



OPINIA O PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Mateusza BARTCZAKA

pt. „Intensyfikacja wymiany masy w bioreaktorze z mieszaniem typu wave”

opracowana na podstawie pisma Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Sosnowskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Politechniki Warszawskiej, z dnia 15 grudnia 2025 r., zgodnie z uchwałą RNDICh.12-2.2025.

Praca wykonana w Zakładzie Biotechnologii i Inżynierii Bioprosesowej
Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej
Politechniki Warszawskiej
pod kierunkiem dr. hab. inż. Macieja Pilarka, prof. PW

1. Ocena strony formalnej oraz dorobku naukowego. Podwaliny teoretyczne oraz wyniki badań przeprowadzonych w zakresie realizowanej pracy doktorskiej zostały opublikowane w czterech artykułach na łamach czasopism należących do JCR:

- A1.** Bartczak M., Wierzchowski K., Pilarek M., (2022). *Mixing performance in a litre-scale rocking disposable bioreactor: DoE-based investigation of mixing time dependence on operational parameters*, Chemical Engineering Journal, 431, 133288, doi: [10.1016/j.cej.2021.133288](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133288) (IF₂₀₂₂ = 13,273; Punktacja MNiSW: 200 pkt);
- A2.** Bartczak M., Wierzchowski K., Pilarek M., (2023). *Mass Transfer in a Liter-Scale Wave Mixed Single-Use Bioreactor: Influence of Viscosity and Antifoaming Agent*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 62, 10893-10902, doi: [10.1021/acs.iecr.3c00736](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00736) (IF₂₀₂₃ = 3,764; Punktacja MNiSW: 140 pkt);
- A3.** Bartczak M., Pilarek M., (2024). *The Colourimetric Method for Mixing Time Measurement in Single-Use and Multi-Use Bioreactors—Methodology Overview and Practical Recommendations*, Energies, 17, 1-20, doi: [10.3390/en17010221](https://doi.org/10.3390/en17010221) (IF₂₀₂₃ = 3,0; Punktacja MNiSW: 140 pkt);
- A4.** Bartczak M., Yilmaz T., Sączek M., Anderson A., Wierzchowski K., Pilarek M., (2025). *Characterisation of litre-scale wave-mixed bioreactors using colourimetric method adaptation: Mixing performance, flow regime and scale change study*, Chemical Engineering Journal, 509, 161295, doi: [10.1016/j.cej.2025.161295](https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161295) (IF₂₀₂₃ = 13,4; Punktacja MNiSW: 200 pkt).

Sumaryczne wartości współczynnika oddziaływania IF całego cyklu, przypadające na rok opublikowania, oraz punktacji ministerialnej osiągają imponujące wartości równe odpowiednio 33,437 (średni na publikację 8,359) oraz 680. We wszystkich publikacjach cyklu Doktorant pełni rolę pierwszego Autora. Dane zawarte w Rozdziale 10 informują o wysokim wkładzie Doktoranta w tworzeniu każdej z prac wchodzących w skład cyklu: od dogłębnego przeglądu literatury, poprzez opracowanie koncepcji badań i dominujący udział w pracach eksperymentalnych, opracowanie statystyczne i graficzne otrzymanych wyników wraz z korelacjami pomiędzy wielkościami istotnymi z punktu widzenia intensyfikacji wymiany masy w analizowanym typie bioreaktora, aż po merytoryczną dyskusję z pozostałymi współautorami prowadzącą do finalnej formy każdego z artykułów. W związku z powyższym, *pod względem formalnym i bibliometrycznym przedstawiona do recenzji dysertacja doktorska w pełni odpowiada wymaganiom jej stawianym.*

Należy nadmienić, że wyniki prezentowane w dysertacji doktorskiej, Pan mgr inż. Mateusz Bartzak uzyskał podczas realizacji 3 projektów badawczych, przy czym w przypadku dwóch z nich pełnił rolę kierownika.

