

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Jacka Romana

pt. Układy zgazowania odpadów komunalnych w hybrydowych instalacjach odnawialnych źródeł energii

Recenzja wykonana została na zlecenie prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki w Politechnice Poznańskiej. Promotorem pracy doktorskiej jest dr hab. inż. Bartosz Ceran, prof. PP, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Robert Wróblewski.

1. Zasadność podjęcia tematu

Przedłożona rozprawa dotyczy problemu doboru parametrów hybrydowych instalacji energetycznych, w których obok źródeł niesterowalnych (panele fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe) oraz magazynów energii, zastosowano źródło sterowalne w postaci instalacji zgazowania wysokokalorycznych frakcji odpadów komunalnych zintegrowanej z silnikiem tłokowym.

Tematyka doktoratu jest aktualna, co wynika z trendów jakie towarzyszą krajowym procesom transformacyjnym, którymi są: (i) rosnący udział mocy zainstalowanej w niesterowalnych pogodowo-zależnych systemach wykorzystujących odnawialne źródła energii oraz (ii) presji na racjonalne zagospodarowywanie frakcji energetycznych odpadów, jakie powstają w gospodarce komunalnej. W pracy trafnie zaakcentowano, że hybrydowa instalacja musi spełniać kryteria graniczne związane z czasem wykorzystania mocy przyłączeniowej oraz udziałem energii przesyłanej do systemu poprzez magazyn, co jest podyktowane obecnie zaimplementowanymi regulacjami.

Doktorant podjął się przeprowadzenia szeregu analiz ukierunkowanych na wielokryterialne optymalizacje podstawowych parametrów technicznych hybrydowego systemu energetycznego, pracującego zgodnie z dwoma przyjętymi wariantami rynkowymi. Wykorzystał przy tym opracowane narzędzia, a w tym modele przygotowane na potrzeby doktoratu z wykorzystaniem oprogramowania komercyjnego. Na szczególne podkreślenie zasługuje sformułowanie problemu jako zadania decyzyjnego, w którym jednocześnie należy uwzględnić kryteria techniczne, ekonomiczne i środowiskowe oraz ograniczenia prawno-formalne. Autor formułuje tezę wprost, wskazując na zasadność użycia wielokryterialnych



metod podejmowania decyzji przy doborze podstawowych cech technicznych decydujących o skali podsystemów wchodzących w skład systemu hybrydowego.

2. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska składa się z 8 rozdziałów, w tym wstępu oraz dyskusji wyników. Przed zasadniczą częścią pracy znajdują się streszczenia w języku polskim i angielskim oraz lista spisów i symboli. Na końcu pracy zamieszczono spis literatury, obejmujący 154 pozycje (z czego 3 stanowią publikacje autorstwa i współautorstwa Doktoranta), a także załącznik zawierający dodatkowe tabelaryczne zestawienie wyników.

Rozdział 1 rozprawy, stanowiący wprowadzenie, przedstawia ogólne tło i motywację podjęcia tematu. Doktorant przybliży koncepcję hybrydowych instalacji odnawialnych źródeł energii (HIOZE) podkreślając ich rolę w kontekście transformacji energetycznej i obowiązujących uwarunkowań prawnych. Wskazuje tutaj głównie korzystne cechy łączenia źródeł OZE w ramach jednego przyłącza z innymi źródłami energii (tzw. *cable pooling*). Autor w rozdziale omawia zagadnienia towarzyszące planowaniu hybrydowych systemów wytwórczych, podkreślając w nich rolę źródeł pogodowo-zależnych, magazynów energii oraz systemów wykorzystujących biomasę lub odpady komunalne. We wprowadzeniu (sekcja 1.2) Doktorant formułuje jasno tezę rozprawy, która wskazuje, iż dobór wartości kluczowych współczynników określających udziały mocy poszczególnych elementów instalacji hybrydowej jest zadaniem, które można rozwiązać za pomocą wielokryterialnych metod podejmowania decyzji z uwzględnieniem wśród nich kryteriów technicznych, ekonomicznych i środowiskowych. Doktorant wskazuje również cel pracy, którym jest opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na przeprowadzenie wielokryterialnej analizy porównawczej wariantów projektowych instalacji hybrydowej i zbadanie wpływu wag zdefiniowanych kryteriów. Na końcu rozdziału pierwszego zwięźle przedstawiono strukturę dysertacji, dzieląc ją na część teoretyczną (studium literatury i podstawy technologiczne) oraz część badawczą zawierającą opis metody, założenia oraz wyniki własnych analiz Doktoranta.

