

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Marceliny Bitenc-Jasiejko pt. „*Numeryczne i eksperymentalne modelowanie procesu wymiany pędu i masy w bioreaktorze air-lift*”

Promotor pracy: Prof. dr hab. inż. Joanna Karcz

A. Cel i zakres pracy

W recenzowanej pracy mgr inż. Marcelina Bitenc-Jasiejko przedstawiła uzyskane przez siebie wyniki badań teoretyczno-doświadczalnych procesu wymiany pędu i masy w bioreaktorze typu air-lift. Główne części pracy stanowią: streszczenie (w języku polskim i angielskim), wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń, wprowadzenie, studia literaturowe, cel pracy, część eksperymentalna, część obliczeniowa, wnioski oraz spis literatury. Rozprawa zawiera łącznie 222 strony, w tym: 95 rysunków, 51 tabel oraz 251 pozycji literatury specjalistycznej.

Celem rozprawy było przeprowadzenie badań teoretyczno-doświadczalnych procesów przenoszenia pędu oraz masy w bioreaktorze air-lift w oparciu o szczegółową analizę zjawisk zachodzących w układzie dwufazowym ciecz-gaz oraz biofaza-ciecz-gaz podczas tlenowej hodowli drożdży. Formułując cel pracy Doktorantka założyła, że przez synergii analizy numerycznej i eksperymentalnej rozpatrywanego problemu możliwe będzie zrealizowanie zarówno celów poznawczych, jak i aplikacyjnych. Aspekt poznawczy podjętych badań związany jest z kompleksowym opisem procesów przenoszenia w układach wielofazowych wytwarzanych w napowietrzanych bioreaktorach kolumnowych, uzyskanym z użyciem zaawansowanych metod numerycznej mechaniki płynów.

Realizacja pracy wymagała wyznaczenia wielu kluczowych parametrów charakteryzujących procesy transportu pędu i masy w bioreaktorze, takich jak prędkość przepływu płynu, czas cyrkulacji, czas homogenizacji, udział gazu zatrzymanego w cieczy, współczynnik wnikania tlenu, powierzchnia kontaktu międzyfazowego oraz wydajność

bioprocessu.

Przed sformułowaniem celu pracy Doktorantka przeprowadziła studia literaturowe (rozdział 2), w których przedstawiła istotne zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi i numerycznymi procesów i bioprocessów zachodzących w aparatach z pneumatycznym podnośnikiem cieczy. Studia są bardzo obszerne, opierają się na 250 pozycjach literatury specjalistycznej. Po ich przeprowadzeniu Doktorantka stwierdziła, że analiza układów bioprocessowych powinna obejmować aspekty bilansu populacji komórek. Wnioski wynikające ze studiów literaturowych, zawarte w rozdziale 2.8, stanowiły podstawę do sformułowania celu pracy (rozdział 3).

W rozdziale 4 zamieszczony został szczegółowy opis aparatury doświadczalnej oraz metodyki badań.

W rozdziale 5 Doktorantka przedstawiła wyniki badań doświadczalnych hydrodynamiki kolumny air–lift z cyrkulacją zewnętrzną. W pierwszym etapie badań przeprowadziła ilościową ocenę wpływu: stężenia cukru (jako pożywki dla mikroorganizmów), konstrukcji dystrybutora w układach woda–powietrze, stężenia biomasy oraz przebiegu bioprocessu na hydrodynamikę bioreaktora. Wyniki badań doświadczalnych przedstawiła graficznie w postaci rozkładów parametrów hydrodynamicznych wyznaczonych w poszczególnych strefach aparatu. Zaproponowała równania opisujące zależność udziału gazu zatrzymanego w cieczy, prędkości cieczy, czasu cyrkulacji i czasu mieszania znacznika w układzie od liczby Froude’a.

W rozdziale 6 przedstawione zostały doświadczalne rozkłady wielkości pęcherzy w wodzie i w wodnym roztworze sacharozy. Wyznaczone zostały średnice pęcherzy oraz stopień zatrzymania gazu. Przeprowadzono bilans populacji pęcherzy gazowych i określono wielkość powierzchni międzyfazowej w reżimie homogenicznym.

