

Załącznik nr 3
do wniosku z dnia 14.12.2022 r.
o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego



PODPIS ZAUFANY

DANIEL
BOROWIAK

11.12.2022 20:28:02 [GMT+1]
Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

Wydział Inżynierii Produkcji

Katedra Inżynierii Bioprocessowej

AUTOREFERAT

OPIS OSIĄGNIĘĆ I DOROBKU NAUKOWO-BADAWCZEGO

dr inż. Daniel Jan Borowiak

Wrocław 2022

Spis treści

1. Dane osobowe	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.....	4
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.)	5
4.1. Tytuł osiągnięcia.....	5
4.2. Lista publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.....	5
4.3. Omówienie osiągnięcia naukowego.....	7
4.3.1. Wprowadzenie	7
4.3.2. Cel badań	9
4.3.3. Omówienie cyklu publikacji	10
4.3.4. Podsumowanie	29
4.3.5. Spis literatury	31
4.4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	36
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.	47
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	49
6.1. Osiągnięcia dydaktyczne.....	49
6.2. Osiągnięcia organizacyjne	53
6.2.1. Organizacja konferencji naukowych	53
6.2.2. Działalność w organizacjach zawodowych.....	54
6.2.3. Działalność organizacyjna w macierzystej uczelni	54
6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę.....	55
7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej	57
7.1. Współpraca z otoczeniem gospodarczym	57
7.2. Nagrody i wyróżnienia.....	58

1. Dane osobowe

Daniel Jan Borowiak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne

- 2007 r. Doktor nauk rolniczych
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Wydział Nauk o Żywności
dyscyplina naukowa: Technologia żywności i żywienia
Tytuł rozprawy doktorskiej: „Wykorzystanie funkcji logistycznej
do sterowania dopływem pożywki w hodowli drożdży piekarskich”
Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Miśkiewicz
Recenzenci rozprawy doktorskiej:
prof. dr hab. inż. Maria Wojtatowicz
prof. dr hab. inż. Włodzimierz Bednarski
- 1996 r. Magister inżynier
Akademia Ekonomiczna im. Oskara Langego we Wrocławiu
Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny Przemysłu
kierunek: Ekonomia i organizacja przemysłu spożywczego
Tytuł pracy magisterskiej: „Badania nad sterowaniem dopływem pożywki
w hodowli drożdży piekarskich przy użyciu komputera typu IBM PC”
Promotor: dr hab. inż. Tadeusz Miśkiewicz, prof. AE Wrocław

Pozostałe dyplomy:

- 2015 r. Studia podyplomowe
Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu
Wydział Finansów i Zarządzania
Dwusemestralne studia podyplomowe
„Menedżer Projektu Badawczo-Rozwojowego”

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- 01.10.1996 r. - 30.09.2000 r. - asystent w Katedrze Biotechnologii Żywności, Akademia Ekonomiczna im. Oskara Langego we Wrocławiu
- 01.10.2000 r. - 30.09.2004 r. - asystent w Katedrze Inżynierii Bioprocessowej, Akademia Ekonomiczna im. Oskara Langego we Wrocławiu
- 01.10.2004 r. - 15.02.2005 r. - specjalista w Katedrze Inżynierii Bioprocessowej, Akademia Ekonomiczna im. Oskara Langego we Wrocławiu
- 16.02.2005 r. - 14.02.2007 r. - wykładowca w Katedrze Inżynierii Bioprocessowej, Akademia Ekonomiczna im. Oskara Langego we Wrocławiu
- 15.02.2007 r. - 14.02.2009 r. - asystent ze stopniem doktora w Katedrze Inżynierii Bioprocessowej, Akademia Ekonomiczna im. Oskara Langego we Wrocławiu
- 15.02.2009 r. - 20.09.2019 r. - adiunkt w Katedrze Inżynierii Bioprocessowej na Wydziale Inżynieryjno-Ekonomicznym Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
- Od 1.10.2019 r. - adiunkt w Katedrze Inżynierii Bioprocessowej na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia

Moim głównym osiągnięciem naukowym, będącym podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego, jest cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych pod wspólnym tytułem:

„Badania nad biosyntezą astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg *Haematococcus pluvialis*”

4.2. Lista publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

W skład osiągnięcia naukowego wchodzi monotematyczny cykl publikacji obejmujący cztery oryginalne prace twórcze opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych oraz rozdział w monografii naukowej. Łączna suma punktów za publikacje zaliczone do osiągnięcia naukowego, zgodnie z wykazem MNiSW z roku publikacji, wynosi 375, a sumaryczny współczynnik wpływu Impact Factor w roku publikacji IF = 11,207.

Safin K., Bakalarz W., **Borowiak D.**, Cuske M., Grobelny A., Lech-Brzyk K., Musiał W., Pelczarski M., Szałata Ł., Witkowski J.: "Transfer wiedzy z nauki do dolnośląskich przedsiębiorstw. Teoria i praktyka.". Rozdział: „Komputerowo sterowane mieszadło wielostanowiskowe do eksperymentowania z mikroalgami”. Wydawnictwo Edytor, Legnica 2015, ISBN 978 83 61176 71 8, Recenzent: prof. dr hab. inż. Jerzy Zwoździak, (Załącznik 4, I.2.1) (punkty MNiSW = 25)

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie koncepcji, zaprojektowanie i oprogramowanie wielostanowiskowego mieszadła laboratoryjnego, wdrożenie i walidację urządzenia, przygotowanie manuskryptu i ilustracji, udzielenie odpowiedzi na recenzje, pełnienie roli autora korespondującego. Mój sumaryczny udział w w/w publikacji oceniam na 100%.

Udział i opis roli autora rozdziału w monografii udokumentowano stosownym oświadczeniem (Załącznik 5).

Borowiak D.*, Pstrowska K., Wiśniewski M., Grzebyk M.: „Propagation of inoculum for *Haematococcus pluvialis* microalgae scale-up photobioreactor cultivation system” Applied Sciences (2020), 10, 6283, (Załącznik 4, I.2.2), (punkty MNiSW = 100, IF = 2,679).

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował współudział w opracowaniu koncepcji pracy i metodologii, przygotowaniu oprogramowania, walidacji systemu, przygotowaniu manuskryptu i ilustracji, udzieleniu odpowiedzi na recenzje, pełnienie roli autora korespondującego. Mój sumaryczny udział w w/w publikacji oceniam na 55%.

Udział i opis roli poszczególnych autorów artykułu udokumentowano stosownymi oświadczeniami (Załącznik 6).

Borowiak D.*, Lenartowicz P., Grzebyk M., Wiśniewski M., Lipok J., Kafarski P.: “Novel, automated, semi-industrial modular photobioreactor system for cultivation of demanding microalgae that produce fine chemicals - the next story of *H. pluvialis* and astaxanthin” Algal Research (2021) 53, 102151, (Załącznik 4, I.2.3), (punkty MNiSW = 100, IF = 5,276).

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował współudział w opracowaniu koncepcji pracy, metodologii, przygotowaniu oprogramowania sterującego, walidacji, prowadzeniu badań, wykonywaniu analiz i oznaczeń, przygotowaniu manuskryptu, ilustracji i wykresów, odpowiedzi na recenzje, pełnienie roli autora korespondującego. Mój sumaryczny udział w w/w publikacji oceniam na 50%.

Udział i opis roli poszczególnych autorów artykułu udokumentowano stosownymi oświadczeniami (Załącznik 7).

Borowiak D.*, Pietruszka P., Grzebyk M., Luboińska M., Marcinkowska K., Seruga P., Kucharczyk M., Krzywonos M., Wilk M.: „Komputerowy system sterowania hodowlą biomasy mikroalg *Haematococcus pluvialis* do produkcji astaksantyny” Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu (2016) nr 461, 30-41, (Załącznik 4, I.2.4)

(punkty MNiSW = 10)

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował współudział w opracowaniu koncepcji pracy, prowadzeniu prac badawczych i analitycznych, przygotowaniu manuskryptu, opracowaniu i interpretacji wyników, udzieleniu odpowiedzi na recenzje i pełnienie roli autora korespondującego. Mój sumaryczny udział w w/w publikacji oceniam na 50%.

Udział i opis roli poszczególnych autorów artykułu udokumentowano stosownymi oświadczeniami (Załącznik 8).

Borowiak D.*, Krzywonos M.: “Bioenergy, biofuels, lipids and pigments - research trends in the use of microalgae grown in photobioreactors” *Energies* (2022) 15, 5357, (Załącznik 4, I.2.5), (punkty MNiSW = 140, IF = 3,252).

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował przygotowanie koncepcji pracy, sporządzenie źródłowej bazy danych i przeprowadzenie analiz i badań literaturowych, przygotowanie manuskryptu publikacji, wprowadzenie modyfikacji, udzielenie odpowiedzi na recenzje i pełnienie roli autora korespondującego. Mój sumaryczny udział w w/w publikacji oceniam na 70%.

Udział i opis roli poszczególnych autorów artykułu udokumentowano stosownymi oświadczeniami (Załącznik 9).

4.3. Omówienie osiągnięcia naukowego

4.3.1. Wprowadzenie

Astaksantyna (3,3'-dihydroksy- β,β -karoten-4,4'-dion) jest karotenoidem o wzorze cząsteczkowym $C_{40}H_{52}O_4$ i masie molowej $596,84 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ (Ambati i in., 2014). Zalicza się ją do grupy ksantofili, które w swojej cząsteczce oprócz atomów węgla i wodoru zawierają również atomy tlenu, występujące zarówno w postaci grup hydroksylowych (OH) w pozycjach 3 i 3' jak i karbonylowych (C=O) w pozycjach 4 i 4' w obydwu pierścieniach jononowych (Seabra i Pedrosa, 2010). Charakterystyczny układ polienowy, stanowiący system chromoforowy, składa się z łańcucha węglowego zawierającego dziewięć sprzężonych wiązań podwójnych wraz z pierścieniami jononowymi. Układ ten odpowiada za barwę astaksantyny, nadaje jej unikalną strukturę molekularną i właściwości chemiczne, m.in. wysoką zdolność przeciwutleniającą (Sieradzka i Kołodziejczyk-Czepas, 2016). W przyrodzie astaksantynę można znaleźć głównie w środowisku morskim, gdzie odpowiada między innymi za kolor ciała krewetek, homarów, langust i ryb łososiowatych (Nguyen, 2013).

W ostatnich latach popularność astaksantyny ciągle rośnie. Ze względu na bardzo dobre właściwości antyoksydacyjne, korzystne dla zdrowia człowieka, znajduje ona coraz szersze zastosowanie, między innymi w przemyśle nutraceutycznym, spożywczym, farmaceutycznym oraz kosmetycznym. Astaksantyna poprawia odporność immunologiczną oraz zmniejsza ryzyko powstawania komórek nowotworowych (Kaewpintong i in., 2007). Dzięki tym właściwościom bardzo często jest wykorzystywana jako suplement diety. W przemyśle spożywczym, ze względu na atrakcyjny kolor, stosuje się ją jako barwnik. Produkowane są także preparaty i kremy z dodatkiem astaksantyny, chroniące skórę przed działaniem

promieniowania słonecznego, spowalniające procesy starzenia, wygładzające, nawilżające i poprawiające kolor skóry (Galvão i in., 2013).

Zdecydowana większość produkowanej na świecie astaksantyny jest wytwarzana na drodze syntezy chemicznej i wykorzystywana jako dodatek paszowy, powodujący silną pigmentację w akwakulturze, np. w hodowlach łososi i homarów, nadając rybom i skorupiakom charakterystyczną, czerwono-pomarańczową barwę (Liu i in., 2014). Astaksantyna przeznaczona do spożycia przez ludzi musi pochodzić ze źródeł naturalnych. Wyłącznie astaksantyna pochodzenia naturalnego została oficjalnie zatwierdzona jako suplement diety w USA, Japonii i kilku krajach europejskich. Amerykańska Agencja Żywności i Leków FDA (Food and Drug Administration) przyznała naturalnej astaksantynie z mikroalgi *Haematococcus pluvialis* status GRAS (Generally Recognized as Safe), czyli substancji uznanej za bezpieczną do stosowania w żywności (Shah i in., 2016). Na terenie Unii Europejskiej mikroalgi są traktowane jako nowa żywność, zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2015/2283 (Villaró i in., 2021). W publikacjach zaliczonych do osiągnięcia naukowego przedstawiono kolejne etapy badań nad doskonaleniem innowacyjnej technologii wytwarzania naturalnej astaksantyny przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

Naturalną astaksantynę można pozyskiwać z produktów ubocznych przy przetwórstwie skorupiaków, lecz jej zawartość w krylu czy krewetkach jest śladowa, co czyni ten sposób jej otrzymywania ekonomicznie nieopłacalnym (Ambati i in., 2014). Największy potencjał do produkcji naturalnej astaksantyny, ze względu na jej wysoką zawartość w suchej masie tych mikroorganizmów sięgającą 4%, wykazują mikroalgi *Haematococcus pluvialis*. Niestety rosną one stosunkowo wolno, są podatne na zakażenia i wymagają bardzo silnego światła na etapie stresowania (Saei i in., 2012). Alternatywą mogą być zielone, słodkowodne algi *Chlorella zofingiensis*, które potrafią szybko rosnać w hodowlach z bardzo dużą gęstością komórek, zarówno w pomieszczeniach, jak i na zewnątrz. Dodatkowo algi te cechują się małą wrażliwością na zanieczyszczenia i niekorzystne środowisko oraz akumulacją astaksantyny w warunkach heterotroficznych z glukozą jako jedynym źródłem węgla i energii (Liu i in., 2014). Gram-ujemne, aerobowe bakterie *Paracoccus carotinifaciens* mogą zawierać 2,2% s.m. astaksantyny, a algi *Neochloris wimmeri* jedynie 0,6% s.m. (Stachowiak i Czarnecki, 2006). Naturalna astaksantyna może być również produkowana z użyciem czerwonych drożdży *Xanthophyllomyces dendrorhous* (wcześniej określanych jako *Phaffia rhodozyma*) z udziałem różnych źródeł węgla (glukozy, ksylozy i melasy). Wprawdzie szybkość wzrostu i gęstość zawiesiny komórek drożdży są wysokie, jednak zawartość astaksantyny nie przekracza 0,16 do 1,1 mg×g⁻¹ suchej masy w zależności od zastosowanego szczepu. Z roślin wyższych

jedynie miłek jesienny (*Adonis annua*) wytwarza astaksantynę w płatkach swoich kwiatów. Coraz częściej pojawiają się także doniesienia o możliwości akumulacji astaksantyny w roślinach transgenicznym, takich jak tytoń, rzodkiewnik pospolity (*Arabidopsis*), ziemniak, marchew, a nawet pomidor. W ten sposób można podnieść wartości odżywcze jadalnych części tych roślin (Liu i in., 2014).

