



Prof. dr hab. inż. Jarosław Milewski

Warszawa, 30.06.2023 r.

Politechnika Warszawska

Instytut Techniki Ciepłej im. Bohdana Stefanowskiego

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Zakład Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Darii Katli-Milewskiej pt. „Research on the potential of electrolysis and gasification of solid fuels for the production of synthetic natural gas in polygeneration system”. Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie zlecenia prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka w Politechnice Śląskiej. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Anna Skorek-Osikowska, promotorem pomocniczym dr inż. Michał Jurczyk.

Uzasadnienie tematyki rozprawy

W ostatnich latach w energetyce obserwuje się dynamiczny wzrost zainteresowania i rozwój systemów magazynowania energii, które mają być odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na rozwiązania pozwalające na bilansowanie mocy w systemach energetycznych, dostarczanej w coraz większej ilości z nieprzewidywalnych i niestabilnych źródeł wytwarzania, w tym źródeł solarnych i turbin wiatrowych. Wzrost udziału źródeł odnawialnych energii (OZE) w systemach wytwarzania energii wynika z globalnej polityki klimatyczno-energetycznej ukierunkowanej na przeciwdziałanie zmianom klimatu oraz konieczność dekarbonizacji różnych sektorów gospodarki i transportu (dla osiągnięcia do 2050 r. neutralności klimatycznej).

W celu przystosowania istniejących systemów do rosnącego udziału OZE wskazuje się konieczność wdrożenia na szeroką skalę właśnie systemów magazynowania. W literaturze proponowane są różne rozwiązania magazynów energii elektrycznej dużej pojemności, z których największym zainteresowaniem cieszą się technologie elektrowni szczytowo-

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland



pompowych, magazynowania energii w sprężonym powietrzu oraz instalacje Power to Gas (PtG). Technologia PtG bazuje na konwersji nadmiarowej energii elektrycznej z wykorzystaniem procesu elektrolizy w wodór, który może być wykorzystany np. w czasie szczytów energetycznych, w przemyśle lub też wprowadzany do sieci gazowej gazu ziemnego. Należy jednak podkreślić, że istnieją znaczące ograniczenia odnośnie do możliwości transportu wodoru istniejącą infrastrukturą przesyłową gazu ziemnego. Ponadto wodór, ze względu na bardzo małą gęstość i niską temperaturę punktu krytycznego, należy też do gazów które stosunkowo trudno jest magazynować. Dlatego też proponuje się inne rozwiązanie jego magazynowania poprzez wykorzystanie dodatkowego procesu metanizacji w celu konwersji wodoru do syntetycznego gazu ziemnego SNG.

Jednym ze sposobów dostarczenia tlenków węgla do procesu metanizacji może być zgazowanie paliw stałych w tym zgazowanie biomasy. Ponadto, proces zgazowania umożliwia zagospodarowanie tlenu będącego produktem ubocznym procesu elektrolizy. W tym kontekście produkcja syntetycznego gazu ziemnego (SNG) z wodoru oraz biomasy zalicza się do rozwiązań o dużym potencjale rozwojowym, głównie z uwagi na możliwość uzyskiwania paliwa bazującego na źródłach odnawialnych i posiadającego cechy konwencjonalnego gazu ziemnego. Zagadnienia związane z projektowaniem oraz modelowaniem systemów produkcji syntetycznego gazu ziemnego bazującego na procesach elektrolizy, zgazowania biomasy oraz metanizacji są złożone, ale i niezwykle aktualne i zasadne.

Tematyka doktoratu wpisuje się w aktualny i istotny obszar badań nad produkcją syntetycznego gazu ziemnego, rozwijaną obecnie w wielu wiodących jednostkach naukowych, w tym również w ramach działań Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej.

Biorąc pod uwagę złożoność badawczą podjętego przez Doktorantkę problemu oraz jej potencjalnie wysoką wartość utylitarną wybór tematyki rozprawy należy uznać za w pełni uzasadniony.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa składa się z 8 rozdziałów oraz trzech załączników, zawierających wyniki opracowanych przez Doktorantkę symulacji modeli matematycznych systemów power to gas oraz wyniki eksperymentów przeprowadzonych na stanowisku metanizacji. Praca zawiera również, zamieszczone za zasadniczą częścią rozprawy, streszczenie (w języku polskim i angielskim), wykaz oznaczeń, spis rysunków oraz tabel. Na końcu umieszczono bibliografię zawierającą 111 cytowane w pracy pozycje, w tym 6 pozycji, których Doktorantka jest współautorem. Należy podkreślić, że mgr inż. Daria Katla-Milewska dysponuje już

