

Dr hab. inż. Magdalena Jasińska, prof. PW
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej
Politechnika Warszawska

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana Ciesielskiego
pt. „Nieliniowe sterowanie predykcjne procesem produkcji bioetanolu
metodą fermentacji ciągłej”

Proces produkcji bioetanolu metodą fermentacji ciągłej jest złożony, a zjawiska generowane w bioreaktorach zbiornikowych o działaniu przepływowym wykorzystywanych do produkcji bioetanolu mają charakter nieliniowych zjawisk zarówno o naturze statycznej jak i dynamicznej. Metoda ciągła produkcji bioetanolu stanowi obecnie przedmiot intensywnych badań, również ze względu na fakt zastosowania w skali przemysłowej. Nadzór nad optymalnymi warunkami wzrostu mikroorganizmów oraz wytwarzania pożądanego produktu oraz stabilnej pracy wymaga zatem nowoczesnych układów sterowania, które dodatkowo powinny móc zarządzać na raz kilkoma parametrami. Układy takie określane mianem metod sterowania predykcyjnego były tematem przedstawionego do recenzji doktoratu.

Zaawansowane algorytmy regulacji w połączeniu ze sterowaniem predykcyjnym są nowatorskie i efektywne. Staje się to szczególnie istotne w przypadku gdy odpowiedź układu jest opóźniona w czasie co ma miejsce w procesie wzrostu mikroorganizmów i wytwarzania produktów wewnątrzkomórkowych. Podjętą przez Doktoranta tematykę badań uważam zatem za nowatorską, perspektywiczną i bardzo ważną zarówno w aspekcie poznawczym jak i praktycznym.

W swojej pracy doktorskiej doktorant podjął się zrealizowania dwóch kluczowych dla prowadzenia procesu ciągłej produkcji bioetanolu zadań. Mianowicie określenia oraz analizy nieliniowych stanów stacjonarnych w celu identyfikacji obszarów w którym występują niekorzystne zjawiska. Zjawiska te polegają na zmianie szlaków metabolicznych związanych ze zmianą aktywności metabolicznej komórek, a co z tym idzie na zmniejszeniu szybkości wytwarzania produktu. Lokalizacja zakresów o określonej aktywności pomogła z kolei w generacji bibliotek ograniczeń procesowych, co tym samym przyczyniło się do realizacji kolejnego celu jaki postawił sobie doktorant, a mianowicie syntezy nowoczesnego regulatora wykorzystującego algorytm regulacji predykcyjnej. Metoda zaproponowana i rozwinięta przez Doktoranta do interpretacji procesu produkcji bioetanolu zapewnia brak możliwości wprowadzania układu poza zdefiniowane granice procesowe i na tym polega jej przewaga nad podejściem klasycznym. Drugą zaletą, która została wykorzystana przez Doktoranta do realizacji w/w procesu, jest możliwość sterowania w układzie wielowymiarowym w obrębie pojedynczego regulatora, co nie jest możliwe do wykonania w przypadku choćby regulatora PI.

Przedstawiona do oceny rozprawa jest napisana w języku polskim i liczy łącznie 152 strony w formacie A4. Praca zawiera 11 rozdziałów, które uzupełniają streszczenia w j. polskim i j. angielskim, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli wraz z jednostkami, a także spis cytowanej literatury, w obrębie której można znaleźć publikacje własne Doktoranta (4 pozycje). Są to publikacje w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym indeksowane w bazie „Web of Science” (WoS), dwie z 2019 i po jednej z 2020 i 2021 roku. Rozprawa zawiera

SEKRETARIAT WIITCH

ogółem 68 rysunków, 8 tabel oraz 194 pozycji cytowanej literatury. Niemal 40% prac wymienionych w spisie literatury zostało opublikowanych w okresie ostatnich 10 lat (2012-2021), a około 50% w okresie ostatnich 15 lat (2007-2021).