Ponadto, rozwiązania techniczne zastosowane w bioreaktorze *single-use* z mieszaniem typu *wave*, w celu intensyfikacji wymiany masy, oraz metody aplikowane podczas badań warunków operacyjnych wspomnianego bioreaktora stały się treścią 4 zgłoszeń patentowych, co dodatkowo zwiększa doświadczenie Doktoranta w różnych obszarach działalności naukowej.

Podsumowując, na sumaryczny dorobek Doktoranta składają się:

- 4 artykuły w czasopiśmie z listy Journal Citation Report (JCR) stanowiące jednotematyczny cykl publikacji,
- 4 zgłoszenia patentowe,
- udział w realizacji 3 projektów badawczych,
- 5 publikacji w monografiach konferencyjnych,
- 7 referatów wygłoszonych na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych,
- 8 wystąpień w sesjach posterowych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych

Przedstawione do oceny materiały wskazują na znakomite doświadczenie badawczo-publicystyczne i organizacyjne Doktoranta, które nie tylko w pełni kwalifikują go do ubiegania się o stopień naukowy doktora, lecz również dają podwaliny do kierowania projektami. *Wysoko, zatem, oceniam obecny dorobek naukowy i kwalifikacje Doktoranta, rokujące szybki i płynny awans na stanowisko samodzielnego pracownika naukowego po uzyskaniu stopnia doktora.*

2. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej. Większość procesów biologicznych przebiega w układach heterogenicznych, w których – oprócz kinetyki procesu biologicznego – należy uwzględnić mechanizm transportu masy, stopień jednorodności układu, warunki hydrodynamiczne oraz ograniczenia substratowe i tlenowe. To właśnie one, a nie zachowania biologiczne, decydują o wypadkowej szybkości procesu. Zatem stworzenie warunków procesowych intensyfikujących wymianę masy należy do największych wyzwań w inżynierii bioprosesowej, szczególnie w przypadku procesów biologicznych przebiegających w środowisku tlenowym. W miarę wzrostu gęstości biomasy wzrasta zapotrzebowanie na tlen, którego ilość w fazie ciekłej jest limitowana jego niską rozpuszczalnością oraz oporami transportu tlenu na granicy faz. Aby obejść wspomniane niedogodności procesowe można zintensyfikować mieszanie, zredukować średnicę pęcherzy powietrza, czy zastosować czysty tlen, jednak żadne z nich nie gwarantuje poprawy warunków procesowych ze względu na możliwość występowania stresu hydrodynamicznego, czy mechanicznego komórek i w konsekwencji spadku produktywności bioreaktora. Zatem, w mojej opinii, *wybór przedmiotu rozprawy doktorskiej i przewidywany przez Doktoranta zakres prac badawczych uważam za właściwy i w pełni uzasadniony, a podjęty problem naukowy został postawiony poprawnie i zdefiniowany w sformułowanych тезach dysertacji.*

Tło teoretyczne oraz wyniki swoich badań Doktorant przedstawił w cyklu publikacji [A1-A4], które zostały uporządkowane w logicznej kolejności przedstawionej powyżej. Publikacje te, wraz z przejrzystym i bardzo szczegółowym przewodnikiem, wskazują na szeroko zakrojone, interdyscyplinarne zainteresowania Doktoranta, które wymagały kompilacji wszechstronnej wiedzy i narzędzi badawczych z różnych obszarów naukowych, włączając metody komputerowej mechaniki płynów, zaawansowane metody statystyczne oraz metody przetwarzania i analizy obrazu.

Pan mgr inż. Mateusz Bartczak podjął bardzo szerokie wyzwanie naukowe koncentrując się na analizie doboru warunków procesowych, intensyfikujących wymianę masy w bioreaktorze *single-use* z mieszaniem typu *wave*, wykorzystywanym w nowoczesnych hodowlach przemysłu biofarmaceutycznego. Badania przeprowadził w bioreaktorze *ReadyToProcess WAVE™ 25*, którego integralną część stanowił polimerowy zbiornik *Cellbag™* o pojemnościach 2 i 10 litrów

Badania opierały się o weryfikację trzech hipotez postawionych przez Doktoranta, które ukierunkowały Jego prace badawcze, a zostały sformułowane w Rozdziale 2, str. 24.

