

Wydział Mechaniczny  
Politechniki Białostockiej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Budeka: **Warunki minimalnego zużycia energii w instalacji do fermentacyjnej produkcji wodoru z biomasy.**

Podstawa przygotowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku prof. zw. dr hab. inż. Janusza Zielińskiego z dnia 13.10.2014 roku.

### **Zawartość pracy**

Przedstawiona do recenzji praca podzielona jest na 7 rozdziałów, zawiera również: wykaz oznaczeń, spis literatury oraz 4 załączniki. Spis literatury zawiera 38 pozycji, w tym Pan mgr inż. Andrzej Budek jest współautorem jednej cytowanej pracy.

W pracy analizowana była instalacja do produkcji wodoru w oparciu o technologię HYVOLUTION. W rozdziale pierwszym „Geneza pracy” przedstawiono: tło powstania projektu „HYVOLUTION – Produkcja czystego wodoru z biomasy metodą niskotemperaturową”. Doktorant przedstawił również dwie hipotezy badawcze oraz cel pracy.

Rozdział drugi zawiera opis stanu wiedzy dotyczącej tematyki pracy. Omówiono w nim metody otrzymywania wodoru (zgazowania i pirolizy biomasy oraz biologicznej produkcji wodoru, fermentacyjnej technologii produkcji wodoru). Przedstawiono zagadnienia dotyczące ogniw paliwowych (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - PEMFC, Alkaline Fuel Cell - AFC, Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC, Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC, Solid Oxide Fuel Cell - SOFC). Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom przydatności różnych typów ogniw do zastosowania w elektrociepłowniach dla wytwórni wodoru. Przedstawiono przegląd literatury dotyczący modelowania i optymalizacji bilansów cieplnych instalacji procesowych oraz zagadnień dotyczących integracji procesowej.

W rozdziale trzecim przedstawiono metodę PPT (Pinch Point Technology - Analiza punktów zbliżenia) oraz jej wykorzystanie do wspomagania projektowania energooszczędnych sieci wymienników. W rozdziale czwartym poświęconym zagadnieniom modelowania instalacji do produkcji wodoru omówiona jest rozpatrywana w pracy instalacja oraz procesy produkcyjne. Przedstawiono zagadnienia dotyczące wstępnej obróbki biomasy,

w której surowcem są odpady ziemniaczane przetwarzane w syrop glukozowy. Omówiono dwustopniową fermentację, w wyniku której powstają gazy pofermentacyjne o dużej zawartości CO<sub>2</sub>. Podano parametry procesów. Przedstawiono oczyszczanie gazu wodorowego metodą absorpcji przy użyciu monoetanolaminy. Metoda ta pozwala na uzyskanie wodoru o bardzo dużej czystości. Do sprężania gazu produkcyjnego w modelu wykorzystano odśrodkową sprężarkę adiabatyczną. Rozdział 4.2 omawia strukturę bilansu energetycznego, natomiast rozdział 4.3 poświęcony jest metodom poprawy bilansu energetycznego. W rozdziale 4.3 sformułowano funkcję celu przyjmując jako kryterium optymalizacji minimalne zużycie energii pierwotnej.

W rozdziale piątym przedstawiono zagadnienia dotyczące wytwarzania wodoru w instalacji z podukładem zapewniającym pokrycie zapotrzebowania na energię. Rozpatrywano wytwórnię z podukładem zapewniającym pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną oraz wytwórnię z podukładem zapewniającym pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną i elektryczną. Analizowano instalację, do której dodano kocioł parowy zasilany wodorem zawartym w nieoczyszczonych gazach pofermentacyjnych. Proponowane rozwiązanie pozwala na pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną w całej instalacji. Uniezależnienie instalacji do fermentacyjnej produkcji wodoru z biomasy od energii elektrycznej uzyskano poprzez dodanie do instalacji ogniwa paliwowego, w którym paliwem będzie wytwarzany w instalacji wodór.

Rozdział szósty zawiera studium parametryczne, którego celem była analiza różnych wariantów wytwórni wodoru w celu wyznaczenia warunków minimalnego zużycie energii. Przedstawiono: dane wejściowe oraz warianty analizowanych wytwórni. Rozpatrzono cztery przypadki wytwórni wodoru z biomasy. W rozdziale 6.4 przedstawiono analizę wrażliwości, której celem było: zbadanie niepewności wyników obliczeń zapotrzebowania energii, wykonanych w ramach studium parametrycznego. Rozdział siódmy zawiera wnioski końcowe. Praca zawiera cztery załączniki. Trzy załączniki zawierają wyniki studium parametrycznego wytwórni wodoru. Załącznik czwarty zawiera raport programu ASPEN HYSYS dotyczący podukładu oczyszczania gazów.

### **Merytoryczna ocena pracy**

Praca poświęcona jest analizie energetycznej instalacji do produkcji wodoru pracującej w oparciu o technologię HYVOLUTION. Autor przedstawił dwie hipotezy badawcze. Pierwsza dotyczy możliwości modelowania bilansu energetycznego w celu minimalizacji zużycia

energii w instalacji. Druga hipoteza zawiera stwierdzenie, iż można tak zaprojektować instalację, "aby uniezależnić ją od zewnętrznych źródeł energii cieplnej i elektrycznej oraz zapewnić minimalne zużycie energii zawartej w wodorze".

Cel pracy autor definiuje w następujący sposób: "Celem niniejszej rozprawy jest określenie warunków minimalnego zużycia energii w instalacji do fermentacyjnej produkcji wodoru z biomasy". Autor pracy przyjął, iż realizacja celu pracy będzie wymagała wykorzystania bilansów masowych i cieplnych oraz metodyki Pinch Point Technology z zastosowaniem programu Aspen Energy Analyzer do wykonania analizy zapotrzebowania energii i oceny stopnia regeneracji ciepła.