Pierwszy rozdział rozprawy doktorskiej stanowi wprowadzenie w tematykę badań dotyczących analizy matematycznej oraz nieliniowego sterowania procesu produkcji bioetanolu metodą ciągłą. W rozdziale drugim Doktorant sformułował tezy, cele i zakres badań podkreślając, że analizowana w ramach doktoratu tematyka związana jest z prowadzeniem istotnego z ekonomicznego punktu widzenia procesu. W tym przypadku doktorant obrał sobie za cel bardzo ważny obszar związany z modelowaniem matematycznym oraz analizą nieliniową stanów stacjonarnych procesu, a także syntezy nowoczesnego układu sterowania procesem.

Główny cel badań Doktoranta stanowiła weryfikacja tezy o możliwości zdefiniowania właściwych zakresów parametrów procesowych na podstawie analizy struktury gałęzi stanów stacjonarnych bioreaktora oraz możliwości syntezy układu sterowania. Istotą doktoratu stało się zaproponowanie odpowiedniego regulatora, który umożliwi pracę jedynie w zakresie uprzednio określonych granic procesowych oraz sterowanie w ich obrębie z uwzględnieniem możliwości sterowania wielowymiarowego procesem. W związku z tak postawioną główną tezą pracy, Doktorant zdefiniował również cele szczegółowe obejmujące:

1. Analizę zmian szybkości reakcji metabolicznych w funkcji parametrów procesowych (tzw. bifurkacyjnych) tak aby możliwe było zlokalizowanie obszarów, w których komórki wykazują określoną aktywność metaboliczną.
2. Sporządzenie mapy procesowej będącej podstawą koncepcji sterowania obiektem.
3. Zaproponowanie bibliotek ograniczeń procesowych oraz wykorzystanie ich w algorytmie regulacji predykcyjnej.
4. Zaproponowanie syntezy regulatora predykcyjnego do dwuwymiarowego sterowania procesem produkcji bioetanolu w bioreaktorze przepływowym z recyrkulacją i zagęszczeniem biomasy.

Aby zrealizować te cele Doktorant zaplanował bardzo obszerne, wieloetapowe, czasochłonne i wymagające zaawansowanych umiejętności badania, które obejmowały głównie symulacje numeryczne przy użyciu zarówno procedur własnych jak i dedykowanego oprogramowania. Na wykonane badania w postaci symulacji składały się następujące etapy:

1. Analiza procesu produkcji bioetanolu w bioreaktorze przepływowym z idealnym mieszaniem oraz w bioreaktorze zbiornikowym z recyrkulacją i zagęszczeniem biomasy, z uwzględnieniem nieliniowej analizy stanów stacjonarnych procesu oraz interpretacji struktury ich gałęzi na diagramach bifurkacyjnych.
2. Sprzężenie mapy procesowej z wyszczególnieniem obszarów o określonej aktywności metabolicznej komórek.
3. Sformułowanie koncepcji sterowania procesem, wybranie zmiennych sterujących oraz zdefiniowanie ograniczeń procesowych.
4. Synteza układu sterowania bioreaktorem: jednowymiarowy oraz dwuwymiarowy nieliniowy regulator predykcyjny do sterowania procesem bez recyrkulacji oraz z uwzględnieniem recyrkulacji biomasy i jej częściowym zagęszczeniem.

Badania te zostały wykonane z wykorzystaniem strukturalno-niesegregowanego, cybernetycznego modelu kinetycznego wzrostu drożdży (*S. Cerevisiae*). Oceniając ten fragment

rozprawy uważam, że nakreślone cele są bardzo ambitne, a zakres badań podjętych przez Doktoranta jest bardzo obszerny, ukierunkowany na uzyskanie wyników opisujących proces zarówno w aspekcie poznawczym jak i aplikacyjnym.

W czterech kolejnych rozdziałach, Doktorant zamieścił obszerny przegląd literatury związanej z tematyką prowadzonych przez Niego badań. Zamieszczone w rozprawie studia literaturowe wyróżnia bardzo wysoki poziom opracowania i klarowność prezentacji omawianych zagadnień. Na podstawie zgromadzonej, aktualnej i obszernej literatury przedmiotu Doktorant przedstawił wielorakie aspekty badanego procesu, w tym podstawy teoretyczne i problemy związane z realizacją procesu.

