Warszawa, 27 lipca 2017 r

Dr hab. inż. Antoni Rożeń
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej
Politechnika Warszawska

RECENZJA
pracy doktorskiej mgr inż. Anny Story
pt. „Badanie przepływu płynów nienewtonowskich w mieszalniku wyposażonym w mieszadło PMT"
wykonanej w Zakładzie Projektowania Systemów i Optymalizacji Procesowej
promotor: prof. dr hab. inż. Zdzisław Jaworski

1. Charakterystyka pracy

Przedmiotem recenzowanej pracy autorstwa mgr inż. **Anny Story** jest proces mieszania konwekcyjnego płynów nienewtonowskich w mieszalniku zbiornikowym z szybkoobrotowym mieszadłem o przestrzennej krzywiźnie łopatek. Celem pracy było zbadanie wpływu własności reologicznych mieszanych cieczy na: pole przepływu, moc mieszania i rozmiar strefy intensywnego mieszania. Badania te przeprowadzono dla mieszadła Prochem Maxflow T (PMT), wytwarzającego intensywny przepływ cieczy wzdłuż osi mieszadła. Mieszanymi cieczami były woda oraz dwa płyny nienewtonowskie: pseudoplastyczny i lepkosprężysty. W ramach pracy wykonano m.in. pomiary: własności reologicznych płynów nienewtonowskich, rozkładów prędkości mieszanych cieczy przy użyciu anemometrii obrazowej (PIV), momentu obrotowego i nacisku osiowego mieszadła. Przeprowadzono również wizualizację procesu mieszania. Wyniki badań eksperymentalnych posłużyły do walidacji modelu przepływu płynu w mieszalniku z mieszadłem PMT, wykorzystującego metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), oraz sformułowania empirycznego modelu do obliczania zasięgu strefy intensywnego mieszania cieczy pseudoplastycznej. Dodatkowo wyznaczono przybliżony zasięg strefy wokół mieszadła PMT, gdzie powinna dominować odpowiedź sprężysta nad odpowiedzią lepkościową w płynie lepkosprężystym.

Recenzowana praca napisana jest w języku polskim i liczy 200 stron. Rozprawa ma czytelną strukturę, na którą składa się: wprowadzenie, przegląd literatury, część eksperymentalna, część teoretyczna poświęcona symulacjom numerycznym przepływu, analiza i porównanie wyników doświadczalnych i wyników modelowania, wnioski końcowe oraz bibliografia, obejmująca 155 pozycji literaturowych. Pracę uzupełniają dwa załączniki zawierające wyniki

pomiarów reologicznych oraz porównanie wyników symulacji CFD przepływu cieczy w mieszalniku z wynikami uzyskanymi przy użyciu laserowej anemometrii dopplerowskiej i anemometrii obrazowej.

We wprowadzeniu (rozdział 1) Autorka przedstawiła przedmiot swoich badań i zwięźle uzasadniła potrzebę ich podjęcia.

Przegląd literatury (rozdział 2) poświęcony jest kluczowym zagadnieniom związanym z realizacją pracy badawczej m.in.: własnościom reologicznym i klasyfikacji płynów nienewtonowskich, podstawowym parametrom służącym do charakteryzacji pracy mieszadeł (moc mieszania, nacisk osiowy, wydajności pompowania), praktycznym problemom występującym podczas mieszania cieczy o silnych własnościach nienewtonowskich (strefy martwe i obszary intensywnej cyrkulacji płynu), metodom pomiaru prędkości płynu oraz zastosowaniu obliczeniowej mechaniki płynów do modelowania mieszania. W końcowej części tego rozdziału Autorka przedstawiła dotychczasowy stan wiedzy na temat mieszadła PMT, opierający się głównie na wynikach pomiarów podstawowych parametrów pracy mieszadła. Autorka podkreśliła przy tym, że nadal niewiele wiadomo o polu prędkości, polu szybkości ścinania, czy o położeniu i rozmiarach obszaru intensywnego mieszania w cieczach pseudoplastycznych. Tego typu dane, łącznie z wynikami modelowania CFD są już dostępne dla innych mieszadeł hydrofoliowych (Chem. Eng. Sci., 2003, 58, 2141; Chem. Eng. Proc, 2015, 93, 66). Szkoda, że nie zostały one przytoczone w przeglądzie literatury chociażby po to, aby przeanalizować zastosowaną przez ich autorów metodykę badawczą w perspektywie zamierzeń Autorki.

