

WPŁYNEŁO

dnia 12.11.2021 r.
PK/UM/100/7/846/2021

SZKOŁA GŁÓWNA
GOSPODARSTWA
WIEJSKIEGO



Warszawa, 30.10.2021 r

dr hab. inż. Adam Ekielski, prof. Uczelni
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Inżynierii Produkcji
e-mail: adam_ekielski@sggw.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

MGR INŻ. MARTY STACHNIK

**PT. „ANALIZA NUMERYCZNA I BADANIA EKSPERYMENTALNE PRZEPŁYWU
BRZECZKI PIWNEJ W KADZI WIROWEJ O ZMODYFIKOWANEJ KONSTRUKCJI”**

1. WPROWADZENIE

Recenzję przedłożonej rozprawy doktorskiej wykonano na podstawie Uchwały Senatu Politechniki Koszalińskiej z dnia 22 września 2021 roku oraz pisma JM Rektora Politechniki Koszalińskiej Pani Profesor Danuty Zawadzkiej z dnia 30 września 2021. Rozprawa została wykonana na Wydziale Mechanicznym, pod promotorskim kierownictwem dr hab. inż. Marka Jakubowskiego, profesora Politechniki Koszalińskiej oraz promotora pomocniczego dr inż. Moniki Sterczyńskiej.



2. FORMALNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Marty Stachnik nosi tytuł „ Analiza numeryczna i badania eksperymentalne przepływu brzezki piwnej w kadzi wirowej o zmodyfikowanej konstrukcji”. W skład pracy wchodzi 9 numerowanych rozdziałów oraz 6 nienumerowanych pozycji takich jak: Streszczenie w języku polski i angielskim, Wykaz symboli, Bibliografia, Spis rysunków, Spis tabel. Na pracę składa się 15 tabel oraz 84 rysunków i schematów. W rozprawie Autorka odwołuje się do 446 pozycji literatury, w ogromnej większości opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych.

Układ rozdziałów numerowanych i nienumerowanych jest prawidłowy, w którym kolejne informacje przedstawiane są w logicznej kolejności wobec wcześniej wprowadzonych. Obszerność każdego z rozdziałów uważam za właściwą odpowiednią do zakresu przedstawianych informacji. W całości praca zawiera 233 strony maszynopisu w formacie A4.

Rozprawa doktorska napisana jest formalnie poprawnie zgodnie z wymogami stawianymi dla tego typu opracowań. Informacje zawarte w rozprawie przekazywane zostały w strona graficzna i redakcyjna oraz wykorzystywane w pracy słownictwo nie budzą większych zastrzeżeń.

Tytuł pracy został sformułowany poprawnie w sposób precyzyjny przedstawia rozwiązywany w pracy problem naukowy. Pracę zakończono wnioskami wynikającymi z przeprowadzonych badań.

3. OCENA ROZPRAWY

3.1 Ocena celowości podjęcia tematu

Zgodnie z tytułem rozprawy, Doktorantka podjęła aktualny dla nauki temat modelowania wymuszonego przepływu cieczy niejednorodnej w zbiorniku zamkniętym. Badania zostały podjęte na rzeczywistym modelu, jakim jest proces klarowania brzezki piwnej. Prowadzone badania przepływu cieczy niejednorodnych są do tej pory jednym z najbardziej skomplikowanych zagadnień w zakresie analizy przepływu. Znajduje to odbicie w licznych publikacjach z zakresu modelowania przepływów, zjawisk zachodzących podczas przepływu i separacji dynamicznej, mieszanin wielofazowych oraz barbotażu. Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, iż pomimo znacznej



liczby publikacji związanych z modelowaniem przepływów wielofazowych, nadal jest to temat nośny i twórczy, głównie ze względu na różne rodzaje interakcji zachodzące w czasie przepływu, pomiędzy składnikami wchodzącymi w skład analizowanych substancji. Jednym z tych złożonych i mało rozpoznanych problemów zajęła się doktorantka w swojej pracy.

