

Częstochowa, 19.06.2023

Prof. dr hab. inż. Izabela Majchrzak-Kuceba
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 73
42-200 Częstochowa
e-mail: izabela.majchrzak-kuceba@pcz.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Darii Katli

pt.: „Research on the potential of electrolysis and gasification of solid fuels for the production of synthetic natural gas in a polygeneration system”

„Badanie potencjału procesów elektrolizy i zgazowania paliw stałych do produkcji syntetycznego gazu ziemnego w układzie poligeneracyjnym”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest pismo RIE-BD.512.35.2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki, prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina z dnia 12.05.2023 roku.

2. Przedmiot, zawartość i układ rozprawy doktorskiej

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Darii Katli pt.: „Badanie potencjału procesów elektrolizy i zgazowania paliw stałych do produkcji syntetycznego gazu ziemnego w układzie poligeneracyjnym”. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Anna Skorek-Osikowska, a promotorem pomocniczym dr inż. Michał Jurczyk.

Rozprawa obejmuje badania eksperymentalne procesu metanizacji oraz analizę techniczno-ekonomiczną różnych konfiguracji układu produkcji syntetycznego gazu ziemnego i liczy wraz z bibliografią, streszczeniami i załącznikami 164 strony. Praca składa się z 8 rozdziałów oraz spisu rysunków, tabel, akronimów, bibliografii, abstraktów w języku polskim i angielskim. Dodatkowo rozprawa zawiera 3 załączniki: materiały uzupełniające do rysunków: 4.5, 4.6 oraz 5.10. Rozprawa doktorska zawiera 111 odpowiednio dobranych pozycji bibliograficznych w tym 6 publikacji Doktorantki: 4 publikacje w czasopiśmie Energy, 1 publikacja w czasopiśmie Fuel oraz 1 publikacja w materiałach konferencyjnych.

Podkreślić należy bardzo staranną oprawę graficzną rozprawy, którą stanowią liczne rysunki i wykresy. Rozprawa przygotowana jest w języku angielskim. Układ rozprawy doktorskiej jest logiczny i spójny.

Rozdział 1 rozprawy doktorskiej *Wprowadzenie* pełni funkcję wstępu do tematyki podjętej w pracy.

W rozdziale 2 *Motywacja i zakres pracy*, Doktorantka zawarła motywację, które skłoniły Ją do realizacji pracy oraz przedstawiła główny cel pracy i jej zakres. Doktorantka zwróciła uwagę na potrzebę rozwoju technologii magazynowania energii w związku ze stale rosnącym udziałem energii elektrycznej wytwarzanej z OZE i koniecznością bilansowania takiego źródła energii dla stabilnej pracy sieci elektroenergetycznej. Doktorantka wskazała

przy tym na znaczny potencjał zastosowania technologii *Power to SNG* (PtSNG) w procesie magazynowania nadwyżek energii m.in. ze względu na produkcję paliwa, które w przeciwieństwie do czystego wodoru ma większe możliwości wykorzystania w obecnym systemie energetycznym, może być łatwo transportowane obecnymi sieciami przesyłowymi i jest znacznie prostsze w magazynowaniu.

Rozdział 3 *Technologia Power to Synthetic Natural Gas* zawiera charakterystykę całego układu produkcji syntetycznego gazu ziemnego. W rozdziale tym scharakteryzowane zostały: proces elektrolizy wody, magazynowania otrzymanego wodoru oraz proces metanizacji wraz z przeglądem dostępnych reaktorów i technologii. Rozdział zawiera także charakterystykę syngazu otrzymanego w procesie gazyfikacji biomasy jako wejściowego źródła węgla do procesu metanizacji. Istotnym elementem rozdziału jest charakterystyka wydajności i kosztów dostępnych instalacji *Power to SNG* (PtSNG) oraz przegląd pilotowych projektów i istniejących zakładów metanizacji -produkujących SNG w oparciu o syngaz z procesu gazyfikacji biomasy.

W rozdziale 4 *Stanowisko laboratoryjne generatora metanu na Politechnice Śląskiej* Doktorantka scharakteryzowała i przedstawiła parametry laboratoryjnego reaktora metanizacji wykorzystywanego w przedstawionych w pracy badaniach a zaprojektowanego przez naukowców Politechniki Śląskiej. Główną ideą przy projektowaniu tej instalacji było opracowanie reaktora, który będzie jednocześnie efektywny, prosty i tani. Celem badań eksperymentalnych, których wyniki zawarto w rozdziale była ocena wpływu głównych parametrów procesu na efektywność produkcji metanu. W rozdziale przedstawiono wyniki z jednej z przeprowadzonych kampanii pomiarowych. Badania eksperymentalne prowadzone były w dwóch etapach (przed i po modernizacji). Rozdział zakończony jest dyskusją wyników.