Jeśli chodzi o Rozdział 3, w którym Doktorant prezentuje charakterystykę produkcji bioetanolu metodą ciągłą, mam pewne wątpliwości co do zaprezentowanych zależności kinetycznych. I tak w równaniu 3.14 zamiast stężenia etanolu mamy stężenie tlenu, jeśli natomiast chodzi o zależność 3.19 chciałabym zobaczyć źródło z którego równanie zostało zaczerpnięte oraz interpretację fizyczną tej zależności. Z kolei w równaniu 3.26 pierwszy człon powinien być przemnożony przez stężenie substratu węglowego. W rozdziale wspomniano, że w modelu należy określić współczynnik przenikania masy rozpuszczonego tlenu; czy w równaniu 7.5 k_{LA} jest współczynnikiem przenikania czy wnikania tlenu? Jest tu też pewna niejasność jeśli chodzi o oznaczenia. W zależności 3.25 mamy K_{LA} , podczas gdy w zależności 7.5 mamy k_{LA} , przy czym oczywiście $a=A/V$. W tekście na str. 52 jest mowa o współczynniku przenikania masy k_{LA} . Czy to jest to samo?

W omawianym rozdziale nr 3 mam również drobne zastrzeżenia dotyczące opisu modeli segregowanych. Chcąc uwzględnić zróżnicowanie komórek stosuje się modele segregowane najczęściej oparte na tzw. bilansie populacji i tu moja pierwsza uwaga dotycząca stosownego słownictwa. Otóż nie mówi się „równanie równowagi populacji”, choć można to tak bezpośrednio przetłumaczyć (z ang. Population Balance Equation). Następnie Doktorant pisze, że „równanie to opisuje rozkład liczby stanów wewnętrznych komórek w funkcji czasu”. Niestety nie zupełnie o to chodzi mianowicie równanie to umożliwi opis rozkładu komórek w funkcji tzw. parametrów zewnętrznych (rozkład przestrzenny) oraz parametrów wewnętrznych, które w tym przypadku odnoszą się np. do ich rozmiaru, masy, aktywności katalitycznej. Ponadto Doktorant wspomina dalej, że modele segregowane klasyfikują komórki w zależności np. od wieku, a zróżnicowanie populacji jest najczęściej modelowane funkcją Gaussa. Również to nie jest do końca słuszne. Najczęściej stosowanym modelem jest model populacji rosnącej, w którym komórek młodszych jest zawsze więcej niż komórek starszych. W takim przypadku rozkład wieku opisuje się rozkładem wykładniczym w zakresie czasu życia komórek tzn. od chwili ich narodzin do momentu podziału. Wynika to z faktu, że im więcej jest komórek w populacji tym szybciej się starzeją. Uwagi powyższe mają jednak charakter marginalny, gdyż autor skupił się w pracy na zastosowaniu modelu strukturalnego, natomiast populację komórek traktował z wykorzystaniem modelu tzw. „komórki zastępczej”.

Kolejna sprawa to sposób modelowania produktu (ciekłego), w tym przypadku etanolu (równanie 3.24). Zasadniczo, produkt może powstawać albo w fazie wzrostu wykładniczego, wtedy szybkość jego powstawania jest proporcjonalna do szybkości przyrostu biomasy, albo w fazie stacjonarnej kiedy szybkość wytwarzania produktu jest proporcjonalna do ilości biomasy, a biomasa, a w zasadzie enzymy wewnątrzkomórkowe, pełnią rolę biokatalizatora. Biorąc pod

uwagę analizowany proces, który z tych efektów dominuje i czy w literaturze można znaleźć doniesienia które umożliwiłyby weryfikację właściwego modelu kinetycznego dla produktu w fazie ciekłej?