Rynek karotenoidów, a w szczególności rynek astaksantyny, należy rozpatrywać jako rynek światowy, na którym najaktywniejszym odbiorcą są Stany Zjednoczone (Nguyen, 2013). Szacuje się, że rosnące zapotrzebowanie ze strony konsumentów na produkty ekologiczne spowoduje wzrost rynku astaksantyny produkowanej biotechnologicznie do 148,1 mln USD (Bauer i Minceva, 2021). Większość sprzedawanej obecnie astaksantyny z mikroalg pochodzi z Azji. Zakłady produkcyjne można znaleźć także w USA, Europie i Izraelu. Koszt produkcji naturalnej astaksantyny przy użyciu mikroalg *H. pluvialis* w Unii Europejskiej wynosi około 1500 EUR×kg⁻¹ w Grecji i 6400 EUR×kg⁻¹ w Holandii (Villaró i in., 2021). W Polsce nie ma firm zajmujących się komercyjną produkcją naturalnej astaksantyny.

Jednym z najważniejszych czynników decydujących o powodzeniu hodowli mikroorganizmów fototroficznych jest dostęp do światła, będącego dla nich źródłem energii. Z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej opłacalnym źródłem energii w hodowlach mikroalg jest światło słoneczne (Abu-Gosh i in., 2016). Z tego powodu największe komercyjne systemy hodowlane zostały opracowane i powstały w strefie klimatu umiarkowanego i gorącego (np. USA, Europa i Australia). Nieustannie są również prowadzone badania naukowe mające na celu sprawdzenie, czy można w opłacalny sposób prowadzić hodowle mikroalg w krajach o mniejszym nasłonecznieniu (Pankratz i in., 2017).

4.3.2. Cel badań

Celem ogólnym badań naukowych przedstawionych w monotematycznym cyklu publikacji było doskonalenie technologii biosyntezy naturalnej astaksantyny z użyciem mikroalg *Haematococcus pluvialis*. Nowa technologia powinna umożliwiać efektywne wytwarzanie astaksantyny w skali półtechnicznej w Polsce i innych krajach leżących w strefie o małym nasłonecznieniu.

Szczegółowe cele badawcze osiągnięcia naukowego to:

- optymalizacja parametrów procesowych dwuetapowej hodowli mikroalg *H. pluvialis* w skali laboratoryjnej,
- opracowanie, wykonanie i wdrożenie trój etapowego systemu namnażania inokulum mikroalg niezbędnego do prowadzenia badań i hodowli mikroalg w skali półtechnicznej,

- opracowanie oryginalnej technologii biosyntezy astaksantyny z użyciem mikroalg *H. pluvialis* w skali półtechnicznej, w zautomatyzowanym systemie fotobioreaktorów typu airlift, możliwej do zastosowania w Polsce i innych krajach o ograniczonym dostępie do światła słonecznego,
- opracowanie, wykonanie i przetestowanie komputerowego systemu zdalnego sterowania przebiegiem hodowli mikroalg *H. pluvialis* w modułach produkcyjnych w oddalonych lokalizacjach,
- zdiagnozowanie i scharakteryzowanie trendów w badaniach naukowych związanych z algami, fotobioreaktorami i astaksantyną na przestrzeni dwudziestu pięciu lat, wraz ze wskazaniem przyszłych kierunków badań, które powinny zostać podjęte przez naukowców.

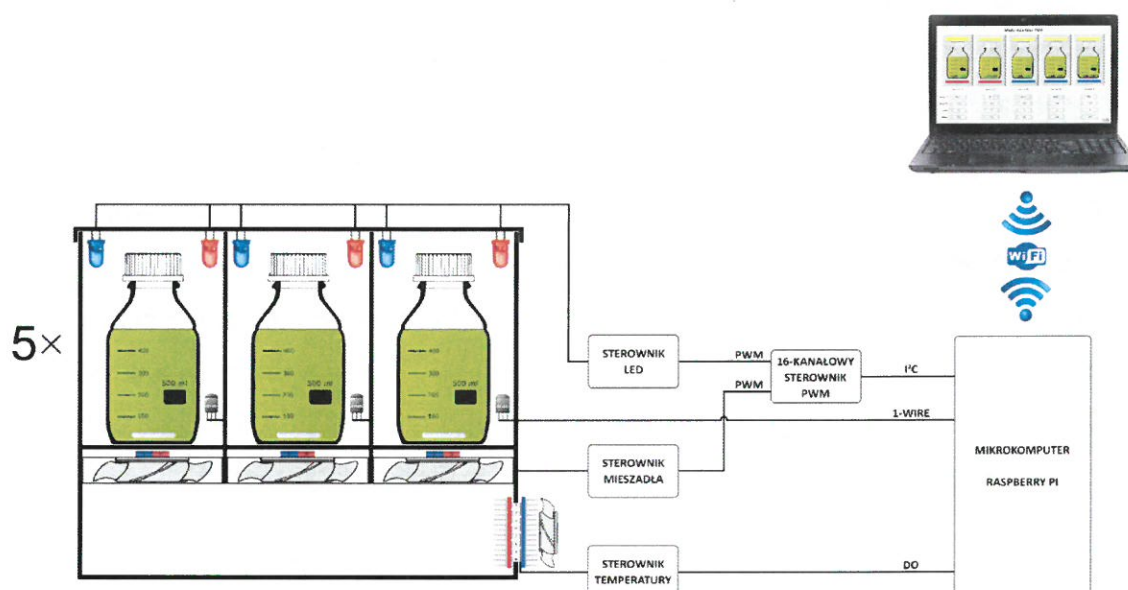
4.3.3. Omówienie cyklu publikacji

Publikacja nr 1

Safin K., Bakalarz W., Borowiak D., Cuske M., Grobelny A., Lech-Brzyk K., Musiał W., Pelczarski M., Szałata Ł., Witkowski J.: "Transfer wiedzy z nauki do dolnośląskich przedsiębiorstw. Teoria i praktyka.". Rozdział: „Komputerowo sterowane mieszadło wielostanowiskowe do eksperymentowania z mikroalgami”. Wydawnictwo Edytor, Legnica 2015, ISBN 978 83 61176 71 8.

W publikacji nr 1 zaprezentowano osiągnięcie naukowe polegające na zaprojektowaniu, oprogramowaniu i wdrożeniu komputerowo wspomaganego, wielostanowiskowego mieszadła laboratoryjnego z proporcjonalnym sterowaniem natężeniem oświetlenia LED i prędkością obrotową mieszadeł oraz regulacją temperatury. Prototypowe mieszadło przeznaczone było do eksperymentowania z mikroorganizmami fototroficznymi w trakcie badań naukowych związanych z optymalizacją parametrów środowiskowych w hodowlach mikroalg *Haematococcus pluvialis*. Składało się ono z piętnastu stanowisk dostosowanych do rozmiarów kolb lub butelek laboratoryjnych o pojemności do 0,5 dm³. Całość podzielono na pięć oddzielnych stref (po trzy stanowiska), działających w sposób niezależny. Poszczególne stanowiska oddzielono od siebie ściankami z nieprzeźroczystego materiału, który stanowił równocześnie izolację termiczną. Przy projektowaniu mieszadła uwzględniono jego gabaryty, wagę i mobilność oraz uzyskanie przyspieszenia realizacji eksperymentów i ich wykonywania w odpowiedniej liczbie powtórzeń dla statystycznej obróbki otrzymanych wyników.

Układ regulacji temperatury zbudowano w oparciu o czujniki temperatury DS18B20 zainstalowane na każdym stanowisku (Rysunek 1). Dokładność pomiarów tych czujników w przedziale temperatur od -10°C do 85°C wynosi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ i jest akceptowalna przy pracy z mikroalgami (Galvão i in., 2013, Nie i in., 2013). Rolę elementów wykonawczych, pozwalających na utrzymywanie zadanej temperatury w zakresie od 10°C do 50°C , pełniły termoelektryczne ogniwa Peltiera, które działają jak pompy ciepła. Po podłączeniu do źródła napięcia stałego jedna powierzchnia ogniwa ochładza się, a druga staje się gorąca (Riffat i Ma, 2003). Po zmianie polaryzacji zasilania ciepło jest transportowane w odwrotnym kierunku. Dzięki tej właściwości moduły Peltiera mogły pracować zarówno jako elementy podgrzewające, jak i chłodzące (Alaoui, 2011).



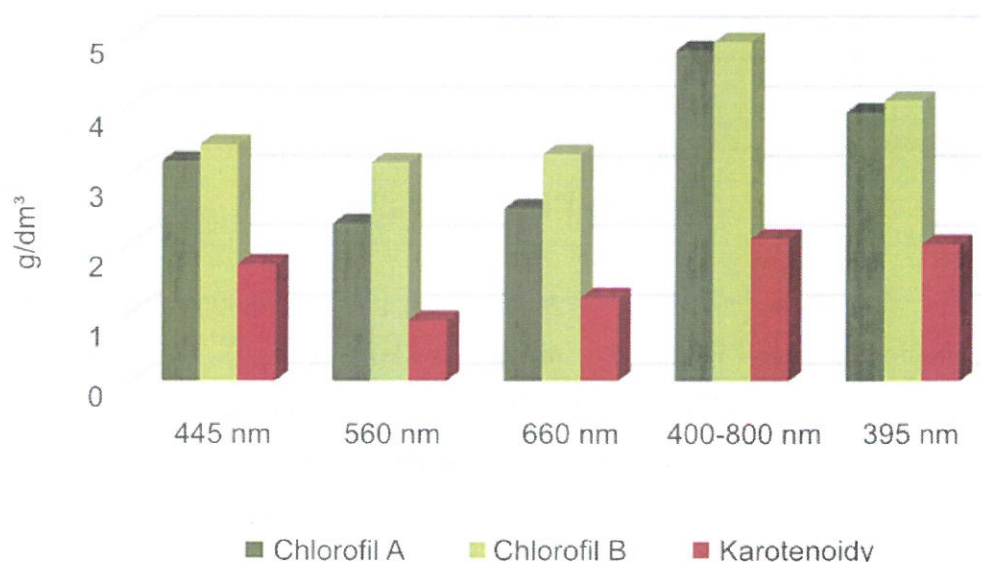
Rysunek 1. Schemat komputerowo sterowanego mieszadła wielostanowiskowego do eksperymentowania z mikroalgami

Do oświetlenia każdego stanowiska w urządzeniu wykorzystano po dwie diody elektroluminescencyjne LED (Light-Emitting Diode) o mocy 1 W. Diody zamocowano w sposób umożliwiający ich szybką wymianę, dzięki czemu uzyskano możliwość prowadzenia badań z różnymi kolorami oświetlenia. Do mieszania kultury mikroalg zastosowano system mieszadeł magnetycznych zbudowany w oparciu o wentylatory z przymocowanymi magnesami neodymowymi. Oprócz napędzania elementów mieszających, wentylatory powodowały także równomierne rozprowadzanie ogrzanego lub schłodzonego przez moduły Peltiera powietrza w obrębie pojedynczej strefy. Płynne sterowanie prędkością obrotową silników elektrycznych

wentylatorów oraz mocą świecenia diod LED w zakresie od 0 do 100% uzyskano dzięki układom elektronicznym z zaimplementowanym algorytmem zmiany wypełnienia generowanego sygnału PWM (Pulse-Width Modulation) (Teikari i in., 2012). Nadrzędnym urządzeniem sterującym pracą wszystkich komponentów mieszadła wielostanowiskowego był miniaturowy komputer jednopłytkowy Raspberry Pi, który za pośrednictwem sieci bezprzewodowej Wi-Fi komunikował się z komputerem PC. Specjalnie przygotowane oprogramowanie umożliwiało monitorowanie mierzonych parametrów oraz sterowanie wartościami zadanymi temperatury, natężenia oświetlenia i prędkości mieszania, niezależnie dla każdej z pięciu stref mieszadła.

Najważniejszym osiągnięciem naukowym, związanym z wykorzystaniem prototypowego mieszadła wielostanowiskowego, była optymalizacja parametrów środowiskowych dwuetapowego procesu biosyntezy naturalnej astaksantyny w hodowli mikroalg *H. pluvialis* w skali laboratoryjnej.

W trakcie badań ustalono wpływ barwy dostarczanego światła (długości fali) na przyrosty biomasy mikroalg *H. pluvialis*. Użyto pięciu różnych źródeł oświetlenia LED o barwach odpowiadających długości fali światła 450 nm (głęboki niebieski), 560 nm (żółty), 660 nm (czerwony), 400-800 nm (światło niebieskie z czerwonym luminoforem, dające efekt zmiksowanego światła czerwonego i niebieskiego) i 395 nm (bliski ultrafiolet UV-A). Najlepsze wyniki ze względu na wydajność biosyntezy chlorofilu A i B oraz karotenoidów odnotowano przy mieszanym świetle czerwonym i niebieskim (Rysunek 2).



Rysunek 2. Biosynteza chlorofilu A i B oraz karotenoidów w badaniach laboratoryjnych nad wpływem długości fali światła na przyrost biomasy mikroalg *H. pluvialis*

Oświetlenie tego typu pozwoliło na osiągnięcie wydajności biosyntezy chlorofilu A i B wynoszącej blisko $5 \text{ g} \times \text{dm}^{-3}$ i karotenoidów prawie $2 \text{ g} \times \text{dm}^{-3}$. Wyniki te wykorzystano później w trakcie badań nad biosyntezą naturalnej astaksantyny w skali półtechnicznej, opisanych w publikacji nr 3.