Tezy badawcze, które Autorka zaplanowana udowodnić w ramach swojej pracy doktorskiej, wynikające z nich cele i szczegółowy zakres badań zostały przedstawione w rozdziale 3. Za kluczowy problem naukowy do rozwiązania uznano opracowanie metody eksperymentalnej i sformułowanie modeli matematycznych, w tym modelu CFD, do identyfikacji obszaru intensywnego mieszania mieszadła PMT oraz określenia wpływu geometrii mieszalnika i parametrów procesowych na rozmiary tego obszaru. Dodatkowo podjęto się opracowania metody obliczeniowej do lokalizowania stref w mieszalniku, w których dominuje odpowiedź sprężysta nad odpowiedzą lepkościową na ścinanie w płynie lepkosprężystym.

Zasadniczą część pracy doktorskiej stanowią rozdziały od 4 do 7. Rozdział 4 zawiera informacje o stanowisku badawczym m.in. opis geometrii mieszalnika zbiornikowego z przegrodami i mieszadła PMT oraz trzech cieczy testowych: wody, roztworu wodnego polimeru kwasu akrylowego (Carbopol 940) i roztworu wodnego karboksymetylocelulozy (CMC). W tym rozdziale przedstawiono także siatki obliczeniowe zastosowane w modelowaniu przepływu cieczy testowych w mieszalniku. Z kolei rozdział 5 poświęcony jest badaniom ekspe-

rymentalnym. Autorka przedstawiła w nim wyniki pomiarów krzywych płynięcia 0,2% roztworów wodnych Carbopolu 940 i CMC oraz zaproponowana, aby do opisu lepkości pozornej tych roztworów użyć modelu potęgowego. Użycie tak prostego modelu jak model potęgowy do opisu własności reologicznych roztworu Carbopolu 940, zwłaszcza w obszarze małych szybkości ścinania, jest rzadko spotykane w literaturze przedmiotu. Najczęściej do obliczania naprężeń lepkich w roztworach Carbapolu 940 wykorzystuje się model Herschela-Bulkleya uwzględniający graniczne naprężenie płynięcia lub jego kombinację z modelem Ostwalda-de Waele (Rheol. Acta, 2001, 40, 499; J. Non-Newtonian Fluid Mech., 2007, 142, 123; Chem. Eng. Sci., 2010, 65, 1288). Ewentualne istnienie granicy płynięcia lub jej brak ma duże znaczenie w modelowaniu przepływu i obliczeniach zasięgu strefy intensywnej cyrkulacji płynu, dlatego dziwi brak w pracy doktorskiej szerszej dyskusji dotyczącej własności reologicznych roztworów Carbopolu 940. W dalszej części rozdziału 5 Autorka opisała procedurę pomiaru: momentu obrotowego i siły osiowej na wale mieszadła PMT oraz pola prędkości mieszanej cieczy przy użyciu techniki PIV. Przedstawiona została również metoda wizualnej identyfikacji regionu intensywnej cyrkulacji cieczy w mieszalniku. Wyniki pomiarów i wizualizacji zostały przedstawione: w tabelach, na wykresach i mapach prędkości płynu oraz na zdjęciach przekrojów płaszczyzną światła laserowego strefy intensywnego mieszania, tworząc w ten sposób obszerną bazę danych doświadczalnych. W rozdziale 6 przedstawiono kluczowe założenia modelu CFD mieszalnika z przegrodami bocznymi i mieszadłem PMT. Opisano również metodę prowadzenia złożonych wieloetapowych obliczeń pola prędkości cieczy w układzie badawczym oraz porównano wyniki doświadczalne z wynikami modelowania CFD. Stwierdzono dobrą zgodność porównywanych wyników w odniesieniu do liczb mocy i nacisku osiowego, a także w przypadku składowych prędkości płynu w bezpośrednim sąsiedztwie mieszadła PMT dla cieczy testowych o różnych własnościach reologicznych. Rozdział 7 Autorka poświęciła na analizę porównawczą map wektorowych i rozkładów prędkości mieszanych cieczy testowych, uzyskanych w drodze symulacji CFD. Porównywane rozkłady prędkości cieczy testowych obliczono dla tych samych lub bardzo zbliżonych częstości obrotowych mieszadła, ale dla diametralnie różnych warunków przepływu. W przypadku wody (płyn newtonowski) był to przepływ burzliwy, a w przypadku roztworu CMC (płyn lepkosprężysty) przepływ przejściowy, zaś w przypadku roztworu Carbopolu 940 (płyn pseudoplastyczny) przepływ laminarny. Oznacza to, że zaobserwowane zmiany w kształcie i rozmiarach pętli cyrkulacji pierwotnej i wtórnej wynikają również z działania różnych mechanizmów transportu pędu płynu. Zwiększenie lepkości wody i roztworu CMC za pomocą odpowiednio dobranych dodatków, pozwoliłoby wyodrębnić wpływ efektu rozrzedzania ścinaniem

