

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr inż. Mateusza Bartczaka
pt. „Intensyfikacja wymiany masy w bioreaktorze z mieszaniem typu *wave*”

Recenzja została opracowana w związku z postępowaniem w sprawie nadania Panu mgr inż. Mateuszowi Bartczakowi stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno–technicznych, w dyscyplinie inżynieria chemiczna, zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna z dnia 9 grudnia 2025 r. oraz w odpowiedzi na pismo Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Sosnowskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Politechniki Warszawskiej, z dnia 15 grudnia 2025 r. Rozprawę zrealizowano pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Macieja Pilarka, prof. uczelni z Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej.

Charakterystyka i doskonalenie bioreaktorów z mieszaniem typu *wave* oraz opis ilościowy bioprocessów prowadzonych w tego typu aparatach mają istotne znaczenie z punktu widzenia przemysłu biofarmaceutycznego, m.in. w kontekście produkcji białek rekombinowanych. Mieszanie typu *wave* umożliwia prowadzenie hodowli komórek szczególnie narażonych na negatywne skutki stresu związanego z występowaniem naprężeń ścinających, np. komórek ssaczych. Temat przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej należy uznać za aktualny i w pełni uzasadniony, a jego związek z dyscypliną inżynieria chemiczna nie budzi wątpliwości.

Rozprawę otwierają streszczenia w języku polskim i angielskim. W kolejnej części podano dorobek naukowy Autora, spis treści, listę symboli i skrótów. Po wstępie, przedstawionym w rozdziale 1, zdefiniowano główny cel, zakres oraz tezy rozprawy. W kolejnych rozdziałach zawarto wprowadzenie, czyli przegląd literatury (rozdział 3), opis materiałów i metod badawczych (rozdział 4), omówienie wyników i dyskusję (rozdział 5), podsumowanie i wnioski końcowe (rozdział 6). Rozdziały 7, 8 i 9 to, kolejno, spis źródeł literaturowych (bibliografia zawierająca 154 pozycje), spis rysunków i spis tabel. Ostatnią częścią pracy jest zbiór pełnych tekstów czterech monotematycznych publikacji wchodzących w skład rozprawy wraz z opisem wkładu Doktoranta jako pierwszego autora (rozdział 10). W mojej ocenie, struktura pracy jest prawidłowa i typowa dla tego typu opracowań.

Autor poprawnie zdefiniował główny cel, tj. intensyfikację wymiany masy w bioreaktorze *single-use* z mieszaniem typu *wave* poprzez strukturalne modyfikacje geometrii polimerowych zbiorników do hodowli biomasy, oraz nakreślił bardzo szeroki zakres prac eksperymentalnych i obliczeniowych. Tezy, których słuszność potwierdzono w ramach rozprawy, również nie budzą zastrzeżeń. Należy podkreślić, że dla każdego z etapów realizacji zadań badawczych sformułowano cele szczegółowe, związane z celem głównym. Zostały one przedstawione wraz z merytorycznym uzasadnieniem w rozdziale 5 dotyczącym wyników i dyskusji.

Po zapoznaniu się z przeglądem literatury stwierdzam, że Doktorant zaprezentował ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria chemiczna oraz omówił w sposób wyczerpujący i rzetelny tematy związane z rozprawą. Dobór pozycji literaturowych oraz zakres merytoryczny przedstawionych opisów oceniam bardzo dobrze. Co ważne, Autor pracy podszedł do omawianych zagadnień w sposób krytyczny. W rozprawie przedstawiono nie tylko korzyści wynikające z zastosowania bioreaktorów *single-use* i polimerowych zbiorników, ale również poinformowano czytelników o pewnych problematycznych kwestiach związanych z użytkowaniem tego typu aparatury (str. 40 i 41). W przypadku omawiania sposobów określania wartości czasu mieszania w bioreaktorach, zwrócono uwagę na potencjalne trudności i ograniczenia związane z poszczególnymi technikami, np. na str. 53 odnotowano, że w metodzie kolorymetrycznej występuje „ryzyko wzajemnego przesłaniania obszarów cieczy o różnej barwie”.

Wybór metod eksperymentalnych i obliczeniowych jest w pełni uzasadniony, a ich opis przygotowano w sposób prawidłowy, z uwzględnieniem aktualnych źródeł literaturowych. Doktorant zastosował zarówno podejścia wcześniej opisane i zweryfikowane, jak i zaproponował oryginalne rozwiązania, np. algorytmy umożliwiające przeprowadzenie analizy obrazu. Warto w tym miejscu zauważyć, że opracowanie autorskiej adaptacji metody kolorymetrycznej, stanowiące jedno z najważniejszych osiągnięć pracy, zrealizowano z uwagi na dostrzeżone wady metody pH, np. brak możliwości obserwacji postępu procesu mieszania w całej objętości cieczy, czy też ograniczoną powtarzalność pomiarów (zgodnie z opisem na str. 108). Zatem, kwestie związane z metodyką miały w tym przypadku fundamentalne znaczenie, gdyż stały się dla Autora motywacją do opracowania autorskiego rozwiązania.