W kolejnym 5 rozdziale pracy *Wstępna analiza termodynamiczna systemów produkcji SNG* Doktorantka przedstawiła metodologię i założenia przyjęte do modelowania procesu metanizacji wraz z uzyskanymi z modelowania wynikami i dyskusją oraz przedstawiła metodologię i założenia przyjęte do modelowania systemów produkcji SNG opartych na procesach elektrolizy i zgazowania biomasy wraz z uzyskanymi z modelowania wynikami i dyskusją.

Rozdział 6 *Charakterystyka wybranych systemów produkcji SNG* zawiera ocenę działania trzech wybranych systemów produkcji syntetycznego gazu ziemnego integrujących procesy zgazowania biomasy i metanizacji gazu syntezowego. Doktorantka przyjęła następujące konfiguracje w trzech analizowanych przypadkach: (przypadek 1) bezpośrednie zgazowanie biomasy tlenem (CFB) oraz metanizacja gazu syntezowego wodorem pochodzącym z elektrolizy, (przypadek 2) pośrednie zgazowanie biomasy (DFB) oraz metanizacja gazu syntezowego wodorem pochodzącym z elektrolizy, (przypadek 3) pośrednie zgazowanie biomasy (DFB) oraz metanizacja gazu syntezowego i separacja CO₂ ze względu na wymagany wysoki udział metanu w produkcie końcowym w celu zatłaczania SNG do sieci. Ocena przedstawiona w rozdziale obejmuje analizą termodynamiczną oraz analizą ekonomiczną.

Rozdział 7 *Potencjalny rynek syntetycznego gazu ziemnego* to bardzo istotny rozdział z punktu widzenia zarekomendowania wykorzystania otrzymanych w pracy wyników w praktyce. Doktorantka wykorzystując dane z przeprowadzonych w rozdziale 6 analiz termodynamicznych i ekonomicznych dla wybranych systemów produkcji syntetycznego gazu ziemnego opisała potencjalne możliwości rynkowe dla produkcji SNG.

Ostatni 8 rozdział pracy stanowi jej *Podsumowanie i wnioski* uwzględniające najistotniejsze wnioski z wykonanych badań, symulacji oraz obliczeń.

Zastosowane piśmiennictwo w ramach rozprawy doktorskiej i jej całościowa strona edytorska jest na wysokim poziomie.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1 Ocena doboru tematu i postawionego celu pracy

Istotną kwestią do rozwiązania w związku z inwestycjami w odnawialne źródła energii jest ich niestabilność z przejściowymi nadwyżkami produkcji energii elektrycznej. Kluczowym wyzwaniem jest opracowanie innowacyjnych rozwiązań w zakresie długoterminowego magazynowania energii z OZE. Jedną z perspektywicznych technologii wielkoskalowego magazynowania energii w sposób długoterminowy są układy *Power to Gas* (PtG lub P2G) w których następuje transformacja energii elektrycznej do postaci syntetycznego paliwa gazowego. Choć aktualnie z uwagi na wysoki koszt instalacje tego typu nie są stosowane komercyjnie na szeroką skalę to wraz ze spadkiem cen instalacji PtG i rozwojem energetyki odnawialnej rozwiązanie to może się okazać kluczowym elementem systemu energetycznego, zapobiegającym wahaniom podaży energii elektrycznej. Instalacje do wytwarzania syntetycznego gazu ziemnego są szczególną klasą układów PtG, w których elektrolizer współpracuje z reaktorem metanizacji. Główną zaletą systemów produkcji SNG jest produkcja paliwa, które w przeciwieństwie do czystego wodoru ma szeroki potencjał wykorzystania w obecnych systemach energetycznych, może być łatwo transportowane przez obecne sieci przesyłowe oraz jest znacznie prostsze w przechowywaniu.

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.

Badane w ramach niniejszej rozprawy różne konfiguracje proponowanych układów *Power to SNG* wpisują się w kierunek badań nad nowymi systemami magazynowania energii. Niezmiernie cenne są takie prace eksperymentalne i modelowe jak te zaproponowane przez Doktorantkę w niniejszej rozprawie gdyż dostarczają one wielu unikatowych i cennych danych możliwych do wykorzystania w zastosowaniach aplikacyjnych badanych układów.