Mieszadło wielostanowiskowe wykorzystano także do optymalizacji składu pożywki stosowanej w hodowlach mikroalg *H. pluvialis*. W tym przypadku we wszystkich piętnastu komorach mieszadła wielostanowiskowego zainstalowano diody LED koloru czerwonego o długości fali światła 660 nm. Badania przeprowadzono z użyciem pożywki Bold's Basal Medium (BBM) z modyfikowaną dawką źródła azotu w zakresie BBM1N do BBM3N, z krokiem 0,5N. Wartość liczbowa (np. 3N) oznacza wielokrotność standardowo używanej nawózki NaNO_3 w oryginalnej wersji pożywki BBM, wynoszącej $0,25 \text{ g} \times \text{dm}^{-3}$. Maksymalna szybkość właściwa wzrostu komórek mikroalg występowała w eksperymentach z zastosowaniem pożywki BBM2N, a najwyższą wydajność biomasy uzyskano w hodowlach na pożywce BBM2,5N. Z kolei najlepszą wydajność biosyntezy karotenoidów zaobserwowano przy zastosowaniu pożywki BBM1N. Było to związane z faktem najłatwiejszego wprowadzania hodowli w stan stresu świetlnego w warunkach „głodu azotowego”, czyli po wyczerpaniu źródła azotu zawartego w pożywce. Z przebadanych źródeł azotu zawartych w pożywkach (azotan sodu, wodorotlenek amonu, mocznik), najlepiej przyswajany przez komórki mikroalg *H. pluvialis* był azotan sodu.

Mieszadło wielostanowiskowe wykorzystano także w badaniach prowadzących do znalezienia optymalnej temperatury dla procesu hodowli mikroalg *H. pluvialis* w przedziale od 18 do 30°C. Najwyższe przyrosty biomasy w fazie zielonej procesu występowały w zakresie temperatur od 22 do 25°C. W fazie czerwonej podwyższona temperatura pozytywnie wpływała na proces stresowania komórek mikroalg i biosyntezę astaksantyny. Miało to miejsce w zakresie temperatur od 26 do 30°C. Wyniki zebrane w trakcie tych badań były podstawą do prowadzenia dalszych eksperymentów mających na celu doskonalenie technologii biosyntezy naturalnej astaksantyny w skali półtechnicznej.

Koncepcja i projekt wielostanowiskowego mieszadła do eksperymentowania z mikroalgami powstały w trakcie realizacji mojego pięciomiesięcznego stażu w firmie AlgaeLabs Sp. z o.o. w ramach projektu „Od innowacji do zysku”, dofinansowanego z funduszy Unii Europejskiej (POKL.08.02.01-02-027/12) (Załącznik 4, III.2.3.2). Wyniki badań zaprezentowano w trakcie krajowej konferencji naukowej podsumowującej realizację projektu (Załącznik 4, II.7.1.4).

Publikacja nr 2

Borowiak D.*, Pstrowska K., Wiśniewski M., Grzebyk M.: „Propagation of inoculum for *Haematococcus pluvialis* microalgae scale-up photobioreactor cultivation system” Applied Sciences (2020), 10, 6283.

W publikacji nr 2 przedstawiono osiągnięcie naukowe polegające na opracowaniu koncepcji i wdrożeniu trój etapowego systemu przygotowania inokulum mikroalg. Sprawny i wydajny system inokulacji był niezbędny w planowanych, dalszych badaniach nad powiększeniem skali procesu biosyntezy astaksantyny w fotobioreaktorach o objętości 90 dm³ oraz w skali półtechnicznej.

Powiększanie skali procesu hodowli mikroorganizmów do poziomu umożliwiającego komercyjną produkcję jest bardzo złożonym zadaniem. Żeby osiągnąć zadowalające wyniki należy uwzględnić wiele czynników, zarówno konstrukcyjnych, jak i procesowych. W rezultacie bardzo często hodowle w dużej skali dają gorsze wyniki niż w warunkach laboratoryjnych (Das, 2015). Z punktu widzenia prowadzenia procesu w skali półtechnicznej i produkcji przemysłowej najważniejsza jest niezawodność połączona z minimalizacją potrzebnego czasu i kosztów. Są to problemy, których nie dostrzega się w trakcie badań naukowych prowadzonych w skali laboratoryjnej. Opracowanie odpowiednich metod i procedur jest ściśle związane z hodowanymi mikroorganizmami, używanym systemem hodowli czy lokalizacją zakładu produkcyjnego. Szczegóły wdrożonych rozwiązań przemysłowych nie są chętnie wyjawiane przez producentów komercyjnych (Borowitzka i Vonshak, 2017). W przypadku hodowli mikroalg, przyrost biomasy jest uzależniony między innymi od temperatury, pH, natężenia światła, napowietrzania i mieszania kultury, dostępności źródła azotu i ditlenku węgla. Bardzo ważne jest również odpowiednie modyfikowanie parametrów procesowych wraz z tempem wzrostu kultury i jej stanem fizjologicznym (Penloglou i Kiparissides, 2018).

Działanie systemu przygotowania inokulum, przedstawionego w publikacji nr 2, skorelowano z wymaganiami modułu w skali półtechnicznej, w którym proces biosyntezy astaksantyny wymaga 21 dni dla fazy zielonej i 7-9 dni dla fazy czerwonej (publikacja nr 3). Łącznie daje to trzydziestodniowy cykl produkcyjny. Wzorem znanych w biotechnologii rozwiązań postawiono na wieloetapowe przygotowanie inokulum, a cały proces podzielono na trzy etapy, z których każdy zajmował 8 dni. Umożliwiło to przygotowanie w ciągu 24 dni odpowiednich ilości inokulum potrzebnego do uruchomienia kolejnych eksperymentów lub cyklu produkcyjnego. Czasy trwania poszczególnych etapów namnażania inokulum

dobrano w taki sposób, aby cały system mógł pracować w trybie ciągłym, z zachowaniem kilkudniowego marginesu potrzebnego na wykonanie czynności pomocniczych, jak demontaż fotobioreaktorów, mycie, sterylizacja, ponowny montaż itp.

W zaprojektowanym systemie przygotowania materiału inokulacyjnego przyjęto skalowanie objętości hodowli z krokiem $\times 10$. Pierwsze dwa etapy inokulacji realizowano w kolbach laboratoryjnych o objętości roboczej $0,1 \text{ dm}^3$ i 1 dm^3 . Trzeci etap prowadzono w fotobioreaktorach o objętości roboczej 10 dm^3 . Przy skalowaniu hodowli mikroalg zalecana jest stopniowa propagacja kultury mikroorganizmów. Przy przechodzeniu do kolejnych etapów skalowanego procesu zalecane jest stosowanie inokulacji na poziomie od 1% do 10% pojemności zbiorników w następnym etapie hodowli. W ten sposób przechodzi się z mniejszych objętości hodowli podstawowej do końcowego etapu skali komercyjnej (White i in., 2015). Ważna jest również gęstość komórek, która powinna wynosić powyżej $10 \text{ mln} \times \text{cm}^{-3}$, aby uniknąć długiej fazy opóźnienia po zaszczepieniu (Das, 2015).

Istotnym elementem osiągnięcia naukowego, związanego z trój etapowym systemem przygotowania inokulum mikroalg, było opracowanie konstrukcji i wdrożenie stanowiska do namnażania inokulum funkcjonującego na ostatnim, najważniejszym i technologicznie najtrudniejszym etapie w całym systemie przygotowania materiału inokulacyjnego (Rysunek 3).



Rysunek 3. Stanowisko ostatniego etapu namnażania inokulum mikroalg *Haematococcus pluvialis*

Projektując stanowisko, przewidziano zastosowanie zamiast jednego zbiornika o dużej objętości, ośmiu mniejszych o objętościach roboczych 10 dm³ każdy. Były to zbiorniki podobnego typu i działające na podobnej zasadzie (fotobioreaktory typu airlift), jak zbiorniki przewidziane do prowadzenia hodowli w skali półtechnicznej. Wprawdzie skomplikowało to budowę systemu sterującego, ale zastosowanie mniejszych zbiorników lub budowy modułowej pozwoliło na zachowanie płynności i elastyczności oraz uzyskanie buforu bezpieczeństwa na wypadek np. zanieczyszczenia hodowli, konieczności powtarzania eksperymentów lub anomalii w przebiegu procesu namnażania. W przypadku dużych zbiorników każdy pojawiający się problem (np. zakażenie) wpływa negatywnie na całą kulturę i całą namnażaną partię (Das, 2015). Wiąże się to z ponoszeniem wysokich kosztów ekonomicznych i energetycznych w przypadku nieplanowanych przestojów i ponownego rozruchu.

Skuteczność i prawidłowy sposób funkcjonowania stanowiska do namnażania inokulum zostały potwierdzone w sposób praktyczny, w trakcie wielokrotnego przygotowania materiału inokulacyjnego na potrzeby prowadzonych eksperymentów w dużej skali. Każde stanowisko z fotobioreaktorem posiadało możliwość niezależnej kontroli parametrów procesowych. Podobnie jak w pracach eksperymentalnych White i in. (2015), pozwoliło to na prowadzenie hodowli mikroalg z różnymi nastawami natężenia oświetlenia i zadanej wartości pH. Na etapie wdrażania stanowiska monitorowano temperaturę, pH i zawartość biomasy mikroalg. Najlepszym zakresem temperatur dla prawidłowego prowadzenia hodowli mikroalg *H. pluvialis* jest przedział od 20 do 27°C (Klochkova i in., 2013). Przekroczenie tego zakresu o 2-4°C ma bardzo duży wpływ na przebieg reakcji enzymatycznych w komórkach mikroalg (zwłaszcza na fotosyntezę) i może prowadzić do całkowitej utraty hodowli (Tamburic i in., 2014). W trakcie badań zanotowano systematyczny wzrost temperatury wewnątrz fotobioreaktorów będący efektem wydzielania energii cieplnej przez oświetlenie LED. Projektując stanowisko nie przewidziano stosowania układu regulacji temperatury. Podobnie jak fotobioreaktory modułu w skali półtechnicznej, stanowisko do namnażania inokulum pracowało w klimatyzowanym pomieszczeniu o stałej temperaturze 22°C. Wyniki pomiarów temperatury zebrane w trakcie eksperymentów potwierdziły, że pozwoliło to na uniknięcie przekroczenia górnego dopuszczalnego progu temperatury, podobnie jak w pracach Sipaúba-Tavares i in. (2013) i Santhanam i in. (2019).

Spośród wszystkich parametrów środowiskowych, pH ma największy wpływ na szybkość wzrostu komórek i syntezę chlorofilu mikroalg *H. pluvialis* (Shah i in., 2016). Parametr ten determinuje także rozpuszczalność i dyfuzję ditlenku węgla w podłożu,

co przekłada się na wydajność fotosyntetycznego wiązania węgla oraz bezpośrednio lub pośrednio wpływa na metabolizm mikroorganizmów (Nagaraj i in., 2012). W trakcie badań zaobserwowano typowy dla mikroalg, stopniowy wzrost wartości pH w kolejnych dniach trwania hodowli, od 5,78 do 6,92 (Zhang i in., 2018). W układzie sterowania zaimplementowano z zadowalającym efektem algorytm regulacji dwustawnej pH z wartością zadaną na poziomie pH = 7,0 i histerezą 0,2. Jest to zgodne z wynikami badań Sarada i in. (2002), w których przy takiej właśnie wartości pH uzyskano najwyższą zawartość chlorofilu. Również w wynikach badań Nagaraj i in. (2012) maksymalny wzrost liczby komórek oraz maksymalne stężenia chlorofilu A i B odnotowano przy pH = 7,0.

W eksperymentach potwierdzających skuteczność działania stanowiska do namnażania inokulum uzyskano zadowalające efekty zarówno jeśli chodzi o wydajność hodowli, aktywność pozyskanego materiału hodowlanego, jak i powtarzalność procesu. Podwojenie stężenia biomasy osiągnięto w piątym i szóstym dniu hodowli, co jest wynikiem lepszym w porównaniu z badaniami Sipaúba-Tavares i in. (2013), w których w fotobioreaktorze o objętości 12 dm³ uzyskano podwojenie liczby komórek mikroalg *H. pluvialis* po blisko 7 dniach.

Wprawdzie przedstawiony w publikacji nr 2 system przygotowania inokulum powstał z myślą o hodowli mikroalg *H. pluvialis* i biosyntezie astaksantyny, to jednak warto podkreślić, że może on być z łatwością zaadaptowany i wykorzystany do hodowania innych, znanych w technologii żywności mikroorganizmów fototroficznych, np. spiruliny (*Arthrospira platensis*).

Stanowisko do namnażania inokulum mikroalg zostało wdrożone w firmie AlgaeLabs Sp. z o.o. w trakcie mojego dwunastomiesięcznego stażu zrealizowanego w ramach IV edycji (2015/2016) Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „Mozart” (Załącznik 4, III.2.3.3).

Publikacja nr 3

Borowiak D.*, Lenartowicz P., Grzebyk M., Wiśniewski M., Lipok J., Kafarski P.: „Novel, automated, semi-industrial modular photobioreactor system for cultivation of demanding microalgae that produce fine chemicals - the next story of *H. pluvialis* and astaxanthin” *Algal Research* (2021), 53, 102151.

W publikacji tej opisano osiągnięcie naukowe polegające na opracowaniu nowej technologii biosyntezy astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg *Haematococcus pluvialis* w specjalnie zaprojektowanym, modułowym systemie dwunastu fotobioreaktorów typu airlift

o łącznej objętości roboczej 1 m³ (Rysunek 4). Jedną z istotnych zalet opracowanej technologii jest możliwość jej stosowania w Polsce i innych krajach o ograniczonym dostępie do światła słonecznego.



Rysunek 4. Moduł dwunastu fotobioreaktorów typu airlift do biosyntezy astaksantyny w skali półtechnicznej

Do hodowli mikroalg na skalę komercyjną wykorzystywane są obecnie zarówno systemy otwarte, w których hodowla jest prowadzona w płytkich zbiornikach (naturalnych lub sztucznych), jak i systemy zamknięte, składające się z fotobioreaktorów (Zabochnicka-Świątek i in., 2014). Produkcja naturalnej astaksantyny o odpowiedniej jakości i czystości, przeznaczonej do wytwarzania nutraceutyków i suplementów diety dla ludzi, powinna być prowadzona w zamkniętych fotobioreaktorach. Umożliwiają one zapewnienie wyższego stopnia kontroli przebiegu procesu i oferują wyższą wydajność w porównaniu z systemami otwartymi. Dodatkowo fotobioreaktory zmniejszają ryzyko wystąpienia zakażenia oraz pozwalają na prowadzenie hodowli w powtarzalnych warunkach procesowych (Griffiths i in. 2011).