Możliwości poprawy bilansu energetycznego przedstawiono w rozdziale 4.3, gdzie zdefiniowano kryterium optymalizacji zużycia energii pierwotnej (zależność (32)). Przedstawiono propozycje dwóch sposobów poprawy bilansu energetycznego:

- poprzez zmianę stężeń glukozy oraz kwasu octowego,
- poprzez zmniejszenie czystości produkowanego gazu.

Omówiono również zagadnienie poprawy bilansu energetycznego wytwórni wodoru poprzez rozbudowanie instalacji o podukład zapewniający pokrycie zapotrzebowania na energię cieplną i elektryczną. Kolejne warianty przedstawiono w rozdziale piątym, w którym zaproponowano również rozwiązania technologiczne wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej.

Studium parametryczne zaproponowanych rozwiązań technicznych przedstawiono w rozdziale szóstym. Analizowano bilans energetyczny instalacji w czterech wytwórniach wodoru z biomasy: wytwórnię wyposażoną w ciepłownię oraz trzy warianty elektrociepłowni z zastosowaniem różnych ogniw paliwowych (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - PEMFC, Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC, Solid Oxide Fuel Cell - SOFC). Dane do bilansu pozyskiwano z symulacji komputerowej. Na rys. 6.1 przedstawiono zakres studium parametrycznego w odniesieniu do analizy instalacji podstawowej. W ramach analizy wyznaczono charakterystyki zmienności zapotrzebowania mocy cieplnej i elektrycznej w wytwórni w zależności od wskaźnika  $m_D/m_T$  dla zmiennej zawartości  $\text{CO}_2$  w gazie produktowym. Dane wejściowe do modelowania przedstawiono w Tab.6.1, zaś parametry pracy urządzeń wchodzących w skład instalacji w Tabeli 6.2. Analizowano stworzony w programie ASPEN Hysys model numeryczny. Wyniki symulacji komputerowych przedstawione są w rozdziale 6.3. Zamieszczono w nim wykresy zapotrzebowania mocy cieplnej i elektrycznej w wytwórni wodoru z biomasy w zależności od wskaźnika  $m_D/m_T$  oraz całkowite zapotrzebowanie mocy w zależności od zawartości  $\text{CO}_2$ .

W rozdziale 6.4 przeprowadzono analizę wrażliwości zaproponowanego modelu na zmianę niektórych parametrów pracy instalacji. Analizowano:

- zmianę stopnia konwersji glukozy na wodór,
- zmianę zawartości CO<sub>2</sub> w paliwie zasilającym dla ogniwa SOFC.

Pokazano, że wzrost stopnia konwersji fermentacji termofilnej do 86% prowadzi do zmniejszenia strumienia ciepła o 5.5% i mocy elektrycznej o 0.5%.

Wnioski końcowe przedstawiono w 12 punktach. Podsumowując przeprowadzone badania stwierdzono, że celowe jest poszukiwanie możliwości realizacji fermentacyjnej produkcji wodoru w skojarzeniu np. z cukrownią. W tym przypadku dostępne jest ciepło odpadowe o parametrach pozwalających na wykorzystanie go do oczyszczania gazu produkowanego w wytwórni wodoru.

### Uwagi krytyczne

Autor pracy usunął szereg błędów redakcyjnych wskazanych w mojej poprzedniej recenzji (poprzedzającej złożenie pracy). Jednak praca zawiera nadal błędy redakcyjne. Następujące wzory są napisane niepoprawnie (brak w nich symboli): wzór 17 (s 50), wzór 20 (s 53), wzór 33 (s 65), wzór 37 (s 69), wzór 38 (s 70). Brak w spisie oznaczeń symbolu  $m_T$  i  $m_D$ . Znaczenie tych symboli opisano jedynie na rys. 5.5 i 5.2. W podpisie pod rys.6.9 podane jest „zawartość CO<sub>2</sub>” powinno być zawartość % CO<sub>2</sub>. Na rys. 6.19 w podpisie osi jest „ $m_G/m_T$ ”, zaś w podpisie pod rysunkiem jest  $m_D/m_T$ . Błędy te utrudniają czytanie pracy, ale nie zmniejszają jej wartości merytorycznej.

W pracy nie przeprowadzono analizy ekonomicznej produkcji wodoru w oparciu o technologię HYVOLUTION. Nie umniejsza to wartości pracy ponieważ jej celem była analiza energetyczna, jednak wzbogacenie pracy o podstawowe informacje dotyczące kosztów budowy proponowanych instalacji oraz szacunkowa ocena ich opłacalności byłyby ciekawym uzupełnieniem przeprowadzonej analizy.

### Podsumowanie

Przedstawiony do oceny rękopis pracy doktorskiej jest pracą teoretyczną, jednak jej wyniki mają zastosowanie aplikacyjne. Autor opracował szereg modeli instalacji do fermentacyjnej produkcji wodoru z biomasy oraz wykonał szereg symulacji, których celem była odpowiedź na pytanie: czy możliwe jest uniezależnienie instalacji do produkcji wodoru od zewnętrznych

źródeł energii cieplnej i elektrycznej. Wyniki analiz wskazały kierunki działań pozwalających na optymalizację instalacji w celu minimalizacji zużycia energii.

Moim zdaniem, praca spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dn.14 marca 2003 r. Proponuję przyjęcie jej przez Radę Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej w Płocku.

