

dr hab. inż. Mariusz Markowski, Prof. PW  
Instytut Inżynierii Mechanicznej  
Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii  
Politechnika Warszawska

Płock, dn. 04.06.2019 r.

## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Grabarczyka

Tytuł rozprawy: *Analiza techniczno-ekonomiczna instalacji do produkcji wodoru metodą dwustopniowej fermentacji wodorowej*

Promotor: *prof. dr hab. inż. Krzysztof Urbaniec*

#### 1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Grabarczyka dotyczy analizy techniczno-ekonomicznej instalacji do produkcji wodoru z biomasy metodą niskotemperaturową. Praca bazuje częściowo na wynikach badań, uzyskanych w projekcie HYVOLUTION p.t. „Non-thermal production of pure hydrogen from biomass”, realizowanym w ramach 7 programu ramowego UE w latach 2006-2010. Jako uczestnik rozważanego projektu, Doktorant w swojej pracy wykorzystał wybrane schematy wytwórni wodoru oraz parametry eksploatacyjne procesu (ciśnienie, temperatura), opracowane w projekcie HYVOLUTION. Stanowiły one dane wyjściowe do analizy techniczno-ekonomicznej instalacji.

Doktorant wykonał analizę techniczno-ekonomiczną instalacji do produkcji wodoru z melasy buraczanej dla wariantu zasilania wytwórni wodoru w energię elektryczną i ciepło, współpracującej z kotłem parowym. Przyjęto warunek, że ciepło do procesu jest wytwarzane w całości przez wytwórnię tylko dla potrzeb własnych oraz, że występuje zewnętrzne jej zasilanie w energię elektryczną.

Przed przystąpieniem do analizy techniczno-ekonomicznej, Doktorant scharakteryzował metody otrzymywania wodoru z biomasy. Następnie omówił surowce mające zastosowanie w ciemnej fermentacji wodorowej. W dalszej kolejności Doktorant scharakteryzował warunki zastosowania fermentacji wodorowej w wybranych regionach UE, w tym w Polsce, w oparciu o uprawę buraka cukrowego, gdzie typowanym surowcem do fermentacji jest melasa buraczana.

Przed przystąpieniem do obliczeń techniczno-ekonomicznych instalacji, Doktorant omówił szczegółowo proces produkcji wodoru z biomasy metodą niskotemperaturową, opracowany w ramach projektu HYVOLUTION. Przedstawił schematy procesu realizowanego w trzech

głównych układach: fermentacji termofilnej (fermentacji ciemnej), fotofermentacji, osuszania gazu wodorowego oraz oczyszczania gazu wodorowego metodą adsorpcji zmiennociśnieniowej VSA. Podał wartości ważniejszych parametrów procesu. Podane informacje stanowiły dane wyjściowe do symulacji numerycznych wytwórni wodoru.

Przed przystąpieniem do obliczeń numerycznych Doktorant stworzył matematyczne opisy powyższych układów wykorzystując równania bilansowe masy. Sformułowane równania dotyczyły dwóch trybów pracy wytwórni wodoru:

- Tryb dwustopniowy: eksploatacji podlegają następujące układy: fermentacji termofilnej, fotofermentacji, osuszania gazu wodorowego oraz oczyszczania gazu wodorowego,
- Tryb jednostopniowy: eksploatacji podlegają następujące układy: fermentacji termofilnej, osuszania gazu wodorowego oraz oczyszczania gazu wodorowego,

Doktorant zaproponował uproszczone modele wymiarowania aparatów i urządzeń dla wytwórni wodoru w celu oszacowania cen ich zakupu. W ustalaniu cen zakupu aparatów i urządzeń wykorzystano metodę Garretta, gdzie do oszacowania kosztu zakupu aparatów i urządzeń wykorzystuje się znajomość następujących wielkości:

- objętość - aparaty zbiornikowe (zbiornik melasu, zbiornik wody uzupełniającej, bioreaktor fermentacji termofilnej, skraplacz bezprzeponowy, adsorber),
- powierzchnia wymiany ciepła – płytowe lub płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła (chłodnice gazu wodorowego, wymienniki WC1-WC3),
- wydajność produkowanej pary wodnej – kocioł,
- powierzchnia filtracji – filtr świecowy,
- moc do napędu maszyn przepływowych – pompa próżniowa, dmuchawa, pompy cieczy P1-P4, pompa PWCH.

Całkowite nakłady inwestycyjne wytwórni wodoru oszacowano na podstawie znajomości całkowitej ceny zakupu aparatów i urządzeń wytwórni wodoru, wykorzystując współczynnik Langa.

W analizie ekonomicznej, oprócz całkowitych kosztów inwestycyjnych, uwzględniono koszty eksploatacyjne, takie jak: koszt surowca, koszty pracownicze, koszty eksploatacyjne (wytworzenia i zużycia pary grzewczej, zużycia energii elektrycznej, zużycia wody chłodzącej i chemikaliów, środowiskowe związane z emisją CO<sub>2</sub>, napraw i konserwacji instalacji, zużycia materiałów eksploatacyjnych).

Wykorzystując zaproponowany model matematyczny wytwórni wodoru, Doktorant przeprowadził studium parametryczne funkcjonowania instalacji. Polegało to na zbadaniu wpływu wybranych parametrów procesowych, takich jak: stężenie substratów, produktywność czy współczynnik konwersji, na główne wskaźniki techniczno-ekonomiczne funkcjonowania instalacji, tj. wydajność energetyczną, zapotrzebowanie na surowiec, zapotrzebowanie na wodę uzupełniającą oraz koszty produkcji wodoru.

