

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk
pt. „Badania hydrodynamiki mieszania cieczy w zbiorniku z niecentrycznie
usytuowanym mieszadłem turbinowym”**

1. Podstawa opracowania

Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej prof. dr. hab. inż. Jerzego A. Ślodka, zawarte w piśmie z dnia 3 lipca 2023 roku.

2. Aktualność wyboru tematu

Mieszanie mechaniczne cieczy w mieszalnikach różnej konstrukcji jest operacją powszechnie stosowaną w wielu gałęziach przemysłu, m. in. chemicznym, farmaceutycznym, biotechnologii. Aktualnie w zastosowaniach przemysłowych proces mieszania mechanicznego prowadzi się przeważnie w klasycznych mieszalnikach z przegrodami i centralnie usytuowanym wałem mieszadła. Biorąc jednak pod uwagę dążenie przedsiębiorstw do obniżania nakładów energetycznych związanych z tym procesem, poszukuje się nowych rozwiązań konstrukcyjnych mieszalników pozwalających na obniżenie kosztów produkcji. Jednym z kierunków poszukiwań jest wykorzystywanie w tym celu konstrukcji mieszalników bez przegród, z niecentrycznie usytuowanym wałem mieszadła.

Z przeglądu danych literaturowych, szeroko cytowanych także przez Doktorantkę, wynika, że jakkolwiek takie rozwiązania pozwalają na ograniczenie nakładów energetycznych, przy zachowaniu wymaganej intensywności procesu, to brak jest w nich wystarczająco dokładnych informacji odnośnie analizy i modelowania hydrodynamiki mieszania w odniesieniu do nowych typów mieszadeł turbinowych.

W tym świetle, podjęcie przez mgr inż. Anetę Celarek-Kobyłczyk prac, dotyczących teoretycznego i eksperymentalnego modelowania procesu mieszania w zbiorniku bez przegród, z mieszadłem stożkowym usytuowanym niecentrycznie, należy uznać za działanie w pełni celowe i uzasadnione zarówno z naukowego jak i utylitarnego punktu widzenia.

Praca ta, prowadzona pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. inż. Jerzego Kamińskiego oraz promotora pomocniczego dr. inż. Jana Talagi, w swym zakresie stanowi oryginalne opracowanie wnoszące nowe elementy naukowe do wiedzy odnośnie modelowania procesu mieszania w mieszalnikach nowej konstrukcji. Stanowi ona jednocześnie rozwinięcie dotychczasowych prac naukowo-badawczych w zakresie procesu mieszania, prowadzonych w zespole Katedry Inżynierii Ciepłej i Procesowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie.

3. Charakterystyka ogólna rozprawy

Opiniowana praca zawarta na 185 stronach składa się z 10 rozdziałów uwzględniających w swym zakresie odpowiednio: część opisową dotyczącą przeglądu i oceny aktualnego stanu wiedzy w zakresie konstrukcji, zastosowania mieszalników cieczy o różnej geometrii zbiorników i mieszadeł wraz z przeglądem metod pomiarów zasadniczych wielkości charakterystycznych dla opisu hydrodynamiki mieszania cieczy, część zawierającą sformułowanie tezy, celu i zakresu pracy, a także część doświadczalną, ujmującą odpowiednio charakterystykę stanowiska badawczego, opis wykorzystywanych przyrządów i metod pomiarowych, metodykę przeprowadzanych badań i opis uzyskanych wyników oraz podsumowanie i wnioski końcowe.

Całość opracowania została uzupełniona streszczeniem w języku polskim i angielskim, szczegółowym wykazem oznaczeń oraz spisem rysunków, tabel i cytowanej w pracy literatury zawierającej 140 pozycji, z czego większość to opracowania z ostatnich kilkunastu lat.

4. Cele, teza i zakres pracy

W ramach niniejszej pracy Doktorantka postawiła przed sobą do realizacji dwa główne cele, a mianowicie naukowy oraz użyteczny.

Celem naukowo-badawczym pracy było dążenie do oceny efektywności procesu mieszania, przez wyeliminowanie przegród w mieszalniku z wałem mieszadła przesuniętym w stosunku do osi mieszalnika. W szczególności była nim *„jakościowa i ilościowa ocena wpływu zmiany geometrii mieszadła turbinowego na wielkości charakteryzujące turbulencję przepływu cieczy w mieszalniku bez przegród z ekscentrycznie zamocowanym mieszadłem w funkcji zmiany jego położenia w zbiorniku”*. Badania w tej konfiguracji przyjęto przeprowadzić dla konwencjonalnych mieszadeł turbinowych tarczowych RT i z łopatkami pochylonymi PBT oraz mieszadła stożkowego CT.

