

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Budek,

Tytuł rozprawy: *Warunki minimalnego zużycia energii w instalacji do fermentacyjnej produkcji wodoru z biomasy*

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

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Budek dotyczy analizy energetycznej instalacji do produkcji wodoru z biomasy metodą niskotemperaturową. Praca bazuje 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 opracowane w projekcie HYVOLUTION schematy wytwórni wodoru oraz parametry eksploatacyjne procesu (ciśnienie, temperatura, strumień masy). Stanowiły one dane wyjściowe do analizy zużycia energii elektrycznej i ciepła przez wytwórnię wodoru, przyjmując warunek samowystarczalności energetycznej instalacji.

Doktorant wykonał analizę energetyczną instalacji do produkcji wodoru z biomasy dla dwóch wariantów zasilania wytwórni wodoru w energię elektryczną i ciepło:

- wytwórnia wodoru współpracująca z ciepłownią; przyjęto warunek, że ciepło do procesu jest wytwarzane w całości przez instalację tylko dla potrzeb własnych oraz, że występuje zewnętrzne zasilanie instalacji w energię elektryczną,
- wytwórnia wodoru współpracująca z elektrociepłownią rozumianą tutaj jako układ zbudowany z ogniw paliwowych, produkujących energię elektryczną i ciepło oraz kotła parowego i dopalacza produkującego ciepło; przyjęto warunek, że ciepło i energia elektryczna do procesu są wytwarzane w całości przez instalację tylko dla potrzeb własnych.

Ponadto w analizie energetycznej instalacji Doktorant rozpatrywał trzy typy ogniw paliwowych: polimerowe, fosforowe i tlenkowe.

Przed przystąpieniem do analizy energetycznej Doktorant scharakteryzował metody otrzymywania wodoru. Następnie omówił budowę i zasadę działania trzech typów ogniwa paliwowych: z elektrolitem polimerowym, z elektrolitem z kwasu fosforowego oraz ogniwa tlenkowe, a następnie ocenił przydatność omawianych ogniw do zasilania wytwórni wodoru w ciepło i energię elektryczną.

W dalszej części rozprawy Doktorant przedstawił zarys metody Pinch Technology, którą wykorzystał do minimalizacji zużycia ciepła w wytwórni wodoru.

Przed przystąpieniem do obliczeń energetycznych instalacji Doktorant omówił szczegółowo proces produkcji wodoru z biomasy metodą niskotemperaturową, opracowany w ramach projektu HYVOLUTION: przedstawił schematy procesu oraz podał wartości ważniejszych parametrów procesu. Podane informacje stanowiły dane wyjściowe do symulacji numerycznych wytwórni wodoru, podłączonej do różnych układów wytwarzających ciepło i energię elektryczną: ciepłownia złożona z kotła parowego zasilanego gazem wodorowym pofermentacyjnym lub elektrociepłownia zbudowana z kotła parowego zasilanego gazem wodorowym pofermentacyjnym, ogniwa paliwowego zasilanego wodorem oraz dopalacza zasilanego gazem wodorowym opuszczającym ogniwo paliwowe.

Przed przystąpieniem do obliczeń numerycznych Doktorant zaproponował strukturę instalacji dla dwóch przypadków:

- wytwórnia wodoru sprzężona z kotłem parowym,
- wytwórnia wodoru sprzężona z ogniwem paliwowym, kotłem parowym oraz dopalaczem,

a następnie stworzył matematyczne opisy powyższych układów oraz dla celów optymalizacyjnych sformułował funkcję celu, wyrażającą całkowite zużycie energii pierwotnej zawartej w wodorze przez instalację dla potrzeb własnych.

Autor przedstawił algorytm obliczeniowy według, którego rozwiązywał układ równań opisujących przepływy energii pomiędzy poszczególnymi podukładami instalacji oraz opisał sposób optymalizacji energetycznej instalacji dla przyjętej funkcji celu. W obliczaniu parametrów procesowych instalacji (temperatura, strumienie masy, skład chemiczny) Doktorant wykorzystał program komercyjny HYSYS. Natomiast w optymalizacji funkcji celu wykorzystał oprogramowanie własne.

Dla przyjętej struktury układu, na podstawie symulacji numerycznych, Doktorant wyznaczył ilościowe zapotrzebowanie przez instalację na energię elektryczną i ciepło dla zadanych wartości wybranych parametrów układu. Dla wyselekcjonowanych zmiennych decyzyjnych

Doktorant zminimalizował zaproponowaną funkcję celu wyznaczając optymalne parametry układu.

Na zakończenie w pracy wykonano analizę wrażliwości, związaną z niepewnością uzyskiwanych wyników obliczeń, dla przyjętych przez Autora parametrów układu.

Zaproponowana przez Doktoranta metoda modelowania matematycznego układu do produkcji wodoru z biomasy, z wykorzystaniem elementów metody Pinch Technology, stanowi oryginalne osiągnięcie Autora. Uzyskane wyniki obliczeń pozwoliły Doktorantowi dokonać oceny zapotrzebowania wodoru dla potrzeb własnych instalacji, dla wariantu pracy wytwórni wodoru z ciepłownią i elektrociepłownią. Okazało się, że w przypadku elektrociepłowni, niezależnie od typu zastosowanego ogniwa paliwowego, zużycie wodoru dla celów własnych jest praktycznie takie samo. Jeśli chodzi o sprawność produkcji wodoru, rozumianą tutaj jako stosunek ilości wodoru opuszczającego instalację do całkowitej ilości wyprodukowanego wodoru przez instalację, jest stosunkowo niska ($0,28 \div 0,4$). Dlatego Autor słusznie uznał, że przedstawiona w pracy technologia produkcji wodoru wymaga dalszych badań, co zostało zasygnalizowane w prawidłowo sformułowanych wnioskach końcowych.