i odpowiedzi sprężystej mieszanego płynu na jego cyrkulację w badanym układzie. W dalszej części rozdziału 7 Autorka przedstawiła własny model do obliczania średnicy strefy intensywnego mieszania (kawerny) powstającej podczas mieszania cieczy pseudoplastycznych wokół obracającego się mieszadła. Model ten opracowano poprzez odpowiednie skorelowanie ze sobą: średnicy kawerny, sumy sił stycznych i osiowych działających na mieszadło PMT, częstości obrotów i średnicy mieszadła oraz parametrów modelu reologicznego. Średnica kawerny obliczona za pomocą własnego modelu Autorki jest zgodna zarówno z wynikami doświadczalnymi jak i z wynikami symulacji numerycznych przepływu płynów pseudoplastycznych w mieszalnikach wyposażonych w mieszadła wytwarzające strumień osiowy cieczy. W pracy przeanalizowano również wpływ częstości obrotowej mieszadła PMT na wysokość formującej się wokół niego kawerny i stwierdzono rozbieżność wyników symulacji numerycznej przepływu z wynikami doświadczalnymi. Niewykluczone, że gdyby zasięg strefy intensywnego mieszania oszacować w oparciu o przebieg trajektorii elementów płynu, to uzyskano by w tym przypadku znacznie lepszą zgodność z doświadczeniem. W ostatnim punkcie rozdziału 7 dokonano identyfikacji regionów w otoczeniu pracującego mieszadła PMT, w których może dominować odpowiedź sprężysta płynu lepkosprężystego nad odpowiedzią lepkościową. Wiedząc, że dla roztworu CMC istnieje graniczna szybkość ścinania, powyżej której pierwsza różnica naprężeń normalnych jest większa od naprężeń stycznych, można taki region zlokalizować przeliczając wyniki pomiarów prędkości na rozkład szybkości ścinania.

Podsumowanie i wnioski końcowe, wynikające z przeprowadzonych badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przepływu trzech cieczy testowych o różnych własnościach reologicznych, przedstawiono w rozdziale 8. Moim zdaniem jedna z tez badawczych pracy odnosząca się do możliwości identyfikacji regionów mieszanej cieczy, charakteryzujących się przewagą efektów sprężystych nad efektami lepkościowymi, wymaga dodatkowych badań modelowych. Badania te powinny uwzględniać m.in. periodyczną zmienność pola przepływu w mieszalniku wyposażonym w mieszadło o skończonej liczbie łopatek.

2. Ocena tematyki badawczej, dokonań badawczych i publikacyjnych

Operacje mieszania cieczy o złożonej reologii prowadzone w mieszalnikach zbiornikowych wymagają bardzo starannego doboru zarówno geometrii mieszadła, jego wielkości i położenia w mieszalniku, jak i warunków procesowych. Istnieją pewne ogólne wskazówki projektowe dla różnych typów mieszadeł pozwalające przewidzieć zachowanie się mieszanego płynu na podstawie jego własności reologicznych. Jednak po to, aby prawidłowo wyznaczyć: zużycie energii na mieszanie, czas osiągnięcia zadanego stopnia wymieszania, zidenty-

fikować położenie i rozmiary stref martwych w mieszalniku lub maksymalną szybkość ścinania płynu konieczne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych i modelowych. Cenne są zwłaszcza wyniki pomiarów pola prędkości cieczy nienewtonowskiej wykonane za pomocą metod nieinwazyjnych tj. anemometria obrazowa PIV oraz precyzyjna wizualizacja procesu mieszania. Doskonałym uzupełnieniem badań eksperymentalnych jest obliczeniowa mechanika płynów, które pozwala wyznaczyć złożone wielkości hydrodynamiczne tj.: szybkość ścinania lub szybkość rozpraszania energii mechanicznej, fluktuacje stężeń składników mieszaniny, czy rozmiary i morfologia niewymieszanych pakietów płynu z trudną do osiągnięcia lub wręcz niedostępną dla metod eksperymentalnych rozdzielczością przestrzenną.