Do budowy systemu biosyntezy astaksantyny w skali półtechnicznej wykorzystano specjalnie zaprojektowane fotobioreaktory typu airlift o całkowitej wysokości 2100 mm, wykonane z dwóch rur szklanych. Średnica rury wewnętrznej (riser) wynosiła 190 mm, a rury zewnętrznej (downcomer) 250 mm. Fotobioreaktory zamknięto od dołu innowacyjną, opatentowaną (Załącznik 4, III.3.1.3) pokrywą w kształcie kopuły ze specjalnymi elementami ułatwiającymi szybkie napełnianie zbiornika i jego opróżnianie, napowietrzanie i mieszanie podłoża oraz automatyczne mycie fotobioreaktora. Podstawowy moduł do biosyntezy astaksantyny w skali półtechnicznej składał się z dwunastu fotobioreaktorów o objętości 90 dm³, dających łączną objętość roboczą 1 m³. W skład kompletnego systemu wchodził także moduł inokulacyjny pierwszego stopnia, zbudowany z dwóch fotobioreaktorów o objętości 12 dm³ oraz moduł inokulacyjny drugiego stopnia, zawierający dwa fotobioreaktory o objętości 90 dm³.

Opracowana technologia biosyntezy astaksantyny polegała na dwuetapowym prowadzeniu hodowli mikroalg *H. pluvialis* w oparciu o recepturę zawierającą zadany z góry, optymalny profil czasowy natężenia oświetlenia LED i dozowania ditlenku węgla, wypracowane w trakcie przeprowadzonych badań naukowych. Optymalny profil czasowy obejmował zarówno fazę zieloną procesu, jak i przejście do fazy czerwonej z uwzględnieniem działania czynników stresujących. Zdaniem Aflalo i in. (2007) dwuetapowy system hodowli najlepiej nadaje się do optymalizacji i komercyjnej produkcji astaksantyny na dużą skalę. Przedstawiony w publikacji nr 3 proces biosyntezy trwał 720 godzin (30 dni), z czego namnażanie biomasy mikroalg (faza zielona) zajmowało 21 dni, a proces stresowania i kumulowania astaksantyny w komórkach mikroalg (faza czerwona) do 9 dni.

Autorski algorytm sterowania bioprocusem wykorzystywał opracowany w trakcie badań, optymalny z punktu widzenia biosyntezy astaksantyny, profil natężenia oświetlenia LED koloru czerwonego, niebieskiego i białego. W każdej godzinie procesu program sterujący automatycznie określał z jaką mocą powinny świecić diody LED każdego koloru, np. od szesnastej godziny system załączał oświetlenie LED koloru czerwonego na 80% mocy, koloru niebieskiego na 10% mocy, a białego na 0%. W początkowej fazie procesu biosyntezy dominowało oświetlenie koloru czerwonego (100% mocy od drugiego dnia procesu). W kolejnych dniach hodowli systematycznie zwiększano natężenie świecenia diod LED koloru niebieskiego z początkowych 10% do 100% w 17-tym dniu hodowli. W końcowym etapie fazy zielonej (od 12 do 20 dnia procesu) zwiększano również natężenie świecenia diod LED koloru białego, które pełną mocą świeciły od 19-go dnia hodowli. Całkowita moc systemu oświetlenia LED wynosiła 250 μmol×m⁻²×s⁻¹, co jest zgodne z wynikami badań Torzillo i in. (2005), którzy

wykazali, że liniowy wzrost produktywności i górna granica efektywnego wykorzystania światła sięga $200 \mu\text{mol}\times\text{m}^{-2}\times\text{s}^{-1}$. Również Sipaúba-Tavares i in. (2013) stwierdzili, że w fotobioreaktorach o dużych pojemnościach dla maksymalnej wydajności wzrostu mikroalg potrzebne jest natężenie oświetlenia na poziomie $180 \mu\text{mol}\times\text{m}^{-2}\times\text{s}^{-1}$.

Istotnym elementem osiągnięcia naukowego wykazanego w publikacji nr 3 jest także opracowanie optymalnego profilu czasowego dozowania ditlenku węgla w hodowli mikroalg *H. pluvialis* w zależności od gęstości podłoża i etapu procesu. Według tego profilu program sterujący automatycznie identyfikował moment włączenia elektrozaworów odpowiedzialnych za wprowadzanie CO₂ do fotobioreaktorów i czas ich pracy, np. od szesnastej godziny system w okresie 80 minut dozował ditlenek węgla przez pierwszą minutę zadanego okresu. Po początkowym, dynamicznym wzroście dozowanych objętości CO₂, od piątej doby hodowli następowała stabilizacja przepływu gazu na poziomie $12 \text{ dm}^3\times\text{h}^{-1}$. Taki przepływ CO₂ utrzymywano do siedemnastego dnia procesu. Począwszy od osiemnastego dnia hodowli do fotobioreaktorów wprowadzano $18 \text{ dm}^3\times\text{h}^{-1}$ CO₂. O prawidłowo dobranym profilu dozowania ditlenku węgla świadczyły monitorowane wartości pH podłoża, które przez cały czas trwania procesu utrzymywało się na poziomie zbliżonym do 7. Jest to zgodne z wynikami badań Nagaraj i in. (2012), w których maksymalny przyrost liczby komórek oraz maksymalne stężenie chlorofilu A i B również osiągnięto przy pH = 7.

Drugi etap hodowli (faza czerwona), polegający na indukowaniu stresu metabolicznego kultury mikroalg, rozpoczął się w 21 dniu procesu i trwał (w zależności od gęstości kultury) od 7 do 9 dni. Istotnym wkładem w rozwój nauki, kluczowym dla tej fazy procesu biosyntezy, było umiejętne wykorzystanie trzech czynników stresujących. Pierwszym była zwiększona irradiacja, którą uzyskano poprzez oświetlenie fotobioreaktorów całą mocą zainstalowanego oświetlenia LED (100% natężenia każdego z trzech kolorów). Dodatkowo w fazie czerwonej (od 22-go dnia hodowli) nie stosowano dwudziestosześciodzinnego cyklu oddziaływania światła (fotoperiodu) (oświetlenie 24 h światło włączone / 2 godziny światło wyłączone). Drugim czynnikiem stresującym było zwiększenie temperatury hodowli do 28-29°C. Wyższa temperatura w fotobioreaktorach występowała na skutek generowania zwiększonej ilości energii cieplnej przez załączone z maksymalną mocą oświetlenie LED. Trzecim stresorem był głód azotowy, do którego dochodziło w efekcie wyeliminowania z podłoża wszelkich związków azotu. Dwa pierwsze czynniki stresujące były indukowane poprzez zmianę parametrów pracy fotobioreaktorów. Natomiast stres związany z głodem azotowym wynikał z całkowitego wykorzystania przez kulturę mikroalg po 21 dniach hodowli związków azotu zawartych w podłożu (NaNO₃ zawarty w pożywce BBM2M).

W efekcie przeprowadzonych badań opracowano dwuetapową metodę biosyntezy naturalnej astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg *H. pluvialis* w skali półtechnicznej. Kumulacja trzech czynników stresujących pozwoliła na uzyskanie w trzydziestodniowym cyklu produkcyjnym wydajności sięgające 3,2% s.m. astaksantyny. Skonstruowany w trakcie badań modułowy system fotobioreaktorów typu airlift zapewnił bardzo wysoki stopień automatycznej kontroli przebiegu procesu i uzyskiwanie przewidywalnych i powtarzalnych warunków hodowli. Zastosowane rozwiązania zapewniają poprawną pracę fotobioreaktorów bez względu na strefę klimatyczną, w której system będzie funkcjonował oraz zmienność warunków atmosferycznych. Modułowość konstrukcji pozwala z kolei na łatwe zwiększanie skali procesu poprzez zmultiplikowanie przedstawionego w publikacji nr 3 modułu podstawowego, z zapewnieniem wysokiej wydajności i czystości produktu gotowego.

Przedstawione w publikacji nr 3 badania naukowe zostały zrealizowane w ramach projektu „Pozyskiwanie metabolitów wtórnych z mikroalg i cyjanobakterii w oparciu o zautomatyzowany system fotobioreaktorów” (Załącznik 4, II.9.1.4) dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (PBS3/B8/25/2015). W projekcie tym pełniłem rolę kierownika zadania badawczego polegającego na optymalizacji warunków prowadzenia hodowli mikroalg *H. pluvialis*.

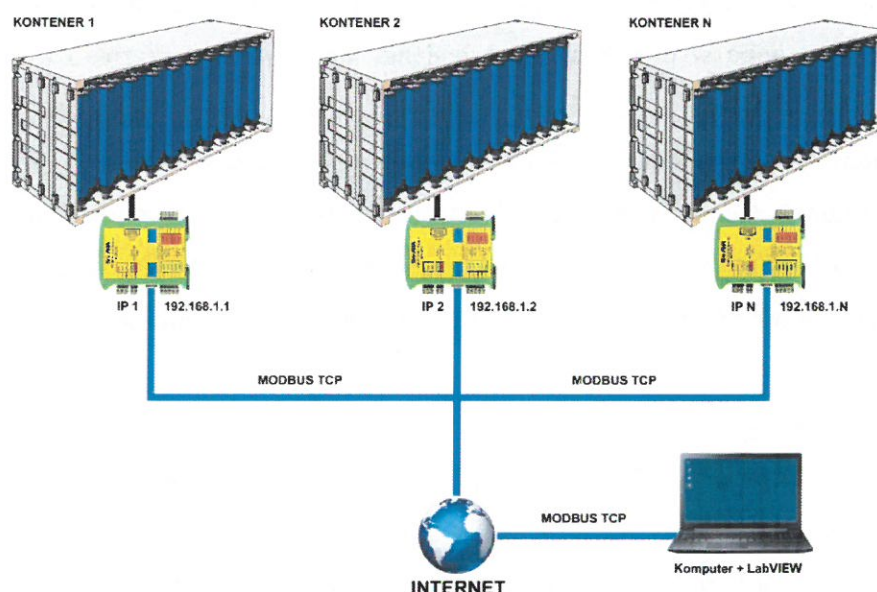
Publikacja nr 4

Borowiak D.*, Pietruszka P., Grzebyk M., Luboińska M., Marcinkowska K., Seruga P., Kucharczyk M., Krzywonos M., Wilk M.: „Komputerowy system sterowania hodowlą biomasy mikroalg *Haematococcus pluvialis* do produkcji astaksantyny” Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu (2016), Wybrane zagadnienia z bioekonomii, nr 461, 30-41.

Osiągnięciem naukowym zaprezentowanym w publikacji nr 4 było opracowanie, wykonanie i przetestowanie zdalnego systemu kontrolowania warunków hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis*. Rozwiązanie to rozszerza wiedzę na temat zdalnego sterowania bioprocessami i pozwala na kontrolowanie biosyntezy astaksantyny prowadzonej w modułach fotobioreaktorowych pracujących w oddalonych lokalizacjach za pomocą pojedynczego, nadrzędnego komputera sterującego ze specjalistycznym oprogramowaniem.

Zaprezentowana w publikacji nr 3 metoda biosyntezy naturalnej astaksantyny w skali półtechnicznej jest przeznaczona do wykorzystania w systemach modułowych. Dwanaście fotobioreaktorów o łącznej objętości 1 m³ stanowiło najmniejszą jednostkę (moduł podstawowy), którą w łatwy sposób można multiplikować, uzyskując dalsze zwiększanie skali

procesu. Budowa i wymiary modułu podstawowego zostały dobrane w taki sposób, aby kilka takich jednostek można było umieścić w typowym kontenerze do transportu towarów. Kontenery produkcyjne mogłyby funkcjonować w różnych lokalizacjach, nawet bardzo oddalonych od siebie, np. na terenie firm generujących duże ilości CO₂ (gorzelnie, elektrownie spalające paliwa kopalne, cementownie) lub w zakładach wytwarzających suplementy diety bogate w astaksantynę. Pomysł zamknięcia przemysłowej hodowli mikroalg w kontenerach pojawił się w wielu firmach związanych z branżą produktów biotechnologicznych (Algae.Tec 2016, AlgaeLabs 2016, Complete Container Technology 2016, Paul Scherrer Institut 2016). Wdrożenie tej idei wymagało opracowania innowacyjnego systemu zdalnego monitorowania i sterowania przebiegiem hodowli mikroalg w oddalonych lokalizacjach (Rysunek 5).



Rysunek 5. System zdalnego sterowania biosyntezą astaksantyny w oddalonych modułach kontenerowych

Badania prowadzące do opracowania systemu zdalnego sterowania hodowlą mikroalg *H. pluvialis* przeprowadzono w fotobioreaktorze typu airlift o objętości 35 dm³, funkcjonującym w jednym z laboratoriów Wrocławskiego Parku Technologicznego. Nadrzędny komputer PC, pozwalający na monitorowanie parametrów i sterowanie hodowlą mikroalg, podłączono do Internetu na terenie Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu (odległość około 4 km). W opracowanym rozwiązaniu komputer sterujący ze specjalnie przygotowanym oprogramowaniem komunikował się za pomocą sieci Internet z modułem MOD-ETH, pełniącym funkcję bramy (gateway) pomiędzy siecią komputerową

a urządzeniami z interfejsem szeregowym RS-485, pracującymi w otoczeniu fotobioreaktora (Salonen i in. 2007). Do modułu MOD-ETH wprowadzono unikalny, stały adres IP, jednoznacznie identyfikujący to urządzenie w sieci Internet. Za pomocą interfejsu RS-485 podłączono urządzenia przeznaczone do realizacji pomiarów i sterowania parametrami hodowli mikroalg: moduł wejścia analogowego MOD-1AI oraz sterownik diod i pasków LED RGB SPL-3CM. Urządzenia te komunikowały się w oparciu o protokół Modbus RTU często stosowany w przemyśle i rozwiązaniach laboratoryjnych (Skjånes i in., 2016). Dzięki komunikacji z użyciem Internetu do aplikacji sterującej w komputerze PC docierały wyniki pomiarów temperatury i pH w fotobioreaktorze. Zgodnie z zapisanym w programie algorytmem sterującym odbywało się modyfikowanie wartości zadanej pH, histerezy pH i natężenia oświetlenia LED. Wyniki pomiarów parametrów hodowli były wyświetlane na ekranie komputera w formie liczbowej, prezentowane na wykresie oraz zapisywane do pliku na dysku komputera.