Pewną wadą pracy jest brak eksperymentów. Eksperymenty objawiają się jedynie w postaci stałych kinetycznych zaczerpniętych z literatury. Dlatego wykonana w ramach doktoratu analiza parametryczna i opracowana na ten cel autorska metoda służąca do analizy czułości poszczególnych parametrów modelu stanowi według mnie bardzo cenny jej element. Szkoda, że w pracy nie zamieszczono wartości O^* czy k_{LA} dla badanego układu. Warto byłoby napisać z jakiej korelacji korzystano przy określaniu k_{LA} , oraz czy pomijano opory po stronie gazu. Czy Doktorant mógłby pokazać również wykres zmian rozpuszczonego tlenu oraz na jakim poziomie to stężenie ustala się w cieczy? Celem pracy nie było modelowanie transportu tlenu, ale skoro Autor uwzględnił również bilans tlenu w fazie ciekłej (zależności 7.5 oraz 7.13), zatem śledził stężenie tlenu w procesie. Czy byłaby zatem możliwość określenia na podstawie symulacji, z wykorzystaniem zaproponowanego przez Doktoranta modelu, szybkości zasilania tlenu którą należałoby utrzymywać, aby zapewnić określone stężenie tlenu w cieczy w zależności od szybkości jego konsumpcji przez mikroorganizmy? Przedstawione w pracy bilanse dotyczą przypadku idealnego mieszania. Szczególnie dystrybucja tlenu w układzie nie musi spełniać tej zależności. Tlen dostarczany jest z zewnątrz, a mikroorganizmy w pętli cyrkulacyjnej doznają jego deficytu zależnie od czasu cyrkulacji (oraz rozkładu czasu cyrkulacji). To z kolei może mieć duże znaczenie w przypadku problemów powiększania skali układu. Wiąże się z tym kolejne pytanie, mianowicie jakie parametry powiększania skali należałoby zastosować w rozważanym w doktoracie procesie produkcji etanolu? Można też było pokusić się o wprowadzenie dodatkowych efektów symulujących pewne odstępstwa od założenia idealnego mieszania, co ma szczególnie znaczenie właśnie w przypadku powiększania skali. Efekty takie jak np. obecność tzw. „strefy martwej”, czy bocznikowanie nie wymagałoby wprowadzenia znaczących zmian w podejściu do modelowania, a pokazałby jak istotny jest ten problem w kontekście omawianego procesu. Być może jednak aspekty te staną się tematem dalszych prac badawczych w zespole prof. Grzywacza.

Wyniki własne badań procesu produkcji bioetanolu metodą fermentacji ciągłej Doktorant przedstawił w liczących ponad 80 stron (46-128) rozdziałach 7 (Badane układy procesowe), 8 (Badane układy sterowania procesem produkcji bioetanolu) oraz 9 (Metoda badawcza), gdzie przybliżył stosowaną w pracy metodę badawczą, na którą składają się: tworzenie diagramów bifurkacyjnych, prezentowanie trajektorii czasowych stężenia glukozy oraz chwilowych zmian szybkości reakcji biochemicznych. W najbardziej obszernym rozdziale 10 swojego doktoratu, liczącego niemal 60 stron (71-128) zatytułowanego „Wyniki i dyskusja” zamieścił wyniki badań własnych wraz z dyskusją i wnioskami szczegółowymi dotyczącymi pracy bioreaktora bez recyrkulacji strumienia. W ramach tego rozdziału Doktorant przedstawił analizę stanów stacjonarnych na diagramach bifurkacyjnych oraz diagramach pokazujących zakresy reakcji faworyzowanych przez komórki, mapy procesowe ilustrujące obszary o określonej aktywności metabolicznej komórek i określonym stężeniu produktu, z zaznaczeniem obszarów występowania rozwiązań oscylacyjnych oraz wielokrotnych stanów stacjonarnych. W ramach tego rozdziału Doktorant przedstawił również bibliotekę ograniczeń procesowych regulatora, którą wykorzystał następnie podczas syntezy jednowymiarowego nieliniowego regulatora predykcyjnego oraz przedstawił jego porównanie, z pełniącym rolę układu odniesienia, klasycznym regulatorem PI.

Szczegółowa analiza wyników pracy doktorskiej zaprezentowana w rozdziale 10 dotyczyła również pracy bioreaktora ciągłego z recyrkulacją strumienia i częściowym zagęszczeniem biomasy. W tym ostatnim przypadku oprócz analogicznej analizy, przedstawiono również rozdział dotyczący syntezy oraz badań pracy dwuwymiarowego nieliniowego regulatora predykcyjnego. Rozprawę kończy Rozdział 11 w którym Doktorant zawarł podsumowanie i wnioski.