Zasadność podjętych badań, motywacja do ich przeprowadzenia, jak również cele i postawione hipotezy badawcze zostały zawarte we *Wstępie* (Rozdział 1) oraz w Rozdziale 2. *Cele i zakres rozprawy doktorskiej. Tezy naukowe*, by ułatwić Czytelnikowi poruszanie się w obszernym opisie synkretycznych zagadnień naukowych, które Doktorant podejmował.

Całe przedsięwzięcie naukowe zostało zaplanowane w sposób wysoce przemyślany, podparty dogłębną analizą bieżących osiągnięć. Uwagę zwraca logiczny układ prowadzonych badań umożliwiający płynne przejście od podwalin teoretycznych dotyczących omówienia genety bioreaktorów *single-use* oraz wskazanie na najintensywniej rozwijane typy tych aparatów, charakterystyki parametrów – wraz z ich definicjami – wpływających na wymianę masy w poddanym analizie bioreaktorze (Rozdział 3. *Wprowadzenie*) oraz przeglądu literaturowego dotyczącego charakterystyki metod pomiaru czasu mieszania pod wpływem wybranych cech wpływających na ich aplikacyjność w celu określenia charakterystyki wydajności mieszania [A3].

Następnie Doktorant przystąpił w Rozdziale 4 do opisu metodyki pomiarów, rozpoczynając od ilościowej charakterystyki wydajności mieszania przy zastosowaniu metody odczynu pH [A1], metodyki ilościowej identyfikacji charakterystyki wnikania masy w bioreaktorze poddanym analizie w zależności od wybranych właściwości fazy ciekłej [A2], metodyki identyfikacji charakterystyki wydajności mieszania przy aplikacji autorskiej adaptacji metody kolorymetrycznej [A3,A4], metodyki analizy struktury falującej powierzchni międzyfazowej gaz-ciecz [A4] oraz symulacji przepływu cieczy w zbiorniku Cellbag™ przy zastosowaniu obliczeniowej mechaniki płynów, metodyki modyfikacji strukturalnej powierzchni polimerowego zbiornika bioreaktora oraz ostatecznie, metodyki przeprowadzenia eksperymentalnej hodowli zawiesiny komórek *N. tabacum* linii BY-2 w obu wariantach strukturalnych powierzchni zbiornika bioreaktora *ReadyToProcess WAVE™ 25*.

Eksperyment naukowy został zaplanowany i przeprowadzony z dużym rozmachem, z wykorzystaniem algorytmów i narzędzi badawczych w duchu najnowszych, światowych trendów. Należy tutaj wyraźnie podkreślić **opracowanie autorskiej metody kolorymetrycznej**, której wprowadzenie zostało poprzedzone przeglądem literaturowym dotyczącym krytycznego spojrzenia na metody pomiaru czasu mieszania pod względem ich aplikacyjności w celu określenia charakterystyki wydajności mieszania w bioreaktorze typu *single-use* z mieszaniem typu *wave* [A3], ze szczególnym uwzględnieniem metod cyfrowego przetwarzania i analizy materiału filmowego. Imponujące przy tym jest zgromadzenie przez Doktoranta materiału filmowego za pomocą cyfrowej kamery zainstalowanej nieruchomo względem oscylującej platformy bioreaktora na statywie zaprojektowanym na potrzeby badań i wykonanym w wyniku druku 3D, co umożliwiło uzyskanie wysokiej jakości obrazu bez zakłóceń. Następnie, przy pomocy autorskich algorytmów napisanych w języku Python oraz w środowisku Matlab Doktorant przetworzył zgromadzony materiał oraz dokonał jego analizy i weryfikacji statystycznej pod kątem powtarzalności pomiarów uzyskując wręcz znakomitą powtarzalność z wartościami odchylenia standardowego nieprzekraczającego 12 %, co w porównaniu z odchyleniem standardowym na poziomie około 30% w przypadku metody odczynu pH stanowi znakomite osiągnięcie.