Wysoko oceniam komentarze i wyjaśnienia zamieszczone w rozdziale dotyczącym metodyki. Autor dołożył wszelkich starań, aby u czytelników nie pojawiły się wątpliwości dotyczące wybranego podejścia badawczego lub zastosowanych rozwiązań technicznych. Przykładowo, na str. 69 podano informację, że parametry nagrywania ustawiono manualnie „w celu przeciwdziałania wykonywanej przez kamerę GoPro automatycznej kompensacji zmian jasności i zabarwienia zawartości polimerowego zbiornika w trakcie mieszania”. Na str. 77 zapisano komentarz na temat uwzględnienia stopnia napełnienia zamiast objętości cieczy

w zbiorniku, co „umożliwiło bezpośrednie powiązanie uzyskanych charakterystyk czasu mieszania w zbiornikach Cellbag™ o różnych objętościach nominalnych”.

Prace badawcze, których wyniki zostały opisane w rozdziale 5, charakteryzowały się bardzo rozbudowanym zakresem. Pierwszy etap dotyczył określenia wpływu parametrów procesowych bioreaktora na wydajność mieszania oraz wpływu wybranych właściwości fazy ciekłej na wnikanie masy w badanym układzie. W drugiej części skupiono się na opracowaniu adaptacji metody kolorymetrycznej z komputerową analizą obrazu do pomiaru czasu mieszania. Przeprowadzono również analizę struktury falującej powierzchni międzyfazowej w zbiorniku. Podczas realizacji trzeciego etapu pracy skoncentrowano się na oszacowaniu efektów proponowanych modyfikacji geometrii zbiornika. Następnie, dla wybranego wariantu wyznaczono wartości czasu mieszania i współczynnika k_{LA} , po czym zweryfikowano eksperymentalnie wpływ modyfikacji zbiornika na wzrost biomasy komórek roślinnych *Nicotiana tabacum*. Opisy przebiegu oraz wyników badań przedstawiono w sposób uporządkowany i przejrzysty. Chciałbym w tym miejscu podkreślić, że przeprowadzenie tak szeroko zakrojonych prac wymagało opanowania bogatego warsztatu badawczego. Obsługa bioreaktorów, opracowanie algorytmów do przetwarzania obrazu, budowa stanowiska badawczego do rejestrowania materiału filmowego, wykorzystanie metod statystycznych, prowadzenie hodowli komórek roślinnych, symulacje przepływu cieczy, obliczenia inżynierskie związane z wymianą masy w bioreaktorze – wszystkie te elementy umiejętnie zintegrowano w ramach tematycznie spójnej pracy doktorskiej. Dodatkowe informacje, dotyczące np. zastosowanych metod, zawarto w publikacjach w rozdziale 10. Można w nich również znaleźć fotografie stanowiska badawczego. Przykładowo, na str. 224 przedstawiono autorsko zaprojektowany i wydrukowany z zastosowaniem drukarki 3D statyw, na którym zamontowano kamerę. Autor wymienił najważniejsze osiągnięcia pracy na str. 153. Zaliczył do nich m.in. zaproponowanie szeregu korelacji umożliwiających szacowanie wartości czasu mieszania w funkcji parametrów operacyjnych bioreaktora, opracowanie autorskiej adaptacji metody kolorymetrycznej do pomiaru czasu mieszania oraz zmodyfikowanie zbiorników *single-use* pod kątem intensyfikacji mieszania i wnikania masy. Po zapoznaniu się z częścią eksperymentalną rozprawy stwierdzam, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Od strony językowej opracowanie nie budzi zastrzeżeń. Autor poprowadził narrację w sposób przemyślany, logiczny i płynny. Wykazał się przy tym zdolnością formułowania klarownych i jednocześnie dość przystępnych opisów skomplikowanych zagadnień. Jedyne w nielicznych przypadkach zastosowano w pracy bardzo rozbudowane zdania, których redakcja byłaby warta rozważenia, np. ostatnie zdanie na str. 28 (wiersze od 27 do 34). Należy jednak zaznaczyć, że takie fragmenty pojawiają się w pracy bardzo rzadko i nie wpływają negatywnie na odbiór rozprawy jako całości.