Przechodząc do części własnej pracy, rozpocznę od przedstawienia uwag dotyczących wykresów oraz zaprezentowanych na nich wyników. Należy przede wszystkim podkreślić, że wykresy zaprezentowane w pracy zostały przygotowane bardzo starannie, są jasne i czytelne pomimo nierzadko dużej ilości informacji które zawierają, (szczególnie jeśli chodzi o diagramy bifurkacyjne oraz mapy procesowe). Uwagi szczegółowe są następujące:

1. Uważam za konieczność podpisać na Rys 7.1 oraz 7.2 wszystkie „strumienie” zasilające i opuszczające obszar bilansowany, tzn. oznaczyć zarówno strumienie, jak również stężenia poszczególnych składników rozpuszczonych w cieczy na wlocie i wylocie z bioreaktora, a w przypadku recyrkulacji również z separatora. Uważam, że należało wyraźnie zaznaczyć obszary bilansowania, a oprócz bilansu reaktora przedstawić również bilans separatora: tzn. bilanse strumieni oraz bilanse składników. I tak, dla przykładu zgodnie z przedstawionym rysunkiem (7.2), na wylocie z układu powinno być raczej F_{vf} , a nie F_v , natomiast jeśli chodzi o biomasę to na schemacie powinny pojawić się 3 różne oznaczenia: biomasa na wylocie z bioreaktora, biomasa recyrkulowana, biomasa na wylocie z układu. Również na Rys. 8.3 strumienie są częściowo podpisane (G , X_R , E , O) ale niestety nie wszystko zostało podane więc należałoby te informacje uzupełnić.

2. Proszę podać jak zdefiniowano D w przypadku z recyrkulacją? D jest przepływem na wylocie z całego układu na jednostkę objętości, więc zgodnie z oznaczeniami na rys. 7.2 powinno być $D = F_{vf}/V$?

4. Mam również pewną wątpliwość jeśli chodzi o parametry recyrkulacji; stopień recyrkulacji to $F_{VR}/F > 0$ gdzie F_{VR} jest strumieniem recyrkulowanym, natomiast stopień zagęszczenia definiuje się jako stosunek X_R/X , gdzie X_R jest stężeniem biomasy w recyrkulowanym strumieniu. W prawidłowo działającym separatorze stopień zagęszczenia powinien być większy od jedności. Jak te warunki mają się do warunków stosowanych w pracy?

5. Dlaczego Rys. 9.5 urywa się dla szybkości wymywania równej $D = 0.3$ h. Czy jest możliwe określenie szybkości wymywania przy której szybkość produkcji biomasy oraz szybkość wytwarzania produktu osiąga wartość maksymalną - zależnie od reżimu procesu?

6. W jaki sposób określano wartość D_{kr} przedstawioną przykładowo na diagramie zależności D od G_0 (Rys. 10.10)? Wartość D_{kr} powinna zależeć od stężenia pożywki w strumieniu zasilającym, a na przedstawionym diagramie jest to linia pozioma co wymaga dodatkowego wyjaśnienia.

Oprócz tego Doktorant nie ustrzegł się drobnych błędów przy prezentacji wykresów mianowicie:

1. Rysunki 10.33 i 10.34 są dokładnie takie same; wartości D podane na wykresie 10.33 nie zgadzają się z tym co zamieszczono w podpisie do wykresu, ale to najprawdopodobniej wynika z zamieszczenia tego samego rysunku dwukrotnie.

2. Porównanie Rys. 10.43 A i 10.44 A – w tekście Doktorant pisze że zwiększył λ_D i λ_ξ ; o ile λ_D faktycznie uległo 10-krotnemu zwiększeniu o tyle wartość λ_ξ podana w tekście (str. 121) jest taka

sama. Jednocześnie na rysunku 10.43 w podpisie λ_ξ jest równa 1.0 podczas gdy na Rys. 10.44 jest mniejsza i równa 0.1. Proszę o wyjaśnienie.

3. Na rys 10.37 (oraz kolejnych) występuje oznaczenie MSS; czy nie powinno być WSS? Jeśli nie, to w takim razie proszę opisać w tekście co oznacza skrót MSS.

