

Dr hab. inż. Magdalena Cudak, prof. ZUT  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej  
Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej  
Al. Piastów 42, 71-065 Szczecin  
[cudak@zut.edu.pl](mailto:cudak@zut.edu.pl)

Szczecin, 29.08.2023

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza  
Pt. „Mieszanie nieustalone gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłem o wygiętych łopatkach”  
Promotor pracy: dr hab. inż. Szymon Woziwodzki

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza została wykonana na zlecenie Pani Dziekan Wydziału Technologii Chemicznej, Prof. dr hab. inż. Ewy Kaczorek zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Chemiczne Politechniki Poznańskiej nr RD-15/3/2023 z dnia 4 lipca 2023 roku.

Najczęściej w przemyśle stosowane są zbiorniki z przegrodami oraz centralnie umieszczonym wałem mieszadła, które gwarantują uzyskanie odpowiednich warunków panujących w takim układzie (np. odpowiednią cyrkulację cieczy). Niestety w niektórych przypadkach np. dla cieczy o dużych lepkościach czy dla układów, w których występuje faza biologiczna przegrody mogą niekorzystnie wpływać na warunki panujące w mieszalniku np. w wyniku tworzenia się zastojów cieczy w ich okolicach, czy też stanowić problem przy zachowaniu odpowiedniej sterylności układu. W takich sytuacjach konieczne jest usunięcie przegród co jednak wiąże się, szczególnie przy wyższych częstościach obrotów mieszadła, z pogorszeniem panujących w mieszalniku warunków m.in. wystąpieniem cyrkulacji okrężnej czy też pojawieniem się leja. Aby do tego nie dopuścić konieczna jest modyfikacja takiego mieszalnika poprzez np. inne usytuowanie wału mieszadła (niecentryczne, ukośne czy boczne) lub zmianę sposobu mieszania układów jedno czy wielofazowych z mieszania ustalonego na mieszanie nieustalone ze zmienną częstością obrotów mieszadła i/lub zmiennym kierunkiem obrotów wału mieszadła. Autor przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej podjął się badań mających na celu możliwość zastąpienia mieszania ustalonego mieszaniem nieustalonym dla układów jedno i dwufazowych w mieszalniku bez przegród, z pojedynczym mieszadłem. W celu znalezienia jak najkorzystniejszej konfiguracji zbiornik-mieszadło w badaniach zastosował zaprojektowane i wykonane w Zakładzie Inżynierii i Aparatury Chemicznej mieszadła BT-6, CD-6, RT-6, Scaba 6SRGT oraz Maxflo W. Ważnym elementem pracy jest powiązanie uzyskanych wyników badań stopnia zatrzymania gazu czy objętościowego współczynnika wnikania masy z mocą mieszania. Pozwoli to na znalezienie takiego układu, który zapewni uzyskanie odpowiednich warunków (parametrów) prowadzonego procesu przy jak najmniejszym nakładzie energetycznym. Co w dzisiejszych czasach jest aspektem bardzo pożądanym w każdym procesie.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza została wykonana w Instytucie Technologii i Inżynierii Chemicznej Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej, pod kierunkiem dra hab. inż. Szymona Woziwodzkiego.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy 205 stron. Struktura rozprawy jest typowa dla prac o charakterze doświadczalnym. Praca składa się z: „Wprowadzenia”, „Analizy

*literaturowej zagadnienia*”, „*Części eksperymentalnej*” oraz „*Wyników badań*”. Zasadniczą część rozprawy doktorskiej uzupełniają: spis ważniejszych symboli i skrótów umieszczony na początku rozprawy oraz streszczenia po polsku i angielsku, bibliografia oraz informacja o aktywności naukowej Autora znajdujące się na końcu rozprawy doktorskiej. W rozprawie zamieszczono 172 rysunki, 31 tabel, 110 równań oraz 140 pozycji literaturowych.

