

Dr hab. inż. Krystian Czernek, profesor uczelni
Katedra Inżynierii Procesowej i Środowiska
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska

Opole, 10.08.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Frankiewicza pt. „Mieszanie nieustalone gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłem o wygiętych łopatkach”.

Podstawą prawną sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Dziekan Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Ewy Kaczorek, z dnia 4 lipca 2023 roku informujące o powołaniu przez Radę Dyscypliny Nauki Chemiczne mojej osoby na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Sebastiana Frankiewicza.

Praca doktorska wykonana została pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Szymona Woziwodzkiego.

Treść i zakres rozprawy

Mieszanie jest operacją jednostkową powszechnie stosowaną w niemal wszystkich gałęziach przemysłu. Efektywna realizacja procesów wymiany masy, ciepła czy też homogenizacji układu przy jak najniższych nakładach energetycznych jest niezwykle istotna i stanowi obecnie bardzo duże wyzwanie. Jako przykłady można tu wymienić procesy absorpcji, utleniania, chlorowania, uwodornienia, ozonowania oraz inne procesy biochemiczne. Klasyczny mieszalnik mechaniczny, w którym prowadzone jest mieszanie w zakresie przepływu burzliwego, wyposażony jest najczęściej w przegrody stosowane w celu ograniczenia cyrkulacji okrężnej cieczy. Zastosowanie przegród wiąże się z niedogodnościami takimi jak zaleganie zanieczyszczeń czy też utrudniona konserwacja. Przegrody w mieszalniku mogą mieć niekorzystny wpływ na proces krystalizacji, wpływając na wielkość kryształów, a w przypadku mieszania układów gaz-ciecz za przegrodami może gromadzić się gaz wskutek opływu przegrody przez ciecz. Rozwój mieszania mechanicznego podąża w kierunku poszukiwania zarówno nowych rozwiązań konstrukcyjnych jak i nowych metod realizacji procesu, pozwalających intensyfikować proces wymiany masy przy niższych nakładach

energetycznych. W niniejszej rozprawie zaproponowano rozwiązanie, jakim jest mieszanie nieustalone, w przypadku którego, modyfikacja istniejących rozwiązań konstrukcyjnych może ograniczać się jedynie do usunięcia przegród. Koszty inwestycji mogą zostać dodatkowo zredukowane, jeżeli mieszalnik zostanie wyposażony w falownik, co pozwoli poprzez modyfikację jego ustawień na realizowanie zmiany częstości obrotów mieszadła w czasie. Mieszanie nieustalone, w którym mieszadło porusza się ze zmienną częstością i/lub kierunkiem obrotów, pozwala na poprawę procesu mieszania w mieszalnikach bez przegród. Przeprowadzone dotychczas badania dotyczące mieszania nieustalonego układów gaz-ciecz dotyczyły m.in. mocy mieszania, stopnia zatrzymania gazu, struktur kawern gazowych oraz objętościowego współczynnika wnikania masy. Nie prowadzono dotychczas badań dla mieszadeł turbinowych o zakrzywionych łopatkach. Badania przeprowadzone przez Pana mgra inż. Sebastiana Frankiewicza wpisują się więc w tematykę mieszania nieustalonego gaz-ciecz. Praca doktorska jest ciekawa, poprawnie napisana i zredagowana, ma klasyczny i przejrzysty układ, kolorową oprawę graficzną, zawiera bogatą literaturę przedmiotu, głównie pochodzącą z ostatnich dwudziestu lat.

Celem rozprawy doktorskiej była analiza mieszania nieustalonego układów dwufazowych gaz-ciecz w mieszalniku bez przegród, z pojedynczym mieszadłem. Szczegółowe etapy prac badawczych 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,
- analizę objętościowego współczynnika wnikania masy k_{LA} oraz określenie wpływu stężenia roztworu elektrolitu (NaCl),
- porównanie uzyskanych wyników dla mieszania ustalonego i nieustalonego.

Po ustaleniu przedmiotu i celu badań zostały określone następujące hipotezy badawcze:

- 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,
- stopień zatrzymania gazu mieszania nieustalonego zależy od zdolności roztworu do tłumienia koalescencji.

Rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego oraz powinna wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną Autora w danej dziedzinie, jak i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że najważniejsze wymogi spełnia zarówno recenzowana praca, jak i Kandydat na doktora. Rozprawa została przedstawiona w postaci rękopisu wykonanego komputerowo i oprawionego. Praca składa się z 205 stron, zawiera stronę tytułową, za którą zostały zamieszczone podziękowania. Przedstawioną do recenzji pracę, składającą się z 12 rozdziałów, podzielić można na dwie zasadnicze części: część teoretyczną (rozdziały 1-5) oraz część doświadczalną (rozdziały 6-12). Całość poprzedza wykaz stosowanych oznaczeń oraz krótkie wprowadzenie. Kończą natomiast streszczenie pracy w językach polskim i angielskim, wykaz cytowanego piśmiennictwa oraz aktywność naukowa Autora. Tytuł rozprawy oddaje w pełni jej zawartość. Niespełna dwustronicowe wprowadzenie oraz sformułowany na stronie 74 cel pracy wprowadzają czytelnika w analizowane zagadnienia i w bardzo jasny sposób przedstawiają konieczność podjęcia proponowanych przez Autora badań. Część teoretyczna przedstawia studia literaturowe skupione głównie wokół mieszania nieustalonego układów jednofazowych oraz dwufazowych gaz-ciecz. Omówione zostały w niej podstawowe parametry pozwalające na scharakteryzowanie tych układów takie jak: moc mieszania, współczynnik oporu i bezwładności, względna moc mieszania, względny współczynnik oporu i bezwładności, średnia średnica pęcherza gazowego, stopień zatrzymania gazu, powierzchnia międzyfazowa, współczynnik wnikania masy oraz objętościowy współczynnik wnikania masy. Podsumowując tę część pracy stwierdzić należy, że Autor zarówno dobrze przygotował się teoretycznie do zaplanowanych badań, jak też dobrze uzasadnia konieczność ich podjęcia. Część doświadczalna omawia szeroko i szczegółowo metody badawcze oraz wyniki badań doświadczalnych. Ta część pracy jest najobszerniejsza i najważniejsza. Przy jego opracowaniu Autor wykazał się niezbędną wiedzą i umiejętnościami twórczego prowadzenia badań. Wszystkie prezentowane przez Doktoranta wyniki badań są bardzo dobrze udokumentowane z wykorzystaniem tabel, rysunków oraz zdjęć. Wszystkie rysunki w pracy zostały przygotowane starannie, a ich jakość nie budzi zastrzeżeń. Przeprowadzone badania odznaczają się oryginalnością i mają duży potencjał w aspekcie ich zastosowania w praktyce. Rozdział 12 podsumowuje uzyskane wyniki badań oraz przedstawia prawidłowo sformułowane wnioski. Dokonano w nim syntetycznej rekapitulacji osiągniętych wyników. Na końcu pracy Doktorant zawarł spis literatury i własnych publikacji. Przedstawiony przegląd literatury obejmuje 140 pozycji literaturowych oraz 3 publikacje Autora pracy, 2 rozdziały w monografii, 12 publikacji

w materiałach konferencyjnych wraz z 1 komunikatem, a także 10 posterów na konferencjach naukowych. Dodatkowo Autor pracy zamieścił informację o zrealizowanym stażu naukowym w firmie Zentiva k.s. Praga. Liczba cytowanych prac świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w dyscyplinie, którą uprawia.

Przedstawiona do recenzji praca napisana jest poprawnym językiem polskim. Praca zredagowana jest starannie, ale nie jest wolna od drobnych błędów edytorskich. Poniżej przedstawiam kilka wybranych z dostrzeżonych przeze mnie tego rodzaju niezręczności:

