



WPŁYNĘŁO

dnia 09.11.2021
PKI/M/BW/7/842/2021

Politechnika Łódzka

Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności

Łódź, 02.11.2021

dr hab. inż. Tomasz P. Olejnik, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności
Instytut Technologii i Analizy Żywności

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Marty Stachnik

**pt. „Analiza numeryczna i badania eksperymentalne
przepływu brzezki piwnej w kadzi wirowej
o zmodyfikowanej konstrukcji”**

Podstawą formalną niniejszej recenzji jest uchwała nr 45/2021 Senatu Politechniki Koszalińskiej, z dnia 22 września 2021 roku oraz pismo JM Rektor Politechniki Koszalińskiej Pani Profesor Danuty Zawadzkiej, z dnia 30 września 2021 r.

Recenzowana rozprawa mgr inż. Marty Stachnik została napisana pod kierunkiem Pana promotora dr hab. inż. Marka Jakubowskiego, profesora Politechniki Koszalińskiej oraz Pani promotor pomocniczej dr inż. Moniki Sterczyńskiej.

Praca poświęcona jest badaniom modyfikacji dennicy kadzi wirowej, wykorzystywanej podczas klarowania brzezki piwnej po jej gotowaniu. Doktorantka wykorzystwała zaawansowane techniki obliczeniowe oraz symulacje komputerowe do opisu zjawisk zachodzących wewnątrz kadzi i mających wpływ na proces klarowania brzezki.

Należy zaznaczyć już na wstępie, że zakres pracy był bardzo szeroki i objął między innymi opis matematyczny ruchu brzezki w kadzi klasycznej, stanowiącej odniesienie do dalszych modyfikacji konstrukcyjnych dennicy kadzi. Ponadto, Doktorantka zaproponowała modyfikację konstrukcji, polegającą na wbudowaniu w dennicę elementów, których kształt składał się z wycinków spirali Ekmana.

Doktorantka wykorzystwała zaawansowane narzędzia i techniki pomiarowe do zbadania transportu masy wewnątrz zmodyfikowanych konstrukcyjnie kadzi wirowych. Podjęła zakończoną sukcesem próbę zbudowania modelu komputerowego opisu zachowania się faz ciągłych (powietrze i brzezka) oraz fazy rozproszonej, tj. osadu. Wykorzystane modele obliczeniowe oraz narzędzia i techniki komputerowej symulacji, pozwoliły na ustalenie optymalnych warunków procesu formowania się stożka osadu. Praca wymagała wskazania kierunku naukowego badań, długotrwałych obliczeń numerycznych, analizy wyników wielu badań stanowiskowych, weryfikacji statystycznych wyników oraz wskazania możliwych zmian technologiczno-konstrukcyjnych, które mogą prowadzić do utylitarnego wykorzystania zaproponowanych rozwiązań.

Zasadność podjęcia tematyki

Producenci towarów konsumpcyjnych, w tym piwa, muszą wychodzić naprzeciw oczekiwaniom odbiorców końcowych. Konsumenci wymuszają zatem zmiany w organizacji produkcji oraz technologiach wytwarzania, które prowadzą do zaspokojenia potrzeb klientów. Zmiana oferty produktowej wiąże się, po pierwsze ze zrozumieniem wpływu wprowadzanych innowacji na technologię, a po drugie musi uwzględniać poznanie złożonych procesów technologicznych niezbędnych do otrzymania produktu o wysokich walorach smakowych oraz zdrowotnych. Zwiększona konsumpcja oraz dostosowanie się do wymagań konsumentów determinuje wzrastającą emisję gazów cieplarnianych, degradację środowiska oraz nieodwracalne zmiany wyczerpywania się zasobów naturalnych. By sprostać tym wyzwaniom, europejskie ośrodki decyzyjne wskazują na konieczność rozwoju nowej strategii na rzecz wzrostu, służącej przekształceniu Unii w nowoczesną, zasobooszczędną i konkurencyjną gospodarkę, która w 2050 r. osiągnie zerowy poziom emisji gazów cieplarnianych netto. Każde rozwiązanie i nowe metody produkcji, które prowadzą do ograniczenia wykorzystania zasobów niezbędnych w początkowym etapie zmian w konstrukcji i technologii, zmniejszają oddziaływanie wprowadzanych zmian na środowisko.