We „*Wprowadzeniu*” (2 strony) Autor omówił problemy jakie mogą występować w przypadku zamontowania przegród w mieszalniku oraz co zrobić, aby uzyskać porównywalne, do zbiornika z przegrodami, warunki panujące w mieszalniku bez przegród np. inne usytuowanie wału mieszadła lub zastąpienie mieszania ustalonego mieszaniem nieustalonym.

W „*Analizie literaturowej zagadnienia*” (61 stron) podzielonej na 5 rozdziałów Pan mgr Sebastian Szymon Frankiewicz szczegółowo przeanalizował, na podstawie dostępnych w literaturze prac, zagadnienia dotyczące mieszania nieustalonego (m.in. modeli ruchu nieustalonego - dominacji sił bezwładności i oporu, rodzaju fal), mocy mieszania (dla mieszania ustalonego oraz nieustalonego w układach jednorodnych oraz gaz-ciecz) oraz wymiany masy (teorie wymiany masy oraz parametry - średnia średnica objętościowo-powierzchniowa pęcherza gazowego  $d_{32}$ , powierzchnia wymiany masy  $a$ , stopień zatrzymania gazu  $\varepsilon$  i  $\phi$  oraz objętościowy współczynnik wnikania masy  $k_{La}$  - pozwalające w sposób efektywny ocenić proces wymiany masy przebiegający między fazą ciągłą a rozpraszonym gazem). W ostatnim rozdziale tej części Pracy Autor podsumował część literaturową oraz w oparciu o przeprowadzoną analizę literaturową sformułował następujące hipotezy badawcze:

„1. Mieszanie nieustalone mieszadłami z wygiętymi łopatkami oraz typu „hydrofoil” pozwala uzyskać co najmniej takie same wartości objętościowego współczynnika wymiany masy w porównaniu do mieszania ustalonego.

2. Stopień zatrzymania gazu mieszania nieustalonego zależy od zdolności roztworu do tłumienia koalescencji.”

Dobór, kolejność oraz sposób omawiania zagadnień w tej części pracy jej właściwy i świadczy o dużej wiedzy teoretycznej dotyczącej analizowanego zagadnienia.

W „*Części eksperymentalnej*” (18 stron), podzielonej na 2 rozdziały, Pan mgr Sebastian Szymon Frankiewicz przedstawił cel pracy (Rozdział 6) oraz materiały i metody stosowane w jego realizacji (Rozdział 7). Celem rozprawy doktorskiej (Rozdział 6) była analiza mieszania nieustalonego układów dwufazowych gaz-ciecz w mieszalniku bez przegród, z pojedynczym mieszadłem. Szczegółowe cele pracy badawczej obejmowały:

- zaprojektowanie i wykonanie mieszadeł RT-6, CD-6, BT-6, Scaba 6SRGT oraz Maxflo W,
- opracowanie sposobu pomiaru stopnia zatrzymania gazu z wykorzystaniem czujnika rezystancyjnego eTape,
- analizę mocy mieszania nieustalonego gaz-ciecz,
- analizę stopnia zatrzymania gazu oraz określenie wpływu stężenia roztworu elektrolitu (NaCl),
- analizę objętościowego współczynnika wnikania masy oraz określenie wpływu stężenia roztworu elektrolitu (NaCl),
- porównanie uzyskanych wyników dla mieszania ustalonego i nieustalonego.

Zakres przeprowadzonych badań został omówiony w Rozdziale 7 „*Materiały i metody*”. Badania pozwalające na zrealizowanie celu pracy zostały wykonane w cylindrycznym zbiorniku, w którym wysokość słupa cieczy równała się średnicy wewnętrznej mieszalnika. Do pomiaru momentu obrotowego i częstości obrotów mieszadła zastosowano miernik 4 AT MW-2006-2 współpracujący z momentomierzem tensometrycznym 1 MT2 firmy SENSOR-AT oraz przetwornik obrotowo-impulsowy MKO30 firmy Wobit. Do pomiaru stężenia rozpuszczonego tlenu zastosowano dwa rodzaje czujników: Elmetron COG-1 9 i OptiOx 21. Czujnik COG-1 współpracował z tlenomierzem Elmetron CO-505 natomiast czujnik OptiOx 21 współpracował z miernikiem SevenExcellence pH meter S400 22. Sondy umieszczone były w zbiorniku