Wyznaczone charakterystyki czasu mieszania przy użyciu doskonale opracowanej i dostosowanej do warunków pomiarowych metody, Doktorant poddał analizie regresji, by skorelować wartości czasu w celu wyznaczenia równań korelacyjnych pomiędzy wartościami czasu mieszania oraz zmiennymi charakteryzującymi pracę poddanego analizie bioreaktora *ReadyToProcess WAVE™25* (amplituda α i częstotliwość oscylacji ω platformy bioreaktora oraz stopień napełnienia fl), które w sposób istotny statystycznie determinują ilościowo warunki mieszania. Opracowane równania korelacyjne stanowią „produkt finalny” badań – niezwykle istotny z punktu widzenia praktyki inżynierskiej – gdyż umożliwiają przewidywanie wartości czasu mieszania w zależności od warunków operacyjnych bioreaktora, scharakteryzowanych przez całkowity zbiór danych eksperymentalnych (wejściowych). Nieco dokładniejsza analiza Doktoranta pokazała, że zadowalające wartości prognozowanych czasów mieszania uzyskuje się, gdy zbiór danych eksperymentalnych zostanie podzielony na te, dla których czas mieszania $t_{95\%}$ jest krótszy od 100 sekund, co odpowiada najczęstszym sytuacjom spotykanym podczas hodowli tlenowych, oraz tych, dla których czas mieszania jest dłuższy od wspomnianego. Postępując w ten sposób Doktorant uzyskał Rów. (26) i (27) aproksymujące czas mieszania w pierwszym przypadku oraz Rów. (24) i (25) w drugim z rozważanych przypadków, dla obu analizowanych wariantów pojemności zbiornika. Na ich podstawie Doktorant wyselekcjonował zmienną operacyjną (częstotliwość oscylacji ω), która w sposób najbardziej znaczący wpływa na wydajność mieszania.

Zgromadzony materiał filmowy dokumentujący przebieg badań w zakresie wyznaczenia czasu mieszania Doktorant wykorzystał w celu przeprowadzenia analizy charakteryzującej przepływ cieczy w polimerowym zbiorniku bioreaktora w obu analizowanych wariantach objętości [A4]. W oparciu o dostępne w literaturze zdefiniowane struktury kształtu powierzchni swobodnej cieczy (6 kategorii), Doktorant przyporządkował kształt falującej powierzchni międzyfazowej do reżimu przepływu fazy ciekłej poddanej mieszanemu typu *wave*, uwzględniając zarówno czasy mieszania, jak i wartości zmiennych operacyjnych, za pomocą których można sterować procesem.

Ostatnim etapem badań prowadzonych w zakresie realizacji celów badawczych była modyfikacja strukturalna zużywalnych zbiorników polimerowych Cellbag™, umotywowana zwiększeniem produktywności bioreaktora poddanego analizie oraz jego elastyczności pod względem obszaru jego zastosowań. I w tym przypadku Doktorant wykazał się niezwykłą intuicją oraz pomysłowością, gdyż zachowując prostotę zastosowanej modyfikacji, doprowadził – jak się okazało podczas walidacji bioprosesowej – do intensyfikacji transportu tlenu bez „zabójczych” dla komórek naprężeń ścinających generowanych wzrostem turbulencji i zawirowań podczas ruchu cieczy. W inżynierii procesów przebiegających z udziałem materii żywej, zapewnienie warunków wolnych od oporów transportu masy i pozbawionych stresu mechanicznego oraz/lub hydrodynamicznego – jak już

wspomniano – jest dla inżynierów najistotniejszym z wyzwań, które w mojej opinii częściowo, ale także znacząco, rozwiązał Doktorant, mgr inż. Mateusz Bartczak.

Uzyskane wyniki eksperymentalne oraz prawidłowości z nich wynikające Doktorant zweryfikował za pomocą symulacji CFD i na tej podstawie wskazał zachowania fazy ciekłej mające bezpośredni wpływ na intensyfikację wymiany masy. Pozwoliło to na potwierdzenie korzystnego wpływu modyfikacji geometrii powierzchni zbiornika Cellbag™ na wydajność mieszania, skutkującą intensyfikacją wydajności wymiany masy oraz finalnie, opracowaniem w pełni funkcjonalnego prototypu innowacyjnego polimerowego zbiornika będącego integralną częścią bioreaktora *ReadyToProcess WAVE™25*.