Sformułowana przez Autora hipoteza, stwierdzająca możliwość stworzenia matematycznego opisu instalacji wodorowej oraz możliwość wyznaczenia struktury i parametrów układu w ten sposób, aby instalacja zużywała minimum energii zawartej w wodorze i była niezależna od zewnętrznych źródeł energii elektrycznej i ciepła, została pozytywnie zweryfikowana w pracy.

2. Uwagi i pytania do pracy

W pracy Doktorant sformułował funkcję celu zależną od takich zmiennych decyzyjnych, jak: stężenie glukozy w surowcu do termofilnej fermentacji, stężenie kwasu octowego w surowcu do fotofermentacji oraz stężenie dwutlenku węgla w oczyszczonym gazie wodorowym. Ostatecznie w optymalizacji funkcji celu została uwzględniona tylko jedna zmienna decyzyjna, tj. stężenie dwutlenku węgla w gazie wodorowym. Autor wyjaśnia, że pozostałe zmienne decyzyjne nie mogą być uwzględnione w rachunku optymalizacyjnym, gdyż bakterie w bioreaktorach mogą istnieć w ściśle określonych warunkach, dlatego wartości stężenia glukozy i stężenia kwasu octowego w surowcach zostały przyjęte jako stałe. Szkoda, że Autor nie przeprowadził symulacji numerycznych dla tych dwóch ostatnich zmiennych decyzyjnych w celach poznawczych, gdyż należy przypuszczać, że wraz z postępowaniem

inżynierii genetycznej, w przyszłości zaistnieje możliwość wyhodowania bakterii, które będą tolerowały zmienne wartości stężeń glukozy i kwasu octowego w surowcu.

Doktorant w pracy przedstawił algorytm minimalizacji zużycia energii w instalacji wodorowej, gdzie między innymi posługiwał się charakterystykami zapotrzebowania na energię przez wytwórnię wodoru w zależności od wskaźnika m_D/m_T . Punkt przecięcia na wykresie linii reprezentującej zapotrzebowanie na ciepło z linią reprezentującą produkcję ciepła wyznacza wartość wskaźnika m_D/m_T , któremu odpowiada domknięcie energetyczne instalacji polegające na tym, że energia elektryczna i ciepło są wytwarzane z wodoru tylko dla potrzeb własnych instalacji. Pomysł bilansowania instalacji przy użyciu charakterystyk jest zrozumiały, jednak umieszczenie na wykresach wielu innych linii reprezentujących przebiegi innych wielkości, np. zapotrzebowanie na moc elektryczną instalacji, zaciemnia ideę zastosowania charakterystyk i powstaje mylne wrażenie, że zapotrzebowanie na energię elektryczną może dowolnie ulegać zmianie w instalacji w zależności od wskaźnika m_D/m_T . Ponadto na rys. 6.11, 6.12, 6.15, 6.16, 6.19 i 6.20 występują dwa punkty, powstałe w wyniku przecięcia dwóch linii z jedną, co utrudnia interpretację wyników.

W pracy została wykonana analiza wrażliwości, związana z niepewnością uzyskiwanych wyników obliczeń, dla przyjętych przez Autora parametrów układu. Autor nie uwzględnił wszystkich istotnych parametrów, np. sprawność ogniwa paliwowego. Wprawdzie w pracy występuje stwierdzenie, że rozważany parametr nie ma znaczącego wpływu na wyniki obliczeń, jednak należałoby ten fakt bardziej udokumentować.

W dotychczasowych rozważaniach, dotyczących technologii wodorowych, przyjmowano warunek, że należy dokładnie oczyścić gaz wodorowy z dwutlenku węgla przed jego zmagazynowaniem. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant wykazał, że z ekonomicznego punktu widzenia nie należy oczyszczać zbyt dokładnie gazu wodorowego z dwutlenku węgla przed jego zmagazynowaniem, ponieważ ze wzrostem zawartości dwutlenku węgla w gazie wodorowym zużycie energii w instalacji do produkcji wodoru maleje. Czy ten wniosek można uogólnić w ten sposób, że w technologii wodorowej ekonomicznie jest opłacalne magazynowanie wodoru niezbyt dokładnie oczyszczonego z dwutlenku węgla? A może nie jest ekonomicznie uzasadnione oczyszczanie gazu wodorowego z dwutlenku węgla, dzięki czemu dodatkowo zostanie wyeliminowany układ oczyszczania?

Przedstawiona przez Doktoranta instalacja jest skomplikowana technologicznie. Czy na podstawie uzyskanych w pracy wartości zapotrzebowania na energię przez poszczególne podukłady (podukład: wstępnej obróbki biomasy, fermentacji termofilnej i fotofermentacji,

oczyszczania gazu wodorowego, sprężania gazu wodorowego) oraz na podstawie uzyskanych w pracy wartości wytwarzanej energii przez poszczególne podukłady stanowiące źródło energii (kocioł parowy, ogniwa paliwowe, dopalacz), istnieje ekonomicznie uzasadniona możliwość uproszczenia instalacji, uwzględniając dalsze doskonalenie ogniw paliwowych pod względem ich trwałości użytkowej i sprawności, związanej z efektywniejszym wykorzystaniem wodoru zasilającego ogniwo ?

3. Wniosek końcowy

Podsumowując opinię rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Budek 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. „Warunki minimalnego zużycia energii w instalacji do fermentacyjnej produkcji wodoru z biomasy” spełnia wymagania określonego 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. Andrzeja Budek do publicznej obrony.