Z utylitarne punktu widzenia opracowanie modelu przepływu brzezki piwnej w zaprojektowanym nowym rozwiązaniu dennicy kadzi wirowej pozwala na poznanie samego procesu separacji osadu gorącego od brzezki i w konsekwencji może zostać wykorzystane przy projektowaniu zarówno samych kadzi wirowych, jak również ustalania parametrów procesowych. Cel poznawczy pracy, jakim była: „Analiza zjawisk przepływowych zachodzących w zbiorniku kadzi wirowej podczas jej napełniania i rozdziału cieczy na etapie wirowania ze szczególnym uwzględnieniem uwarunkowań kształtu dennicy oraz wzajemnych oddziaływań przepływu wtórnego i zawirowań na efekt separacji”, **uwzględniłam za poprawnie, jasno i prawidłowo sformułowany będący dobrym punktem wyjścia do podjęcia przyjętego tematu badań zawartych w rozprawie doktorskiej.**

Uważam, że podjęty przez mgr inż. Martę Stachnik temat rozprawy doktorskiej za bardzo aktualny, ważny oraz zdecydowanie poszerzający zasób wiedzy z zakresu badań przepływu, separacji cieczy niejednorodnych oraz wpływu konstrukcji elementów kadzi wirowych na jej właściwości technologiczne.

3.2 Ocena metodologiczna

Rozprawę z metodologicznego punktu widzenia oceniam, jako poprawną. Hipoteza badawcza zakłada, że „zastosowanie zmodyfikowanej spirali Ekmana wpłynie korzystnie na warunki przepływu odpowiedzialnego za formowanie się stożka osadu w separatorze”,

W celu weryfikacji hipotezy badawczej ustalono cel i zakres pracy. Zakres pracy składał się z 8 etapów, przedstawionych w pracy na stronie 77 recenzowanej rozprawy doktorskiej. Mogą być one podzielone na trzy obszary badawcze:

Część teoretyczna. Ten etap badań zawierał analizę istniejących rozwiązań i metod separacji osadu gorącego, charakterystykę właściwości reologicznych badanego układu oraz budowę

1



teoretycznego modelu przepływu trójfazowego, wykorzystującego wspomaganie CFD, przy budowie modelu teoretycznego.

Cześć konstrukcyjna. Na podstawie wyników uzyskanych w części teoretycznej, opracowano konstrukcję nowego kształtu dennicy kadzi wirowej, oraz przygotowano ją do prowadzenia optycznych pomiarów prędkości cząstek (PIV).

Cześć doświadczalna i analityczna. Na tym etapie pracy przeprowadzono badania przepływu pierwotnego w kadzi wirowej o zmodyfikowanych kształtach dennicy wykorzystując metodę PIV. Na podstawie wyników pomiarów optycznych, wyprowadzono wnioskowanie o właściwościach i interakcjach w przepływie wielofazowym i przeprowadzono symulację przepływu pierwotnego i wtórnego za pomocą symulacji CFD. Ostatnim etapem tej części badań jest analiza otrzymanych wyników oraz wnioski z nich wynikające. Literatura przedmiotu stanowi zbiór 446 pozycji literaturowych. Po wnikliwej analizie uważam, że wszystkie zostały umieszczone właściwie i odwołanie do nich jest merytorycznie uzasadnione. Nawet umieszczenie pozycji wydanych przed 1960 rokiem jest merytorycznie akceptowalne ze względu na ich fundamentalny charakter dla prowadzonych przez Doktorantkę badań.

Podsumowując, przedłożona rozprawę doktorską z metodologicznego punktu widzenia uważam za poprawną i oceniam pozytywnie. Wprowadzenie tak dużej liczby referencji do literatury i przeprowadzenie przedstawionych w pracy badań wymagało włożenia znacznego wysiłku ze strony Doktorantki. Uzyskane wyniki badań zostały przedstawione czytelnie i zgodnie z formą przyjętą dla prac naukowych. Na szczególną uwagę zasługuje poprawne wykorzystanie metody PIV pozwalającej uzyskać wsad informacyjny dla systemów modelowania CFD, co należy uznać za znaczne osiągnięcie naukowe Doktorantki.

