

prof. dr hab. inż. Romuald Mosdorf
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C
15-351 Białystok

Białystok, 05.06.2019

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Robert Grabarczyk nt: "Analiza techniczno-ekonomiczna instalacji do produkcji wodoru metodą dwustopniowej fermentacji wodorowej".
Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Urbaniec.

Podstawa przygotowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Janusza Zielińskiego z dnia 27.05.2019 roku.

Struktura pracy

Praca podzielona jest na 8 rozdziałów, zawiera 7 załączników, wykaz oznaczeń oraz wykaz literatury zawierający 92 pozycje, w tym 7 prac, których współautorem jest Pan mgr inż. Robert Grabarczyk.

W rozdziałach "Geneza pracy" i "Wprowadzenie" omówiono wyniki badań, które zostały przeprowadzone w Centrum Doskonałości CERED Politechniki Warszawskiej w Płocku w ramach projektu "HYVOLUTION". Hipoteza badawcza została przedstawiona w rozdziale 1.2, natomiast cel i zakres pracy w rozdziale 1.3.

W rozdziale 2. przedstawiono obecny stan wiedzy dotyczący dwustopniowej fermentacji wodorowej. W kolejnych rozdziałach omówiono zagadnienia dotyczące fermentacji wodorowej i etanolowej sacharozy, surowce wykorzystywane w ciemnej fermentacji wodorowej oraz warunki zastosowania buraków cukrowych.

Zagadnienia dotyczące modelowania instalacji przedstawiono w rozdziale 3. W kolejnych podrozdziałach omówiono: bilans dwustopniowej i jednostopniowej fermentacji wodorowej, wyznaczono maksymalne wartości współczynników konwersji. Opis instalacji przedstawiono w rozdziale 3.2, zaś zastosowane w pracy komputerowe wspomaganie obliczeń w rozdziale 3.3. Równania bilansu masy przedstawiono w rozdziale 3.4. W kolejnych podrozdziałach omówiono bilanse: masy fermentacji wodorowej, masy układu oczyszczania gazu wodorowego, zapotrzebowanie na wodę uzupełniającą, dobową i roczną produkcję wodoru oraz zapotrzebowanie na chemikalia.

Charakterystykę maszyn i aparatów przedstawiono w rozdziale 3.5. Omówiono aparaty zbiornikowe, bioreaktory fermentacji wodorowej, skraplacz bezprzeponowy, chłodnice gazu wodorowego, chłodnicę wentylatorową, płytowe wymienniki ciepła, kocioł parowy, filtr świecowy, adsorbenty oraz maszyny przepływowe. Wskaźniki zużycia energii przedstawiono w rozdziale 3.6.

Rozdział 4. poświęcony jest ocenie ekonomicznej procesu budowy i funkcjonowania instalacji. Omówiono koszty inwestycyjne, eksploatacyjne, surowców oraz zatrudnienia.

Studium parametryczne funkcjonowania instalacji przedstawiono w rozdziale 5. W kolejnych podrozdziałach omówiono: stężenie sacharozy w fermentacji termofilnej, stężenie kwasu octowego w fotofermentacji, współczynniki konwersji: sacharozy w fermentacji termofilnej, kwasu octowego w fotofermentacji. Analizowano również produktywność wodoru w fermentacji termofilnej i fotofermentacji oraz strukturę kosztów produkcji wodoru i trwałość rur transparentnych. Wyniki analizy wrażliwości przedstawiono w rozdziale 5.4. Wnioski i uwagi końcowe przedstawiono w rozdziałach 6 i 7.

Praca zawiera 7 załączników zawierających: wzory opisujące właściwości fizyczne roztworów, zestawienie cen urządzeń, metodę wyznaczenia kosztu jednostkowego pary grzewczej, ceny jednostkowe oraz koszty płac, wskaźniki cen produkcji sprzedanej przemysłu, wskaźniki techniczno-ekonomiczne funkcjonowania instalacji, wyniki analizy wrażliwości.