pionowo w 3/4 wysokości słupa cieczy. Do pomiaru poziomu cieczy wykorzystano rezystancyjny czujnik poziomu cieczy eTape firmy Milone Technologies współpracujący z oprogramowaniem komputerowym. Badania zostały wykonane dla układu powietrze-woda oraz układów wykazujących zjawisko tłumienia koalescencji powietrze-wodne roztwory chlorku sodu o stężeniach 0,1M oraz 0,2M. Na wale zamontowane były, zaprojektowane i wykonane przez Pana mgra Sebastiana Szymona Frankiewicza, mieszadła o średnicy  $d = 0,1$  m: turbina Bakker BT-6, turbina Smitha CD-6, turbina Rushtona RT-6, Scaba 6SRGT oraz mieszadło osiowe Maxflo W. Stosowano dwa typy mieszania ustalonego różniące się kierunkiem obrotów mieszadła (F, R). W przypadku mieszania nieustalonego (S1-S5) zmiany częstości obrotów mieszadła odbywały się zgodnie z przebiegiem symetrycznej fali trójkątnej ze zmianą kierunku obrotów. W przypadku mieszadła Maxflo W oprócz fal symetrycznych, stosowano również fale niesymetryczne (A1-A4). W przypadku typów mieszania A1 i A3 przeważało pompowanie cieczy w kierunku dna mieszalnika, natomiast dla mieszania A2 i A4 przeważało pompowanie w kierunku zwierciadła cieczy.

W bardzo obszernej części „Wyniki badań” (95 stron) podzielonej na 5 rozdziałów Pan mgr Sebastian Szymon Frankiewicz szczegółowo omówił wyniki swoich badań oraz porównał je z wynikami dostępnymi w literaturze. Ze względu na bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań Autor wyniki podzielił na trzy części. W rozdziałach 8 i 9 przedstawił wyniki badań wpływu ustalonego i nieustalonego mieszania na moc mieszania uzyskaną w układzie jednofazowych oraz w układach gaz-ciecz. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant wyznaczył charakterystyki mocy mieszania ustalonego i nieustalonego zarówno dla układu jedno- jak i dwufazowego. Szkoda, że w przypadku układu jednofazowego przedstawił wyniki jedynie dla wody. Bardziej interesujące byłyby wyniki uzyskane dla 0.1M NaCl lub 0.2M NaCl. Najważniejsze w tej części pracy są wyniki obrazujące wpływ liczby Keulegana-Carpentera na wartości współczynnika bezwładności, współczynnika oporu oraz względnego współczynnika oporu a także na ich podstawie wyznaczone równania korelacyjne (99-101) oraz (104-107). W rozdziale 10 opisał, przeanalizował i porównał wyniki stopnia zatrzymania gazu w cieczy uzyskane dwoma metodami: metodą objętościową oraz metodą eTape. Uzyskane wyniki wpływu jednostkowej mocy mieszania na stopień zatrzymania gazu Doktorant przedstawił na kilkunastu rysunkach. Niestety zbyt duża liczba serii pomiarowych, dodatkowo oznaczonych dziwnymi znacznikami, zestawionych na jednym rysunku znacznie utrudnia ich analizę. Nowością w tej części pracy są opracowane przez Pana mgra Sebastiana Szymona Frankiewicza równanie (108) uwzględniające wpływ jednostkowej mocy mieszania, pozornej liniowej prędkości gazu i parametru określającego zdolność pęcherzy do koalescencji na stopień zatrzymania gazu oraz model (109) zależności stopnia zatrzymania gazu od czasu. Ostatnie wyniki, przedstawione w rozdziale 11, dotyczyły wpływu analizowanych parametrów na objętościowy współczynnik wnikania masy. Współczynnik  $k_{La}$ , dla mieszania ustalonego i nieustalonego, wyznaczano w oparciu o pomiar stężenia tlenu rozpuszczonego w roztworze. Również w tej części pracy uzyskane wyniki zostały opracowane w postaci zależności (76) uwzględniającej wpływ jednostkowej mocy mieszania oraz pozornej liniowej prędkości gazu na objętościowy współczynnik wnikania masy. W rozdziale 12 Autor przedstawił podsumowanie oraz wnioski wynikające z uzyskanych wyników pracy.