3.3 Ocena merytoryczna

Praca podzielona jest na 9 numerowanych rozdziałów

Rozdział 1 - **Wprowadzenie.** W dwustronicowym rozdziale zaprezentowano rys historyczny produkcji piwa ze szczególnym uwypukleniem problemów i pytań badawczych, jakie są stawiane w czasie prowadzenia operacji klarowania. Narracja w rozdziale prowadzona jest w ten sposób,



że czytelnik naturalnie kierowany jest myślami w stronę sposobów rozwiązania złożoności przepływu metodami CFD. Autorka w dalszej części rozdziału przedstawia możliwość rozwiązania problemów związanych z przepływem cieczy. Jedną z metod badawczych wymienionych w tej części pracy jest metoda PIV. Rozdział jest pod względem logicznym i merytorycznym poprawnie przygotowany. Brakuje jednak jasnego powiązania pomiędzy metodami CFD i PIV wskazującego na uzupełniającą (aczkolwiek konieczną) rolę metody PIV w trakcie badań i budowy modelu przepływu i separacji wielofazowych materiałów w kadzi.

Rozdział 2 – **Technologia browarnicza**. Rozdział składa się z 6 podrozdziałów opisujących technologie produkcji piwa oraz właściwości reologiczne półproduktów powstających w przemyśle browarniczym. W rozdziale 2.2 przedstawiono warunki prowadzenia procesu, którego wynikiem jest powstanie brzezki piwnej oraz rodzaje dodatków wpływających na powstawanie osadów. Powstające w procesie produkcji piwa osady opisano w kolejnym podrozdziale (2.3), gdzie jednym z czynników wpływających na właściwości filtracji jest ilość oraz wielkość cząstek osadu. Logicznym następstwem informacji przedstawionych w rozdziale jest usuwanie osadów, opisane w kolejnym podrozdziale (2.4), gdzie zaprezentowano technologię usuwania osadów stosowaną w przemyśle browarniczym. Autorka bardzo płynnie i jasno przechodzi do opisu kadzi wirowej będącej obecnie podstawowym urządzeniem wykorzystywanym do klarowania brzezki piwnej. Opisuje przy tym różne jej rozwiązania konstrukcyjne wraz z ich ograniczeniami przy oczyszczaniu brzezki z osadów. Ponieważ z wcześniejszych rozważań wynikała konieczność możliwie wydajnej separacji osadu od brzezki, uzależnionych od ich cech reologicznych. Autorka w kolejnym rozdziale (2.5), przedstawiła wpływ surowców na wymienione wcześniej cechy. Podsumowując rozważania przedstawione w rozdziale 2, Autorka uznała za celowe wprowadzenie modyfikacji dennicy kadzi, w celu poprawy warunków formowania stożka osadu. Jednocześnie słusznie kierując uwagę na wpływ lepkości brzezki i osadu, jako istotnego czynnika wpływającego na tworzenie się wirów wewnątrz kadzi, umożliwiającą formowanie stożka osady i tym samym efektywne klarowanie cieczy.

Rozdział 3 – **Przepływ wirowy i wielofazowy**. W skład rozdziału, składającego się z 5 podrozdziałów, wchodzi opis przepływu formowania się ruchu wirowego oraz model przepływu