Z uwagi na tematykę, starannie przygotowane opisy i przejrzystą formę, praca może stanowić interesującą lekturę nie tylko dla wąskiego grona specjalistów, lecz również dla szerszej grupy czytelników posiadających jedynie ogólną wiedzę na temat bioreaktorów. Pan mgr inż. Mateusz Bartczak zademonstrował głębokie zrozumienie zagadnień stanowiących przedmiot rozprawy, co pozwoliło mu nie tylko dostrzec i prawidłowo zdefiniować aktualne problemy badawcze, ale również zaproponować oryginalne rozwiązania. Co ważne, potrafił umiejętnie je opisać, stosując przejrzysty i zrozumiały styl podczas omawiania treści o charakterze naukowym.

Korektę tekstu przeprowadzono starannie, z dbałością o szczegóły. W pracy można zauważyć jedynie nieliczne błędy w tym zakresie, np. podanie nazwy rodzaju „*Penicillum*” zamiast poprawnej nazwy „*Penicillium*” w tabeli 1 na str. 38. Inny przykład to odniesienie się w tekście na str. 47 do równań (1) i (2) w tabeli 4, w której zawarto jedynie równania oznaczone numerami (5), (6) i (7). Autor nie ustrzegł się drobnych błędów polegających na braku ujednoczenia formatu opisu bibliograficznego. Przykładowo, nazwę czasopisma *Engineering in Life Sciences* zapisano w spisie literatury w rozdziale 7 zarówno w formie pełnej, jak i skróconej (*Eng. Life Sci.*). W spisie symboli i skrótów zabrakło pozycji „FW”, zdefiniowanej jako „wydajność końcowa biomasy”. Można również zauważyć, że w pracy znalazły się liczne odniesienia do „objętości roboczej” i „objętości nominalnej” zbiornika, jednakże słowo „objętość” zostało w niektórych przypadkach zastąpione słowem „pojemność”, np. we fragmencie „zbiorniki Cellbag™ 2 L o pojemności roboczej do 1 L oraz pojemności nominalnej 2 L” (str. 91). Wskazane byłoby konsekwentne stosowanie słowa „objętość” w całym opracowaniu. Chciałbym podkreślić, że uwagi przedstawione powyżej, poczynione z obowiązku recenzenta, nie umniejszają wartości poznawczej rozprawy i w żaden sposób nie wpływają na bardzo wysoką ocenę pracy jako całości.

W trakcie analizy tekstu nasunęło mi się kilka pytań o charakterze dyskusyjnym. Uprzejmie proszę Autora o odniesienie się do poniższych kwestii podczas publicznej obrony:

- 1) Zgodnie z informacją podaną na str. 46 rozprawy, wartość współczynnika k_{LA} w bioreaktorach z mieszaniem typu *wave* zwiększa się wraz ze zwiększaniem stopnia napełnienia cieczą zbiornika. Z tabeli 3 na str. 46 wynika, że niektóre opublikowane we wcześniejszych pracach wartości k_{LA} uzyskano przy stopniu napełnienia zbiornika sięgającym 50%. Autor rozprawy zdecydował się wyznaczyć k_{LA} przy stopniu napełnienia zbiornika na poziomie 15% (str. 66). Warto zauważyć, że ta sama wartość stopnia napełnienia występuje również w kontekście symulacji CFD, jak podano na str. 128. W jaki sposób dokonano wyboru tej wartości?
- 2) W pracy zastosowano metodę obliczenia k_{LA} bez obecności biomasy w bioreaktorze. Jest to podejście, które ze względu na wiele zalet jest najczęściej stosowane i, w mojej ocenie, jak najbardziej uzasadnione w badanym przypadku. Z drugiej jednak strony, z uwagi na brak biomasy w układzie, wyniki mogą nie odzwierciedlać warunków bioprocessowych. Czy

Autor podejmował próby wyznaczenia k_{LA} w obecności biomasy i scharakteryzowania zmian wartości k_{LA} podczas hodowli?