Doktorantka postawiła sobie w rozdziale 2 *Motywacja i zakres pracy* ambitny, główny cel do rozwiązania – *zbadać możliwości wykorzystania procesu elektrolizy i zgazowania tlenowego paliw stałych do produkcji syntetycznego gazu ziemnego metodą metanizacji w układzie poligeneracyjnym*. - na drodze rozważań teoretycznych, badań eksperymentalnych, modelowych oraz analiz ekonomicznych.

Główny cel rozprawy wymagał realizacji kilku celów szczegółowych. W obrębie części eksperymentalnej celami szczegółowymi pracy były: (1) rozwój stanowiska laboratoryjnego reaktora metanizacji oraz (2) analiza eksperymentalna wpływu wybranych parametrów na przebieg procesu metanizacji wraz z oceną wskaźników termodynamicznych procesu. W zakresie analizy techniczno-ekonomicznej różnych konfiguracji układu produkcji SNG celami szczegółowymi były: (1) opracowanie modeli matematycznych poszczególnych procesów układu produkcji SNG, głównie: instalacji zgazowania biomasy oraz instalacji metanizacji, (2) szczegółowa analiza termodynamiczna poszczególnych procesów całego układu produkcji SNG, (3) integracja poszczególnych procesów układu produkcji SNG w oparciu o procesy elektrolizy i zgazowania, (4) określenie strumieni substancji i energii wytwarzanych i wykorzystywanych w systemie produkcji SNG (wodór, tlen, woda/para, tlenek węgla, dwutlenek węgla, strumień ciepła itp.) oraz ich potencjału dla poprawy efektywności całego procesu, (5) ocena konieczności zastosowania reaktora konwersji Shift oraz układów separacji do poprawy właściwości wytwarzanego SNG, (6) analiza techniczno-ekonomiczna wybranych układów produkcji SNG.

Zarówno cel główny jak i cele szczegółowe pracy osadzone są bardzo dobrze w aktualnej problematyce naukowej odnośnie rozwoju metod magazynowania energii takich jak technologie *Power to SNG*. Podjęty przez Doktorantkę temat rozprawy oraz sformułowane cele

są zasadne z naukowego i praktycznego punktu widzenia oraz pozwalają zakwalifikować rozprawę do dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Dla realizacji głównego celu rozprawy Doktorantka pozyskała eksperymentalne dane z laboratoryjnej instalacji metanizacji oraz przeprowadziła ich analizę w celu oceny wpływu głównych parametrów procesu na efektywność produkcji metanu. Doktorantka do realizacji celu głównego przeprowadziła także analizę techniczno-ekonomiczną różnych konfiguracji układu produkcji SNG.

Na podkreślenie zasługuje widoczne w pracy konsekwentne dążenie Doktorantki do zrealizowania postawionych celów, co świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu tematyki rozprawy i solidnym przygotowaniu Doktorantki zarówno do prowadzenia badań eksperymentalnych jak i modelowania (bardzo dobra znajomość narzędzia zastosowanego w pracy -programu Aspen Plus).

3.2 Ocena wartości naukowej

Po analizie rozprawy za najważniejsze osiągnięcia naukowe Doktorantki uznać można:

- Zaproponowanie kompleksowego, oryginalnego rozwiązania, które umożliwia: (1) wykorzystanie nadwyżek produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych do produkcji wodoru w elektrolizerach do dalszego wykorzystania w produkcji SNG, (2) zastosowanie tlenu jako ubocznego produktu wytwarzania wodoru do procesu tlenowego zgazowania biomasy oraz (3) zastosowanie procesu zgazowania biomasy w celu wytworzenia gazu zawierającego tlenek i dwutlenek węgla do wykorzystania w procesie metanizacji.
- Opracowanie reaktora metanizacji o wysokiej efektywności i prostocie wraz ze stworzeniem bazy unikatowych, eksperymentalnych danych odnośnie wpływu wybranych parametrów na przebieg procesu metanizacji i efektywność produkcji SNG. Podkreśla to wkład Doktorantki w uzyskanie „nowej wiedzy” na temat procesu metanizacji, która może być w przyszłości niezmiernie ważna i użyteczna.
- Opracowanie modeli matematycznych poszczególnych procesów układu produkcji SNG: instalacji zgazowania biomasy oraz instalacji metanizacji (z wykorzystaniem oprogramowania Aspen Plus), szczegółowa analiza termodynamiczna poszczególnych procesów całego układu produkcji SNG oraz integracja poszczególnych procesów układu produkcji SNG w oparciu o procesy elektrolizy i zgazowania,
- Wykonanie analizy techniczno-ekonomicznej zintegrowanego systemu PtSNG dla różnych jego konfiguracji (w zależności od rodzaju technologii zagazowania biomasy i dostępności produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych).
- Ocena parametrów technicznych i ekonomicznych związanych z potencjalną realizacją proponowanego systemu PtSNG w skali komercyjnej.
- Rekomendacje zaproponowanego w rozprawie rozwiązania do stosowania w skali komercyjnej w przyszłości poprzez ocenę kosztów produkcji SNG.