pierwotnego i wtórnego w kadziach wirowych wykorzystywanych w browarnictwie. W rozdziale wprowadzono opis matematyczny ruchu wirowego w kadzi wraz z warunkami brzegowymi. Wprowadzenie przestrzennego opisu zjawiska generowania wiru nad nieruchomą powierzchnią, prowadzi wprost do pojawienia się opisu funkcyjnego obwiedni prędkości, nazywanej spiralą Ekmana. Autorka słusznie zauważyła, że w przypadku kadzi konieczne jest uwzględnienie wpływu ścianek na formowanie wiru, co powoduje powstanie wiru nieswobodnego. W dalszych rozdziałach przedstawiono problem przepływu wielofazowego i modele przepływu dla mieszanin wielofazowych oraz wykorzystanie ich do oddzielania strumieni wielofazowych. Trzeba przyznać, że Autorka w podsumowaniu rozdziału sprawnie nawiązała do możliwości wykorzystania spirali Ekmana ruchu mieszaniny do separacji jej poszczególnych składników. Wprowadzając jednocześnie uwagi do konstrukcji potencjalnych separatorów wykorzystujących ruch wirowy cieczy.

Rozdział 4 – **Wybrane metody analizy przepływu**. Rozdział składający się w sumie z 7 podrozdziałów jest wyraźnie podzielony na dwie główne części. W podrozdziałach 4.1, 4.3, przedstawiono eksperymentalne metody śledzenia i modelowania ruchu cieczy. W rozdziale 4.2, podzielonym na 4 dalsze podrozdziały, omówiono zagadnienia symulacji ruchu cieczy, obie te części spięte są niejako w kolejnym podrozdziale (4.4) łączącym opisane wcześniej obie grupy metod badawczych. Ze szczególnym naciskiem przedstawiono metodę PIV (Particle Image Velocimetry), jako skuteczne narzędzie do obserwacji rozkładu prędkości cząstek. Całkowicie należy przyznać rację Doktorantce, jeżeli rozważamy konieczność określenia prędkości przemieszczania się elementów struktury w przypadku braku danych do wprowadzenia do oprogramowania wykorzystywanego przy modelowaniu. Nie mniej, w trakcie czytania czułem pewien niedosyt, związany z brakiem informacji o bardzo podobnej do PIV metodzie, jaką jest DIC (Digital Image Correlation). Pomimo tego, że część autorów traktuje metodę DIC, jako inną nazwę lub wręcz synonim metody PIV, przedstawiają one jednak inne podejście przy rozwiązywaniu podobnego problemu. Nie mniej uważam, że w recenzowanej pracy warto byłoby wspomnieć o metodzie DIC wspomagającej PIV, dzięki czemu można byłoby pokusić się na zrozumienie dwukierunkowego sprzężenia między płynem generującym pewne obciążenia hydrodynamiczne



w konstrukcji kadzi i stożka osadu a dynamicznym odkształceniem struktury materiału. Jest to jednak tylko moja sugestia wynikająca z analizowanych podobnych problemów badawczych. W części opisującej symulacje komputerowe Autorka dokładnie opisuje założenia metod symulacji komputerowych. Uwzględniając specyfikę przepływów wielofazowych, przedstawia również ograniczenia jej stosowania w przy doborze odpowiedniego modelu wielofazowego. Według mnie jest to klucz do zrozumienia przedstawionej w pracy metodyki. Należałoby go silnie uwypuklić uzasadniając tym zastosowanie metody PIV połączonej z symulacją CFD. Z tego powodu brakuje mi w podsumowaniu rozdziału (4.4) wyraźnego zaznaczenia konieczności wykonania badań wstępnych za pomocą metody PIV, jako narzędzia do wyznaczenia rzeczywistych danych wsadowych do symulacji przepływu za pomocą metod CFD. Według mnie, zaletą algorytmu PIV jest, nie tylko fakt, że jest metodą szybką i bezkontaktową, ale również daje możliwość określenia zachowania (parametrów) cieczy o nieznanym dokładnie właściwościach. Dotyczy to szczególnie przepływów wielofazowych lub cieczy nienewtonowskich.