- 3) Czy w ramach adaptacji metody kolorymetrycznej testowano rozwiązania techniczne, które ostatecznie zostały z jakiegoś powodu odrzucone? Informacje tego typu pozwoliłyby osobom zainspirowanym pracą Doktoranta uniknąć błędów przy próbie opracowania podobnych metod. Czy przetestowano inne ustawienia elementów oświetlenia zamontowanych na statywie? Czy w przypadku zastosowanej metody istniała możliwość wystąpienia interakcji chemicznych prowadzących do zmian barwy polimerowego zbiornika i czy zauważono powstawanie osadów? Czy na wewnętrznej powierzchni zbiornika widoczne były krople cieczy i czy taka sytuacja mogłaby w zauważalnym stopniu wpłynąć na wynik analizy, tj. liczbę pikseli odczytaną dla danego wariantu? Czy zauważono zmiany kształtu zbiornika podczas wykonywania pomiarów?
- 4) Czy, zdaniem Autora rozprawy, możliwe byłoby wykorzystanie opisanego w pracy stanowiska badawczego pod kątem monitorowania wzrostu biomasy lub ilościowego scharakteryzowania tworzenia aglomeratów komórek na poziomie makroskopowym? Przykładowo, w przypadku hodowli wglębnej niektórych gatunków grzybów szczególnie interesujące byłoby sformułowanie opisu zmian wielkości i kształtu aglomeratów grzybni w bioreaktorze z mieszaniem typu *wave*. Aglomeraty tego typu nie zawsze można analizować na poziomie mikroskopowym ze względu na relatywnie duże pole powierzchni rzutu obserwowanych obiektów. Czy podejście oparte na hodowli w bioreaktorze z mieszaniem typu *wave*, rejestracji materiału filmowego i analizie obrazu mogłoby, w opinii Autora, okazać się pomocne w takim przypadku i jakie modyfikacje metody byłyby konieczne? Należałoby oczywiście wziąć pod uwagę wyzwania związane z analizą obrazu. Czy możliwe byłoby poprawne rozpoznanie poszczególnych aglomeratów na tle podłoża i w obecności innych struktur grzybni? Czy metoda mogłaby zostać wykorzystana pod kątem dalszej analizy hodowli komórek *N. tabacum*?

Chciałbym w tym miejscu zwrócić uwagę na dorobek publikacyjny Doktoranta, obejmujący 4 publikacje w czasopismach z listy Journal Citation Reports (tj. dwa artykuły w *Chemical Engineering Journal*, jeden artykuł w *Industrial and Engineering Chemistry Research* i jeden w *Energies*) oraz 5 publikacji w monografiach konferencyjnych. Należy podkreślić, że we wszystkich wymienionych publikacjach Pan mgr inż. Mateusz Bartczak jest pierwszym autorem. Prace te zostały już zauważone w środowisku naukowym, o czym świadczą cytowania publikacji. Zgodnie z bazą Scopus (stan na dzień 17.02.2026), liczba cytowań wynosi 34. Dodatkowo, według informacji przedstawionych w rozprawie, Autor posiada w swoim dorobku liczne referaty i postery konferencyjne oraz 4 zgłoszenia patentowe, dotyczące m.in. zbiorników hodowlanych z wypustkami oraz ich zastosowań pod kątem hodowli biomasy. Warto wspomnieć, że Pan mgr inż. Mateusz Bartczak otrzymał grant Dziekana Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej oraz był

laureatem konkursu skierowanego do młodych naukowców, realizowanego w ramach Programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Biorąc pod uwagę etap kariery naukowej i osiągnięcia Doktoranta uważam, że Pan mgr inż. Mateusz Bartczak posiada wyróżniający dorobek naukowy i wykazuje dużą aktywność publikacyjną i konferencyjną.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym, jak i formalnym. Opracowanie dotyczy aktualnej tematyki, istotnej z punktu widzenia rozwoju inżynierii chemicznej. Praca zawiera wiele elementów nowości, a jej poziom naukowy i bardzo szeroki zakres zasługują na uznanie. Cele sformułowane w pracy zostały w pełni osiągnięte. Należy podkreślić, że wyniki zaprezentowane w rozprawie opublikowano w renomowanych czasopismach, takich jak *Chemical Engineering Journal*. Opracowana przez Doktoranta adaptacja metody kolorymetrycznej otwiera nowe perspektywy badawcze, a uzyskane wyniki stanowią wartościowy wkład w rozwój inżynierii bioreaktorów. W mojej ocenie, Autor opracowania zaprezentował ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria chemiczna i przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z intensyfikacją wymiany masy w bioreaktorach. Dowiódł, że posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Intensyfikacja wymiany masy w bioreaktorze z mieszaniem typu *wave*” autorstwa Pana mgr inż. Mateusza Bartczaka spełnia warunki określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Mateusza Bartczaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ponadto, z uwagi na bardzo wysoki poziom merytoryczny pracy, szeroki zakres przeprowadzonych badań, a także osiągnięcia i aktywność naukową Doktoranta, składam wniosek o wyróżnienie rozprawy.

.....Tomasz Boruta.....

dr hab. inż. Tomasz Boruta