W rozdziale 7 przeprowadzono analizę doświadczalną przebiegu tlenowej hodowli drożdży, która umożliwiła określenie efektywności przebiegu bioprocessu w zależności od intensywności napowietrzania. Obejmowała ona zarówno zmienność w czasie parametrów fizykochemicznych, jak również dynamikę populacji komórek biomasy. Żywotność komórek oceniano jakościowo na podstawie zdjęć preparatów przeżyciowych.

W końcowej części pracy (rozdziały 8–13) Doktorantka zamieściła wyniki badań numerycznych. Obejmowały one ocenę wpływu: natężenia przepływu gazu w układzie woda - powietrze, modelu burzliwości w układzie z cieczą nienewtonowską, stężenia cukru w fazie ciągłej (przy różnym stopniu napowietrzania) oraz konstrukcji dystrybutora gazu na hydrodynamikę kolumny air–lift. Implementacja modelu bilansu populacji umożliwiła

numeryczne wyznaczenie kluczowych parametrów związanych z procesami przenoszenia masy, takich jak wielkość pęcherzyków gazu i powierzchnia międzyfazowa. Zastosowanie metody CFD umożliwiło analizę hydrodynamiki i wymiany masy w badanych w pracy układach w skali lokalnej. W wyniku przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że strumień cyrkulującego płynu silnie oddziałuje na wielkości hydrodynamiczne oraz na parametry przenoszenia masy, a jego wpływ jest dominujący w obszarze połączenia dolnej rury poziomej ze strefą wznoszenia.

Porównując uśrednione wyniki obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych wykazano ich zadowalającą zgodność. Tym samym wykazano, że model numeryczny zastosowany w pracy jest odpowiedni do badań aparatów typu air-lift i może znacznie zredukować koszty i czas związany z projektowaniem i wdrażaniem nowych konstrukcji tego typu aparatów.

B. Ocena pracy

Zamieszczone w recenzowanej rozprawie wyniki badań mają, obok aspektu użytecznego, duże znaczenie poznawcze. Rozprawa wypełnia szereg luk w dotychczasowym piśmiennictwie poświęconym omawianej tematyce. Jest to wynikiem zarówno dużej liczby czynników branych pod uwagę podczas badań, jak i jednoczesnego stosowania zaawansowanych metod modelowania matematycznego oraz metod eksperymentalnych. Uzyskane wyniki stanowią cenny zbiór informacji dla badaczy procesów transportu pędu i masy występujących w kolumnach air-lift z cyrkulacją zewnętrzną.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć pracy doktorskiej Pani mgr inż. Marceliny Bitenc-Jasiejko, nie mających odpowiednika w literaturze przedmiotu, należą:

- Opracowanie równań empirycznych opisujących wpływ stężenia sacharozy oraz natężenia przepływu gazu na: wielkość udziału gazu zatrzymanego w cieczy w strefie wznoszenia, prędkość cieczy w strefie opadania i wznoszenia oraz czas cyrkulacji i czas mieszania znacznika w układzie.
- Uzyskanie opisu matematycznego charakteru reologicznego zawiesin drożdży spożywczych.
- Opracowanie uogólnionych zależności empirycznych uwzględniających wpływ właściwości fazy ciągłej, warunków procesowych oraz konstrukcji dystrybutora gazu na parametry hydrodynamiczne kolumny air-lift.

- Zastosowanie metody bilansu populacji do oceny wpływu stężenia cukru na wielkość pęcherzy gazowych w kolumnie air–lift.
- Przeprowadzenie analizy ilościowej i jakościowej przebiegu hodowli drożdży piekarniczych w wielkolaboratoryjnym aparacie air–lift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy.
- Przeprowadzenie symulacji numerycznych wielkolaboratoryjnej kolumny air–lift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy i uzyskanie na ich podstawie rozkładów lokalnych wielkości hydrodynamicznych.
- Identyfikacja jakościowa i ilościowa przepływu ciec–gaz w skali lokalnej, z implementacją własnego modelu empirycznego opisującego nienewtonowski charakter fazy ciągłej.
- Przeprowadzenie obszernej weryfikacji doświadczalnej wyników symulacji numerycznych.