Literatura przedmiotu sugeruje, że tzw. mieszadła hydrofoliowe stanowią ważną alternatywę wobec mieszadeł szybkoobrotowych o prostszej geometrii łopatek, np. mieszadeł z płaskimi, pochylonymi łopatkami, zarówno w przypadku mieszania cieczy newtonowskich jak i cieczy o złożonych własnościach reologicznych. Mieszadła hydrofoliowe mają łopatki o zmiennym kącie pochylenia w miarę oddalania się od osi obrotu mieszadła. Dzięki temu zachowana jest stałość skoku linii śrubowych tworzących powierzchnię łopatki mieszadła. W efekcie mieszadła hydrofoliowe wytwarzają silny strumień osiowy cieczy o równomiernym rozkładzie prędkości w przekroju poprzecznym strumieni. Sprzyja to powstaniu intensywnej cyrkulacji cieczy w mieszalniku przy niskim zużyciu energii. Ponadto mieszadła hydrofoliowe generują znacznie mniejsze szybkości ścinania w odróżnieniu od mieszadeł z prostymi łopatkami, co może mieć znaczenie podczas przetwarzania materiałów wrażliwych na naprężenia mechaniczne. Jeżeli mieszana ciecz jest silnie rozrzedzana przez ścinanie lub ma granicę płynięcia, to nawet zastosowanie mieszadła hydrofoliowego może nie zapobiec podziałowi objętości mieszanej cieczy na intensywnie mieszany region wokół obracającego się mieszadła i znajdujący dalej od mieszadła obszar o bardzo słabej cyrkulacji cieczy. Jednym z mieszadeł hydrofoliowych, którego pracę w cieczach pseudoplastycznych zbadano do tej pory w ograniczonym zakresie, jest mieszadło Prochem Maxflow T. Wobec tego podjęcie się przez Doktorantkę badań nad mieszaniem płynów nienewtonowskich za pomocą mieszadła hydrofoliowego PMT jest w pełni uzasadnione ze względów praktycznych i z naukowego punktu widzenia.

Krytyczny przegląd literatury przedmiotu, różnorodność i złożoność zastosowanych przez Doktorantkę metod eksperymentalnych, w tym bardzo skomplikowanej techniki anemometrii obrazowej PIV, szerokie wykorzystanie metod obliczeniowej mechaniki płynów, poprawna analiza wyników badań doświadczalnych i modelowych oraz umiejętna modyfikacja istniejących korelacji do obliczania średnicy intensywnie mieszanego regionu doprowadziły do powstania pracy doktorskiej i szeregu publikacji naukowych. Prace te wnoszą nowe

treści do istniejącego stanu wiedzy na temat mieszania płynów pseudoplastycznych, i w pewnym stopniu także płynów o własnościach lepkosprężystych, w mieszalnikach zbiornikowych wyposażonych w mieszadła hydrofoliowe.

Za główne dokonania Doktorantki uważam:

- stworzenie obszernej bazy danych pomiarowych charakteryzujących pracę mieszadła PMT w cieczach newtonowskich, pseudoplastycznych i lepkosprężystych,
- opracowanie i weryfikacja modelu CFD o wielostopniowej strukturze do obliczeń pola prędkości i innych wielkości hydrodynamicznych charakteryzujących przepływ laminarny i burzliwy cieczy newtonowskich i pseudoplastycznych w mieszalniku zbiornikowym z mieszadłem PMT,
- sformułowanie uniwersalnej korelacji do obliczania średnicy toroidalnej kawerny, wypełnionej intensywnie mieszaną cieczą, powstającą wokół mieszadeł wytwarzających strumień osiowy cieczy w warunkach przepływu laminarnego i przejściowego.