Z kolei celem użytecznym pracy było *„opracowanie wyników badań pod kątem sformułowania wskazówek projektowych przydatnych przy konstruowaniu badanych mieszalników mechanicznych”*.

Realizacja tych celów miała służyć udowodnieniu tezy, że *„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”*.

Osiągnięcie założonych celów i udowodnienie tak postawionej tezy Doktorantka osiągnęła poprzez realizację szerokiego zakresu pracy, obejmującego m.in.: szczegółową analizę danych literaturowych, modernizację stanowiska pomiarowego oraz przeprowadzenie badań pod kątem określenia rozkładów prędkości przepływu cieczy generowanych w takim mieszalniku przez poszczególne mieszadła, określenia dla nich parametrów turbulencji i liczby mocy mieszania oraz wydajności pompowania, wydajności przepływu cieczy i sprawności hydraulicznej. Prowadzona pod tym kątem analiza wyników badań została ukierunkowana na wskazanie praktycznych wskazówek projektowych oraz zaleceń odnośnie efektywnych warunków eksploatacji tego typu mieszalników.

5. Szczegółowa treść i zakres rozprawy

Praca zawiera 10 rozdziałów podstawowych poprzedzonych spisem treści oraz dwoma krótkimi streszczeniami w języku polskim i angielskim z najważniejszymi informacjami o zakresie i rezultatach rozprawy. W kolejnym nienumerowanym rozdziale zostały objaśnione ważniejsze oznaczenia oraz zdefiniowane moduły bezwymiarowe i skróty pojęć stosowanych w pracy. Spośród 9 rozdziałów, stanowiących meritum opracowania, 4 pierwsze to głównie opis i analiza aktualnego stanu wiedzy odnośnie rozwoju konstrukcji mieszalników i mieszadeł mechanicznych wykorzystywanych w różnych procesach technologicznych oraz wprowadzenie w problematykę hydrodynamiki procesu mieszania wraz z opisem stosowanych w tym obszarze technik pomiarowych oraz uzasadnienie celowości i zakresu podjętych badań.

W rozdziale 1 Doktorantka dokonała wprowadzenia w tematykę procesu mieszania w różnych gałęziach przemysłu, wskazując na dużą różnorodność jego wykorzystania i to zarówno podczas realizacji operacji mechanicznych, jak i przy intensyfikacji wymiany ciepła i masy oraz reakcji chemicznych. Opisała w nim także główne kierunki rozwoju konstrukcji mieszadeł i mieszalników mających na celu zmniejszenie energochłonności mieszania przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganych efektów technologicznych. Rozwinięcie tej tematyki zostało

szczegółowo przedstawione w rozdziałach 2 i 3. Zakres tematyczny ujętych w nich treści dotyczył:

- analizy aktualnego stanu literatury odnośnie konstrukcji mieszalników zbiornikowych z przegrodami oraz bez przegród a także charakterystyki warunków ich pracy;
- przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych aktualnie mieszadeł oraz kierunki rozwoju ich geometrii;
- podstawowych informacji dotyczących hydrodynamiki i pomiarów przepływu cieczy w mieszalnikach, a w szczególności pomiarów mocy mieszania, prędkości (chwilowych, średnich i fluktuacyjnych), kinetycznej energii turbulencji, stopnia turbulencji, wydajności pompowania mieszadła i wydajności przepływu cieczy oraz ich sprawności hydraulicznej;
- wykorzystania laserowej anemometrii dopplerowskiej - LDA w pomiarach wybranych wielkości charakteryzujących hydrodynamikę ruchu cieczy w mieszalnikach wraz z opisem techniki ich pomiaru.

Rozdział 4 to podsumowanie przeglądu literatury, na podstawie którego Doktorantka wykazała występowanie istotnych luk w danych literaturowych odnośnie opisu hydrodynamiki mieszania mieszadłami turbinowymi TR, PBT oraz CT, w zbiorniku bez przegród z niecentrycznie umieszczonym wałem mieszadła. Uzyskane w tym temacie wyniki analizy danych literaturowych (w tym także osiągnięć zespołu Katedry) pozwoliły Doktorantce na doprecyzowanie zakresu badań własnych pozwalających na realizację przyjętych (w rozdziale 5) celów i tezy pracy. Sposoby ich realizacji zostały zawarte w kolejnych czterech rozdziałach (rozdziały 6-9), stanowiących część badawczą rozprawy.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że przyjęty w nich zakres oraz metodyka przeprowadzonych badań, wraz z oceną dokładności przeprowadzonych pomiarów, są w pełni poprawne i świadczą o dużej dojrzałości badawczej Doktorantki.