Jak słusznie zauważyła Doktorantka, operacje jednostkowe w browarnictwie obejmują między innymi filtrację, klarowanie (sedymentację) oraz transport masy i energii. Złożoność procesu klarowania w kadzi wirowej wymaga zastosowania nowych rozwiązań oraz technik poznawczych, tak, by opisać proces i określić wpływ jego parametrów na końcową jakość produktu. Szczególnie dotyczy to rozwiązań wielkoskalowych – przemysłowych.

Zastosowanie nowych rozwiązań w zakresie techniki pomiarowej oraz symulacyjnej, umożliwia przeprowadzanie analiz wielu zmiennych. Zastosowanie symulacji komputerowych znacząco obniża koszt wprowadzonych zmian, zaś skomplikowane modele matematyczne opisujące procesy zachodzące podczas wymiany masy i energii w kadzi, umożliwiają wybór tych wariantów zmian konstrukcyjnych, które są najbardziej efektywne, w oparciu o wybrane funkcje celu, oraz jednocześnie są najmniej kosztotwórcze na etapie ich wprowadzania.

W praktyce inżynierskiej, z którą mamy do czynienia podczas optymalizacji procesów przetwórczych, ze szczególnym ukierunkowaniem na zagadnienia transportu płynów (szczególnie zmiana pędu), możliwe jest wykorzystanie kilku typów rozwiązań, podejść do zagadnienia. Najbardziej rozpowszechnione jest podejście teoretyczne. Zaletą analizy teoretycznej jest uzyskiwanie dokładnych rozwiązań. Jednak rozwiązania tego typu są możliwe tylko dla bardzo ograniczonej klasy problemów, zazwyczaj sformułowanych w wyidealizowany sposób. Kolejnym podejściem jest działanie eksperymentalne. Polega ono na przeprowadzeniu starannie zaprojektowanego eksperymentu z wykorzystaniem modelu prawdziwego obiektu. Główne wady podejścia eksperymentalnego wiążą się z trudnościami technicznymi oraz wysokimi kosztami eksperymentów. Wreszcie podejście numeryczne (obliczeniowe), łączy w sobie funkcjonalnie oba wcześniej wymienione sposoby, dając jednocześnie możliwość opisanie prawie każdego przypadku przepływu jako zbioru cząstkowych równań różniczkowych. Przybliżone rozwiązanie tych równań uzyskuje się poprzez implementację szeregu procedur obliczeniowych. Takie podejście nie jest bezproblemowe. Przewyższa ono jednak metody analityczne i eksperymentalne w niektórych, bardzo ważnych aspektach: tj. uniwersalności, elastyczności, dokładności i redukcji kosztów samego rozwiązania. Doktorantka trafnie zaznaczyła, iż postęp w elektronice i informatyce, szybka analiza danych, przetwarzanie obrazu i identyfikacja schematów, umożliwiły rozwój bardzo rozbudowanych technik badawczych, stosowanych w wielu różnych dziedzinach nauki i gałęziach działalności przemysłowej. Metoda PIV jest niewątpliwie jedną z najważniejszych technik stosowanych w zagadnieniach analizy dynamiki płynów. Jej główną zaletą jest możliwość uzyskania bezpośredniej i natychmiastowej wizualizacji pola przepływu w nieinwazyjny sposób.

Charakterystyka i struktura rozprawy

Recenzowana praca obejmuje w sumie 233 strony tekstu wraz z załącznikami oraz streszczeniem w językach polskim i angielskim. Praca zawiera 84 rysunki (w tym również zdjęć prezentujących proces badawczy), 15 tabel oraz imponującą bibliografię liczącą 446 pozycji, z których większość obejmuje dzieła nie starsze niż kilkuletnie.