Opracowany system zdalnego sterowania hodowlą mikroalg pozwalał na podłączanie się za pomocą komputera sterującego (w dowolnym momencie i z dowolnej lokalizacji), do modułu MOD-ETH o konkretnym adresie IP i prowadzenie zdalnego monitoringu parametrów procesowych bądź wprowadzanie zmian wartości zadanych. Przy założeniu multiplikowania modułu w skali półtechnicznej, rozszerzenie systemu zdalnego sterowania o kolejne kontenery wymagałoby jedynie zmiany adresu IP modułu MOD-ETH, z którym ma się komunikować aplikacja sterująca. Pozwala to na zbudowanie rozproszonego systemu hodowli mikroalg w oddalonych lokalizacjach z możliwością kontroli całości za pomocą pojedynczego stanowiska z nadrzędnym komputerem PC (Yang i in., 2004).

Osiągnięciem naukowym zaprezentowanym w publikacji nr 4 jest opracowanie systemu zdalnego sterowania procesem hodowli mikroalg *H. pluvialis* zapewniającego uzyskiwanie podobnych rezultatów, jak w przypadku urządzenia sterującego podłączonego bezpośrednio do fotobioreaktorów. Rozwiązanie to pozwala na prowadzenie biosyntezy astaksantyny w oddalonych od siebie, zmultiplikowanych modułach w skali półtechnicznej za pośrednictwem Internetu. System zapewnia autonomiczną pracę każdego z modułów fotobioreaktorowych (np. kontenerów) i centralne sterowanie pracą całego systemu. Nawet jeśli wystąpią utrudnienia lub przerwy w komunikacji sieciowej, to zadania wymagające determinizmu czasowego (np. regulacja pH) zostaną wykonane prawidłowo i bez opóźnień (Yang i Yang, 2007).

Weryfikację poprawności działania systemu zdalnego sterowania warunkami hodowli mikroalg *H. pluvialis* przeprowadzono w trakcie trzech hodowli typu batch trwających 16 dni.

W trakcie eksperymentów wielokrotnie nawiązywano zdalne połączenie z modułem MOD-ETH stanowiska z fotobioreaktorem w celu monitorowania parametrów procesowych. Analizując zebrane wyniki stwierdzono stabilne zmiany temperatury w przedziale 22-23°C, optymalne dla rozwoju mikroalg *H. pluvialis* (Dos Santos i Lombardi, 2017). O prawidłowym funkcjonowaniu algorytmu regulacji dwustawnej pH świadczą oscylacje pH wokół wartości zadanej, ustawionej w trakcie eksperymentów na poziomie pH = 7,0 z histerezą 0,2 (Infant Santhos i in., 2014). Oscylacje te mieszczą się w zakresie korzystnym z punktu widzenia fizjologii szczepu *H. pluvialis* i świadczą o prawidłowym wykorzystywaniu przez mikroalgi źródła węgla wprowadzanego do fotobioreaktora w postaci ditlenku węgla (Sipaúba-Tavares i in., 2013). W trakcie badań monitorowano przyrosty biomasy mikroalg, które po 16 dniach hodowli kształtowały się na poziomie 1,27 g×dm⁻³ i były porównywalne z rezultatami osiągniętymi przez innych autorów w hodowlach prowadzonych w zbiornikach zamkniętych (Göksan i in., 2011, Sarada i in., 2012).

Dodatkowym wkładem w rozwój nauk o żywności jest uniwersalny charakter opracowanego systemu. Pozwala on na zdalne kontrolowanie eksperymentów związanych z wytwarzaniem bioproduktów lub produktów żywnościowych. Badania naukowe, zamiast w fotobioreaktorach, mogą być prowadzone np. w szklarni na obrzeżach miasta lub pasiece na skraju lasu. Monitorowaniu i sterowaniu mogą podlegać zupełnie inne parametry fizykochemiczne niż w przypadku hodowli mikroalg. Sama idea funkcjonowania systemu zdalnego sterowania nie ulegnie jednak zmianie.

Publikacja nr 5

Borowiak D.*, Krzywonos M.: "Bioenergy, biofuels, lipids and pigments - research trends in the use of microalgae grown in photobioreactors" *Energies* (2022), 15, 5357.

Osiągnięciem naukowym ostatniej publikacji zaliczonej do osiągnięcia naukowego było zdiagnozowanie i scharakteryzowanie trendów w badaniach naukowych związanych z algami, fotobioreaktorami i astaksantyną na przestrzeni dwudziestu pięciu lat. Realizację tego celu oparto o analizę bibliometryczną i przegląd 367 publikacji z lat 1995 do 2020 zamieszczonych w czasopismach znajdujących się w bazach Web of Science i Scopus. Wyselekcjonowanie artykułów naukowych zostało wykonane z użyciem słów kluczowych: (algae OR algal) AND photobioreactor AND astaxanthin, zawartych w tytule artykułu naukowego, streszczeniu i słowach kluczowych.

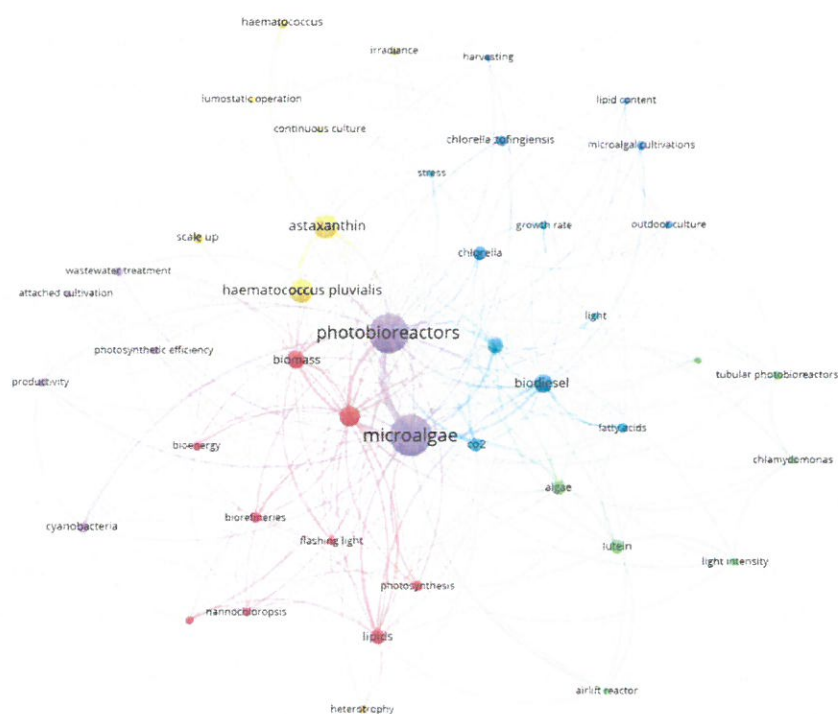
Analiza bibliometryczna wyselekcjonowanych artykułów uwidoczniła stopniowy wzrost zainteresowania tematyką alg wśród naukowców z całego świata. Do 2007 roku liczba publikacji była stosunkowo niewielka. Później widać wyraźną tendencję wzrostową z maksimum przypadającym na 2016 rok. Artykuły, w których opisywano wyniki prac eksperymentalnych, stanowiły 68% wszystkich publikacji, 17% przypadało na prace przeglądowe i 9% na rozdziały w książkach. Najwięcej artykułów ukazało się na łamach *Bioresource Technology* (49 artykułów), następnie w *Algal Research* (19 artykułów), *Journal of Applied Phycology* (16 artykułów) oraz *Bioprocess and Biosystems Engineering* (9 artykułów). Tylko w czternastu czasopismach opublikowano pięć lub więcej artykułów związanych z analizowaną tematyką.

Na podstawie przeprowadzonej analizy scientometrycznej zauważono, że autorami największej liczby publikacji związanych z algami, fotobioreaktorami i astaksantyną byli Chińczycy (64 prace), następnie Amerykanie (40 artykułów), Koreańczycy (33 publikacje) i Hiszpanie (28 pozycji). Analizując osiągnięcia poszczególnych ośrodków naukowych, po 12 publikacji pochodziło z Inha University w Korei Południowej i Chińskiej Akademii Nauk. Pięć uczelni afiliowało minimum cztery artykuły, a pozostałe 13 uczelni wniosło tylko do dwóch publikacji. Autorem z najbogatszym dorobkiem w postaci 17 artykułów był Lee Choul-Gyun, następnie Kim Z-Hun z 11 artykułami i Sim Sang Jun z 10 publikacjami. Najczęściej przywoływanym artykułem była praca „Biodiesel from microalgae” autorstwa Yusufa Chisti (Chisti, 2007).

Przeprowadzona za pomocą programu VOSViewer analiza częstości występowania słów kluczowych i powiązań między nimi pozwoliła na przygotowanie wizualizacji sieciowej (Rysunek 6) i zidentyfikowanie siedmiu wiodących obszarów prowadzonych badań naukowych opisanych w wytypowanych publikacjach: (1) techno-ekonomiczna opłacalność produkcji biopaliw, bioenergii i pigmentów w biorafineriach mikroalg, (2) wpływ konstrukcji fotobioreaktorów i parametrów procesu na wydajność hodowli mikroalg, (3) strategie zwiększania ilości otrzymywanych lipidów i pozyskiwania biodiesla w hodowlach mikroalg *Chlorella*, (4) produkcja astaksantyny na skalę przemysłową z wykorzystaniem mikroalg *Haematococcus*, (5) produktywność biomasy i zastosowanie alternatywnych źródeł węgla w hodowlach mikroalg, (6) wpływ konwersji światła i ditlenku węgla na wydajność biomasy oraz (7) heterotrofia.

W analizowanych publikacjach naukowych (pomimo użytych słów kluczowych w wyszukiwaniu) dominowały tematy związane z produkcją bioenergii i biopaliw. Spośród siedmiu zidentyfikowanych obszarów wiodących, dwa klastry były ściśle związane z produkcją

bioenergii i biopaliw (klaster 1 i 3). Dodatkowo wśród publikacji poruszających tematykę projektowania nowych fotobioreaktorów (klaster 2), zwiększania produktywności biomasy mikroalg (klaster 5) czy heterotrofii (klaster 7), znalazło się wiele artykułów poświęconych wykorzystaniu mikroalg właśnie do celów energetycznych.



Rysunek 6. Wizualizacja sieciowa częstości występowania słów kluczowych i powiązań między nimi

Istotnym wkładem w rozwój nauki opisanym w publikacji nr 5 jest wskazanie kierunków i tematyki przyszłych badań naukowych, które powinny zostać podjęte przez naukowców z całego świata w celu pomyślnego wdrożenia technologii z użyciem mikroalg w skali przemysłowej. Naukowcy w przyszłości powinni zająć się tematyką opłacalności ekonomicznej i zrównoważonego rozwoju (Zhou i in., 2015). Należy precyzyjnie ustalać koszty eksploatacji systemów fotobioreaktorowych, aby móc obliczyć jakie oszczędności energetyczne i ekonomiczne przyniosą wdrażane rozwiązania i jaka jest ich efektywność w porównaniu do konwencjonalnych systemów hodowli (Kim i in., 2016). Niezbędna jest dalsza redukcja kosztów np. przez zmniejszenie liczby etapów hodowli i zwiększenie ich wydajności. Powinno to uprościć cały system i poprawić opłacalność jego funkcjonowania (Kiran i in., 2014). Wdrażając rozwiązania na skalę przemysłową należy przeprowadzać ocenę cyklu życia produktu LCA (Life Cycle Assessment), aby precyzyjnie

określić, jak poszczególne zmiany technologiczne wpływają na wydajność całego procesu (Fuentes-Grünewald i in., 2016). Patrząc z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym, naukowcy powinni także zbadać korzyści wynikające z wiązania CO₂ (Zhou i in., 2015), odzyskiwania wody (Arashiro i in., 2020), usuwania pestycydów za pomocą mikroalg (García-Galán i in., 2020) czy zastosowania alternatywnych metod dekontaminacji fotobioreaktorów (Piltz i Melkonian, 2018).

Planując przyszłe eksperymenty naukowcy powinni przeprowadzić szczegółowe badania z wykorzystaniem nowych gatunków mikroalg, posiadających wysoki potencjał do syntezy bioproduktów, który nie został jeszcze wykorzystany komercyjnie (Gonçalves i in., 2019). Niektóre gatunki mikroalg zostały z powodzeniem przebadane w skali laboratoryjnej, ale ciągle brakuje eksperymentów w dużej skali lub w zbiornikach na zewnątrz (Xie i in., 2013). W przyszłych pracach badawczych powinny być wykorzystane osiągnięcia inżynierii genetycznej i metabolicznej związane z wyizolowaniem „inteligentnych szczepów” o pożądanych w produkcji przemysłowej szlakach metabolicznych, zapewniających np. zwiększenie tolerancji na stres świetlny i cieplny, podniesienie odporności na działanie patogenów, czy zwiększenie zawartości pożądanych produktów (Benedetti i in., 2018), (Medipally i in., 2015). Z punktu widzenia komercyjnego zastosowania, szczególnie istotne będą szczepy o wysokim tempie wzrostu osiąganym nawet w hodowlach o wysokiej gęstości komórek (Han i in., 2015) oraz wzmocnienie kluczowych etapów metabolicznych (Benedetti i in., 2018). Wskazane jest zastąpienie pożywek opracowanych 50 lat temu nowszymi (Huntley i in., 2015). Ważne będą też badania nad możliwością wykorzystania różnych rodzajów odpadów jako surowca do prowadzenia hodowli mikroalg (Altunoz i in., 2017). Sugerowane jest także połączenie produkcji biomasy z oczyszczaniem ścieków z sektora bytowego i przemysłowego, które zawierają znaczne ilości składników odżywczych dla mikroalg (Wannachod i in. 2018). Podniesienie opłacalności procesu jest możliwe również przez wykorzystanie frakcji pozostałej po ekstrakcji oleju z komórek mikroalg do produkcji innych wartościowych produktów lub energii (Kiran i in., 2014).

Obszarem, który wymaga dalszych badań jest ulepszanie konstrukcji i sposobu funkcjonowania fotobioreaktorów wykorzystywanych do prowadzenia hodowli mikroalg (Fujita i in., 2008). Dotyczy to między innymi stosowania nowych materiałów do ich budowy, jak poliuretanu czy polichlorku winylu, które powinny pozwolić na obniżenie kosztów wytworzenia fotobioreaktorów (Kim i in., 2016). Duże nadzieje są związane z rozwojem hybrydowych systemów hodowli mikroalg, które pozwolą na zastosowanie różnych typów fotobioreaktorów w poszczególnych etapach hodowli. Umożliwi to ograniczenie

lub wyeliminowanie problemu zakażeń i stosowanie jednej lub kilku metod stresowania mikroalg (Narala i in., 2016).