Rozdział 2 koncentruje się na opisie roli jaką w krajowym systemie odegrać mogą hybrydowe systemy wykorzystujące OZE. Doktorant dla podkreślenia znaczenia roli tego rodzaju systemów odnosi się do polityki UE, wskazując także implementowane na gruncie krajowym regulacje prawne. Na tle formułowanych zobowiązań wskazuje kluczowe dla własnych analiz uwarunkowania, które odnoszą się do udziałów mocy poszczególnych źródeł wchodzących w skład HIOZE, minimalnego udziału energii przekazywanej do systemu z pośrednim wykorzystaniem procesu magazynowania energii oraz minimalnego w roku czasu wykorzystania mocy przyłączeniowej.

W Rozdziale 3 Doktorant prezentuje zagadnienia związane z procesem zgazowania paliw z odpadów, nawiązując do wielu doświadczeń krajowych oraz zagranicznych. Względnie

duża objętość rozdziału wskazuje, iż podsystem wykorzystujący proces zgazowania, wraz z silnikiem tłokowym zasilanym gazem syntezowym, jest kluczowym podsystemem dla analizowanych w doktoracie instalacji hybrydowych. W rozdziale przytoczona jest charakterystyka różnych frakcji wysokoenergetycznych, jakie mogą wchodzić w skład odpadów komunalnych. Doktorant dużo miejsca poświęca opisowi procesu zgazowania oraz klasyfikacji technologii. Choć szeroko przedstawione są doświadczenia badawcze, także krajowych instytucji badawczych, to niestety Doktorant nie nawiązuje do badań Instytutu Technologii Paliw i Energii (wcześniej Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla), który posiada bogate doświadczenie w zakresie prowadzenia analitycznych i eksperymentalnych badań procesów termicznej przeróbki biomasy oraz frakcji odpadów, szeroko udokumentowane w literaturze przedmiotu. W rozdziale prezentowane są zestawienia wielkości charakterystycznych dla procesu zgazowania. Przykładem może być Rys. 3, przedstawiający składy i kaloryczności różnych gazów syntezowych, uzyskanych w wyniku zgazowania odpadów, zaczerpnięte z literatury przedmiotu. Doktorant zestawia te wielkości informując czytelnika o rodzajach odpadów oraz rodzaju generatora zgazowania, jakim jest generator ze złożem stałym. Wyciąganie wniosków w oparciu o przedstawione charakterystyki nie ma większego sensu, bez znajomości innych parametrów prowadzenia procesów zgazowania, takich jak np. temperatura, ciśnienie, zawartość wilgoci w odpadach.

W Rozdziale 4 Doktorant prezentuje metodykę prowadzenia analiz własnych. W pierwszej kolejności Doktorant przedstawia strukturę prowadzenia prac analitycznych (punkt 4.1). Analizę podzielono na sześć etapów, począwszy od zdefiniowania zakresu rozpatrywanych parametrów układu, poprzez przeprowadzenie symulacji pracy instalacji dla wszystkich kombinacji tych parametrów, aż do wyznaczenia wskaźnika syntetycznej oceny wielokryterialnej i utworzenia rankingu rozwiązań. Tak przedstawiona procedura badawcza świadczy o systematycznym podejściu Doktoranta do postawionego problemu. W sekcji 4.2 zdefiniowano dwie analizowane koncepcje systemu hybrydowego. W wariacie A (HIOZE A) zakłada się, iż całość wyprodukowanej energii trafia do sieci elektroenergetycznej. W wariacie B (HIOZE B) energia elektryczna trafia również do odbiorcy przemysłowego przyłączonego do systemu linią bezpośrednią. W każdym przypadku instalacja hybrydowa składa się z farmy fotowoltaicznej, turbin wiatrowych, baterijnego magazynu energii oraz instalacji zgazowania wysokokalorycznej frakcji odpadów komunalnych sprzężonej z silnikiem tłokowym na gaz syntezowy. Autor pracy zadbał, aby przyjęty model uwzględniał wymagania prawne stawiane instalacjom HIOZE (m.in. minimalny roczny czas wykorzystania mocy przyłącza, tj. 5256 h oraz co najmniej 5%-owy udział energii przekazywanej do sieci poprzez magazyn energii), dzięki czemu wyniki analiz od razu weryfikują, czy dany wariant spełnia kryteria formalne. W dalszych częściach rozdziału (punkty 4.4 i 4.5) Doktorant opisuje opracowane na potrzeby realizacji doktoratu modele obliczeniowe. W przypadku prezentowania modelu silnika tłokowego, który został