Podsumowując, niniejsza rozprawa wpisuje się w kierunek badań nad nowymi systemami magazynowania energii. Doktorantka w pracy dostarczyła argumentów za wysokim stopniem gotowości do wdrożenia technologii *Power to SNG* z wykorzystaniem procesów elektrolizy i zgazowania biomasy. Technologia ta może przyczynić się do produkcji syntetycznego gazu ziemnego, który w przyszłości może stać się konkurencyjny dla konwencjonalnego gazu ziemnego oraz umożliwić magazynowanie nadmiarowej energii z OZE.

Szczególnie wyróżnić należy bardzo bogaty warsztat badawczy i modelowy Doktorantki oraz wysoki poziom wiedzy w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Doktorantka wyróżniła się także umiejętnością planowania i samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wiedzę Doktorantki, w tym znajomość wielu zagadnień procesowych, potwierdzają także badania przeprowadzone na laboratoryjnym reaktorze metanizacji.

Doktorantka wykazała się także wyjątkowo precyzyjną i bardzo wnikliwą interpretacją uzyskanych wyników badań. Podkreślić należy bardzo skrupulatne zestawienie uzyskanych wyników badawczych. Świadczy to o bardzo dużej dojrzałości naukowej Doktorantki, umiejętności selekcji danych i ich przygotowania. Zawarte w rozprawie odwołania do opublikowanych prac Doktorantki potwierdzają wyróżniającą się aktywność w prowadzeniu i publikowaniu prac badawczych.

Szczególnie podkreślić należy aspekt użyteczny pracy. Wkład Doktorantki w opracowanie taniego i prostego reaktora metanizacji to przykład działań podejmowanych w kierunku praktycznego wykorzystania wyników niniejszej rozprawy doktorskiej. Doktorantka na podstawie zebranych przed siebie własnych doświadczeń zarówno podczas badań na laboratoryjnej instalacji metanizacji jak i badań modelowych i analiz techniczno-ekonomicznych przedstawiła pragmatyczne podejście do zagadnienia, opisując potencjalne możliwości rynkowe dla produkcji SNG, co jest kluczowe w kontekście oceny możliwości wykorzystywania zaproponowanego rozwiązania w praktyce. Analizy wykonane przez Doktorantkę wykazały, że produkcja SNG może osiągnąć dużą wydajność i być konkurencyjna do produkcji gazu naturalnego a koszty produkcji SNG i magazynowania energii mają szanse być niższe w przyszłości.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

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

- 1) W moim przekonaniu i z korzyścią dla pracy, przegląd literatury (rozdział 3 *Power to Synthetic Natural Gas*) powinien poprzedzać uzasadnienie wyboru tematu pracy oraz stanowić punkt wyjścia do określenia celu i tezy pracy oraz jej zakresu (rozdział 2 *Motywacja i zakres pracy*). Pomocne w tej kwestii byłoby także uzupełnienie tego rozdziału o podrozdział podsumowujący krytyczny przegląd literatury. Byłoby to także przydatne do wskazania potrzeby wykonania badań i analiz zaproponowanych w pracy w kontekście już znanych rozwiązań.
- 2) W rozdziale 2 rozprawy (*Motywacja i zakres pracy*) Doktorantka podaje główny cel pracy, cele szczegółowe oraz zakres wykonanych prac. Wątpliwości budzi brak tezy pracy, której postawienie niewątpliwie byłoby istotne dla pracy a do której udowodnienia posłużyłyby zawarte w pracy badania eksperymentalne, modelowe oraz analizy techniczno-ekonomiczne.
- 3) W pracy wskazane byłoby określenie, które spośród bardzo szerokiego spektrum badań przeprowadzonych i opisanych w pracy Doktorantka przeprowadziła samodzielnie? Z korzyścią dla Doktorantki byłoby uwypuklenie swoich indywidualnych osiągnięć na tle innych członków zespołu w odniesieniu głównie do obszaru badań związanych z reaktorem metanizacji.
- 4) Doktorantka w rozprawie nie uwypukla na czym polega oryginalność rozwiązania opisanego w pracy i czym różni się ono od innych znanych i proponowanych rozwiązań? Proszę o komentarz.