Na zakończenie, w pracy wykonano analizę wrażliwości, związaną z niepewnością uzyskiwanych wyników obliczeń, dla przyjętych przez Autora parametrów układu. Dla parametrów procesu, takich jak: stężenie substratów, produktywność czy współczynnik konwersji, zbadano wrażliwość wydajności energetycznej instalacji oraz kosztów produkcji wodoru. Natomiast dla pozostałych parametrów, takich jak: roczny okres funkcjonowania instalacji, dobowy okres eksploatacji instalacji w trybie dwustopniowym, współczynnik Langa, ceny zakupu: melasu, gazu ziemnego, chemikaliów, energii elektrycznej itd., zbadano wrażliwość kosztów produkcji wodoru.

Zaproponowana przez Doktoranta metoda modelowania matematycznego układu do produkcji wodoru z melasy buraczanej stanowi oryginalne osiągnięcie Autora. Uzyskane wyniki obliczeń pozwoliły Doktorantowi dokonać oceny opłacalności budowy wytwórni wodoru zasilanej parą wodną - produkowaną w kotle gazowym oraz energią elektryczną - pobieraną z zewnętrznej sieci elektrycznej, gdzie surowcem jest melasa buraczana.

Autor słusznie uznał, że przedstawiona w pracy technologia produkcji wodoru wymaga dalszych badań, co zostało zasygnalizowane w prawidłowo sformułowanych wnioskach i uwagach końcowych. Chodzi tu głównie o dalsze badania układu fotofermentacji wodorowej, gdzie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne wynoszą odpowiednio dla wariantu bazowego 87,2% i 68,2%, natomiast dla wariantu optymistycznego 66,7% i 51,6% kosztów całkowitych. Sformułowana przez Autora hipoteza, stwierdzająca możliwość opracowania modelu matematycznego, którym można badać wpływ parametrów procesu na wskaźniki techniczno-ekonomiczne instalacji wodorowej, została pozytywnie zweryfikowana w pracy.

## **2. Uwagi i pytania do pracy**

- W rozdziale 3.1.3 podano maksymalne wartości współczynników konwersji, równe 0,869. Ma to miejsce w sytuacji wyidealizowanej, której nie należy oczekiwać w rzeczywistym układzie, nawet o udoskonalonej w przyszłości technologii. W wariacie optymistycznym (Tab. 5.1), przyjęty współczynnik konwersji dla fotofermentacji wynosi 0,75. Przyjęta w tym przypadku wartość współczynnika

wydaje się realistyczna, tzn. możliwa do uzyskania w przyszłości, w tego typu układach.

W przypadku fermentacji termofilnej, przyjęty do obliczeń współczynnik konwersji wynosi 0,869. Można wnioskować, że w tym przypadku wartość współczynnika jest zawyżona.

- W pracy przedstawiono w sposób szczegółowy matematyczne opisy instalacji z wykorzystaniem równań bilansu masy, natomiast brakuje szczegółowych opisów opartych na bilansie energii. Wprawdzie w rozdziale 3.6 przedstawiono fragmenty równań bilansowych energii. Wydaje się jednak, że podane w rozważanym rozdziale równania nie przedstawiają pełnego opisu energetycznego instalacji.
- Do oceny efektywności energetycznej procesu użyto wskaźnika zwanego wydajnością energetyczną, opisanego r. (3.202). Następnie Doktorant stwierdził, że proces można uznać za efektywny, jeśli wydajność energetyczna instalacji osiąga wartość powyżej 1. Czy to oznacza, że dla wydajności energetycznej wynoszącej 1,03 proces jest efektywny energetycznie ?
- Zaproponowany w pracy model matematyczny oszacowania nakładów inwestycyjnych przedsięwzięcia jest znacznie uproszczony. W pracy brak informacji o błędach oszacowania nakładów inwestycji.
- Praca byłaby bardziej uporządkowana, gdyby rozdział 3 rozpoczynał się od opisu funkcjonowania instalacji. W obecnej strukturze pracy, opis funkcjonowania instalacji (rozdział 3.2) jest poprzedzony modelami matematycznymi instalacji przy użyciu równań bilansu masy.
- W rozdziale 3 część rysunków zawiera symbole opisujące strumienie masy (np. rys. 3.3÷3.6), natomiast rys. 3.1 i rys. 3.2 nie zawierają symboli. Dlatego analiza równań bilansowych, przedstawionych w rozdziale 3.1.1. i 3.1.2, jest utrudniona.
- Interpretacja wyników, przedstawionych w formie wykresów zamieszczonych w rozdziale 5.3, jest utrudniona, gdyż trzeba się domyślać, który to przypadek symulacyjny. Jest to spowodowane brakiem opisu symboli zamieszczonych na rysunkach (legenda). Również w wykazie oznaczeń oraz tekście opisującym wykresy nie ma objaśnienia symboli.

Analogiczna sytuacja występuje w przypadku wykresów z rozdziału 5.4.

- Nie wszystkie symbole występują w wykazie oznaczeń. Forma pracy jest niejednolita w tym sensie, że część symboli występujących w równaniach jest wyjaśniona

bezpośrednio przy równaniach, a część symboli występuje jedynie w wykazie oznaczeń. Występują również symbole, które nie zostały w pracy wyjaśnione.

### **3. Wniosek końcowy**

Podsumowując opinię rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Grabarczyka stwierdzam, że tematyka została trafnie wybrana i charakteryzuje się wyraźnymi wartościami naukowymi. Badania te wniosły również nowe treści poznawcze, dotyczące technologii wodorowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Analiza techniczno-ekonomiczna instalacji do produkcji wodoru metodą dwustopniowej fermentacji wodorowej” spełnia wymagania określone ustawą „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuk” (Dz. U. nr 65 poz. 595, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Roberta Grabarczyka do publicznej obrony.

*Mechanik Woźniak*