Rozdział 5 – **Cele, hipoteza i zakres pracy.** W rozdziale przedstawiono w sposób czytelny cel, hipotezę badawczą oraz zakres pracy. W tej części pracy, przedstawiono cel pracy, podzielony na trzy szczegółowe zadania (cel poznawczy, cel użytkarny, cel metodyczny), które powinny być rozwiązane. W rozdziale postawiono hipotezę badawczą wynikającą bezpośrednio z przedstawionego wnioskowania zawartego w rozdziałach 2-4. Sformułowanie hipotezy badawczej pozwoliło na sformalizowanie zakresu pracy (5.2), który stanowi spójny pod względem kolejności i zakresu pracy obszar działań.

Rozdział 6 – **Materiały i metody,** z racji swojej wagi jest bardzo rozbudowanym rozdziałem, składającym się z 5 podrozdziałów, posiadających swoje własne rozdziały uzupełniające. Materiały i metody zostały opisane w sposób poprawny. Na szczególną uwagę zasługuje poprawne sformułowanie warunków brzegowych (6.3.3), które wpływają na kontynuację dalszych analiz. Osobiście rozdział 6.5 zatytułowany: „Propozycje modyfikacji dennicy kadzi” umieściłbym w rozdziale 7. Wynika, to z wcześniej przedstawionego zakresu prac



przedstawionych w rozdziale. 5.3, punkt 4 harmonogram prac , poprzedzonych jednak budową trójfazowego modelu CFD, punkt 3, rozdział 5.3. Przyznam, że jest to jedyny w całej pracy punkt nieprecyzyjnie i niespójnie opisany. Tym bardziej, że Doktorantka w rozdziale 6 przedstawia budowę dennicy kadzi, jako wynik analiz CFD prowadzonych we wcześniejszych badaniach. Co prawda z informacji zamieszczonych dalszej części pracy (rozd. 7.2) wynika, że symulacje CFD dotyczą klasycznej konstrukcji kadzi. Nie mniej brak jest czytelnego tego podkreślenia we wcześniej podawanym harmonogramie badań.

Rozdział 7 – **Wyniki pomiarów i analiz.** W rozdziale podzielonym na 4 części zaprezentowano uzyskane wyniki prac badawczych. Rozdział zajmuje 90 stron, stanowiąc 39% struktury objętościowej pracy. W pierwszym rozdziale (rozd. 7.1), omówiono wyniki pomiarów reologicznych brzezki i osadów gorących pobranych z browaru przemysłowego. Jest to niezwykle cenna informacja, jako że warunki laboratoryjne produkcji piwa mogą się nieznacznie różnić głównie ze względu na inny wolumen produkcji i towarzyszące mu inne warunki wymiany ciepła i masy. W rozdziale 7.2, zatytułowanym: „CFD przepływu kadzi klasycznej”, przedstawiono symulację przepływu wykonaną dla kadzi klasycznej. W rozdziale zaproponowano modyfikację kadzi, umożliwiającą intensywne formowanie stożka osadu na jej dnie. Rozdział 7.3 poświęcony jest analizie wyników uzyskanych podczas badań metodą PIV, przeprowadzonych dla zmodyfikowanej konstrukcji kadzi. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano mapy pola prędkości przepływu pierwotnego w klasycznym i zmodyfikowanym zbiorniku kadzi. Rozdział 7.4, zatytułowany: „Analiza symulacyjna kadzi z modyfikacjami dennicy”, przedstawia model przepływu pierwotnego i wtórnego przeprowadzony dla zmodyfikowanej konstrukcji kadzi warzelniczej.

W rozdziale 8, zatytułowanym „**Omówienie wyników**” przedstawiono krytyczne omówienie otrzymanych wyników.

Praca została podsumowana rozdziałem, zawierającym zestawienie wniosków i przemyśleń Doktorantki. W rozdziale umieszczono wnioski podzielone na 3 grupy, których dwie pierwsze grupy stanowią podsumowanie wyników badań i na ich podstawie przeprowadzonego



wnioskowania ukierunkowane naukowo i użytkowo. Ostatnia, trzecia grupa wniosków ma charakter predykcyjny, przedstawiając możliwości dalszych prac umożliwiających rozwój pewnej grupy prac badawczych wykorzystujących wiedzę zdobytą w trakcie przygotowania i prowadzenia badań opisanych w recenzowanej rozprawie.