Omawiana praca napisana została w typowym układzie. Rozdział 1. wprowadza czytelnika w zagadnienia opisu problemów badawczych za pomocą narzędzi symulacyjnych, wykorzystywanych do rozwiązywania problemów obejmujących mechanikę płynów.

Kolejny, 2. rozdział opisuje proces warzenia piwa, kładąc nacisk na procesy biologiczne oraz operacje jednostkowe, występujące w kolejnych operacjach technologicznych warzenia. Doktorantka podkreśliła wymagania technologiczne mające wpływ na jakość brzezki piwnej, wskazując na słabe miejsca technologii wynikające z konstrukcji kadzi filtracyjnej lub kadzi wirowej oraz z nieprzestrzegania warunków technologicznych dotyczących jakości surowców. W konkluzji 2. rozdziału Doktorantka, biorąc pod uwagę przegląd literatury, wskazała możliwe obszary usprawnienia procesu separacji polegające na poprawie kształtu dennicy aparatu (kadzi wirowej). Kierunki możliwych działań uzasadniła również reologią brzezki piwnej. Doktorantka trafnie wnioskuje, że strącanie osadu gorącego w kadzi wirowej, zdeterminowane jest właściwościami fizyko-chemicznymi brzezki, na które mają wpływ zmiany zawartości rozpuszczonego białka, wpływając na lepkość brzezki. Rozdział 3. poświęcony jest omówieniu przepływów wirowych i wielofazowych oraz zjawiskom im towarzyszącym. Doktorantka omówiła aparat matematyczny dotyczący równań ruchu. Do opisu rozdziału mieszaniny (brzezki), wykorzystowała model ruchu w spirali Ekmana, który najwierniej odwzorowuje ruch cząstek w kadzi wirowej. Wnioski z rozdziału 3. wyznaczyły kierunek możliwych modyfikacji dennicy, przy czym, jak słusznie zaznaczyła Doktorantka, modyfikacje kadzi wirowej, odpowiadające skali przemysłowej procesu, nie mogą prowadzić do zamkniętej zabudowy uniemożliwiającej, bądź utrudniającej wymywanie nagromadzonego osadu. Ponadto, rozwiązanie nie powinno wprowadzać dodatkowych połączeń spoinowych lub zagłębień, w których może gromadzić się osad, Nie może również wprowadzać elementów zabudowy w osi zbiornika, których występowanie utrudni lub uniemożliwi gromadzenie się osadu w strefie centralnej separatora, wreszcie zaburzać układu przepływów, w tym przepływu bezpośrednio odpowiedzialnego za formowanie się stożka osadu.

Jednocześnie modyfikacja dennicy powinna wprowadzać korzystne warunki dla powstawania naprężeń ścinających w przepływie, które mogą powodować rozbijanie konglomeratów osadu gorącego. Rozdział 4. poświęcony jest zagadnieniom dotyczącym metodom analizy przepływu, w tym cyfrowej anemometrii obrazowej oraz narzędziom wykorzystywanym w symulacjach komputerowych. Doktorantka wykazała słuszność zastosowania modeli fazy rozproszonej DPM oraz modelu granularnego Eulera, jako najlepiej odwzorowujących zjawiska występujące podczas ruchu brzezki w kadzi wirowej. W rozdziale 5. Doktorantka bardzo dokładnie określiła cel pracy, a właściwie trzy cele, tj. *cel poznawczy* dotyczący analizy zjawisk przepływu wielofazowego zachodzącego w kadzi wirowej podczas jej napełniania. Cel poznawczy obejmował również analizę rozdziału faz wywołanych zróżnicowanym kształtem dennicy oraz wzajemnych oddziaływań przepływu wtórnego i zawirowań w separatorze. *Cel użytkowy*, istotny z punktu widzenia praktycznego implementowania rezultatów pracy doktorskiej, dotyczył opracowania różnych rozwiązań konstrukcyjnych dennicy zbiornika kadzi wirowej. Jako funkcję celu Doktorantka wskazała, możliwość zastosowania w praktyce przemysłowej dennicy o najkorzystniejszym profilu rozdziału osadu gorącego i resztek chmielin po gotowaniu brzezki piwnej. Wreszcie, nie mniej istotny *cel metodyczny*, obejmujący opracowanie modeli symulacyjnych komputerowej dynamiki płynów (CFD) opartych o teorię Euler-granularną przepływu wielofazowego z wykorzystaniem śledzenia swobodnej powierzchni, w analizie zjawisk przepływowych, występujących podczas rozdziału faz w kadzi wirowej.