W rozdziale dotyczącym wyników badań recyrkulacji umieszczono trajektorie na mapach procesowych. Uważam, że jest to bardzo interesująca propozycja, ułatwiająca ocenę aktualnego stanu, jednak z mojej strony sugestia byłaby taka aby uzupełnić tę trajektorię o pokazanie kierunku ruchu np. za pomocą odpowiednich strzałek.

Podsumowując mogę stwierdzić, że Doktorant przedstawił bardzo ciekawe metody i sposoby prezentacji wyników zarówno w postaci wykresów 3D jak i wykresów konturowych (map procesowych). Sporządzenie mapy procesowej pozwoliło na stworzenie funkcji opisujących krzywe graniczne i w ten sposób zdefiniowano z powodzeniem użyteczne narzędzie do pracy jakim jest biblioteka ograniczeń procesowych. Uważam tę część pracy za bardzo przydatną, szczególnie z punktu widzenia kolejnej części dysertacji dotyczącej regulatora predykcyjnego. Również symulacje pracy regulatorów uważam za bardzo użyteczne gdyż, z praktycznego punktu widzenia, może to pozwolić na lepsze przygotowanie do procesu w skali przemysłowej, a także oceniając walory poznawcze, na lepszą interpretację wyników badań eksperymentalnych.

Na zakończenie chciałabym się odnieść do problemu warunków optymalnych prowadzenia procesu. W rozdziale pt. „Praktyczne zastosowanie biblioteki ograniczeń procesowych” na stronie 91 Doktorant pisze „układ może osiągnąć nową wartość zadaną w dwóch stanach stacjonarnych dla $D_1 = 0.25 \text{ [h}^{-1}]$ i $D_2 = 0.3868 \text{ [h}^{-1}]$. W tabeli 10.2 przedstawione zostały przykładowe scenariusze realizacji procesu nie mniej uważam, że należało choćby dla pierwszego przypadku przanalizować dokładnie wybór odpowiedniej szybkości wymywania dla zadanego E_{SET} .

Z punktów widzenia obu reaktorów przepływowych bez recyrkulacji oraz z recyrkulacją i częściowym zagęszczeniem biomasy interesujące byłoby określenie szybkości wymywania maksymalizującego produkcję biomasy i produktu. Ważne jest bowiem zarówno stężenie biomasy (i produktu) na wylocie z układu jak również jak szybko następuje ich wypływ. Oba czynniki decydują o wydajności realizowanego procesu. Może warto byłoby się w związku z tym zastanowić nad wyborem innej zmiennej sterującej w postaci iloczynu $D \cdot X$ lub $D \cdot P$?

W tym miejscu chciałabym również nawiązać do problemu doboru współczynników wagowych dla funkcji celu w algorytmie regulatora predykcyjnego. Dobór tych współczynników wydaje się być szczególnie istotny w przypadku, gdy uzyskanie tego samego stanu stacjonarnego jest możliwe przy różnych wartościach D . Proszę zatem o krótkie wyjaśnienie jaką metodą dobiera się te współczynniki, czy jest to metoda prób i błędów, czy nieco bardziej złożone podejście?

Podsumowując uważam, że cenną informacją byłoby porównanie trzech przypadków możliwej pracy układu: w reaktorze przepływowym, w układzie z recyrkulacją oraz z recyrkulacją i częściowym zagęszczaniem biomasy. Porównanie takie należałoby wykonać pod kątem zarówno maksymalnej szybkości wymywania w tych układach, jak również szybkości wymywania maksymalizującej czy to produkcję biomasy czy wytwarzanie produktu. Pozwoliłoby to odpowiedzieć na pytanie jak prowadzić proces w warunkach optymalnych.

Na zakończenie chciałam podkreślić, że wykonana praca zasługuje na pochwałę. Pomimo, iż praca jest czysto numeryczna, Doktorant starał się uniknąć doboru takich parametrów, które w rzeczywistym procesie nie byłyby możliwe do osiągnięcia. Co prawda niskie stężenia glukozy są

mało praktyczne i ta część pracy ma raczej walory poznawcze, ale na pewno można ten proces tak zrealizować. Myślę, że wykonanie eksperymentów byłoby wspaniałą walidacją zaproponowanej w pracy metody i modelu. Praca jest ciekawym źródłem informacji na temat przemian metabolicznych, ilości szlaków metabolicznych oraz częstości tych zmian w zależności od parametrów procesowych D i G w przypadku bez recyrkulacji, a z recyrkulacją mamy dodatkowe dwa parametry ξ i η . Takie analizy możliwe są jedynie dzięki zastosowaniu modeli strukturalnych, praca pokazuje zatem ich istotną rolę przy opisie procesów biochemicznych z udziałem mikroorganizmów.