Merytoryczna zawartość pracy

Wyniki badań przeprowadzonych w Centrum Doskonałości CERED Politechniki Warszawskiej w Płocku z udziałem Autora pracy zainicjowały prace, których wyniki przedstawiono w pracy doktorskiej. Wcześniejsze badania prowadzono w ramach projektu "HYVOLUTION", gdzie analizowano metodę oczyszczania gazu wodorowego poprzez absorpcję w roztworach amin. Natomiast w pracy doktorskiej rozpatrywana jest metoda adsorpcyjna. Zastosowanie tej metody nie było do tej pory przedmiotem analiz techniczno-ekonomicznych. Jako potencjalny surowiec do fermentacji wodorowej przyjęto melasę buraczaną.

Autor pracy sformułował następujące dwie hipotezy badawcze:

- „– można opracować model matematyczny instalacji opartej o dwustopniową fermentację wodorową melasu,
- wykorzystując opracowany model można badać wpływ zmiany parametrów procesu na wskaźniki techniczno-ekonomiczne, a tym samym określać możliwości usprawnienia funkcjonowania instalacji.”

Celem pracy było "przeprowadzenie analizy techniczno-ekonomicznej instalacji do wytwarzania wodoru metodą fermentacji dwustopniowej.”

„Zakres pracy obejmuje:

- wskazanie parametrów procesu, które mają wpływ na funkcjonowanie instalacji,
- opracowanie modelu matematycznego instalacji,
- wykonanie studium parametrycznego i analizy wrażliwości,
- analizę uzyskanych wyników,
- weryfikację hipotezy badawczej w oparciu o przebieg badań i uzyskane wyniki.”

W pracy przedstawiono zalety zastosowania wodoru jako paliwa (duża wartość opałowa, brak emisji zanieczyszczeń, wysoka sprawność). Omówiono zagadnienia związane z fermentacją wodorową ciemną i fotofermentacją. Omówiono również fermentację dwustopniową, w której kwasy organiczne produkowane w fermentacji ciemnej są wykorzystywane w fotofermentacji.

Zarówno w projekcie "HYVOLUTION" jak i w niniejszej pracy w pierwszym stopniu poddano analizie wykorzystanie bakterii termofilnych. W Tab. 1. porównano teoretyczne wydajności dwustopniowej fermentacji wodorowej i fermentacji etanolowej sacharozy. Pokazano, że możliwa do uzyskania ilość energii z wodoru jest o 17% większa od ilości energii, którą można uzyskać z etanolu.

Przedstawiono surowce, które mogą być wykorzystywane w procesie fermentacji wodorowej, omówiono również metodę ich klasyfikacji.

Przedstawiono warunki produkcji cukru w Polsce oraz zagadnienia związane z oceną nasłonecznienia. Przyjęto, że charakterystyka promieniowania słonecznego w Płocku jest zbliżona do charakterystyki w Aachen.

Współczynniki bilansowe reakcji fermentacji termofilnej zapisano równaniami (3.1 - 3.4), natomiast współczynniki fotofermentacji równaniami (3.5 - 3.7). Opisują one stosunki mas molowych: wodoru, sacharozy, ditlenku węgla, kwasu octowego oraz wody. Wartości współczynników wydajności biomasy bakterii podano w równaniach (3.8 i 3.9). Schemat blokowy dwustopniowej fermentacji wodorowej przedstawiono na rys. 3.1.

W kolejnych równaniach (3.11 - 3.24) przedstawiono bilanse masy: wodoru produkowanego w fermentacji termofilnej, kwasu octowego, bakterii fermentacji termofilnej, ditlenku węgla produkowanego w fermentacji termofilnej, sacharozy i wody zużywanych w fermentacji termofilnej, sacharozy niewykorzystanej, wodoru produkowanego w fotofermentacji oraz biomasy bakterii, ditlenku węgla produkowanego w fotofermentacji, kwasu octowego i wody zużywanych w fotofermentacji. Schemat blokowy termofilnej fermentacji wodorowej pokazano na rys. 3.2.

W kolejnych równaniach (3.26 - 3.34) przedstawiono bilanse masy: wodoru produkowanego w fermentacji termofilnej, kwasu octowego oraz przyrost biomasy bakterii fermentacji termofilnej, ditlenku węgla produkowanego w fermentacji termofilnej, masy sacharozy i wody. Masę wodoru wyprodukowanego w trybach dwustopniowym i jednostopniowym określają odpowiednio równania (3.35) i (3.36).