Doktorantka jest współautorką 1 publikacji w czasopiśmie naukowym z listy filadelfijskiej, 4 publikacji w czasopismach naukowych znajdujących się na liście punktowanej MNiSW oraz 1 pracy przedstawionej na międzynarodowej konferencji naukowej.

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Lektura rozprawy doktorskiej nasunęła szereg uwag o charakterze merytorycznym.

a) Definicja płynu przedstawiona na początku podrozdziału 2.1 jest nieprecyzyjna. Pierwsze zdanie tego podrozdziału jest tautologią. Z kolei w drugim zdaniu Autorka nie określiła o jakie naprężenie w płynie Jej chodzi.

b) Akapit tekstu, znajdujący się bezpośrednio pod wzorem (2.7), nie uwzględnia płynów z granicą płynięcia, których lepkość pozorna dąży do nieskończoności dla małych szybkości ścinania.

c) W pierwszym akapicie tekstu na stronie 29 pominięto fakt, że obracające się mieszadła wytwarzają również przepływ okrężny cieczy.

d) W paragrafie 2.2.2 stwierdzono, że wypadkowa siła nacisku osiowego na mieszadło jest równa strumieniowi pędu płynu zgodnie ze wzorem (2.27). Tymczasem po to, aby obliczyć tę siłę należałoby zbilansować pęd płynu dopływającego i odpływającego z objętości kontrolnej otaczającej mieszadło oraz uwzględnić różnice ciśnienia płynu nad i pod mieszadłem.

e) W rozdziale 2.3 na stronie 40 napisano, że pomiar prędkości płynu za pomocą rurek spiętrzających jest możliwy tylko w przepływie uwarstwionym, co jest nieprawdą. Rurki spiętrzające można również stosować do pomiarów prędkości płynu w przepływie burzliwym.

f) W tabeli 5.1 na stronie 84 zamieszono współczynniki konsystencji i indeksy płynięcia dla roztworów wodnych Carbopolu 940 i CMC wyznaczone na podstawie pomiarów reologicznych. Niestety nie podano jak obliczono te parametry i dla jakiego zakresu szybkości ścinania obowiązują.

g) W paragrafie 5.2.1 nie zamieszczono informacji o dokładności pomiaru momentu obrotowego na wale mieszadła.

h) W paragrafie 5.2.3. zabrakło informacji dotyczącej liczby przechwytywanych przez kamerę cyfrową obrazów w każdej serii pomiarowej. Nie przedstawiono również oszacowania błędu pomiaru prędkości średniej i fluktuacyjnej przy użyciu techniki PIV.

i) Metoda badania wpływu dodatku rodaminy na właściwości reologiczne roztworu Carbopolu 940, opisana w paragrafie 5.2.4 na stronie 92, jest dalece nieprecyzyjna za względu na niejednorodność szybkości ścinania w mieszalniku. Sam fakt, że moc mieszania nie ulega zmianie nie dowodzi jeszcze, że krzywa płynięcia roztworu z rodaminą będzie identyczna z krzywą płynięcia roztworu bez dodatku rodaminy.

j) W paragrafie 5.3.2 użyto terminów „masa pozorna zbiornika wraz załadunkiem" i „masa zredukowana" bez objaśnienia.

k) Na rysunku 5.21 przedstawiono 18 map prędkości cieczy nie podając informacji o odstępach czasu pomiędzy kolejnymi mapami.

l) W tabeli 6.1 podano bez uzasadnienia granice dolnego i górnego zakresu newtonowskiego dla roztworów Carbopolu 940 i CMC, zastosowane później w obliczeniach CFD.

4. Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca wyróżnia się dbałością o poprawność językową i niewielką liczbą błędów edycyjnych. Przytaczam zauważone błędy.

a) Strona 24, wiersz 12 od dołu: jest „(lepkosprężystych.", powinno być „(lepkosprężystych)."

b) Strona 40, wiersz 17 od góry: jest „pomiarowe", powinno być „pomiarowej".

c) Strony 58 i 59, wzory 2.54, 2.55 i 2.57: nie podano definicji wielkości oznaczonej symbolem „P".

d) Strona 61, wiersz 7 od dołu: jest „koniczne", powinno być „konieczne".

e) Strona 137, wiersz 1 od dołu: jest „cyrkulayjne", powinno być „cyrkulacyjne".

f) Strona 166, pozycja 2: brak zakresu stron.

5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Anny Story spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję do Rady Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.