Aby dowieść praktycznej strony korzyści wynikających z dokonanej modyfikacji strukturalnej powierzchni zbiornika Cellbag™, Doktorant przeprowadził bioprosesową walidację obejmującą zakresem porównanie gęstości biomasy zawiesiny komórek roślinnych *Nicotiana tabacum* linii BY-2, uzyskanej w serii hodowli wstępnych prowadzonych w zbiornikach z modyfikacją oraz bez modyfikacji strukturalnej.

Analiza przebiegu hodowli pokazała, że zastosowanie półkulistych wypustek w strukturze powierzchni zbiornika pozytywnie wpływa na przebieg hodowli i proliferację biomasy, co uwidocznili się nie tylko wzrostem końcowej wydajności biomasy o około 6,5% względem hodowli referencyjnej, lecz również skróceniem czasu niezbędnego do osiągnięcia maksymalnej aktywności metabolicznej i wydłużeniem czasu dostępności tlenu rozpuszczonego w medium hodowlanym.

Należy tutaj wyraźnie podkreślić, że finalny efekt uzyskany podczas eksperymentu jest dziełem perfekcyjnie przeprowadzonej optymalizacji eksperymentu (DoE), co umożliwiło wskazanie zmiennych procesowych odpowiedzialnych w największym stopniu za zachowanie fazy ciekłej w zbiorniku bioreaktora. W efekcie przeprowadzonej procedury planowania eksperymentu (DoE), mgr inż. Mateusz Bartczak wskazał 4 zmienne, mianowicie amplitudę ruchu oscylacyjnego α , częstotliwość ruchu oscylacyjnego ω , parametr acc opisujący profil przyspieszenia w trakcie ruchu oscylacyjnego oraz objętość cieczy w zbiorniku hodowlanym V_L , które pozwoliły na redukcję kosztochłonności prowadzonych badań, a odpowiedni dobór ich wartości przyczynia się do uzyskania pożądanej wydajności bioprosesu.

Wyniki tych ambitnych i efektywnie zrealizowanych przez Doktoranta zadań badawczych mają istotny wkład w światowe osiągnięcia naukowe w obszarze inżynierii reaktorów biochemicznych na rzecz rozwoju przemysłu biofarmaceutycznego oraz w obszarze medycyny spersonalizowanej, terapii komórkowych, czy też wytwarzaniu szczepionek nowej generacji, mających wpływ na wzrost odporności populacji ludzkiej na infekcje wywołane kolejnymi wariantami dobrze znanego na świecie wirusa SARS-CoV-2. ***Wśród najważniejszych osiągnięć – w mojej opinii – należy wskazać opracowanie autorskiej adaptacji***

metody kolorymetrycznej z komputerowym przetwarzaniem i analizą obrazu w celu wyznaczenia czasu mieszania. Osiągnięcie to w sposób kluczowy przyczyniło się do pomyślnej realizacji wszystkich, pozostałych celów badawczych wskazanych przez Doktoranta.

Reasumując, wysoko oceniam walory naukowe przedstawionej mi do recenzji dysertacji: od pomysłu i założonego celu badawczego, poprzez racjonalny harmonogram zaplanowanych badań, wykorzystane interdyscyplinarne narzędzia badawcze, aż po uzyskane wyniki i wysnute z nich wnioski. Słowa uznania kieruję również w stronę kompozycji i treści artykułów wchodzących w skład cyklu, których walory naukowe zostały już wcześniej docenione przez międzynarodowe gremium ekspertów, nie wymagając tym samym mojej szczegółowej opinii. *Zatem, strona naukowa opiniowanej dysertacji w pełni upoważnia Pana mgra inż. Mateusza Bartczaka do ubiegania się o stopień naukowy doktora.*

3. Ocena edytorskiej strony pracy. Rozprawa poddana ocenie stanowi obszerne, bo liczące 237 stron opracowanie, które zawiera wszystkie elementy wymagane dla dysertacji doktorskiej, ujęte w formie 10 rozdziałów, zawierających nierzadko kilka podrozdziałów. Dobór 154 źródeł literaturowych – pięćdziesiąt procent z tych prac zostało opublikowanych w ciągu ostatnich 10 lat – w mojej opinii jest trafny i odpowiada aktualnemu stanowi wiedzy z problematyki podjętej przez Doktoranta.