**Warsaw University
of Technology**

prof. Jarosław Milewski
Institute of Heat Engineering
jaroslaw.milewski@pw.edu.pl
21/25 Nowowiejska Street
00-665 Warsaw
Poland



znaczącym, jak na Doktorantkę, dorobkiem publikacyjnym będąc współautorką wielu wysoko punktowanych artykułów.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do pracy. Doktorantka przybliżyła tu najważniejsze problemy współczesnych systemów energetycznych, w tym konieczność rozwijania systemów magazynowania oraz wytwarzania energii i paliw z odnawialnych źródeł energii. W rozdziale tym Autorka wskazuje układy magazynowania jako istotne elementy systemów energetycznych, w których coraz większa jest dominacja odnawialnych źródeł energii.

Rozdział 2 przedstawia motywację podjęcia działań badawczych w obszarze systemów power to synthetic natural gas (SNG), będących rozwiązaniem pozwalającym na magazynowanie energii w postaci SNG. Autorka opisuje w tym rozdziale również cele i zakres pracy doktorskiej, jakimi były analiza eksperymentalna na stanowisku metanizacji oraz analiza techno-ekonomiczna wybranych systemów power to SNG.

W rozdziale 3 Doktorantka opisuje aktualny stan wiedzy w zakresie technologii power to SNG, omawiając wszystkie procesy składowe zachodzące w ramach danego systemu. W tym rozdziale opisane zostały procesy elektrolizy, magazynowania wodoru, metanizacji oraz zgazowania biomasy (ponieważ w swojej pracy Autorka zakładała wykorzystanie właśnie syngazu generowanego w procesie zgazowania biomasy jako źródła tlenków węgla do procesu metanizacji). W rozdziale tym przedstawione i porównane zostały również parametry charakterystyczne innych instalacji power to SNG bazujących na różnych konfiguracjach systemu. Doktorantka opisała również istniejące projekty i instalacje power to SNG.

Rozdział 4 został poświęcony na opisanie stanowiska metanizacji wykorzystanego do badań w czasie realizacji pracy doktorskiej oraz rezultaty eksperymentu. Badania zostały przeprowadzone dla dwóch konfiguracji systemu generatora metanu (przed i po modernizacji). W rozdziale przedstawione zostały ograniczenia związane z operacją systemu w pierwszej konfiguracji reaktora metanizacji związane głównie z charakterystyką użytego katalizatora niklowego. Instalacja została kolejno zmodernizowana, a sam katalizator zmienione na pelety rutenowe oraz wykonano pomiary dla 9 par strumieni wlotowych wodoru i dwutlenku węgla przy zmieniającym się ciśnieniu w reaktorze.

Rozdział 5 poświęcony jest na opis wstępnych wyników modelowania matematycznego wybranych konfiguracji systemów power to SNG. W swoich kalkulacjach Autorka wykorzystuje oprogramowanie Aspen Plus. We wstępnych symulacjach skupiła się przede wszystkim na opracowaniu różnych modeli procesu metanizacji, analizach wrażliwości różnych zmiennych decyzyjnych procesu oraz badaniu wpływu różnego składu gazu wsadowego na skład produkowanego SNG.

Rozdział 6 przedstawia analizę techno-ekonomiczną trzech wybranych konfiguracji układu power to SNG. Porównano ze sobą przypadki różniące się założoną technologią zgazowania biomasy oraz obecnością lub brakiem generatorów wodoru. Obliczone ceny granicznej sprzedaży SNG otrzymane w wyniku analizy rozważanych systemów porównano z cenami konwencjonalnego gazu ziemnego na przestrzeni lat 2018-2022. Wyniki są o tyle interesujące, że w tych latach dochodziło do wielu zawirowań na rynku gazu ziemnego przez co można zauważyć opłacalność budowy systemów produkcji SNG jako systemów magazynowania energii.

Rozdział 7 stanowi krótki opis potencjalnego rynku syntetycznego gazu ziemnego. Zawarte w nim informacje choć interesujące, wydają się bardzo uproszczone. Brakuje szerszej dyskusji uzyskanych wyników oraz odniesienia do wyników uzyskanych przez innych badaczy.

Ostatni rozdział stanowi zgrabne podsumowanie zrealizowanych prac badawczych. Autorka wskazuje najważniejsze osiągnięcia otrzymane w wyniku analizy eksperymentalnej na stanowisku metanizacji oraz na drodze modelowania matematycznego i stwierdza, że analizowane systemu power to SNG charakteryzują się wysoką sprawnością oraz wykazują potencjał wdrożeniowy jako sposób magazynowania energii.