W rozdziale 6 - rozpoczynającym część doświadczalną pracy, podano szczegółowe informacje dotyczące budowy i opomiarowania stanowiska badawczego, charakterystyki geometrycznej zastosowanych w badaniach mieszadeł turbinowych, właściwości mieszanej cieczy oraz cząstek posiewu a także specyfikację stosowanych układów pomiarowych.

W kolejnym rozdziale 7 opisano metodykę prowadzenia badań i pomiarów wybranych parametrów hydrodynamiki przepływu cieczy w mieszalniku (scharakteryzowanych w rozdziale 3) oraz sposób programowania pomiarów. Badania realizowano komputerowo w oparciu o oprogramowanie „BSA Flow Software” firmy DANTEC, które pozwalało na zautomatyzowanie procedury pomiarowej składowych prędkości w mieszalniku za pomocą laserowego anemometru dopplerowskiego - LDA.

W dalszej części pracy (rozdział 8) przedstawiono analizę wyników badań, które prowadzone były dwuetapowo, jako badania wstępne i zasadnicze.

Badaniom wstępnym poddano trzy różne geometrie mieszadeł stożkowych CT (o różnych proporcjach $h_m/d = 0,5; 0,73; 1$). Obejmowały one wyznaczenie, dla poszczególnych mieszadeł, kryteriów tworzenia się leja i napowietrzania cieczy oraz ponoszonych nakładów energetycznych. Na podstawie tych wyników, do badań zasadniczych wybrano mieszadło o wysokości $h_m/d=0,73$, które charakteryzowało się najkorzystniejszymi cechami eksploatacyjnymi. Badania, dla tej geometrii mieszadła, prowadzono w warunkach przesunięcia wału mieszadła względem osi zbiornika o $e=(0; 0,25; 0,5)R$, przy zachowaniu stałej jego odległości od dna zbiornika $h = 0,5d$. Przyjęta częstość obrotów mieszadła w większości badań była stała i wynosiła $5 [1/s]$, jedynie w pomiarach mocy mieszania zmieniano ją w zakresie przepływu burzliwego.

Badania zasadnicze przeprowadzono zarówno dla wytypowanej geometrii mieszadła stożkowego CT, jak i porównawczo dla wytypowanych dwóch konstrukcji sześciłopatkowego mieszadła turbinowego tarczowego RT oraz mieszadła tarczowego z pochylonymi łopatkami PBT. Wykorzystując komputerowy system zbierania i analizy danych doświadczalnych,

wyznaczono (dla każdego z badanych mieszadeł) odpowiednio: wydajności pompowania, przepływ cieczy w zbiorniku, intensywność jej turbulencji, a w połączeniu z liczbą mocy mieszania także sprawności hydrauliczne mieszadeł. Obliczenia wykonywano za pomocą oprogramowania MATLAB. Analizę wyników badań i obliczeń prowadzono w celu określenia jak poszczególne wielkości zmieniają się w zależności od geometrii mieszadła i jego położenia względem osi zbiornika. Na wyróżnienie zasługuje tutaj przedstawienie wyników w różnorodnej formie graficznej oraz zestawień tablicowych, które dobrze ilustrują efektywności pracy poszczególnych mieszadeł. Porównanie uzyskanych wyników charakterystycznych dla hydrodynamiki mieszadła stożkowego CT z odpowiadającymi sobie parametrami dla pozostałych badanych mieszadeł potwierdziło sensowność jego stosowania w wybranych aplikacjach przemysłowych. W tym zakresie Doktorantka wykazała, iż główne zalety tego mieszadła to większy zakres stosowności pod względem prędkości obwodowej końca łopatek bez występowania niepożądanych zjawisk tworzenia się leja i napowietrzania powierzchniowego oraz mniejsze zapotrzebowanie mocy w stosunku do powszechnie stosowanego aktualnie mieszadła RT. Potwierdziło to słuszność podjętych badań, które w rezultacie pozwoliły na wskazanie zakresu stosowności mieszadła CT jako efektywnego rozwiązania konstrukcyjnego.

Końcowa część rozprawy (rozdział 9) to podsumowanie wyników badań i analiz oraz podanie wskazówek projektowych przydatnych przy konstruowaniu niekonwencjonalnych mieszalników mechanicznych z mieszadłami turbinowymi.