opracowany z wykorzystaniem popularnego programu Ebsilon Professional, Doktorant prezentuje wyniki przeprowadzonej walidacji modelu, na potrzeby której wykorzystał dane literaturowe. W sekcjach 4.6-4.8 w pracy zaprezentowane zostały definicje wskaźników jakie Doktorant wykorzystuje odpowiednio w ocenie aspektów technicznych, ekonomicznych oraz środowiskowych. Niezrozumiałe jest, dlaczego Doktorant nie podjął się analiz przypadków, w których produktem handlowym, poza energią elektryczną, jest także ciepło. W przypadku systemów bazujących na procesie zgazowania uzyskiwane są względnie duże (np. w stosunku do uzyskiwanej mocy elektrycznej) strumienie ciepła o wysokim parametrze temperaturowym. W warunkach krajowych trudno sobie wyobrazić rynkową implementację systemów analizowanych przez Doktoranta, bez użytkowego zagospodarowywania ciepła uzyskiwanego w procesie chłodzenia gazu syntezowego przed jego oczyszczaniem, jak również ciepła uzyskiwanego na drodze chłodzenia silnika oraz wychładzania spalinowych gazów wylotowych. Na krytyczną uwagę zasługuje również sposób określania nakładów inwestycyjnych na poszczególne elementy instalacji hybrydowej. Doktorant wykorzystuje tutaj estymacje zaczerpnięte z literatury, w których stosowane są wielkości charakterystyczne dla poszczególnych podsystemów. Choć metoda ta jest szeroko stosowana i nie budzi zastrzeżeń, to niestety Doktorant bezkrytycznie podchodzi do faktu, iż funkcje opisujące koszty inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne są zaczerpnięte przez niego z opracowań publikowanych już pewien czas temu, a mianowicie w latach od roku 2005 do roku 2023. Niestety Doktorant nie przeprowadził szacunkowej aktualizacji kosztów, np. wykorzystując metodę opartą o zastosowanie wskaźnika CEPCI (ang. *Chemical Engineering Plant Cost Index*). Ponadto Doktorant w zależnościach (23)-(25) dwukrotnie dyskontuje koszty eksploatacyjne. Pojawia się także pytanie: dlaczego Doktorant nie wykorzystał popularnych wskaźników oceny efektywności ekonomicznej, tj. np. NPV, NPVR, IRR? Dla opracowania rankingu systemów Doktorant zastosował metodę TOPSIS, która została opisana w sekcji 4.9. W tej sekcji zaprezentowano także 42 warianty rozkładu wag dla wybranych przez Doktoranta sześciu wskaźników, tj. dwóch dla każdego z trzech grup kryterialnych (techniczne, ekonomiczne i środowiskowe). Wybór metody oraz zastosowany opis nie budzą zastrzeżeń.

Rozdział 5 oraz Rozdział 6 charakteryzują się taką samą strukturą, przy czym rozdziały odpowiednio prezentują wyniki analiz przeprowadzonych dla wariantów HIOZE A oraz HIOZE B. Doktorant dla poczynionych założeń prowadzi analizy, określając w ich toku zdefiniowane wskaźniki oceny. Obliczenia prowadzi dla różnych wartości mocy silnika, baterijnego magazynu energii oraz podsystemów OZE. W pierwszej kolejności Doktorant określa, dla których konfiguracji możliwe jest spełnienie wszystkich sformułowanych kryteriów ustawowych. Tylko warianty spełniające te kryteria następnie poddawane są dalszej ocenie. Dla nich Doktorant określa wartości wskaźników efektywnościowych systemu: energetycznych, ekonomicznych oraz środowiskowych. W kończących rozdziały sekcjach