Podstawowe osiągnięcia badawcze

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

1. Przeprowadzenie głębokich badań literaturowych dotyczących zagadnień metanizacji oraz układów power to SNG.
2. Opracowanie modeli matematycznych dla poszczególnych komponentów proponowanego systemu, głównie: systemu zgazowania biomasy i instalacji metanizacji i ich analiza termodynamiczna.
3. Budowa i przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku metanizacji.
4. Przeprowadzenie walidacji modelu w oparciu o badania eksperymentalne.
5. Integracja procesów jednostkowych w układ power to SNG w oparciu o procesy elektrolizy i zgazowania biomasy, określenie strumieni substancji i energii wytwarzanych i zużywanych w układzie oraz ich potencjału do poprawy efektywności procesu.
6. Szczegółowa analiza techno-ekonomiczna wybranych przypadków systemu power to SNG.



Podstawowe uwagi KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Oprócz niewątpliwie bardzo ciekawych i wartościowych z poznawczego punktu widzenia elementów recenzowana praca zawiera również nieco elementów dyskusyjnych.

1. W rozprawie brak szczegółowych porównań otrzymanych wyników do istniejących już instalacji metanizacji, co stanowiło przeszkodę do wykonania podobnej analizy?
2. Na stanowisku wykorzystywane były gazy wysokiej czystości – jak obecność zanieczyszczeń wpłynęłaby na przebieg procesu? Czy w rzeczywistych procesach konieczne jest tak dokładne oczyszczanie gazów biorących udział w reakcji?
3. W jaki sposób możliwe jest skalowanie procesu metanizacji (względem obecnego reaktora na stanowisku laboratoryjnym)?
4. Reakcja metanizacji jest egzotermiczna – czy nie było problemu z przegrzewaniem się reaktora i w jaki sposób była kontrolowana temperatura w reaktorze?
5. Czy wyniki z przeprowadzonych badań laboratoryjnych posłużyły do walidacji modeli matematycznych i jakie były ograniczenia wykorzystania tych wyników?
6. W modelu zbudowanym w programie Aspen model reaktora składa się z trzech części – jak to się ma w stosunku do badań eksperymentalnych? Dlaczego wybrano taki sposób modelowania?
7. Co jest największą barierą prowadzenia procesu metanizacji na szeroką skalę i jakie mechanizmy mogą pomóc we wdrażaniu tego rodzaju rozwiązań?

Inne uwagi

Praca została wydana w formie książkowej, w formacie B5. Praca jest estetyczna i wygodna dla czytelnika. Napisana jest językiem technicznym. Błędy i niedociągnięcia natury merytorycznej, stanowiące podstawę do dyskusji podczas obrony doktoratu, wskazano w punkcie 4 niniejszej recenzji. Praca, choć od strony graficznej wykonana estetycznie, zawiera różnego typu usterki redakcyjne, błędy językowe i nieścisłości gramatyczne, których trudno uniknąć przy tak obszernej rozprawie. Poprawki zostały przekazane Doktorantce. Tu, ze względów praktycznych, wymieniam tylko niektóre:

1. Tabela 6.11 wydaje się niekompletna, Recenzent uważa, że Autorka pominęła niektóre dane składowe CAPEX i OPEX, które mogłyby się znaleźć w tej tabeli.
2. Tabela 7.1 ucięty wyraz SOEC na końcu drugiego wiersza tabeli.



3. Rysunek 4.1 jest niskiej jakości.
4. Ostatni rozdział rozprawy (8) mógłby zostać rozbity na dwa osobne rozdziały.
5. W liście oznaczeń występują pewne nieścisłości jak brak przecinka po "e.g." brak konsekwencji w tłumaczeniu skrótów, gdzie część zapisana jest z wielkich, a część z małych liter.
6. Numery stron na pustych stronach (16).

Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji należy podkreślić, że odnoszące się do opiniowanej rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na wysoką jej ocenę. Doktorantka w pełni zrealizowała postawione cele. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter przeprowadzonych badań. Tym samym według mojej opinii spełnia wymagania wyrażone w art. 221 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Dlatego popieram wniosek o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. Ze względu na to, iż praca doktorska zawiera zarówno część doświadczalną jak i modelowanie matematyczne analizowanych procesów składam wniosek o jej wyróżnienie.

Jarosław Milewski