Ogólnie można stwierdzić, że użyty w dysertacji przez Doktoranta język charakteryzuje się zwięzłością i wysokim poziomem naukowym. Można jedynie znaleźć zbyt długie i wielokrotnie złożone zdania, które zmuszają Czytelnika do dłuższego zastanowienia. W samej dysertacji uwagę zwraca jej przyjemna i estetyczna szata graficzna, na którą składają się kolorowe wykresy i ryciny. Tych ostatnich jednak zabrakło w Rozdziale 3, w części poświęconej *Systematyce*, by zobrazować i jednocześnie porównać geometrycznie trzy najobszerniej i najintensywniej rozwijane typy aparatów typu *single-use*.

Pomimo ogromnej ilości danych, znalazłem jedynie nieliczne uchybienia edytorskie, stylistyczne/językowe, np.:

- **str. 22, piąta linia od dołu:** „...a wartościami parametrów operacyjnych charakteryzującymi realizowany proces.”;
- **str. 35, druga linia od dołu** – „...stwarza możliwość zachowania konfigurowalności organizacji realizacji procesu produkcji...”, (prośba o wyjaśnienie w trakcie obrony, jak należy rozumieć to sformułowanie);

czy też lapsus językowy popełniony na str. 45, w odniesieniu do rów. (4), gdzie Autor dysertacji pisze: „Szybkość wnikanía tlenu w Równaniu 4 jest wyrażona jako iloczyn współczynnika przenikania po stronie cieczy K_L , właściwej powierzchni międzyfazowej...” – współczynnik przenikania tlenu K_L charakteryzuje globalną intensywność wymiany masy

na granicy faz gaz-ciecz i w tym wypadku jest równy współczynnikowi jego wnikania k_L po stronie fazy ciekłej, jako że opory transportu po stronie fazy gazowej są do pominięcia.

4. Uwagi i pytania. Lektura dysertacji oraz załączony cykl publikacji nasunęły kilka drobnych uwag oraz pytań:

- (1) W reaktorze *single-use*, podczas hodowli biomasy zapotrzebowanie tlenu zmienia się wraz ze zmianą gęstości wygenerowanej biomasy. Jak ten problem został rozwiązany przez Doktoranta podczas hodowli eksperymentalnych?
- (2) Rysunek 20 przedstawia – jak stwierdził Doktorant – w przybliżeniu, liniową zależność między objętościowym współczynnikiem wnikania masy (k_{La}), a zmodyfikowaną liczbą Reynoldsa (Re_L). Czy uzyskana zależność liniowa jest z góry założona i oceniona statystycznie, czy jest wynikiem analizy regresji przeprowadzonej względem różnych aproksymacji? Jeżeli nie, to czy jest możliwe takie podejście, z uwzględnieniem innej, aniżeli liniowa, aproksymacji (zgodnie z zasadami) i porównanie podstawowych ocen statystycznych?
- (3) Podczas weryfikacji bioprosesowej Doktorant uzyskał krzywe procesowe (Rys. 50) przedstawiające zmiany gęstości biomasy w czasie. Wykres ten może stanowić podstawę do identyfikacji podstawowych parametrów kinetycznych opisujących wzrost biomasy i możliwości śledzenia ich wartości wraz ze zmianą współczynników wnikania masy. Dlaczego Autor dysertacji nie zastosował takiego podejścia? Umożliwiłoby to w formie matematycznej opis kinetyczny zachodzących przemian, możliwość orientacyjnego wyznaczenia ilości produktów hodowli oraz walidacji uzyskanych wyników.
- (4) Doktorant zaproponował równania korelacyjne (Rów. (21)-(23)), opisujące zależność pomiędzy czasem uzyskania homogeniczności medium, a zmiennymi procesowymi. Chociaż Doktorant zamieścił w dysertacji oraz w treści publikacji [A1] dyskusję nad korelacją (w tej ostatniej podano wartości współczynników determinacji), to jednak powszechnie przyjmuje się podanie ocen statystycznych aproksymacji na samym rysunku lub w sporządzonym do nich komentarzu, szczególnie w przypadku tak istotnej analizy, jaką podjął Doktorant w swojej dysertacji. Ten sam komentarz dotyczy również zależności korelacyjnych (24)-(26). Czy Doktorant mógłby zaprezentować niezbędny zbiór ocen statystycznych do dowolnej ze wspomnianych korelacji i dokonać na tej podstawie interpretacji?
- (5) Temperatura jest najważniejszą zmienną decyzyjną w dowolnym typie reaktora przeznaczonego do przebiegu procesów biologicznych i zazwyczaj jest utrzymywana na stałym poziomie. Podczas wyznaczania objętościowego współczynnika wnikania tlenu Doktorant zastosował temperaturę 37°C, natomiast hodowle prowadzono utrzymując