- Nieliczne błędy interpunkcyjne i stylistyczne np. K_g . – str. 22, c_{Ai} , – str. 35, $n'=1$ – str. 37, c_{Ap} . – str. 38, d_{32} , a , *do postaci* : – str. 41, $C_{22}=0,53$. – str. 48, $P_e/(V\rho)$. – str. 52, $Re_n > 10000$. – str. 97, n_{max} . – str. 167,
- Powoływanie się na źródła literaturowe niewystępujące w tekście np. [48] P. M. Doran, „Mixing”, w *Bioprocess engineering principles (2nd ed.)*, P. M. Doran, Red., London: Academic Press, 2013, s. 255–332, [51] „Chemineer impellers”, 1 wrzesień 2022. Dostępne na: <https://chemineer.com/products/chemineer/impellers/>, [52] „Mieszadła Lightning”, 1 wrzesień 2022. Dostępne na: <https://www.spxflow.com/lightnin/>
- Przedwcześnie sformułowany cel pracy, który jedynie w części odpowiada pełnemu, zamieszczonemu na str. 74: *Celem niniejszej pracy były analiza mieszania nieustalonego układów gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłami o zakrzywionych łopatkach (CD-6, BT-6, Scaba 6SRGT, Maxflo W) oraz porównanie uzyskanych wyników z mieszaniem ustalonym.* – str. 11,
- Błąd redakcyjny – str. 20: ... *w zależności od liczby Keulegana-Carpentera K_C .* Powinno być *w zależności od liczby Keulegana-Carpentera K_C ,*
- Błąd redakcyjny – str. 20: tabela 3 – jest: 4.9 oraz 7.14. Powinno być 4,9 oraz 7,14,
- Błąd redakcyjny – str. 25, str. 28: *gaz ciecz* powinno być *gaz-ciecz*,
- Błąd redakcyjny – str. 37: *Teorię warstewkowo-penetracyjną ...* powinno być *Teoria warstewkowo-penetracyjna ...*,
- Błąd redakcyjny – str. 46: ... *co niesie ze sobą sadek powierzchni wymiany masy ...* powinno być ... *co niesie ze sobą spadek powierzchni wymiany masy ...*,
- Błąd redakcyjny – str. 48: *Średnice pęcherzy maleją ze spadkiem napięcia ...* powinno być *Średnice pęcherzy maleją ze spadkiem napięcia ...*, ... *o lepkości dynamicznej zbliżonych do lepkości wody* powinno być ... *o lepkości dynamicznej zbliżonej do lepkości wody*,
- Błąd redakcyjny – str. 48: *powietrze woda* powinno być *powietrze-woda*,

- Błąd redakcyjny – *Rysunek 5. Mieszadła Chemineer: ...* – w opisie nie zaznaczono mieszadła f) turbina Scaba 6SRGT.
- Błąd redakcyjny – *Rysunek 37. Stanowisko badawcze: ... 7 – przegroda* – Celem pracy była analiza mieszania nieustalonego układów dwufazowych gaz-ciecz w mieszalniku bez przegród. Po co w mieszalniku ta przegroda?
- Str. 111 rys. 73, str. 111 rys. 74, str. 112 rys. 75, str. 112 rys. 76, str. 116 rys. 80, str. 117 rys. 81, str. 119 rys. 84, str. 119 rys. 85 oraz str. 128 rys. 99 – zbyt duża ilość danych pomiarowych na rysunkach utrudnia ich analizę.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny lub są drobnymi niedociągnięciami. Nie obniżają mojej zdecydowanie pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Ocena merytoryczna rozprawy – uwagi ogólne

Zadeklarowany cel pracy jest w znacznym stopniu wynikiem zainteresowań badawczych i dokonań Autora rozprawy. W pracy przedstawiono wyniki badań z wykorzystaniem mieszadeł: RT-6, BT-6, CD-6, Scaba 6SRGT oraz Maxflo W, dla układów jednorodnych oraz dwufazowych powietrze-woda oraz powietrze-wodne roztwory NaCl o różnym stężeniu. Stosowano prędkości przepływu gazu w szerokim zakresie ich zmian. Zastosowano mieszanie nieustalone o przebiegu symetrycznym oraz niesymetrycznym dla różnych częstotliwości oscylacji. W pracy mierzono stopień zatrzymania gazu, objętościowy współczynnik wnikania masy, zmierzono moc mieszania w układzie jednorodnym oraz dwufazowym gaz-ciecz. Przeprowadzone badania dowodzą, że najwyższą mocą mieszania nieustalonego w układzie jednorodnym charakteryzowała się turbina Rushtona. Dla mieszadeł o zakrzywionych łopatkach zapotrzebowanie na moc było niższe. Najniższą wartością charakteryzowało się mieszadło osiowe Maxflo W. Nie obserwowano wpływu częstotliwości oscylacji na wartość mocy. Wykazano, że mieszanie nieustalone w przypadku turbiny Rushtona i mieszadła Maxflo W powoduje wzrost wartości mocy względnej *RPD* w stosunku do mieszania ustalonego. W przypadku mieszadeł o zakrzywionych łopatkach uzyskuje się dla mieszania nieustalonego niższe wartości *RPD* niż dla mieszania ustalonego. Najwyższą wartość mocy względnej dla mieszania nieustalonego obserwuje się dla mieszadła Maxflo W. Dla mieszadeł turbinowych o zakrzywionych łopatkach uzyskiwane wartości *RPD* są zbliżone. Najniższą wartością *RPD* spośród badanych mieszadeł charakteryzuje się turbina Rushtona.

Wykazano również, że dla mieszania nieustalonego typu S układów powietrze-woda w mieszalniku z mieszadłami o wygiętych łopatkach uzyskuje się większe wartości objętościowego współczynnika wnikania masy dla niskich wartości mocy jednostkowej w porównaniu do mieszania ustalonego. Wskazuje to na potencjalne zastosowanie mieszania nieustalonego w biotechnologii i bioreaktorach, gdzie zdolność do zapewnienia odpowiedniego transportu tlenu jest ograniczana przez wrażliwość komórek na ścinanie. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że dla mieszadła Maxflo W zalecane jest mieszanie nieustalone zgodne z przebiegiem fali symetrycznej oraz fali niesymetrycznej z przewagą pompowania cieczy w kierunku dna mieszalnika. Dowiedziono, że stężenie roztworu NaCl wpływa na wartości objętościowego współczynnika wnikania masy. Wraz z wzrostem stężenia obserwuje się wzrost wartości tego współczynnika. Wykazano, że wpływ siły nośnej na zmianę momentu obrotowego w czasie podczas mieszania nieustalonego nie ma istotnego znaczenia. Wykazano również, że mieszanie nieustalone pozwala na uzyskiwanie odpowiedniej intensywności wymiany masy przy dużo niższych nakładach energetycznych w porównaniu do mieszania ustalonego oraz zaproponowano 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.

Uzyskane przez autora wyniki badań i przeprowadzonych eksperymentów stanowią oryginalne rozwiązanie.

Należy podkreślić, że przedstawiona tematyka rozprawy doktorskiej wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej analizowanego zagadnienia przez co wypełnia istniejącą lukę informacyjną, dlatego podjęte działania badawcze uważam za w pełni uzasadnione.

Stwierdzam, że Pan mgr inż. Sebastian Frankiewicz zrealizował zadeklarowany cel pracy, a uzyskane z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych wyniki – uznaję za wkład w rozwój prac badawczych związanych z mieszaniem nieustalonym gaz-ciecz. Na uwagę zasługuje fakt, że uzyskane wyniki mają duże znaczenie praktyczne.

Ocena strony formalnej rozprawy – uwagi szczegółowe

Drugą grupę sformułowanych uwag stanowią te, o charakterze merytorycznym, na które oczekuję dodatkowych wyjaśnień Doktoranta podczas publicznej obrony pracy doktorskiej. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na kilka kwestii i zadać kilka pytań:

- 1) *Z tego powodu w przemyśle w niektórych przypadkach stosowanie przegród nie jest zalecane, jednakże ich brak powoduje pogorszenie mieszania. W takich mieszalnikach zwiększenie efektywności mieszania realizuje się m.in. przez niecentryczne umiejscowienie mieszadła lub mieszanie nieustalone, w którym mieszadło porusza się ze zmienną częstością i/lub kierunkiem obrotów - str. 10. Czy to jedyne znane sposoby walki z lejem?*
- 2) *Do tych parametrów można zaliczyć: średnią średnicę objętościowo-powierzchniową pęcherza gazowego d_{32} ... - str. 41. Dlaczego do oceny efektywności przebiegu procesu posłużono się średnią średnicą objętościowo-powierzchniową pęcherza gazowego? W literaturze przedmiotu występują także inne średnice zastępcze: powierzchniowa d_{20} , objętościowa d_{30} czy też masowa d_{43} ?*
- 3) *Obliczone w ten sposób maksymalne momenty obrotowe powiększono odpowiednio dla mieszadeł promieniowych o 95% a dla mieszadła osiowego o 45% w celu umożliwienia rozszerzenia zakresu ewentualnych badań - str. 82. Jaka była przyczyna tak dużego nadatku obciążenia momentem obrotowym? Dlaczego nie przeprowadzono analizy parametrycznej dla wartości 5 Nm i 2 Nm? Doktorant nie wspomina w analizie parametrycznej jaką przyjęto gęstość płynów?*
- 4) *Z danych literaturowych [135] wynika, że w obliczeniach wytrzymałościowych dla mieszadeł przyjmowany jest współczynnik bezpieczeństwa równy $X_e = 3$. - str. 84. Dlaczego tyle? W większości badań wytrzymałościowych współczynniki te nie przekraczają wartości $X_e = 2$?*
- 5) *Spośród przeanalizowanych mieszadeł najwyższą moc uzyskano dla mieszadła turbinowego z płaskimi łopatkami RT-6 ($Ne_m = 6,50 \pm 0,26$). Uzyskana wartość mieści się w zakresie liczb mocy uzyskiwanych w literaturze od 4,5 [54] do 6,5 [136]. - str. 93. Liczba mocy dla mieszania ustalonego i turbiny Rushtona (RT) wyniosła $Ne = 6,5$. Skąd taka wartość? Zwykle w danych literaturowych liczba mocy jest w przedziale 4-5. Z czego wynika różnica?*
- 6) *Podczas mieszania nieustalonego przebiegającego zgodnie z falą trójkątną i zmianą kierunku obrotów zakłada się, że zachłystywanie się mieszadła gazem występuje zawsze w jakimś stopniu niezależnie od częstotliwości oscylacji i maksymalnej wartości częstości obrotów. - str. 152. Czy brano pod uwagę zjawisko zachłystywania się mieszadła gazem? Jeżeli tak to jak to uwzględniano w badaniach? Zwykle w mieszaniu mechanicznym określa się tzw. linię zachłystywania w postaci zależności liczby przepływu gazu Fl od liczby Frouda Fr ? Czy analizowano taką zależność?*

7) *Rysunek 154. Porównanie wartości k_L obliczonych na podstawie równania (76) dla mieszania ustalonego (F) i nieustalonego (S) w układzie powietrze-0,1 M NaCl z wartościami literaturowymi.* - str. 152. Na rysunku przedstawiono porównanie objętościowego współczynnika wnikania masy od mocy jednostkowej P_g/V z danymi literaturowymi dla roztworów NaCl. Porównanie wskazuje na całkowicie odmienną zależność dla mieszania ustalonego i nieustalonego. Wykładnik potęgi przy P_g/V dla mieszania nieustalonego jest znacznie większy niż dla mieszania ustalonego. Czym można wyjaśnić tak odmienną zależność?

Powyższe uwagi, w najmniejszym stopniu nie podważają wartości poznawczej i aplikacyjnej rozprawy, a stanowią jedynie podstawę do merytorycznej dyskusji podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej. W mojej opinii przedstawiony w pracy materiał spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Uwzględniając aktualność podjętej tematyki rozprawy, trafność zdefiniowanego celu oraz poprawność wnioskowania, pozytywnie oceniam rozprawę doktorską pt. „Mieszanie nieustalone gaz-ciecz w mieszalniku z mieszadłem o wygiętych łopatkach”. Złożoność problemów z jakimi spotkał się Doktorant realizując recenzowaną rozprawę niewątpliwie wymagała wiedzy teoretycznej i praktycznej niezbędnej do prowadzenia badań eksperymentalnych oraz ogromnego nakładu pracy. Sposób zaplanowania i prowadzenia badań, jak również forma przedstawienia uzyskanych wyników oraz ich analiza świadczą o dużej wiedzy i kompetencjach. Uważam, że Doktorant zrealizował założone cele swojej pracy.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska jest opracowaniem oryginalnym o wysokiej wartości poznawczej oraz spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim”.

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII PROCESOWEJ I ŚRODOWISKA
DR HAB. INŻ. KRYSZTOF CZERNEK, PROF. UCZELNI