Dzięki odpowiednio dobranym metodom i narzędziom, które umożliwiły przeprowadzenie zaplanowanych badań założony cel pracy został w pełni zrealizowany. Przeprowadzona przez Pana mgra Sebastiana Szymona Frankiewicza analiza wyników uzyskanych w ramach pracy doktorskiej oraz porównanie ich z wynikami innych Autorów świadczy o umiejętności Doktoranta do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Do najważniejszych osiągnięć Pana mgra Sebastiana Szymona Frankiewicza można zaliczyć:

- zaproponowanie równań korelacyjnych (99-101) oraz (104-107),

- zaproponowanie równania (108) uwzględniającego wpływ jednostkowej mocy mieszania, pozornej liniowej prędkości gazu i parametru określającego zdolność pęcherzy do koalescencji na stopień zatrzymania gazu oraz modelu (109) określającego zależność stopnia zatrzymania gazu od czasu,
- zaproponowanie równania korelacyjne pozwalające na wyznaczenie wartości objętościowego współczynnika wnikania masy oraz stopnia zatrzymania gazu podczas mieszania ustalonego i nieustalonego dla mieszadeł RT-6, BT-6, CD-6, Scaba 6SRGT i Maxflo W,
- wykazanie, że mieszanie nieustalone pozwala na uzyskiwanie odpowiedniej intensywności wymiany masy przy dużo niższych nakładach energetycznych w porównaniu do mieszania ustalonego.

Recenzowana rozprawa doktorska nie jest wolna od pewnych usterek i niedociągnięć o charakterze formalnym i merytorycznym. Chciałabym, żeby podczas obrony Doktorant odniósł się do tych drugich.

Uwagi formalne:

1. W pracy wymiennie stosowane jest gaz-ciecz lub gaz ciecz.
2. W tekście pracy pojawiają się różne oznaczenia tych samych wielkości  $C_i$  i  $C_I$ ,  $C_d$  i  $C_D$  oraz  $M_i$  i  $M_I$  oraz  $M_d$  i  $M_D$  – czym się one różnią?
3. Co oznacza wstępna średnica pęcherzyka  $d_{B,i}$ ?
4. Czym różni się mieszadło RT od R100?
5. Str. 20, „Tabela 3. Zestawienie mocy mieszania układu jednorodnego dla mieszania ustalonego i nieustalonego”. W Tabeli 3 zestawiono wartości mocy mieszania czy liczby mocy mieszania.
6. Str. 32-33, takie same równania 27 i 28.
7. Str. 103-104 „Na rysunku 65 przedstawiono przykładowy wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych dla równania (99) i mieszadła RT-6.” Natomiast na rysunku jest odwrotnie: wartości przewidywane do wartości obserwowanych. Tak samo jest na rysunkach: 66, 89, 99, 114, 119, 144, 152, 157, 164 i 168.
8. „Stopień zatrzymnia” zamiast stopień zatrzymania; „sadek” zamiast spadek; „rozwiązani” zamiast rozwiązaniu; „stężnie” zamiast stężenie; „wstępujących” zamiast występujących; „zamian” zamiast zmian; „zakrzywiony” zamiast zakrzywionych.