temperaturę na poziomie 26°C. Dlaczego zastosowano różne temperatury w obu eksperymentach i czym podyktowany był ich wybór?

- (6) Z drugiej jednak strony, wpływ temperatury na wartość współczynnika wnikania masy tlenu, chociaż w sposób powierzchniowy powinien być poddany analizie. Dlaczego Doktorant nie ujął w procedurze DoE temperatury jako zmiennej, która z punktu widzenia szeroko pojętej aktywności materii żywej oraz właściwości fizykochemicznych środowiska hodowlanego jest niezmiernie ważna lub nie przeprowadził eksperymentu przy kilku wartościach temperatur, by wskazać jej wpływ? Czy Doktorant posiada jakieś przesłanki podejmujące ten problem?
- (7) Czy w zbiorniku Cellbag™ można przyjąć stan idealnego wymieszania, co znacząco uprościłoby w przyszłości rozważania dotyczące opisu matematycznego?

Chciałbym jednak podkreślić, że powyższe uwagi i pytania, poczynione z obowiązku recenzenta, w najmniejszym stopniu nie kwestionują wysokiej wartości poznawczej i naukowej przedstawionej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej i kwalifikują się do wyjaśnienia podczas obrony.

5. Wniosek końcowy. Dysertacja doktorska Pana mgr inż. Mateusza Bartczaka, to bogate źródło wiedzy, interdyscyplinarnych narzędzi badawczych oraz inspirujących wyników, bardzo cennych i pożądanych w przypadku przebiegu wyrafinowanych technik hodowlanych, prowadzonych w bioreaktorach typu *single-use* z mieszaniem typu *wave*.

Jednocześnie, Doktorant wykazał wysokie umiejętności w prowadzeniu badań eksperymentalnych rozwiązując złożone zagadnienie z pogranicza mechaniki płynów, inżynierii bioprosesowej oraz analizy i przetwarzania obrazu, co wskazuje na Jego pełne przygotowanie do dalszej, samodzielnej pracy badawczej oraz kwalifikuje do ubiegania się o stopień naukowy doktora.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona mi do zaopiniowania rozprawa doktorska spełnia wymogi określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.). Zatem, zwracam się do Wysokiej Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria chemiczna* Politechniki Warszawskiej z wnioskiem o przyjęcie pracy i dopuszczenie *mgr. inż. Mateusza Bartczaka* do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie *nauk inżynieryjno-technicznych*, dyscyplina: *inżynieria chemiczna*.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoką jakość przeprowadzonych badań, interdyscyplinarny warsztat badawczy oraz wysokie osiągnięcia publikacyjne i ogromny potencjał aplikacyjny podjętej tematyki badawczej, z pełnym przekonaniem wnoszę o wyróżnienie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej.