Wyznaczono strumień masy sacharozy w funkcji średniej wydajności wodoru (masy wodoru wyprodukowanego w ciągu doby). Wyznaczono maksymalne wartości współczynników konwersji, które wynoszą 0.869. Schemat układu fermentacji termofilnej pokazano na rys. 3.3, natomiast schemat układu fotofermentacji na rys. 3.4.

Do przeprowadzenia symulacji pracy układu wykorzystano program Aspen HYSYS oraz arkusze kalkulacyjne. Wyznaczono równowagowy skład mieszaniny gazowo-parowej, strumienie ciepła w skraplaczu bezprzeponowym i chłodnicach gazu wodorowego, moce potrzebne do sprężania gazu wodorowego oraz moc sprężania gazu wodorowego w maszynach przepływowych. Równania (3.46 - 3.52) opisują odpowiednio: strumień masy pary wodnej zawartej w gazie wodorowym, strumień ciepła w skraplaczu bezprzeponowym oraz w chłodnicy gazu wodorowego, strumień masy wody wydzielanej z gazu wodorowego w skraplaczu bezprzeponowym, moc sprężania w pompie próżniowej. Określono średni strumień masy wodoru w gazie kierowanym do oczyszczania (3.53).

Podano zależność określającą zapotrzebowanie na sacharozę dostarczaną w melasie, całkowite strumienie masy cieczy zasilającej fermentację termofilną w trybach dwustopniowym i jednostopniowym, strumień masy sacharozy, strumień masy gazu wodorowego opuszczającego bioreaktory fermentacji termofilnej, strumień masy cieczy opuszczającej fermentację termofilną oraz strumienie masy wody, sacharozy, kwasu octowego, wodorotlenku potasu i biomasy bakterii fermentacyjnych, masę cieczy zgromadzonej w zbiorniku buforowym, całkowity strumień masy cieczy opuszczającej zbiornik buforowy, strumienie masy sacharozy, kwasu octowego oraz wodorotlenku potasu.

Punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy ekonomicznej było określenie głównych składników kosztów. Ceny urządzeń wyznaczono w oparciu o dane udostępnione przez krajowe biura projektowe bądź dostawców urządzeń przemysłowych. Indeksy inflacyjne wyznaczono w oparciu o wskaźnik cen produkcji sprzedanej przemysłu publikowany przez Główny Urząd Statystyczny. Cenę baterii bioreaktorów fotofermentacji wyznaczono uwzględniając cenę zakupu gruntu w Polsce. Cenę zakupu płytowych wymienników ciepła wyznaczono z pomocą liniowej funkcją pola powierzchni wymiennika. Cenę skraplacza bezprzeponowego wyznaczono uwzględniając cenę aparatu kolumnowego i zakupu wypełnienia skraplacza. Całkowity koszt inwestycyjny obliczono uwzględniając: koszty projektu, uzyskania pozwoleń i koncesji, uzbrojenia terenu, montażu, armatury kontrolno-pomiarowej, układu automatycznej regulacji i urządzeń zabezpieczających. Koszty te uwzględniono z wykorzystaniem współczynnika Langa.

Do kosztów eksploatacyjnych zaliczono: koszty energii, wody chłodzącej, chemikaliów, wody uzupełniającej świeżej, koszty środowiskowe związane z emisją ditlenku węgla, koszty napraw i konserwacji instalacji, koszty materiałów eksploatacyjnych. Roczne koszty napraw i konserwacji obliczono, jako odsetek całkowitych kosztów inwestycyjnych. W koszcie zatrudnienia uwzględniono zatrudnienie trzech pracowników wykwalifikowanych oraz

pracowników niewykwalifikowanych. Przewidywany zysk określono z wykorzystaniem funkcji NPV.

W ramach studium parametrycznego zbadano wpływ: stężenia substratów, produktywności oraz współczynnika konwersji na główne wskaźniki techniczno-ekonomiczne funkcjonowania instalacji dwustopniowej fermentacji wodorowej. Wykorzystano model matematyczny instalacji przedstawiony w rozdziale 3 i 4. Wartości parametrów procesu przedstawiono w Tab. 5.1. Dla układu fotofermentacji wodorowej przyjęto wartość współczynnika Langa $L = 2$, dla pozostałych układów $L = 3$. Ceny maszyn i aparatów zestawiono w Załączniku 2, natomiast wskaźniki cen produkcji sprzedanej przemysłu zestawiono w Załączniku 5.