- 5) Korzystne dla pracy byłoby wyjaśnienie: (1) powodów skupienia się w części eksperymentalnej (Rozdział 4) na jednym etapie systemu PtSNG tzn. etapie metanizacji wobec rozpatrywania w części modelowej całego łańcucha systemu PtSNG (Rozdział 5); (2) powodów i kierunku modernizacji reaktora; (3) powodów doboru i zmiany katalizatora przed i po modernizacji reaktora. Proszę o komentarz.
- 6) Proszę o wyjaśnienie wyboru przez Doktorantkę tlenowego zgazowania biomasy do uzyskania „carbon feedstocks” niezbędnego do procesu metanizacji - produkcji SNG?
- 7) Proszę o komentarz odnośnie wyboru parametrów do modelowania reaktora metanizacji, oraz powiązania rezultatów modelowania reaktora metanizacji z wynikami eksperymentalnych badań metanizacji w Rozdziale 4.
- 8) Z korzyścią dla pracy byłoby podanie informacji odnośnie składu jaki powinien mieć otrzymany SNG aby mógł być transportowany/magazynowany.

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

Drobne usterki odnośnie rysunków:

- Brak jednostek przy wzorach zamieszczonych w pracy.
- Rys. 4.8 -brak komentarza.
- Tabela 5.3 -brak wyjaśnienia oznaczeń.
- Tabele 4.3 i 4.4 byłyby także korzystne dla pierwszego typu reaktora (przed modernizacją).
- Tabela 4.5 przedstawia różnice między reaktorem przed i po modernizacji. Korzystne dla pracy byłoby także zestawienie wyników badań dla reaktora przed i po modernizacji.
- Tabela 5.8 -brak źródła.
- Tabela 5.6 - dobrze byłoby wskazać czy chodzi o wydajność całego procesu PtSNG czy procesu metanizacji.

5. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska mgr Darii Katli rozwiązuje postawione oryginalne zadanie naukowe dotyczące możliwości wykorzystania procesu elektrolizy i zgazowania tlenowego paliw stałych do produkcji syntetycznego gazu ziemnego metodą metanizacji w układzie poligeneracyjnym.

Doktorantka dzięki zastosowaniu szerokiego spektrum narzędzi i technik badawczych oraz opisów matematycznych pozyskała dane, które przyczynić się mogą do rozwoju technologii *Power to SNG*. Stwierdzam, że cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte. Doktorantka obok odpowiedniej znajomości wiedzy w zakresie objętym tematem wykazała się także umiejętnościami planowania i prowadzenia eksperymentów naukowych. Doktorantka przeprowadziła liczne badania na laboratoryjnej instalacji metanizacji co wymagało bardzo dobrej znajomości technik badawczych i obsługi aparatury badawczej. 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. Szczególnie podkreślić należy bardzo wnikliwą interpretację uzyskanych wyników zarówno eksperymentalnych jak i modelowych. Uwagi krytyczne, które wymienione zostały w punkcie 4 recenzji nie obniżają jej bardzo wysokiej wartości merytorycznej. Uwagi mają charakter dyskusyjny i być może będą pomocne dla Doktorantki w jej dalszej pracy naukowej.

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska jest oryginalna i stanowi istotny i znaczny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Praca może mieć również istotne znaczenie praktyczne a przedstawione w niej analizy mogą stanowić podstawy do rozwoju technologii *Power to SNG* w skali komercyjnej.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j. t. Dz.U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.). Wobec powyższego, stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Darii Katli do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ze względu na wysoki poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej (w tym kompleksowe podejście do zagadnienia obejmujące zarówno eksperyment jak i analizę techniczno-ekonomiczną) oraz jej użyteczny charakter ukierunkowany na przyszły rozwój technologii magazynowania energii stawiam również wniosek o jej wyróżnienie.

Podpisała Izabela Majchrzak-Kucęba