Problemem do rozwiązania pozostaje skalowanie systemów hodowlanych do poziomu wymaganego dla produkcji komercyjnej, gdyż większość badań prowadzonych jest w skali laboratoryjnej (Borowitzka i Vonshak, 2017). Ważne jest, by zrozumieć wpływ krytycznych parametrów zwiększania skali bioprodukcji, takich jak powierzchniowa prędkość gazu, czas mieszania czy prędkości cyrkulacji (Chandra i in., 2017). Istotne będzie również wytwarzanie odpowiednich ilości inokulum, monitorowanie kultury w celu wychwytywania zakłóceń w przebiegu procesu i zapobieganie utracie kultury w przypadku awarii sprzętu (Borowitzka i Vonshak, 2017).

Jednym z najważniejszych wyzwań w przyszłości będzie optymalizacja oraz skalowanie systemów dostarczania i dystrybucji światła, aby uniknąć zarazem problemu fotolimitacji i fotoinhibicji w trakcie hodowli (Abu-Gosh i in., 2016), (Glemser i in., 2016). W kwestii obniżenia kosztów sztucznego oświetlenia duże nadzieje są związane z rozwojem technologii LED (Glemser i in., 2016). Ciągłe powinny być testowane nowe rozwiązania pojawiające się dzięki postępowi w elektronice i konstruowaniu nowych źródeł światła, np. wysokoenergetycznych diod LED emitujących promieniowanie UV (Schulze i in., 2014), (Glemser i in., 2016). Oczekuje się dalszych badań nad nowymi metodami oświetlenia z wykorzystaniem światłowodów, falowodów i kolektorów słonecznych (Jain i in., 2015), zbadania wpływu różnych składów spektralnych światła na produkcję biomasy dla różnych szczepów mikroalg (Kula i in., 2013) oraz uzupełniania naturalnego światła sztucznym oświetleniem, które służyłoby do intensyfikacji i wydłużenia czasu oświetlenia (Salmean i in., 2019). W przyszłych badaniach należy też dążyć do budowania modeli matematycznych opisujących procesy hodowli mikroalg i wpływ poszczególnych parametrów środowiskowych na wydajność biomasy i tempo jej wzrostu (Zhou i in., 2015). Modele matematyczne powinny uwzględniać specyfikę konkretnego gatunku mikroalg, rodzaj hodowli, porę roku czy lokalizację (Bernard, 2011) i powinny zostać włączone do systemów informatycznych kontrolujących przebieg hodowli mikroalg w czasie rzeczywistym (Chanona i in., 2018).

Publikacja nr 5 stanowi pewnego rodzaju podsumowanie cyklu badań nad doskonaleniem biosyntezy astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg *Haematococcus pluvialis*. Porównując zakres i tematykę zrealizowanych prac zaliczonych do osiągnięcia naukowego warto zauważyć, że wyniki tych badań w wielu aspektach są zgodne z pożądanymi kierunkami działań wskazanymi przez cytowanych naukowców z różnych zespołów

badawczych. Zaobserwowane trendy mogą być drogowskazem dla innych naukowców przy planowaniu tematyki przyszłych badań.

Publikacja nr 5 ukazała się dzięki dofinansowaniu uzyskanemu w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” realizowanego na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu w latach 2019-2022 (Numer projektu 015/RID/2018/19, kwota finansowania 10 721 040,00 PLN).

4.3.4. Podsumowanie

Rezultaty badań naukowych opisanych w monotematycznym cyklu publikacji w sposób istotny przyczyniły się do opracowania innowacyjnej technologii biosyntezy astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg *Haematococcus pluvialis* w skali półtechnicznej.

Doskonalenie technologii zapoczątkowały badania laboratoryjne mające na celu optymalizację parametrów środowiskowych hodowli, zapewniających maksymalizację przyrostu biomasy i biosyntezy astaksantyny przez szczep mikroalg *H. pluvialis* G1002. W wyniku badań wytypowano najefektywniejszy system oświetlenia typu LED. Obejmował on mieszane światło czerwone i niebieskie. Optymalny skład pożywki BBM, z punktu widzenia szybkości właściwej wzrostu komórek mikroalg i skuteczności stresowania, zawierał podwójną dawkę NaNO_3 , będącego źródłem azotu. Badania przeprowadzono w specjalnie zaprojektowanym i wdrożonym mieszadle wielostanowiskowym do eksperymentowania z mikroorganizmami fototroficznymi, przedstawionym w publikacji nr 1.

Realizacja badań naukowych w dużej skali i biosynteza astaksantyny w skali półtechnicznej wymagały sprawnego i wydajnego systemu namnażania inokulum przedstawionego w publikacji nr 2. Działanie opracowanego, trój etapowego systemu przygotowania inokulum skorelowano z wymaganiami dwuetapowego procesu biosyntezy astaksantyny w skali półtechnicznej. Dla zapewnienia odpowiedniej wydajności i niezawodności ostatniego, najważniejszego i technologicznie najtrudniejszego etapu inokulacji, opracowano i wdrożono prototypowe stanowisko do namnażania inokulum. Pozwoliło to na uzyskiwanie wymaganych ilości materiału hodowlanego o odpowiedniej aktywności, w powtarzalny sposób.

Najważniejszy element wskazanego osiągnięcia naukowego stanowiło opracowanie dwuetapowej technologii biosyntezy naturalnej astaksantyny w skali półtechnicznej, opisanej w publikacji nr 3. Technologia ta bazuje na optymalnych profilach czasowych natężenia oświetlenia LED i dozowania ditlenku węgla dla poszczególnych etapów procesu i zmieniającej

się gęstości podłoża. Równoczesne wykorzystanie trzech czynników stresujących w fazie czerwonej hodowli mikroalg pozwoliło na biosyntezę astaksantyny na skalę półtechniczną z wydajnością 3,2% s.m. Ze względu na wykorzystanie sztucznego oświetlenia typu LED opracowana metoda biosyntezy naturalnej astaksantyny może być z powodzeniem stosowana w Polsce i innych krajach o ograniczonym dostępie do światła słonecznego.

Modułowa konstrukcja systemu fotobioreaktorów w skali półtechnicznej, które mogą funkcjonować samodzielnie w oddalonych lokalizacjach, wymusiły konieczność przeprowadzenia badań nad możliwością zdalnego kontrolowania warunków hodowli mikroalg, których efekty zaprezentowano w publikacji nr 4. Opracowany system zdalnego sterowania umożliwił prawidłowe kontrolowanie przebiegu hodowli mikroalg przez Internet, z zapewnieniem wymaganego do sterowania bioprocessami determinizmu czasowego. Przeprowadzone badania potwierdziły osiąganie podobnych rezultatów, jak w przypadku systemu sterowania podłączonego bezpośrednio do fotobioreaktorów.

Podsumowaniem badań naukowych związanych z biosyntezą astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg w fotobioreaktorach było zdiagnozowanie i scharakteryzowanie światowych trendów w tej dziedzinie na przestrzeni dwudziestu pięciu lat. W publikacji nr 5 zidentyfikowano i opisano siedem wiodących obszarów aktualnie prowadzonych badań. Wskazano pożądane kierunki i tematykę przyszłych prac badawczych potrzebnych do pomyślnego wdrożenia na skalę przemysłową technologii na bazie mikroalg. Tematyka badań zaliczonych do osiągnięcia naukowego w wielu aspektach była zgodna z pożądanymi kierunkami, wskazanymi w przeanalizowanych publikacjach. Zaprezentowane w publikacji nr 5 trendy badawcze mogą być wytycznymi dla innych naukowców przy planowaniu przyszłych badań.

Dodatkowym osiągnięciem zrealizowanym w trakcie prowadzenia badań zaliczonych do osiągnięcia naukowego było wprowadzenie innowacji konstrukcyjnych do budowy kopuły dolnej fotobioreaktorów typu airlift, zastosowanych w instalacji w skali półtechnicznej. Wypracowana własność intelektualna uzyskała ochronę patentową PL nr 233555 „Fotobioreaktor do hodowania mikroorganizmów, zwłaszcza mikroalg”, którego jestem współautorem (Załącznik 4, III.3.1.3).

Właścicielem opracowanej technologii biosyntezy naturalnej astaksantyny w skali półtechnicznej jest firma AlgaeLabs Sp. z o. o., należąca do giełdowego funduszu inwestycyjnego Adiuvo Investments S.A. Zamierzeniem firmy jest dystrybuowanie naturalnej astaksantyny w formie oczyszczonej oleożywicy jako składnika do produkcji nutraceutyków.

4.3.5. Spis literatury

1. Abu-Ghosh S., Fixler D., Dubinsky Z., Iluz D.: "Flashing light in microalgae biotechnology". *Bioresource Technology* (2015) 203.
2. Aflalo C., Meshulam Y., Zarka A., Boussiba S.: "On the relative efficiency of two- vs. one-stage production of astaxanthin by the green alga *Haematococcus pluvialis*" *Biotechnology and Bioengineering* (2007) 98 300–305.
3. Alaoui C.: "Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation" *International Journal of Engineering* (2011), 5(1), 114–121.
4. AlgaeLabs (2016), http://www.newconnect.pl/index.php?page=get_ebi_file&id=70856, Dostęp: 31.10.2016 r.
5. AlgaeTec (2016), <http://algaetec.com.au/index.php/technology/the-algae-tec-technology>, Dostęp: 31.10.2016 r.
6. Altunoz M., Pirrotta O., Forti L., Allesina G., Pedrazzi S., Obali O., Tartarini P., Arru L.: "Combined effects of LED lights and chicken manure on *Neochloris oleoabundans* growth" *Bioresource Technology* (2017) 244, 1261–1268.
7. Ambati R. R., Moi P. S., Ravi S., Aswathanarayana R. G.: "Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications - A review" *Marine Drugs* (2014) 12(1), 128–152.
8. Arashiro L.T., Ferrer I., Pániker C.C., Gómez-Pinchetti J.L., Rousseau D.P.L., Van Hulle S.W.H., Garfi M.: "Natural Pigments and Biogas Recovery from Microalgae Grown in Wastewater" *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2020) 8, 10691–10701.
9. Bauer A., Minceva M.: "Techno-economic analysis of a new downstream process for the production of astaxanthin from the microalgae *Haematococcus pluvialis*" *Bioresources and Bioprocessing* (2021) 8, 111.
10. Benedetti M., Vecchi V., Barera S., Dall'Osto L.: "Biomass from microalgae: The potential of domestication towards sustainable biofactories" *Microbial Cell Factories* (2018) 17, 173.
11. Bernard O.: "Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production" *Journal of Process Control* (2011) 21, 1378–1389.
12. Borowitzka M.A., Vonshak A.: "Scaling up microalgal cultures to commercial scale" *European Journal of Phycology* (2017) 52, 407–418.
13. Chandra T.S., Aditi S., Kumar M.M., Mukherji S., Modak J., Chauhan V.S., Sarada R., Mudliar S.N.: "Growth and biochemical characteristics of an indigenous freshwater microalga, *Scenedesmus obtusus*, cultivated in an airlift photobioreactor: Effect of reactor hydrodynamics, light intensity, and photoperiod" *Bioprocess and Biosystems Engineering* (2017) 40, 1057–1068.
14. Chanona E.A.D.R., Liu J., Wagner J.L., Zhang D., Meng Y., Xue S., Shah N.: "Dynamic modeling of green algae cultivation in a photobioreactor for sustainable biodiesel production" *Biotechnology and Bioengineering* (2018) 115, 359–370.
15. Chisti Y.: "Biodiesel from microalgae" *Biotechnology Advances* (2007) 25, 294–306.
16. Complete Container Technology (2016), <http://container-tech.com/algae-farming.html>, Dostęp: 31.10.2016 r.
17. Das D.: "Algal Biorefinery: An Integrated Approach" Springer (2015) Berlin, Germany.
18. Dos Santos A.C., Lombardi A.T.: "Growth, photosynthesis and biochemical composition of *Haematococcus pluvialis* at various pH" *Journal of Algal Biomass Utilization* (2017) vol. 8(1), s. 1-15.