Wyniki zaprezentowano w rozdziale 5.3. Na rys. 5.1 pokazano wydajność energetyczną instalacji i koszty produkcji wodoru w zależności od stężenia sacharozy w fermentacji termofilnej. Strumienie masy cieczy zawracanej do rozcieńczania melasy oraz surowca fotofermentacji w zależności od stężenia sacharozy w fermentacji termofilnej pokazano na rys. 5.2. Dobowe zapotrzebowanie na wodę uzupełniającą w zależności od stężenia sacharozy w fermentacji termofilnej pokazano na rys. 5.3. W kolejnych podrozdziałach analizowano: stężenie kwasu octowego w fotofermentacji, współczynnik konwersji sacharozy w fermentacji termofilnej, współczynnik konwersji kwasu octowego w fotofermentacji, produktywność wodoru w fermentacji termofilnej, produktywność wodoru w fotofermentacji, strukturę kosztów produkcji wodoru, trwałość rur transparentnych oraz wpływ dotacji do inwestycji na koszty produkcji.

Przeprowadzono analizę wrażliwości dla dwóch grup czynników: zmiennych i stałych. Na rys. 5.29 pokazano wrażliwość wydajności energetycznej instalacji na zmiany wartości parametrów procesu. Na kolejnych rysunkach pokazano wrażliwość kosztu produkcji wodoru na zmiany: wartości parametrów procesu, wybranych czynników, ceny zakupu wybranych czynników.

Uwagi krytyczne

W rozdział 3.3 bardzo skrótowo opisano obliczenia komputerowe, w których wykorzystano program HYSYS. Moim zdaniem taki opis powinien zawierać bardziej szczegółowe informacje dotyczące schematów obliczeń w programie HYSYS. Część obliczeń wykonano

w arkuszach kalkulacyjnych i tu również brak jest informacji o zastosowanych schematach obliczeń oraz liczbie i zawartości arkuszy kalkulacyjnych. Moim zdaniem, w pracy, w jednym miejscu powinna być podana informacja o sposobie prowadzenia obliczeń, brak takiego syntetycznego opisu utrudnia zrozumienie schematu obliczeń. Tak skrócony opis rodzi wiele pytań, których można by uniknąć pokazując szczegóły obliczeń. Na przykład, dlaczego sprężanie odbywa się ze sprawnością 0.75, a nie na przykład 0.756, oraz w jaki sposób obliczono wartości współczynników w równaniach (3.46 - 3.52)? Dlaczego w zależności (3.53) przyjęto 10% stratę wodoru?

W pracy analizowano instalację wytwarzającą 60 kg/h wodoru, co odpowiada strumieniowi energii 2 MW. Dlaczego wybrano taki wydatek wodoru i jak zmiana skali wpłynie na wyniki analizy? Jak jest uzasadnienie przyjętych założeń, że NPV = 0 po 15 latach? Czy założenie 10-letniego okresu spłaty kredytu zaciągniętego z 25% wkładem własnym i oprocentowaniem 2% jest realistyczne?. W pracy brak jest informacji, jaka jest całkowita kwota kredytu.

Widzę również w pracy brak całościowego zestawienia przepływów finansowych dla całego okresu eksploatacji wytwórni wodoru.

W załącznikach podano ceny urządzeń właściwe dla różnych lat, np. 2011, 2010 i 2016 - czy tak podane ceny można porównywać?

Wybrane uwagi redakcyjne

Praca napisana jest starannie. Jednak przyjęcie zasady podpisywania rysunków ("oznaczenia objaśnione w tekście") utrudnia lekturę pracy. Moim zdaniem (w miarę możliwości) rysunek powinien być opisany w taki sposób, aby można było zrozumieć pokazane na nim zależności bez czytania tekstu.

W załączniku 1 i 3 wzory są numerowane, natomiast w załączniku 2 i 4 wzory nie są numerowane - powinno być to zrobione jednakowo w całej pracy.

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest pracą teoretyczną. Uzyskane wyniki analiz wskazały kierunki dalszych prac, które mogą doprowadzić do opracowania skutecznych metod obliczeniowych instalacji do wytwarzania wodoru w wyniku przetwarzania roztworu cukru. Praca spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r., dlatego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