Uwagi merytoryczne:

1. Str. 21 - „Moc mieszania oraz właściwości płynu wpływają na rozmiar pęcherzy gazowych (rozdział 4.1).” Jak moc mieszania wpływa na rozmiar pęcherzy gazowych?
2. Str. 28 - „Wpływ lepkości dynamicznej na wielkość pęcherzy jest bardziej złożony dla czystych cieczy o lepkości dynamicznej zbliżonych do lepkości wody i mniejszej nie obserwuje się jej wpływu.” Co znaczy że wpływ lepkości jest bardziej złożony skoro pod koniec zdania jest „...nie obserwuje się jej wpływu”?
3. Str. 54 - „Z przeprowadzonych badań wynika, że stopień zatrzymania jest uzależniony od kierunku pompowania cieczy i wartość minimalną przyjmuje dla pompowania cieczy w dół, natomiast maksymalną dla pompowania cieczy w górę. Jest to tłumaczone zmianą sposobu podawania gazu z bezpośredniej w przypadku pompowania w górę na pośrednią w przypadku pompowania w dół, co prowadzi do zwiększenia mocy i spadku stopnia zatrzymania gazu.” Proszę wyjaśnić co znaczy bezpośrednio podawanie gazu i pośrednie podawanie gazu.

4. Str. 77-80 - Najczęściej stosunek średnicy mieszadła do średnicy zbiornika wynosi  $d/D = 0,33$  lub  $d/D = 0,5$ . Wyniki przedstawione w rozprawie były wykonane w mieszalniku o średnicy wewnętrznej  $D = 0,29$  m. Dla tej średnicy standardowa średnica mieszadła powinna wynosić  $d = 0,0957$  m (dla  $d/D = 0,33$ ) lub  $d = 0,145$  m (dla  $d/D = 0,5$ ). Dlaczego zdecydowano się wykonać mieszadła o niestandardowej średnicy  $d = 0,1$  m czyli  $d/D = 0,345$ . W kolejnych rozdziałach pracy Autor porównywał swoje wyniki z wynikami dostępnymi w literaturze dla mieszadeł o standardowej średnicy. Np. Czy różnice w wartościach  $CD = 2,24$  (z badań) oraz  $CD = 1,98$  [44] (str. 101) nie wynikają z różnic w średnicach porównywanych mieszadeł? Uzyskane w pracy wyniki są o około 10-13% wyższe.
5. Str. 96 - Rys. 56 dotyczy zbiornika z przegrodami czy bez przegród? Przedstawiona na rys. 56 wartość  $Ne = 2.11$  dla mieszadła Maxflo W jest podawana również na rys. 57 gdzie w podpisie jest „Rysunek 57. Zależność liczby mocy od liczby Reynoldsa dla mieszania A1-A4 oraz S1-S5 – Maxflo W, mieszanie bez przegród, woda” oraz na rys. 58 – „Rysunek 58. Zależność liczby mocy od liczby Reynoldsa dla mieszania A1-A4 oraz S1-S5 – Maxflo W, mieszanie z przegrodami, woda”
6. Str. 111-112, rys. 73-76 - Dlaczego dla mieszadła RT oraz mieszania ustalonego wartość RPD jest mniejsza niż dla mieszania nieustalonego natomiast dla pozostałych mieszadeł stwierdzono sytuację odwrotną?
7. Str. 115, rys. 79 - Sposób prezentacji wyników badań przedstawionych na rys. 79 uniemożliwia potwierdzenie lub nie wniosku postawionego przez Autora że: „Analiza uzyskanych danych wskazuje, że wraz ze wzrostem stężenia roztworu wpływ kształtu łopatki na moc względną mieszania maleje.”
8. Str. 130-131 - „W tym zakresie obserwuje się spadek wartości  $C_{Dg}/C_{D0}$  wraz ze wzrostem  $KC$ . U Woziwodzkiego [21] dla zakresu  $KC < 7$  obserwowany był wzrost względnego współczynnika oporu wraz ze spadkiem  $KC$ . Różnica może wynikać z tego, że badania Woziwodzkiego [21] prowadzone były w szerszym zakresie  $KC$ .” Szerszy zakres raczej nie powinien mieć wpływu na obserwowane wartości i ich wzrost czy spadek. Natomiast spadek  $C_{Dg}/C_{D0}$  wraz ze wzrostem  $KC$  oraz wzrost względnego współczynnika oporu wraz ze spadkiem  $KC$  to ta sama tendencja i nie ma tu różnicy.
9. Str. 135 - „W przypadku mieszadła Maxflo W obserwuje się inną zależność względnego współczynnika bezwładności  $C_{Ig}/C_{I0}$  od liczby  $KC$ . Współczynnik  $C_{Ig}/C_{I0}$  staje się niezależny od liczby Keulegana-Carpentera. Dla  $KC = 13$  mieści się on w zakresie od 0,6 do 1,22, natomiast dla  $KC = 80$  od 0,48 do 1,33.” Przy tak dużych zakresach raczej trudno jest stwierdzić o niezależności współczynnika od liczby  $KC$ . Można jedynie stwierdzić, że nie można określić wyraźnej tendencji wzrostu lub spadku wartości współczynników ze wzrostem liczby  $KC$ .
10. Str. 150, rys. 126 - Dlaczego wyższe wartości  $\varepsilon$  dla układu z NaCl w porównaniu do wody otrzymano jedynie dla wyższych wartości jednostkowej mocy mieszania.
11. Str. 151, rys. 127 - Dlaczego dla mieszania nieustalonego na rys. 127 przedstawiono wpływ  $E_0$  w funkcji  $K_g$  a nie  $K_{g,n}$ ?
12. Str. 165 - „Aby uzyskać wartość  $k_{La} = 0,00116$  1/s zastosowanie mieszania  $F$  wymaga użycia o 162% wyższej mocy jednostkowej  $P_g/V$  w stosunku do mieszania typu S1-S5.” Którego mieszadła to dotyczy, ponieważ na żadnym z prezentowanych rysunków nie ma punktów pomiarowych odpowiadających tej wartości  $k_{La}$ .
13. Str. 167-171 - „Dla wysokich wartości mocy jednostkowej  $P_g/V > 3000$  W/m<sup>3</sup> dla mieszania ustalonego obserwuje się stabilizację wartości  $k_{La}$ . W celu potwierdzenia występowania tego zjawiska wykonano badania z zastosowaniem czujnika OptiOx o niższej stałej czasowej  $\tau$  aby wyeliminować potencjalne ograniczenia elektrody COG-1. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 153, który potwierdza, że również w przypadku pomiarów