19. Fuentes-Grünwald C., Bayliss C., Fonlut F., Chapuli E.: "Long-term dinoflagellate culture performance in a commercial photobioreactor: *Amphidinium carterae* case" *Bioresource Technology* (2016) 218, 533–540.
20. Fujita T., Aoyagi H., Ogbonna J.C., Tanaka H.: "Effect of mixed organic substrate on alpha-tocopherol production by *Euglena gracilis* in photoheterotrophic culture" *Applied Microbiology and Biotechnology* (2008) 79, 371–378.
21. Galvão R., Santana T., Fontes C., Sales E.: "Modeling of biomass production of *Haematococcus pluvialis*" *Applied Mathematics* (2013) 4, 50–56.
22. García-Galán M.J., Monllor-Alcaraz L.S., Postigo C., Uggetti, E., de Alda M.L., Díez-Montero R., García J.: "Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas" *Environmental Pollution* (2020) 265, 114579.
23. Glemser M., Heining M., Schmidt J., Becker A., Garbe D., Buchholz R., Brück T.: "Application of light-emitting diodes (LEDs) in cultivation of phototrophic microalgae: Current state and perspectives" *Applied Microbiology and Biotechnology* (2016) 100, 1077–1088.
24. Göksan T., Ak İ., Kılıç C.: "Growth characteristics of the alga *Haematococcus pluvialis* Flotow as affected by nitrogen source, vitamin, light and aeration" *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (2011) vol. 11, s. 377-383.
25. Gonçalves V.D., Fagundes-Klen M.R., Trigueros D.E.G., Kroumov A.D., Módenes A.N.: "Statistical and optimization strategies to carotenoids production by *Tetradismus acuminatus* (LC192133.1) cultivated in photobioreactors" *Biochemical Engineering Journal* (2019) 152, 107351.
26. Griffiths M.J., Dicks R.G., Richardson Ch., Harrison S.T.L.: "Advantages and Challenges of Microalgae as a Source of Oil for Biodiesel" w książce "Biodiesel – Feedstocks and Processing Technologies" (2011) Stoytcheva M. (red.), InTech.
27. Han S.-F., Jin W.-B., Tu R.-J., Wu W.: "Biofuel production from microalgae as feedstock: Current status and potential" *Critical Reviews in Biotechnology* (2015) 35, 255–268.
28. Huntley M.E., Johnson Z.I., Brown S.L., Sills D.L., Gerber L., Archibald I., Machesky S.C., Granados J., Beal C., Greene C.H.: "Demonstrated large-scale production of marine microalgae for fuels and feed" *Algal Research* (2015) 10, 249–265.
29. Infant Santhos B., Elumalai S., Rajesh Kanna G.: "Airlift photobioreactor cultivation of a new strain of *Haematococcus pluvialis* collected from high altitude regions of Himalayas" *International Journal of Science and Research* (2014) vol. 3(10), s. 2289-2292.
30. Jain A., Voulis N., Jung E.E., Doud D.F.R., Miller W.B., Angenent L.T., Erickson D.: "Optimal Intensity and Biomass Density for Biofuel Production in a Thin-Light-Path Photobioreactor" *Environmental Science & Technology* (2015) 49, 6327–6334.
31. Kaewpintong K., Shotipruk A., Powtongsook S., Pavasant P.: "Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor" *Bioresource Technology* (2007) 98, s. 288-295.
32. Kim Z.-H., Park H., Hong S.-J., Lim S.-M., Lee C.-G.: "Development of a floating photobioreactor with internal partitions for efficient utilization of ocean wave into improved mass transfer and algal culture mixing" *Bioprocess and Biosystems Engineering* (2016) 39, 713–723.
33. Kim Z.-H., Park H., Hong S.-J., Lim S.-M., Lee C.-G.: "Development of a floating photobioreactor with internal partitions for efficient utilization of ocean wave into improved mass transfer and algal culture mixing" *Bioprocess and Biosystems Engineering* (2016) 39, 713–723.
34. Kiran B., Kumar R., Deshmukh D.: "Perspectives of microalgal biofuels as a renewable source of energy" *Energy Conversion and Management* (2014) 88, 1228–1244.

35. Klochkova T.A., Kwak M.S., Han J.W., Motomura T., Nagasato C., Kim G.H.: "Cold-tolerant strain of *Haematococcus pluvialis* (*Haematococcaceae*, *Chlorophyta*) from Blomstrandhalvøya (Svalbard)". *Algae* (2013) 28, 185–192.
36. Kula M., Rys M., Mozdzeń K., Skoczowski A.: "Metabolic activity, the chemical composition of biomass and photosynthetic activity of *Chlorella vulgaris* under different light spectra in photobioreactors" *Engineering in Life Sciences* (2013) 14, 57–67.
37. Liu J., Sun Z., Gerken H., Liu Z., Jiang Y., and Chen F.: "*Chlorella zofingiensis* as an alternative microalgal producer of astaxanthin: Biology and industrial potential" *Marine Drugs* (2014) vol. 12, no. 6, pp. 3487–3515, 2014.
38. Medipally S.R., Yusoff F., Banerjee S., Shariff M.: "Microalgae as Sustainable Renewable Energy Feedstock for Biofuel Production" *BioMed Research International* (2015) 2015, 519513.
39. Nagaraj S., Arulmurugan P., Rajaram M.G., Sundararaj R., Rengasamy R.: "Enhanced production of astaxanthin at different physico-chemical parameters in the green alga *Haematococcus pluvialis* Flotow" *Official Journal of Phycological Society India* (2012) *Phykos* 42(1), 59–71.
40. Narala R. R., Garg S., Sharma K. K., Thomas-Hall S. R., Deme M., Li Y., Schenk P. M.: "Comparison of Microalgae Cultivation in Photobioreactor, Open Raceway Pond, and a Two-Stage Hybrid System" *Frontiers in Energy Research* (2016) 4:29, 1–10.
41. Nguyen K. D.: Astaxanthin: "A Comparative Case of Synthetic VS. Natural Production" *Chemical and Biomolecular Engineering Publications and Other Works* (2013) http://trace.tennessee.edu/utk_chembiopubs/94
42. Nie S., Cheng Y., Dai Y.: "Characteristic Analysis of DS18B20 Temperature Sensor in the High-voltage Transmission Lines' Dynamic Capacity Increase" *Energy and Power Engineering* (2013), 05(04), 557–560.
43. Pankratz S., Oyedun A., Zhang X., Kumar A.: "Algae production platforms for Canada's northern climate" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2017) 80, 109–120.
44. Paul Scherrer Institut (2016), <https://www.psi.ch/cpe/konti-c>, Dostęp 31.10.2016 r.
45. Penloglou G., Kiparissides C.: "Scale-up and intensification of a microalgae cultivation process for the production of high-added value biochemical" *Materials Today: Proceedings* (2018) 5, 27463–27471.
46. Piltz B., Melkonian M.: "Immobilized microalgae for nutrient recovery from source-separated human urine" *Journal of Applied Phycology* (2018) 30, 421–429.
47. Riffat S., Ma X.: "Thermoelectrics: a review of present and potential applications" *Applied Thermal Engineering* (2003), 23(8), 913–935.
48. Saei A. A., Ghanbari P., Barzegari A.: "*Haematococcus* as a promising cell factory to produce recombinant pharmaceutical proteins" *Molecular Biology Reports* (2012) vol. 39, no. 11, 9931–9939.
49. Salmean C., Bonilla S., Azimi Y., Aitchison J.S., Allen D.G.: "Design and testing of an externally-coupled planar waveguide photobioreactor" *Algal Research* (2019) 44, 101684.
50. Salonen K., Kiviharju K., Eerikäinen T.: "Bioreactor Measurement and Simulation Environment" 10th International IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology (2007) Cancun, Mexico, June 4-6, s. 279-284.
51. Santhanam P., Begum A., Pachiappan P.: "Basic and Applied Phytoplankton Biology" Springer (2019) Singapore.
52. Sarada R., Ranga Rao A., Sandesh B.K., Dayananda C., Anila N., Chauhan V.S., Ravishankar G.A.: "Influence of different culture conditions on yield of biomass and value added products in microalgae" *Dynamic Biochemistry, Process Biotechnology and Molecular Biology* (2012) vol. 6(2), s. 77-85.

53. Sarada R., Tripathi U., Ravishankar G.A.: "Influence of stress on astaxanthin production in *Haematococcus pluvialis* grown under different culture conditions" *Process Biochemistry* (2002) 37, 623–627.
54. Schulze P.S., Barreira L.A., Pereira H.G., Perales J.A., Varela J.C.: "Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production" *Trends in Biotechnology* (2014) 32, 422–430.
55. Seabra L., Pedrosa L.: "Astaxanthin: Structural and functional aspects" *Revista de Nutrição* (2010) 23(6), 1041-1050.
56. Shah M.M.R., Liang Y., Cheng J.J., Daroch M.: "Astaxanthin-producing green microalga *Haematococcus pluvialis*: from single cell to high value commercial products" *Frontiers in Plant Science* (2016) 7:531.
57. Sieradzka M., Kołodziejczyk-Czepas J.: „Astaksantyna – karotenoidowy przeciwutleniacz o właściwościach kardioprotekcyjnych”. *Problemy Higieny i Epidemiologii* (2016) 97(3), 197-206.
58. Sipaubá-Tavares L.H., Millan R.N., Berchielli-Morais F.A.: "Effects of some parameters in upscale culture of *Haematococcus pluvialis* Flotow" *Brazilian Journal of Biology* (2013) 73, 585-591.
59. Skjånes K., Andersen U., Heidorn T., Borgvang S.A.: "Design and construction of a photobioreactor for hydrogen production, including status in the field" *Journal of Applied Phycology* (2016), vol. 28, s. 2205-2223.
60. Stachowiak B., Czarnecki Z.: „Drożdże *Phaffia rhodozyma* jako potencjalne źródło naturalnej astaksantyny” *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość* (2006) 2(47), s. 17-28.
61. Tamburic B., Guruprasad S., Radford D.T., Szabó M., Lilley R.M., Larkum A.W., Franklin J.B., Kramer D.M., Blackburn S.I., Raven J.A.: "The effect of Diel temperature and light cycles on the growth of *Nannochloropsis oculata* in a photobioreactor matrix" *PLoS ONE* (2014) 9, e86047.
62. Teikari P., Najjar R. P., Malkki H., Knoblauch K., Dumortier D., Gronfier C., Cooper H. M.: "An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research" *Journal of Neuroscience Methods* (2012), 211(2), 227–36.
63. Torzillo G., Goksan T., Isik O., Gokpinar S.: "Photon irradiance required to support optimal growth and interrelations between irradiance and pigment composition in the green alga *Haematococcus pluvialis*" *European Journal of Phycology* (2005) 40, 233–240.
64. Villaró S., Ciardi M., Morillas-España A., Sánchez-Zurano A., Acién-Fernández G., Lafarga T.: "Microalgae Derived Astaxanthin: Research and Consumer Trends and Industrial Use as Food" *Foods* (2021) 10, 2303.
65. Wannachod T., Wannasutthiwat S., Powtongsook S., Nootong K.: "Photoautotrophic cultivating options of freshwater green microalgal *Chlorococcum humicola* for biomass and carotenoid production" *Preparative Biochemistry & Biotechnology* (2018) 48, 335–342.
66. White D., Silkina A., Skill S., Oatley-Radclie D., Van Den Hende S., Ernst A., De Viser C., Van Dijk W., Davey M., Day J.: "Public Output Report of the EnAlgae Project" (2015) www.enalgae.eu (dostęp 3 maja 2020 r.).
67. Xie Y., Ho S.-H., Chen C.-N.N., Chen C.-Y., Ng I.-S., Jing K.-J., Chang J.-S., Lu Y.: "Phototrophic cultivation of a thermo-tolerant *Desmodesmus* sp. for lutein production: Effects of nitrate concentration, light intensity and fed-batch operation" *Bioresource Technology* (2013) 144, 435–444.
68. Yang L., Yang S.H.: "Multirate control in internet-based control systems" *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part C, Applications and Reviews* (2007) 37(2), s. 185-192.
69. Yang S., Tan L., Liu G.: "Architecture design for internet-based control systems" *International Journal of Automation and Computing* (2004) vol. 1, s. 1-9.

70. Zabochnicka-Świątek M., Malińska K., Krzywonos M.: "Removal of biogens from wastewater by microalgae" *Environment Protection Engineering* (2014) 40(2), 87-104.
71. Zhang L., Zhang B., Zhu X., Chang H., Ou S., Wang H.: "Role of Bioreactors in Microbial Biomass and Energy Conversion" *Green Energy and Technology*, Springer (2018) Singapore.
72. Zhou X., Yuan S., Chen R., Ochieng R.M.: "Sustainable production of energy from microalgae: Review of culturing systems, economics, and modelling" *Journal of Renewable and Sustainable Energy* (2015) 7, 012701.

4.4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Drożdże piekarskie

Początek mojej pracy naukowo-badawczej jest związany z Katedrą Biotechnologii Żywności w Instytucie Chemii i Technologii Żywności na Wydziale Inżynieryjno-Ekonomicznym Przemysłu (od 1999 roku Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny) Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu. Funkcję kierownika katedry piastował prof. dr hab. inż. Władysław Leśniak, a moje zatrudnienie było efektem pomyslniej realizacji pracy magisterskiej zatytułowanej „Badania nad sterowaniem dopływem pożywki w hodowli drożdży piekarskich przy użyciu komputera typu IBM PC”. Praca została wypromowana przez kierownika Zespołu Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, dr. hab. inż. Tadeusza Miśkiewicza, prof. AE Wrocław. Tematyka pracy magisterskiej i przygotowany w trakcie jej realizacji komputerowy system wspomagający prowadzenie hodowli drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae* w bioreaktorze laboratoryjnym wraz z autorskim oprogramowaniem idealnie wpisywały się w nurt prac badawczych zespołu, do którego natychmiast po zatrudnieniu (1 października 1996 r.) zostałem dołączony.

Zespół ten realizował w latach 1995-1998 projekt pod tytułem „Knowledge-Based Control and Operation of Industrial Productive Bioprocesses”, o numerze ERB-CIPA-CT-94-0205, sfinansowany przez Unię Europejską z funduszy 4. Programu Ramowego w ramach programu COPERNICUS (Załącznik 4, II.9.1.1). W projekcie uczestniczyły zespoły badawcze z Wielkiej Brytanii (University of Birmingham), Czech (Institute of Chemical Technology, Prague) i Portugalii (INETI - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Lisbon). Jako wykonawca projektu aktywnie uczestniczyłem w badaniach związanych z syntezą $\Delta^{5,7}$ -steroli przez drożdże *Saccharomyces cerevisiae* w procesach typu fed-batch i procesach ciągłych na substracie zawierającym glukozę jako źródło węgla. Synteza ta pozostaje w ścisłym związku z szybkością właściwą wzrostu komórek drożdży. W eksperymentach badano zawartość steroli w komórkach drożdży, m.in. ergosterolu, dehydroergosterolu i dihydroergosterolu. W przypadku procesów ciągłych zawartość dihydroergosterolu była tym większa, im większa była szybkość rozcieńczania. Dla pozostałych steroli istniały szybkości rozcieńczania, przy których osiągały one maksimum swojej zawartości w komórkach drożdży. W przypadku ergosterolu w środowisku hodowlanym wyraźnie zwiększała się zawartość etanolu, co wpływało na hamowanie syntezy $\Delta^{5,7}$ -steroli. W hodowlach typu fed-batch, w których glukoza była przyswajana na drodze czysto tlenowej, zawartość poszczególnych steroli w drożdżach (oprócz dehydroergosterolu) zwiększała się wraz ze wzrostem szybkości

właściwej wzrostu. Przeprowadzono także optymalizację procesu syntezy ergosterolu, gdyż to właśnie ten sterol stanowi surowiec w produkcji witaminy D₂. Dobierając kryteria optymalizacji uwzględniono wydajność ergosterolu wytwarzanego na pożywce glukozowej, jego zawartość w komórkach drożdży i udział w ogólnej puli $\Delta^{5,7}$ -steroli. Biorąc pod uwagę powyższe kryteria, optymalna szybkość rozcieńczania w procesie ciągłym wyniosła 0,13 h⁻¹, a optymalny czas procesu typu fed-batch został ustalony na 6 do 8 godzin. Częstkowe wyniki eksperymentów zostały zaprezentowane w trakcie konferencji naukowych XXVIII, XIX i XXX Sesji naukowej PAN w 1997, 1998 i 1999 roku (Załącznik 4, II.7.2.1, II.7.2.2, II.7.2.3). Wyniki końcowe eksperymentów opublikowano w artykule (Załącznik 4, II.4.2.1).