Oceniając całość recenzowanej rozprawy, wyrażam pełne przekonanie, że Doktorant z sukcesem zrealizował zaplanowany, bardzo ambitny cel badań. Wykazał się bardzo dobrą znajomością podstaw fizycznych i biochemicznych badanego procesu produkcji etanolu metodą fermentacji ciągłej, jak również gruntowną wiedzą z zakresu symulacji nieliniowych stanów stacjonarnych oraz nieliniowego sterowania predykcynego. Wykazał, że potrafi samodzielnie prowadzić kompleksowe badania naukowe, ze szczególnym uwzględnieniem umiejętności wykonywania dość złożonych symulacji numerycznych, badania dynamiki układów pracujących w stanie niestacjonarnym, a także poprawnie interpretować uzyskane wyniki. Dlatego jestem przekonana, że Pan mgr inż. Adrian Ciesielski jest bardzo dobrze przygotowany do podjęcia i rzetelnej realizacji, w niedalekiej przyszłości, samodzielnej pracy badawczej.

Moim zdaniem do najważniejszych, oryginalnych osiągnięć Doktoranta, w badaniach przedstawionych w rozprawie Doktorskiej, należy zaliczyć:

1. Zastosowanie strukturalno-niesegregowanego cybernetycznego modelu kinetycznego do opisu trzech ścieżek metabolicznych przebiegających w komórkach *S. Cerevisiae*, co pozwoliło w konsekwencji dokonać klasyfikacji aktywności komórek oraz określić preferowaną ścieżkę metaboliczną.
2. Zaproponowanie autorskiej metody określania i analizy czułości parametrycznej modelu kinetycznego na zmianę wartości analizowanego parametru, co pozwoliło klasyfikować poszczególne parametry pod względem stopnia ich wpływu na przebieg i wyniki symulacji.
3. Dogłębną analizę struktury stanów stacjonarnych zbiornikowego bioreaktora przepływowego, która ujawniła złożoność struktury gałęzi, obecność rozwiązań oscylacyjnych jak i obecność obszarów wielokrotnych stanów stacjonarnych.
4. Opracowanie bibliotek ograniczeń procesowych będących integralną częścią algorytmu sterowania predykcynego.
5. Opracowanie autorskiej metody śledzenia zmian aktywności metabolicznej komórek w funkcji parametrów procesowych.
6. Syntezę układu sterowania procesem produkcji bioetanolu metodą fermentacji ciągłej z wykorzystaniem nieliniowego algorytmu jedno oraz dwuwymiarowej regulacji predykcynnej.

Podsumowując całość rozprawy doktorskiej wyrażam opinię, że przedstawiona mi do recenzji praca mgr inż. A. Ciesielskiego pt. „Nieliniowe sterowanie predykcynne procesem produkcji bioetanolu metodą fermentacji ciągłej” stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Doktoranta oraz zdecydowanie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Wnoszę zatem do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej o jej przyjęcie i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Warto zauważyć, że zamieszczone w rozprawie wyniki badań zostały już opublikowane przez Doktoranta w czterech współautorskich artykułach. Są to publikacje w renomowanych czasopismach indeksowane w bazie WoS, (Biochemical Engineering Journal, Chemical Engineering Science oraz Technical Transcation). Biorąc pod uwagę ten fakt, a także nowatorską tematykę badań, bardzo obszerny program badawczy, wymagający do jego realizacji umiejętności korzystania z bardzo zaawansowanych narzędzi do symulacji dynamiki procesów nieliniowych oraz uzyskane oryginalne wyniki badań, **z całym przekonaniem rekomenduje recenzowaną rozprawę doktorską Pana mgr inż. A. Ciesielskiego do wyróżnienia.**

Warszawa, 06.07.2021 r.