6. Osiągnięcia naukowe i utylitarne pracy

Do głównych osiągnięć w pracy doktorskiej mgr inż. Anety Celarek-Kobyliczyk należy zaliczyć:

- przedstawienie po raz pierwszy w literaturze obszernych badań hydrodynamiki mieszania cieczy z użyciem stożkowych mieszadeł turbinowych CT w aparacie bez przegród dla różnego położenia wału mieszadła względem osi mieszalnika;
- przeprowadzenie niezależnych badań jakościowych i ilościowych dla trzech różnych mieszadeł turbinowych typu RT, PBT oraz CT wraz ze wskazaniem ich efektywności eksploatacyjnej;
- zestawienie wytycznych do projektowania mieszalników bez przegród z przesuniętym wałem mieszadła, które mogą być pomocne w aplikacji takiej konstrukcji mieszalnika, gdy konieczne jest równoczesne ograniczenie nakładów energetycznych przy zachowaniu wymaganego przepływu cieczy w mieszalniku;
- zgromadzenie bogatego materiału doświadczalnego przydatnego do prowadzenia dalszych symulacji numerycznych mających na celu poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych mieszadeł i mieszalników w oparciu o wyznaczone w badaniach zależności i tendencje.

Zawarte w pracy wyniki badań oraz sformułowane na ich podstawie wnioski stanowią istotne poszerzenie stanu wiedzy odnośnie złożonych zagadnień hydrodynamiki mieszalnika bez przegród w funkcji zmiany położenia wału z mieszadłami turbinowymi a w szczególności z turbinowym mieszadłem stożkowym.

Przedstawione osiągnięcia w pełni potwierdzają realizację deklarowanych celów pracy, a zastosowana przez Doktorantkę aparatura oraz metodyka badań pozwoliły na uzyskanie bardzo wartościowych wyników, których analiza pozwoliła na potwierdzenie tezy o możliwości zastosowanie mieszadła turbinowego stożkowego CT w mieszalniku bez przegród, z ekscentrycznie usytuowanym wałem, jako alternatywnego rozwiązania konstrukcyjnego w stosunku do wybranych mieszadeł konwencjonalnych.

7. Uwagi szczegółowe

Praca jest napisana starannie z dużą dbałością o szatę graficzną opracowania. Zawarte w niej rysunki, wykresy i tabele w pełni oddają istotę analizowanych problemów. Nie dopatrzyłem się także w pracy żadnych istotnych uchybień formalnych ani merytorycznych.

Podczas lektury opracowania nasunęło mi się jednak kilka uwag, głównie o charakterze dyskusyjnym, a mianowicie:

1. Przedstawione w pracy wyniki badań i obliczeń odnoszą się do zjawisk zachodzących w mieszalnika o skali laboratoryjnej. W jakim zakresie mogą one być wykorzystane w przypadku powiększenia skali do warunków przemysłowych?
2. W jakim zakresie można w przyszłości kształtować geometrię turbinowych mieszadeł stożkowych CT jako alternatywę w stosunku do powszechnie stosowanych dotychczas innych typów mieszadeł?
3. W jakim kierunku należałoby prowadzić, sugerowane w pracy, dalsze symulacje numeryczne mające na celu doskonalenie rozwiązań konstrukcyjnych mieszadeł i mieszalników.

Przytoczone uwagi nie umniejszają wysokiej wartości pracy i mają charakter czysto dyskusyjny.

8. Wnioski końcowe

Rozpatrując całość przedłożonej mi do oceny pracy doktorskiej mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk, stwierdzam, że wykazała się Ona dobrą znajomością wiedzy oraz praktycznymi umiejętnościami w zakresie prowadzenia badań oraz modelowania złożonych procesów mieszania.

Wykonana przez mgr inż. Anetę Celarek-Kobyłczyk praca pt. „Badania hydrodynamiki mieszania cieczy w zbiorniku z niecentrycznie usytuowanym mieszadłem turbinowym” jest opracowaniem, które wnosi oryginalny wkład w poznanie i opis zjawisk zachodzących podczas złożonych procesów mieszania cieczy przy wykorzystaniu turbinowego mieszadła stożkowego CT w mieszalniku zbiornikowym bez przegród.

Praca jest oryginalna, przemyślana oraz uporządkowana. Główną jej wartość upatruję zarówno w zebraniu i analizie obszernego materiału doświadczalnego, jak i opracowaniu wytycznych do projektowania mieszalników bez przegród z przesuniętym wałem mieszadła, które mogą być pomocne w aplikacji takiej konstrukcji mieszalnika w różnych zastosowaniach technicznych.

Reasumując stwierdzam, że oceniana praca jest samodzielnym rozwiązaniem problemu badawczego, stanowi wkład w postęp wiedzy, dyscypliny **Inżynieria Mechaniczna** i **spełnia wymagania formalne** określone przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 30 stycznia 2018 r., poz. 261). **Uwzględniając niniejsze wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Anety Celarek-Kobyłczyk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Jednocześnie, uwzględniając oryginalność i wysoką jakość merytoryczną ocenianej pracy, a także aktualność tematu oraz jej szeroki zakres aplikacji, rekomenduję Radzie Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej jej wyróżnienie - po spełnieniu przez Doktorantkę stawianych w tym zakresie wymagań.