Sformułowane cele pracy doktorskiej, wynikające z obszernej analizy stanu wiedzy, umożliwiły Doktorantce sformułować hipotezę badawczą, która była podstawą do określenia zakresu pracy i planu badawczego. Zakres pracy, Doktorantka przedstawiła w sposób zwięzły, przejrzysty i wyczerpujący.

Rozdział 6. opisuje metodykę badawczą oraz materiały, w tym sposób prowadzenia pomiarów wybranych cech reologicznych i aparatury badawczo pomiarowej. Doktorantka opisuje modele komputerowe użyte w symulacjach ruchu brzezki. Obszerny fragment rozdziału 6. poświęcony jest zapisom matematycznym wykorzystywanym do opisu przepływu brzezki w kadzi wirowej, w tym równania zachowania pędu oraz równania opisujące turbulencje złoża. Dopelnieniem treści rozdziału 6. jest opis metodyki badań przepływu przy użyciu cyfrowej anemometrii obrazu, analizującej rozkład strug oraz wirów występujących w kadzi o zmodyfikowanych dennicach.

Należy podkreślić, że zaplanowany plan badawczy był bardzo obszerny, zaś całość metodyki opracowana jest bardzo dobrze, merytorycznie i starannie, co przy tak rozległym podejściu do tematu mogło stanowić ogromną trudność.

W rozdziale 7. omówione zostały wyniki pomiarów i analiz, a ze względu na obszerność pracy, również ten rozdział został podzielony na podrozdziały. Rozdział 8. obejmuje bardzo szeroką dyskusję uzyskanych wyników. Dopełnienie omawianych zagadnień, obejmujące wnioski o charakterze naukowym, użytecznym oraz propozycje dalszych badań, zawarto w rozdziale 9., w którym Doktorantka potwierdziła osiągnięcie trzech, opisanych w rozdziale 5., celów. Rozdział 9. jest bardzo dobrze i syntetycznie opisany. Dysertację kończy wykaz bibliografii oraz spis rysunków i tabel.

Przedstawiona rozprawa doktorska w całości charakteryzuje się poprawną strukturą logiczną, zachowana jest prawidłowa kolejność rozdziałów oraz proporcje pomiędzy rozdziałami, pozwalające na łatwe śledzenie metodyki badań i wyników prac. Napisana jest w sposób zwarty, czytelny, jasny i precyzyjny. Na wyróżnienie zasługuje opracowanie metodologiczne – bardzo czytelne i merytorycznie bardzo dobrze opracowane.

Wartość naukowa i aplikacyjna rozprawy

Oceniając całość rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Marty Stachnik należy powiedzieć, że:

1. Temat rozprawy jest jasno sprecyzowany i jego wybór uzasadniony.
2. Dobór literatury jest wyczerpujący, zgodny z profilem pracy, tematem, zakresem i podjętą tematyką.
3. Rozprawa ma poprawną strukturę, zachowaną prawidłową kolejność rozdziałów, kompletność celów, tez i uzasadnione wnioski.
4. Bardzo dobrze opracowana metodyka badawcza, opisana szeroko i merytorycznie, a jednocześnie jasna i pozwalająca łatwo śledzić skomplikowany temat badawczy.
5. Praca ma charakter technologiczny, interdyscyplinarny, a badania stanowiskowe pozwoliły na twórcze rozwinięcie zagadnień technologicznych i uzyskanie praktycznych wyników, pozwalających na wykorzystanie rezultatów i efektów.
6. Ogromna wartość aplikacyjna pracy pozwalająca na wdrożenie praktycznych rozwiązań w zakresie technologii warzenia piwa.
7. Osiągnięte w pracy wyniki i rezultaty, potwierdzone licznymi publikacjami można uważać za istotnie liczące się w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