*tych czujnikiem pojawia się stabilizacja wartości  $k_{LA}$  przy najwyższych wartościach  $P_g/V$ .”*  
W pracy podano obowiązujący dla mieszania ustalony zakres  $P_g/V \in (1; 3020) \text{ W/m}^3$ .  
Analizując wyniki przedstawione na rys. 147-150 jedynie dla mieszadła RT (rys. 147)  $P_g/V$  nieznacznie przekracza  $3000 \text{ W/m}^3$  i nawet na tym rysunku nie widać stabilizacji wartości  $k_{LA}$ . Dlaczego na rys. 147-150 przedstawiono wyniki dla 0.1M NaCl a na rys. 153 dla 0.2M NaCl?

14. Str. 188, wniosek 3 - *„Zaletą mieszania nieustalonego jest brak konieczności stosowania przegród, lecz trzeba mieć na uwadze wpływ ich obecności na mieszanie nieustalone zgodne z przebiegiem fali niesymetrycznej dla mieszadła Maxflo W.”* Skoro mieszanie nieustalone ma zastąpić przegrody to po co uwzględniać ich wpływ?

Przedstawione w recenzji pytania, uwagi i spostrzeżenia nie obniżają wartości poznawczej i aplikacyjnej przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej, stanowią jedynie podstawę do merytorycznej dyskusji podczas publicznej obrony.

Podsumowując stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza pt. „Mieszanie nieustalone gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłem o wygiętych łopatkach” spełnia wszystkie wymagania formalne i zwyczajowe określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. (D. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zmianami). Przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymogi dotyczące oryginalnego rozwiązania przez Autora zagadnienia naukowego oraz wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej w uprawianej dyscyplinie, a także wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Autora pracy naukowej. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Chemiczne Politechniki Poznańskiej o przyjęcie i dopuszczenie Pana mgr inż. Sebastiana Szymona Frankiewicza do dalszych etapów postępowania doktorskiego.