Doktorant prezentuje wyniki analiz wielokryterialnych, mające kluczowe znaczenie dla pracy. Te sekcje stanowią syntezę rezultatów uzyskanych dla obu wariantów HIOZE (A i B) w kontekście zdefiniowanych kryteriów oceny. Wykorzystując obliczone wcześniej wskaźniki energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe, Autor dokonuje oceny wielokryterialnej kolejnych wariantów, wyznaczając dla każdego z nich wartości wspólnego miernika oceny i porządkując rozwiązania od najbardziej do najmniej preferowanego. Na podstawie utworzonych rankingów Doktorant identyfikuje konfiguracje układu uznane za najkorzystniejsze. Co istotne, Doktorant bardzo szeroko zbadał wpływ założeń dotyczących wag poszczególnych kryteriów na wyniki oceny. Kompleksowe podejście zasługuje na uznanie, gdyż pozwoliło ocenić wrażliwość wybranych rozwiązań na zmianę priorytetów inwestora. Wyniki analizy wielokryterialnej wskazują między innymi, że w przypadku wariantu równych wag kryteriów najlepsze rozwiązanie dla obu scenariuszy obejmuje umiarkowaną moc źródeł niesterowalnych oraz zrównoważone udziały mocy silnika i magazynu. Konfiguracja taka zapewnia wysokie wykorzystanie dostępnych odpadów przy jednoczesnym spełnieniu wymagań prawnych i zachowaniu rozsądnych kosztów. Doktorant w przejrzysty sposób omawia otrzymane rankingi rozwiązań dla wybranych wariantów wag, ilustrując jak różne preferencje wpływają na wybór optymalnej konfiguracji. W opinii recenzenta przedmiotowe rozdziały zostały opracowane bardzo rzetelnie i stanowią kulminację części badawczej pracy. Należy podkreślić, że Autor nie poprzestał na pojedynczym przypadku optymalizacyjnym, lecz zbadał cały wachlarz możliwości, co znacząco zwiększa wartość poznawczą uzyskanych wyników. Jedyną trudność może stanowić dla czytelnika objętość i złożoność zaprezentowanych danych – śledzenie 42 scenariuszy wag wymaga dużej uwagi. Rozdział 5 oraz Rozdział 6 dowodzą, że Doktorant w pełni zrealizował zamierzony cel pracy, tj. wyznaczył optymalne parametry układu hybrydowego z wykorzystaniem metod wielokryterialnych, uwzględniając różne możliwe priorytety oceny. Sposób prezentacji rezultatów jest czytelny. Doktorant posługuje się wykresami i tabelarycznymi zestawieniami, które ułatwiają śledzenie wpływu poszczególnych parametrów na miarodajne wskaźniki oceny. Rozdziały 5 i 6 dowodzą, że umiejętności Doktoranta w przeprowadzeniu złożonych symulacji są na wysokim poziomie. Wydaje się, że korzystniej dla struktury pracy byłoby zintegrowanie obu rozdziałów w jeden. Stosowanie powtórzeń opisów poświęconych metodyce jest nieco męczące dla czytelnika i niepotrzebnie zwiększa objętość dysertacji.

W Rozdziale 7 Doktorant podejmuje próbę podsumowania uzyskanych rezultatów. Jest to w dużej mierze kontynuacja omawiania wyników, co ma już miejsce w finale Rozdziałów 5 i 6. W tym rozdziale w większym stopniu pojawia się próba porównania wariantów A i B.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie pracy. Tutaj Doktorant zestawia najważniejsze wnioski odwołując się do kluczowych rezultatów swoich analiz. Wnioski sformułowane są w sposób należyty i dobrze korespondują z treścią rozdziałów o charakterze badawczym.

Podsumowując charakterystykę pracy, należy stwierdzić, że część teoretyczna dysertacji szczegółowo przedstawia kontekst badań, natomiast część badawcza dostarcza obfitego materiału wynikowego podporządkowanego realizacji dobrze sformułowanego celu naukowego. W ocenie recenzenta obie te części zostały połączone w spójną całość. Rozległa analiza literatury i opisy technologii stworzyły solidne fundamenty, na których Doktorant zbudował własne modele i przeprowadził symulacje. Objętościowo część teoretyczna oraz część badawcza są dobrze zrównoważone.

3. Uwagi o charakterze redakcyjnym

Rozprawa została przygotowana w formie monografii i łącznie zajmuje objętość 193 strony (wraz z załącznikiem). Praca jest napisana językiem technicznym. Błędy natury merytorycznej, stanowiące podstawę do dyskusji podczas obrony doktoratu, wskazano w punkcie 2 recenzji. Praca zawiera niewielką liczbę błędów natury gramatycznej oraz stylistycznej. Pojawiają się też błędy natury redakcyjnej (np. podwójna numeracja sekcji 1.2, niewłaściwe stosowanie zapisów wzorów). Z redakcyjnych kwestii dodatkowo wskazać należy na brak konsekwencji w stosowaniu oznaczeń. Wskazane błędy mają charakter kosmetyczny i nie wpływają na wysoką ocenę merytoryczną.

4. Podsumowanie

Rozprawa stanowi spójne opracowanie naukowe. Doktorant osiągnął postawiony przed sobą ambitny cel, potwierdzając zasadność stosowania analiz wielokryterialnych dla doboru parametrów pracy instalacji hybrydowych wykorzystujących OZE. Doktorant wykazał się umiejętnością zbudowania i zastosowania modelu matematycznego, poprawnego doboru wskaźników oceny oraz krytycznej interpretacji wyników (w tym wskazania ograniczeń wynikających z przyjętych założeń). Praca ma istotny walor aplikacyjny – dostarcza metodyki umożliwiającej inwestorowi wybór konfiguracji zależnie od preferencji (zysk, parametry energetyczne, środowisko), przy jednoczesnym respektowaniu ograniczeń formalnych.

Podsumowując, praca Pana Jacka Romana, pt. *Układy zgazowania odpadów komunalnych w hybrydowych instalacjach odnawialnych źródeł energii*, spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023, poz. 742). W związku z powyższym stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony. Także wnioskuję o jej wyróżnienie.



Dr hab. inż. Łukasz Bartela, Prof. PŚ
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska