

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

Szczecin, 31.08.2023

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk
Pt. „Badania hydrodynamiki mieszania cieczy w zbiorniku z niecentrycznie usytuowanym
mieszadłem turbinowym”

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Jerzy Kamieński

Promotor pomocniczy: dr inż. Jan Talaga

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk została wykonana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Mechanicznego, Prof. dr hab. inż. Jerzego A. Śładka zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej nr M.00-110/2023 z dnia 3 lipca 2023 roku.

W zastosowaniach przemysłowych proces mieszania mechanicznego prowadzi się najczęściej w klasycznych mieszalnikach z przegrodami i centralnie usytuowanym wałem mieszadła. Biorąc pod uwagę nakłady energetyczne coraz częściej stosuje się rozwiązania konstrukcyjne mieszalników bez przegród, z niecentrycznie usytuowanym wałem mieszadła. Niestety przesunięcie wału mieszadła z pozycji centralnej w pozycję niecentryczną powoduje zakłócenie panującej w takich układach symetrii, co prowadzi do wystąpienia stref o różnej intensywności. W związku z tym, w celu uzyskania odpowiednich warunków panujących w układzie, należy zastosować odpowiednią konfigurację zbiornik-mieszadło-usytuowanie wału. Aby tego dokonać konieczne jest przeprowadzenie szczegółowych badań wielkości opisujących hydrodynamikę mieszania płynów w takich układach. Znajomość zagadnień hydrodynamiki mieszania w zbiorniku z niecentrycznie zabudowanym mieszadłem oraz odpowiednie dobranie parametrów geometrycznych, operacyjnych i fizycznych na nią wpływających pozwala na modelowanie przepływu cieczy w mieszalniku, co w konsekwencji umożliwi poprawne zaprojektowanie oraz wykonanie mieszalników z niecentrycznie usytuowanym wałem mieszadła.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk została wykonana w Katedrze Inżynierii Ciepłej i Procesowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, pod kierunkiem Pana prof. dra hab. inż. Jerzego Kamieńskiego oraz Pana dr inż. Jana Talagi.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy 185 stron. Struktura rozprawy jest typowa dla prac o charakterze doświadczalnym. Praca składa się z dwóch części: „Części teoretycznej” i „Części doświadczałnej”. Zasadniczą część rozprawy doktorskiej uzupełniają: streszczenia po polsku i angielsku oraz wykaz ważniejszych oznaczeń umieszczone na początku rozprawy a także literatura oraz spisy rysunków i tabel znajdujące się na końcu rozprawy doktorskiej. W rozprawie zamieszczono 95 rysunków, 11 tabel oraz 140 pozycji literaturowych.

W „Części teoretycznej” (54 strony) podzielonej na 5 rozdziałów Pani mgr Aneta Celarek-Kobyłczyk po krótkim „Wprowadzeniu” przeanalizowała aktualny stan wiedzy dotyczący mieszania i mieszalników (Rozdział 2) oraz hydrodynamiki i pomiarów przepływu cieczy w

mieszalnikach (Rozdział 3). W rozdziale 3 szczegółowo omówiła zagadnienia dotyczące wielkości charakteryzujących hydrodynamikę przepływu cieczy w mieszalniku (moc mieszania, prędkości chwilowe, średnie i fluktuacyjne, kinetyczną energię turbulencji, stopień turbulencji, wydajności pompowania mieszadła oraz przepływu cieczy w mieszalniku oraz sprawność hydrauliczną) oraz metody pomiaru prędkości cieczy w mieszalniku. Podsumowanie oraz wnioski wyciągnięte na podstawie dostępnej literatury Doktorantka przedstawiła w rozdziale 4. Brak w literaturze informacji dotyczących mieszania w zbiorniku bez przegród z mieszadłem turbinowym stożkowym usytuowanym niecentrycznie uzasadnia konieczność podjęcia takich badań oraz pozwoliło na sformułowanie następującej tezy pracy: „Zastosowanie mieszadła turbinowego stożkowego w mieszalniku bez przegród, z ekscentrycznie usytuowanym wałem, może stanowić alternatywne rozwiązanie konstrukcyjne w stosunku do konwencjonalnych mieszadeł i być atrakcyjnym rozwiązaniem konstrukcyjnym pod względem parametrów przepływu oraz ponoszonych nakładów energetycznych” (Rozdział 5). W rozdziale 5 tej części Pracy Autorka oprócz tezy pracy przedstawiła również cel i zakres pracy doktorskiej. Celem pracy była ocena jakościowa i ilościowa wpływu zmiany geometrii mieszadła turbinowego na wielkości charakteryzujące turbulencję przepływu cieczy jednorodnej w mieszalniku bez przegród z ekscentrycznie zamocowanym mieszadłem. Aby zrealizować zaplanowany cel pracy zakres badań obejmował: - modernizację stanowiska badawczego; - wykonanie metodą fotograficzną badań jakościowych przy różnych częstościach obrotów mieszadła, w celu określenia zakresu występowania zjawiska napowietrzania powierzchniowego cieczy; • zastosowanie na stanowisku badawczym dodatkowego lasera, umożliwiającego pomiar trzeciej składowej prędkości chwilowej cząstek traseera, • badania wpływu wybranych parametrów konstrukcyjno-ruchowych mieszalnika bez przegród na: rozkłady średnich i fluktuacyjnych prędkości przepływu cieczy oraz moc mieszania. Badania przeprowadzone zostały dla ustalonych parametrów (częstości obrotów mieszadła, 5 [1/s]; w pomiarach mocy mieszania częstości obrotów mieszadła zmieniano w zakresie przepływu burzliwego; usytuowania wału mieszadła $e = (0; 0,25; 0,5) R$; odległości mieszadła od dna zbiornika $h = 0,5 d$) oraz dla wytypowanych konstrukcji sześciłopatkowych mieszadeł turbinowych: tarczowego RT, tarczowego z pochylonymi łopatkami PBT oraz stożkowego CT.

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

„Część doświadczalna” (97 stron) podzielona jest na 4 rozdziały: „Badania eksperymentalne”, „Metodyka prowadzenia badań i pomiarów”, „Prezentacja otrzymanych wyników” oraz „Podsumowanie uzyskanych wyników badań oraz wnioski i uwagi końcowe”. Prowadzone badania Doktorantka podzieliła na jakościowe i ilościowe. W ramach badań jakościowych prowadziła obserwacje wizualne przebiegu procesu mieszania oraz wykonała ich dokumentację fotograficzną. W części dotyczącej badań ilościowych przeprowadziła analizę wpływu przesunięcia wału mieszadła na wybrane wielkości i parametry określające hydrodynamikę procesu mieszania, m. in.: wydajność pompowania mieszadła, wydajność przepływu cieczy, stopień turbulencji, moc mieszania czy sprawność hydrauliczną mieszadła. Na podstawie otrzymanych wyników badań, wykonanych za pomocą laserowego anemometru dopplerowskiego przedstawiła średnie prędkości przepływu, w formie map wektorowych. Na podstawie uzyskanych wyników określiła, dla wybranych wysokości cieczy w zbiorniku, wartości pulsacji prędkości przepływu cieczy. W kolejnych etapach przeanalizowała również wpływ położenia wału mieszadła na wartość mocy mieszania (liczby mocy mieszania). Wykorzystując zmierzone składowe prędkości średniej cieczy (promieniowe, osiowe, obwodowe) uzyskała obrazy pól przepływu cieczy w mieszalniku bez przegród, dla różnych położenia wału mieszadła, niecentryczności $e = (0 - 0,5) R$. Kolejnym badanym parametrem była intensywność turbulencji. Na podstawie stworzonych map konturowych zaproponowała sposób określenia uśrednionego stopnia turbulencji w płaszczyźnie XY, obrazującego jego zmiany w

funkcji przesunięcia wału mieszadła. Dopelnieniem danych o intensywności przepływu cieczy w mieszalniku było określenie wydajności pompowania mieszadła i wydajności przepływu cieczy w mieszalniku oraz związanych z nimi sprawności hydraulicznych. W rozdziale 9 Autorka przedstawiła podsumowanie oraz wnioski wynikające z uzyskanych wyników badań.

Dzięki odpowiednio dobranym metodom i narzędziom, które umożliwiły przeprowadzenie zaplanowanych badań założony cel pracy został w pełni zrealizowany. Przeprowadzona przez Panią mgr Anetę Celarek-Kobyłczyk analiza wyników uzyskanych w ramach pracy doktorskiej świadczy o umiejętności Doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Do najważniejszych osiągnięć Pani mgr Anety Celarek-Kobyłczyk - będących elementami nowości naukowej - można zaliczyć:

- określenie zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi hydrodynamikę przepływu cieczy w mieszalniku a usytuowaniem (niecentrycznością) wału mieszadła w zbiorniku,
- określenie przebiegu procesu mieszania oraz przepływu cieczy w zbiorniku bez przegród z wyeliminowaniem negatywnych zjawisk towarzyszących temu przepływowi m. in., tworzenia się leja oraz zjawiska napowietrzania cieczy mieszanej - określenie dla każdego z badanych mieszadeł zakresu prędkości obwodowej końca łopatek w jakich zjawiska te nie występują,
- ilościowe określenie intensywności przepływu cieczy w mieszalniku z niecentrycznie umieszczonym wałem mieszadła.
- potwierdzenie, że mieszalnik z ekscentrycznie usytuowanym wałem mieszadła turbinowego stożkowego CT, pod względem zarówno wybranych parametrów przepływu jak i wymaganych nakładów energetycznych, może stanowić alternatywne rozwiązanie konstrukcyjne w stosunku do mieszalników standardowych.

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

Uwagi formalne:

1. Brak numeracji wszystkich rozdziałów pracy.
2. Skróty myślowe oraz niejasne stwierdzenia np. str 44: „*W zależności od konstrukcji mieszadła obszar ten może się zaczynać wcześniej lub później.*”; str. 55: „*Zauważa się tendencję, w której wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa, czyli zmianą przepływu z laminarnego do burzliwego przez przejściowy, następuje się wzrost wartości liczby wydajności przepływu cieczy K_c .*”; str. 60: „*Podał również możliwość osiągnięcia niepewność pomiaru prędkości cieczy.*”, ilość mieszadeł zamiast liczba mieszadeł; ilość łopatek zamiast liczba łopatek.
3. Sulfotlenek dwumetylu DMS czy sulfotlenek dwumetylu DMO (str. 83).
4. Przedstawianie tych samych danych na rysunkach i w tabelach nie wnosi nic nowego do pracy a jedynie zwiększa liczbę stron np. dane w Tabeli 6 i na rys. 91; w Tabeli 7 i na rys. 92; w Tabeli 8 i na rys. 93 czy w Tabeli 10 i na rys. 94 i 95;

Uwagi merytoryczne:

1. Str. 27, „*Niecentryczne usytuowanie wału mieszadła powoduje wzrost mocy mieszania i znaczący spadek czasu jego trwania, zwłaszcza w przypadku mieszadeł wysokoobrotowych [27], [28].*” Co znaczy stwierdzenie „znaczący spadek jego trwania”?
2. Str. 72, „*Zbiornik składał się z prostopadłościennego płaszcza (2) i wewnętrznego walcowego zbiornika (1) o średnicy D równej 286 [mm] i wysokości 540 [mm], w którym*

- realizowany był proces mieszania.*” Na rysunku 25 wysokość zbiornika wynosi 650 mm. Brak w tekście informacji o wysokości słupa cieczy w zbiorniku.
3. Str. 75, Jak wyznaczono średnicę mieszadła turbinowego stożkowego CT uwzględnianą później w obliczeniach.
 4. Str. 107, „*Do badań wstępnych użyto trzech mieszadeł stożkowych CT o różnej geometrii. Miały one na celu przeprowadzenie analizy jakościowej i ilościowej zjawisk występujących w mieszalniku. Pozwoliły na określenie częstości obrotów mieszadła, przy jakich tworzył się w cieczy lej i rozpoczynało się jej napowietrzanie.*” Dlaczego, w tym punkcie przedstawiono wyniki tylko dla dwóch geometrii mieszadeł stożkowych CT ($h_m/d = 0,5$ i $h_m/d = 1$), szczególnie, że do badań zasadniczych wybrano to trzecie mieszadło CT $h_m/d = 0,73$?
 5. Str. 117. „*Bazując na wynikach z poprzedniego rozdziału właściwe badania przeprowadzono przy stałej częstości obrotów mieszadeł, wynoszącej 5 [1/s].*” Dlaczego nie przedstawiono wyników (zdjęć) uzasadniających wybór tej częstości obrotów mieszadła. Na str. 109 pojawia się jedynie informacja, że „*W tym przypadku lej zaczynał tworzyć się po przekroczeniu 5 [1/s].*”
 6. Str. 118. „*Jak widać w zbiorniku pozbawionym przegród liczba Newtona monotonicznie malała wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa, niezależnie od położenie mieszadła. Spadek wartości liczby mocy Ne spowodowany był tworzeniem się chwilowych burzliwości w mieszalniku spowodowanych tworzeniem się leja oraz występowaniem zjawiska napowietrzania.*” Na podstawie wcześniejszych badań stwierdzono, że przy $n = 5$ 1/s nie występuje ani lej, ani powierzchniowe napowietrzanie. Dla tej częstości obrotów mieszadła liczba Reynoldsa wynosi około 22000. Dlaczego więc spadek liczby mocy występuje już przy niższych wartościach liczby Reynoldsa, przy których nie powinny tworzyć się chwilowe burzliwości?
 7. Str. 124, „*Analizując wyniki badań dla mieszadła RT, przy centrycznym jego ustawieniu można było zauważyć, że ciecz „wyrzucana” była promieniowo, z dużą prędkością prawie na całej wysokości łopatki. Pole prędkości cieczy powinno być symetryczne, po obu stronach osi wału mieszadła. Jak widać symetria występowała, ale niepełna. Dotyczyło to zwłaszcza strefy poniżej mieszadła i obszaru wylotowego z łopatki.*” Co powodowało niepełną symetrię uzyskaną dla mieszadła RT?
 8. Str. 146, „*...dla każdego typu mieszadła (z wyjątkiem PBT) największe wartości intensywności turbulencji notowano dla niecentrycznego położenia wału mieszadła, $e = 0,5$ R, wysokie wartości intensywności turbulencji przyjmowało również pod mieszadłem.*” Dlaczego wyniki uzyskane dla mieszalnika z mieszadłem PBT różnią się od pozostałych?
 9. Str. 156, „*Liczba wydajności przepływu cieczy w mieszalniku Kc zmieniała się wraz ze zmianą położenia wału mieszadła przeciwnie jak w przypadku liczby wydajności pompowania Kp .*” Zarówno wartości liczby Kc jak i Kp zmieniały się ze zmianą położenia wału mieszadła. Z tym, że wartości liczby Kc zmniejszały się a wartości liczby Kp zwiększały się ze wzrostem niecentryczności wału mieszadła.
 10. Str. 157, „*Zakładając umownie brak wpływu składowej obwodowej (stycznej) prędkości średniej w mieszalniku bez przegród można wyznaczyć strumień cyrkulacji promieniowoosiowej, wyrażając go w formie bezwymiarowej liczby wydajności przepływu $Kcp-o$.* Otrzymane w ten sposób wartości tej liczby zebrano w tabeli 9. Dodatkowo w ostatniej kolumnie tabeli podano w jakim stopniu zmieniają się wartości liczby wydajności przepływu cieczy w mieszalniku Kc z uwzględnieniem składowej obwodowej i bez niej.” Na podstawie otrzymanych wartości Kc (z uwzględnieniem składowej obwodowej) i $Kcp-o$ (bez niej) można stwierdzić bardzo duży wpływ składowej obwodowej na wartość liczby wydajności przepływu cieczy np. dla CT i $e = 0$: $Kc = 17,39$ a $Kcp-o = 1.23$. Według Doktorantki wartości liczby wydajności przepływu cieczy, w tym przypadku zmieniły się o 7,61 % (ostatnia kolumna w Tabeli 9). Bez wykonywania obliczeń widać, że te dwie liczby różnią

o więcej niż 7,61 %. Proszę o wyjaśnienie równania na podstawie którego obliczone były wartości przedstawione w ostatniej kolumnie w Tabeli 9.

11. Str. 159 „Zauważa się tendencje, że dla mieszadła RT niecentryczne położenie wału mieszadła, $e = 0,25 R$ charakteryzowało się najmniejszą sprawnością hydrauliczną E_p .” Według danych przedstawionych w Tabeli 10 dla $e = 0,25R$ wartość $E_p = 0,21$, natomiast dla $e = 0,5R$ wartość $E_p = 0,18$.
12. Str. 159 W przypadku mieszadeł PBT i RT ze wzrostem niecentryczności wału mieszadła malały wartości sprawności hydraulicznej mieszadła E_p . Natomiast w przypadku mieszadła CT zaobserwowano tendencję odwrotną, ze wzrostem niecentryczności wału wartości sprawności hydraulicznej mieszadła E_p zwiększały się. Z czego to wynika?

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 Pani mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk pt. „Badania hydrodynamiki mieszania cieczy w zbiorniku z niecentrycznie usytuowanym mieszadłem turbinowym” spełnia wszystkie wymagania formalne i zwyczajowe określone w Ustawie z dnia 14 marca 2013 r. (Dz. U. z 2016 r. poz. 882). Przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymogi dotyczące oryginalnego rozwiązania przez Autorkę zagadnienia naukowego oraz wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a także wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Autorkę pracy naukowej. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej o przyjęcie i dopuszczenie Pani mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

31.08.2023 M. Cudak