8. Duża staranność w opisach, zwłaszcza trudnych kwestii użytego aparatu matematycznego oraz skomplikowanych badań laboratoryjnych i stosowanych do badań rozwiązań, zasługująca na wyróżnienie.
9. Uzyskany patent Pat.233379, dopełnia bardzo wysoką wartość aplikacyjną wyników badań uzyskanych przez Doktorantkę.

Opracowany plan badań, przeprowadzone analizy, opis doświadczeń oraz kompletność tez i wniosków w pracy, świadczą o dojrzałości naukowej Doktorantki oraz o kompletności i rzetelności wykonanie pracy. Omawiana problematyka ma duże znaczenie zarówno poznawcze oraz utylitarne.

Praca napisana jest w sposób zwarty, zadbano o poprawność językową i stylistyczną. Nieliczne, wręcz pojedyncze błędy literowe, w żaden sposób nie wpływają na bardzo wysoki poziom dysertacji.

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi i pytania:

1. W pracy posługuje się Pani w obliczeniach stałą „g“, która jest oczywiście przyspieszeniem ziemskim, a nie siłą grawitacji (oznaczenia symboli użytych w dysertacji, strona 10). Oczywiście traktuję ten błąd jako przeoczenie, gdyż inaczej, nie mielibyśmy zgodności jednostek, gdyż siłę wyraża się w N ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) a nie tak jak Pani oznaczenie $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Ponieważ w obliczeniach posługuje się pani poprawnymi jednostkami, więc nie traktuje tego jako błędu.
2. W opisie badań stanowiskowych za pomocą techniki PIV (Particle Image Velocimetry) wskazała Pani na stronie 91, że zbiornik testowy, który odpowiadał kadzi wirowej napełniała Pani wodą o temperaturze 20°C . Na stronie 86, opisując model symulacyjny, przyjęła Pani temperaturę 80°C , odpowiadającej temperaturze brzezki w kadzi wirowej. Czy różnica temperatur jest zamierzona, a jeśli tak to z jakich przesłanek to wynika?
3. W symulacjach PIV, dla uzyskania znaczącej zgodności symulacji z badaniami stanowiskowymi, zakłada się utrzymanie stałej przezroczystości ośrodka, dla którego prowadzi się badania. Czy ten warunek był spełniony, podczas badań i czy nie dochodziło do zmiany przezroczystości ośrodka, podczas formowania się stożka sedymentacyjnego w kadzi wirowej, wypełnionej fazą rozproszoną (wtracenia, białka, etc)?

4. Czy miała Pani możliwość zastosowania aplikacyjnego zaproponowanych rozwiązań w praktyce i czy istnieje możliwość wykonania przedstawionych badań przynajmniej w skali póltechnicznej?

Moje uwagi i pytania nie umniejszają jednak wartości naukowej przedstawionego opracowania.

Podsumowanie

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka dowiodła umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej poprzez zaplanowanie eksperymentu, postawienie tez badawczych, prowadzenie badań i wnioskowanie z przeprowadzonych badań.

W świetle powyższego stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Marty Stachnik, przygotowana pod opieką promotorską dr hab. inż. Marka Jakubowskiego, prof. PK oraz dr inż. Moniki Sterczyńskiej, spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595 z późn. zm.) i stawiam wniosek o **dopuszczenie Pani mgr inż. Marty Stachnik do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.**

Z uwagi na wysoką wartość naukową, jej oryginalność i obszerność przeprowadzonych badań, potwierdzonych dodatkowo licznymi publikacjami, wystąpieniami konferencyjnymi, oraz patentem, proponuję Wysokiemu Senatowi Politechniki Koszalińskiej wyróżnienie przedstawionej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Marty Stachnik, co dodatkowo załączam w odrębnym wniosku, załączonym do niniejszej recenzji.