Przy rozwiązywaniu postawionych w pracy problemów Doktorantka wykazała się umiejętnością prowadzenia badań doświadczalnych, analizy ich wyników oraz budowania modeli matematycznych opisujących procesy przenoszenia pędu i masy w napowietrzanych bioreaktorach kolumnowych. Wyczerpująca i bogato udokumentowana ilustracyjnie analiza badanych zjawisk, prowadzona w różnych warunkach, oparta o wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych i modelowania matematycznego, potwierdza wystarczające umiejętności Doktorantki w zakresie budowania programu badań i prawidłowej interpretacji ich wyników.

C. Uwagi krytyczne

W czasie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi.

1. Wartości powierzchni otworów dystrybutora gazu podane w tabeli 5.1 są błędne.
2. Niejasny jest sposób wykonania zdjęć pęcherzy zamieszczonych w rozdziale 6.
3. W rozdziale 4.1 (*Opis aparatury doświadczalnej*) brakuje niezbędnych informacji na temat zastosowanego do badań manometru różnicowego oraz sondy konduktometrycznej.
4. Na rysunkach (np. rysunek 5.1, strona 89) niepotrzebnie powtarzane są te same informacje w podpisach i w legendzie.
5. Na rysunku 5.2 (strona 90) jedna z dwóch linii jest niepotrzebna.
6. Tytuł rozdziału 8.6 (*Postprocessing*) powinien być podany w języku polskim.

7. Strona 134, 4 wiersz od góry: zamiast *współrzędnej promieniowej* powinno być *współrzędnej osiowej*.
8. W rozdziale 10 (*Wpływ modelu burzliwości na wyniki modelowania numerycznego hydrodynamiki w bioreaktorze air-lift z zewnętrzną cyrkulacją cieczy*) nie podano informacji na temat zastosowanej metody wyznaczenie parametrów równania (10-1).
9. Strona 163, tabela 10.13: zamiast *Dolna górna rura pozioma* powinno być *Dolna rura pozioma*.
10. Strona 159, tabela 10.9: kontury szybkości dyssypacji energii kinetycznej burzliwości dla $h/H=0$ wydają się być niekompletne.
11. Spis oznaczeń jest niekompletny.
12. Rozprawa zawiera nieznaczną liczbę błędów językowych oraz niejasnych i niezręcznych sformułowań. Przykładowe błędy podano poniżej:
 - a) Używanie spójnika *із* zamiast neutralnego *że*. Spójnika *із* można używać, aby uniknąć kilkakrotnego powtórzenia spójnika *że* w jednym zdaniu. W innych wypadkach używanie tego spójnika jest nienaturalne.
 - b) Nadużywanie przyimka *poprzez* – lepiej użyć przyimka *przez* lub innej konstrukcji składniowej.
 - c) Sformułowania: *Na podstawie estymacji najmniejszych kwadratów* (strona 99), *Przeprowadzono symulacje komputerowe nieustalone w czasie* (strona 134) oraz *Błąd względny pomiędzy danymi doświadczalnymi a obliczonymi numerycznie* (strona 180) są niezręczne.
 - d) Strona 25, 6 wiersz od góry: zamiast *air-list* powinno być *air-lift*.

Powyższe uwagi krytyczne w najmniejszym stopniu nie podważają najważniejszych aspektów merytorycznych pracy, a ich uwzględnienie mogłoby podnieść komunikatywność oraz podkreślić liczne cenne treści, które praca zawiera.

D. Wniosek końcowy

Uważam, że w swojej pracy Doktorantka wykazała się rozległą wiedzą teoretyczną na temat procesów wymiany pędu i masy w bioreaktorze air-lift. Potwierdziła również opanowanie umiejętności praktycznych niezbędnych do przeprowadzenia eksperymentów numerycznych, z wykorzystaniem metod CFD, a także badań doświadczalnych oraz interpretacji ich wyników.

Stwierdzam, że rozprawa przygotowana przez mgr inż. Marcelinę Bitenc-Jasiejko pt. „*Numeryczne i eksperymentalne modelowanie procesu wymiany pędu i masy w bioreaktorze air-lift*” w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Jednocześnie proszę Radę Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Bogdan Ambrożek