Przedstawiona na końcu pracy bibliografia nie budzi większych zastrzeżeń. Jest właściwa i adekwatna do tematu pracy. Jestem pod wrażeniem wysokich umiejętności badawczych Autorki pracy, która wykazała się umiejętnością łączenia w pracy kilku przestrzeni badawczych.

4. UWAGI KRYTYCZNE I POLEMICZNE

Pomimo wyjątkowo wysokiej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej, zauważyłem pewne nieścisłości i uchybienia, które z przedstawiam poniżej.

- Rysunek 1. Warto byłoby zaznaczyć na rysunku, której części procesu dotyczyły przedstawione w rozprawie badania. Rysunek przedstawia cały ciąg logistyczno-technologiczny produkcji piwa, podczas, gdy w tekście pracy Autorka opisuje wyłącznie fragment warzenia piwa, bez procesu słodowania będącego etapem przygotowania surowca. Jest to drobna uwaga jednak wprowadzająca już na wstępie pewne zamieszanie u czytelnika.
- Nazwa rozdziału 2.3 zatytułowanego „Osady w piwie” stanowi ewidentny skrót myślowy, jakim posłużyła się Doktorantka. Tytuł sugeruje opis osadów znajdujących się w gotowym piwie, a wszak opisywane są głównie osady powstające i usuwane w procesie produkcji. Według mnie trafniejszym byłby tytuł „Osady powstające w procesie produkcji piwa”.
- Czytając informacje zawarte w rozdziale 4, czułem pewien niedosyt, związany z brakiem informacji o bardzo podobnej do PIV metodzie, jaką jest DIC (Digital Image Correlation).
- Stwierdzenie zawarte w rozdziale 7.1 i brzmiące: „Wraz ze wzrostem szybkości ścinania, osad gorący wykazywał mniejszą lepkość pozorną, co świadczy o jego rozrzedzaniu”. Został wyjaśniony przez Autorkę, jako wpływ granicy płynięcia i jego wpływu na zagęszczenie badanej zawiesiny: ” Po przekroczeniu granicy płynięcia następuje rozrzedzenie ścinaniem”.



Według mnie niefortunnie użyto sformułowania „rozrzedzenie ścinaniem”, sugerowałbym użycie „rozrzedzenie związane z szybkością ścinania”.

- W pierwszym zdaniu zamieszczonym w rozdziale 7.2, brzmiącym „ W tym podrozdziale omówiono trójfazowy model komputerowy ...”. Osobiście razi mnie uproszczenie „model komputerowy”. Użyłbym zwrotu: „model opracowany przez oprogramowanie CFD”. Co prawda intuicyjnie czytelnik od razu rozumie myśl zawartą w zdaniu, niemniej w przypadku rozpraw naukowych powinno się unikać tego typu sformułowań.
- W rozdziale 7.2 prowadzono symulacje CFD, warto byłoby opisać, w jaki sposób dobierano wartości wsadowe potrzebne do budowy modelu.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marty Stachnik pt. „ Analiza numeryczna i badania eksperymentalne przepływu brzeczki piwnej w kadzi wirowej o zmodyfikowanej konstrukcji” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i mieści się w dziedzinie nauk inżynierskich w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Doktorantka zrealizowała nadmiarowo ambitny cel pracy oraz zweryfikowała postawioną hipotezę badawczą. Wyjątkowo należy podkreślić spójność rozważań teoretycznych oraz dokładność w opracowaniu eksperymentu badawczego i prezentację otrzymanych wyników. Nie bez znaczenia jest wnikliwa analiza otrzymanych w trakcie badań wyników eksperymentu, oraz krytyczne do nich podejście. Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Politechniki Koszalińskiej o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Jednocześnie ze względu na wysoką wartość merytoryczną pracy wnoszę o jej wyróżnienie.

Dr hab. inż. Adam Ekielski, prof. SGGW