Doświadczenie zdobyte w trakcie prowadzenia badań związanych z syntezą steroli w hodowlach okresowych i ciągłych zaowocowało pomysłem na opracowanie nowej metody sterowania dopływem pożywki w hodowli typu fed-batch drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae*. Nowa metoda bazowała na funkcji logistycznej i zapewniała szybki wzrost, wysoką wydajność biomasy i zadawalającą siłę pędną drożdży.

Realizując badania opracowano matematyczną metodę modyfikacji parametrów funkcji logistycznej postaci $f(t)=a/(1+b \times e^{-c \times t})$, gdzie „a”, „b” i „c” to parametry funkcji logistycznej, „t” to czas hodowli, a „e” to podstawa logarytmu naturalnego. Do modyfikacji kształtu funkcji logistycznej i całkowitej ilości dozowanej glukozy w trakcie hodowli wykorzystano wartość pojedynczego współczynnika korygującego „s” z przedziału od -14 do 350 [-]. Wyniki uzyskane we wstępnych eksperymentach pokazały, że jednoczesna maksymalizacja wydajności biomasy i szybkości właściwej wzrostu nie jest możliwa, ponieważ są to cele konfliktowe.

Ze względu na potencjalne zastosowanie praktyczne, przy opracowaniu nowej metody zaproponowano optymalizację kryterium K, będącego iloczynem wydajności biomasy (Y) i szybkości właściwej wzrostu (μ) $K=Y \times \mu$. Maksymalizacja tego kryterium była kompromisowym wariantem optymalizacji łączącym dwa konfliktowe cele. Zrealizowano plan badań polegający na wykonaniu serii hodowli z różnymi początkowymi zawartościami biomasy (2,1; 3,0; 4,1; 5,0 i 6,1 g×dm⁻³) i dla różnych logistycznych profili czasowych dozowania pożywki. Znalezione optymalne parametry profilu logistycznego dla każdej początkowej zawartości biomasy oraz opracowano mechanizm pozwalający na dobieranie optymalnych parametrów „a”, „b”, „c” funkcji logistycznej dla dowolnej początkowej zawartości biomasy drożdży w przedziale od 2,1 do 6,1 g×dm⁻³.

W efekcie przeprowadzonych badań opracowano prostą, bezczujnikową metodę dozowania pożywki w hodowli fed-batch drożdży piekarskich *Saccharomyces cerevisiae*, zapewniającą maksymalizację iloczynu wydajności biomasy i szybkości właściwej wzrostu

oraz uzyskiwanie dobrej siły pędnej drożdży. Dobór optymalnych parametrów funkcji logistycznej wymagał jedynie znajomości początkowej zawartości biomasy. Eksperymenty weryfikujące potwierdziły skuteczność opracowanej metody zarówno w hodowlach prowadzonych na pożywce glukozowej, jak i melasowej. Zaproponowana metoda produkcji drożdży piekarskich nie wymaga stosowania ani skomplikowanej aparatury kontrolno-pomiarowej, ani zaawansowanych systemów i algorytmów sterujących. Może być w związku z tym interesującą propozycją dla małych i średnich firm (np. piekarni) pragnących tanio produkować drożdże piekarskie we własnym zakresie.

Wyniki uzyskane w trakcie eksperymentów były podstawą mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej „Wykorzystanie funkcji logistycznej do sterowania dopływem pożywki w hodowli drożdży piekarskich”, którą obroniłem 2 lutego 2007 roku przed Radą Wydziału Nauk o Żywności Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Promotorem pracy doktorskiej był prof. dr hab. inż. Tadeusz Miśkiewicz, a recenzentami prof. dr hab. inż. Maria Wojtatowicz (Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu) i prof. dr hab. inż. Włodzimierz Bednarski (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie). Uzyskałem stopień naukowy doktora nauk rolniczych w zakresie technologii żywności i żywienia.

Wyniki wstępnych eksperymentów zostały zaprezentowane w artykule (Załącznik 4, II.4.2.2). Końcowe wyniki badań wraz z opisem algorytmu działania nowej metody dozowania pożywki w hodowli drożdży piekarskich zostały opublikowane w artykule (Załącznik 4, II.4.1.2). Nową metodę hodowli drożdży piekarskich zaprezentowano w trakcie konferencji krajowej (Załącznik 4, II.7.1.2). Innowacyjny sposób sterowania procesem wzrostu mikroorganizmów uzyskał w 2013 roku ochronę patentową (Załącznik 4, III.3.1.1). Opracowane w ramach pracy doktorskiej rozwiązanie uzyskało na początku 2014 roku wyróżnienie w konkursie Wrocławskiej Rady Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT „Za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki” zrealizowane w 2012 roku (Autoreferat, 7.2. Nagrody i wyróżnienia).

Biodegradacja wywarów gorzelnicznych

Równocześnie z prowadzeniem eksperymentów związanych z pracą doktorską byłem członkiem zespołu zaangażowanego w prowadzenie badań nad biodegradacją odpadów towarzyszących produkcji żywności. Zespół pracowników Katedry Inżynierii Bioprocessowej Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. Tadeusza Miśkiewicza, w latach 2000-2004 realizował projekt „Enhanced, intelligent processing of food and related wastes using thermophilic populations”, finansowany przez Unię Europejską

w ramach 5. Programu Ramowego (Załącznik 4, II.9.1.2). Do międzynarodowego konsorcjum, w którego skład wchodziły ośrodki naukowe z Czech, Portugalii i Wielkiej Brytanii biorące udział w opisanym wcześniej projekcie w ramach programu COPERNICUS, dołączyły zespoły naukowców z Akademii Ekonomicznej w Poznaniu i Aristotle University of Thessaloniki (Grecja) oraz przedsiębiorstwa z Wielkiej Brytanii i Polski.

Zadaniem zespołu pracowników Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu było opracowanie podstaw procesu tlenowej biodegradacji wywaru ziemniaczanego z wykorzystaniem mieszanych kultur bakterii termo- i mezofilnych z rodzaju *Bacillus*. Realizując eksperymenty wykazano, że stosowana mieszana kultura bakterii efektywnie degraduje wywar w szerokim zakresie temperatur, tj. od 20 do 63°C. Stopień usuwania zanieczyszczeń mierzony wskaźnikiem ChZT wnosił od 78 do 89%. Stwierdzono, że podczas biodegradacji wywaru ziemniaczanego konieczna jest regulacja pH podłoża i wzbogacanie go w dodatkowe źródło azotu i fosforu. Przez czteroletni okres trwania projektu współpracowałem z innymi zespołami w zakresie realizowanych prac badawczych i analitycznych oraz brałem udział w opracowaniu wyników i raportów okresowych. Wyniki badań zostały opublikowane w artykule (Załącznik 4, II.4.1.1).

W kolejnych badaniach zajmowałem się możliwością zagospodarowania wywaru pszenicznego, jako surowca do biologicznej produkcji etanolu II generacji. Proces ten musi poprzedzać depolimeryzacja polisacharydów (hemicelulozy i celulozy), prowadząca do uzyskania frakcji ciekłej produktów bogatej w podatne na fermentację monosacharydy. Zbadano przebieg kwasowej hydrolizy pszenicznego wywaru gorzelniczego prowadzonej w temperaturze 121°C przy różnych stężeniach kwasu siarkowego. Sprawdzone, jaki wpływ ma czas trwania procesu hydrolizy na skład chemiczny uzyskanej frakcji i zawartość furfurali. Znalezione optymalne rozwiązanie łączące największy stopień depolimeryzacji polisacharydów zawartych w badanym wywarze pszenicznym do monosacharydów fermentujących, przy najmniejszym stopniu ich degradacji do produktów toksycznych. Efekt ten uzyskano przy czasie reakcji wynoszącym 30 minut i użyciu 1% H₂SO₄. Wyniki badań zaprezentowano w publikacji (Załącznik 4, II.4.1.4).

Realizacja badań związanych z zagospodarowaniem odpadów z produkcji żywności zaowocowała uzyskaniem zaproszenia do udziału w charakterze eksperta w realizowanym w latach 2010-2011 i współfinansowanym przez Unię Europejską projekcie „Identyfikacja potencjału i zasobów Dolnego Śląska w obszarze nauka i technologie na rzecz poprawy jakości życia (Jakość Życia / Quality of Life) oraz wytyczenie przyszłych kierunków rozwoju. Badania metodami foresight” (Załącznik 4, II.9.1.3). Prowadzone badania miały na celu określenie

istniejącego stanu zagospodarowania odpadów na Dolnym Śląsku oraz wskazanie możliwości ich powtórnego wykorzystania i zagospodarowania.

Dekoloryzacja wywarów gorzelnicznych

Kontynuacją prac badawczych związanych z zagospodarowaniem wywarów gorzelnicznych była moja współpraca w latach 2011-2015 z dr inż. Małgorzatą Krzywonos przy realizacji grantu MNiSW (projekt nr NN 312 421940) zatytułowanego „Zastosowanie bakterii z rodzaju *Bacillus* i bakterii fermentacji mlekowej do odbarwiania buraczanego wywaru melasowego”, którego była kierownikiem. Wywar to najbardziej obciążony zanieczyszczeniami produkt odpadowy z produkcji etanolu. Stosowane powszechnie metody obróbki wywaru melasowego pozwalają na zmniejszenie ładunku zanieczyszczeń, ale nie usuwają brązowego zabarwienia.

W przeprowadzonych badaniach do usuwania substancji barwnych z melasowego wywaru buraczanego wykorzystano bakterie fermentacji mlekowej *Lactobacillus plantarum* MiLAB393. Zbadano wpływ dodatku do podłoża wywarowego źródeł azotu w postaci ekstraktu drożdżowego, peptonu i siarczanu amonu oraz fosforu w postaci diwodorofosforanu potasu, a także węgla w postaci glukozy na stopień usunięcia związków barwnych melasowego wywaru buraczanego. W eksperymentach zaplanowanych z użyciem kompozycyjnego plan rotatabilnego, spośród analizowanych czynników statystycznie istotny wpływ ($p \leq 0,05$) na stopień usuwania barwy z wywaru miał dodatek glukozy i ekstraktu drożdżowego. Nieistotny okazał się dodatek pozostałych składników, tj. peptonu, siarczanu amonu i diwodorofosforanu potasu. Najwyższy stopień dekoloryzacji osiągnięto w wariancie z najwyższą dawką glukozy i wyniósł on około 23%. W żadnym z wariantów eksperymentu stopień usunięcia melanoidyn, karmeli i produktów alkalicznego rozkładu inwertu nie był wyższy niż odpowiednio 19%, 17% i 18%. Stopień redukcji ChZT nie przekroczył 17%. Wyniki badań opublikowano w artykule (Załącznik 4, II.4.2.5) oraz przedstawiono na konferencji krajowej (Załącznik 4, II.7.2.7).

W kolejnych badaniach do dekoloryzacji wywaru wykorzystano mieszaną kulturę bakterii powstałą z połączenia szczepów bakterii mlekowych *Lactobacillus casei* 0848, *Lactobacillus plantarum* MiLAB393 oraz *Pediococcus parvulus* MiLab099. Zbadano wpływ dodatku ekstraktu drożdżowego na efektywność okresowych procesów odbarwiania melasowego wywaru buraczanego przez bakterie kwasu mlekowego. Zaobserwowano, że zwiększenie dawki ekstraktu drożdżowego z 2,24 do 4,48 i 8,96 g \times dm⁻³ skutkowało wprawdzie wyższym przyrostem biomasy, ale nie powodowało wzrostu stopnia odbarwienia

wywaru gorzelniczego, którego maksymalna wartość wyniosła 28,36% dla dodatku ekstraktu drożdżowego $2,24 \text{ g} \times \text{dm}^{-3}$. Niezależnie od ilości ekstraktu drożdżowego dodanego do pożywki, stopień usunięcia produktów alkalicznego rozkładu inwertu we wszystkich doświadczeniach był na podobnym poziomie (ok. 13%). Wraz ze wzrostem dawki ekstraktu drożdżowego zaobserwowano wzrost zawartości karmelu. Największe usunięcie melanoidyn (62,3%) stwierdzono w procesie z największą dawką ekstraktu drożdżowego. Toksyczne związki obecne w wywarze: akryloamid, 4-metyloimidazol, furfural, 5-hydroksymetylofurfural i 2-acetylo-4-(1,2,3,4)-tetrahydroksy-butyloimidazol zostały całkowicie przyswojone. Wyniki badań zostały opisane w artykule (Załącznik 4, II.4.1.5) i zaprezentowane w postaci doniesienia na międzynarodowej konferencji naukowej (Załącznik 4, II.7.2.10).

Poszukiwałem także alternatywnych dla węgla aktywowanego materiałów, które będą wydajnym, tanim i skutecznym sorbentem w procesie dekoloryzacji wywaru. W trakcie badań, do usuwania związków barwnych z kukurydziano-melasowego wywaru gorzelniczego, wykorzystano pięć naturalnych sorbentów mineralnych: dwa rodzaje haloizytu (PJC i KR), dwa rodzaje zeolitu, różniące się grubością ziarna oraz bentonit. Najbardziej efektywne odbarwienie uzyskano w procesie z zastosowaniem haloizytu PJC (74%) i bentonitu (62%). Melanoidyny i produkty alkalicznego rozkładu inwertu najskuteczniej zostały usunięte przy udziale bentonitu, natomiast karmele w obecności haloizytów KR oraz PJC. Po procesie dekoloryzacji prawie we wszystkich próbach zmalała zawartość ChZT oraz zawartość fosforu fosforanowego, natomiast wzrosła zawartość ogólnego węgla organicznego. Wyniki badań przedstawiono w publikacji (Załącznik 4, II.4.1.7) oraz w postaci doniesienia na konferencję międzynarodową (Załącznik 4, II.7.2.9). Możliwość nawozowego wykorzystania mineralnych sorbentów otrzymanych po procesie odbarwiania wywaru gorzelniczego przedstawiono w postaci doniesienia na konferencję krajową (Załącznik 4, II.7.2.6).

Brałem również udział w badaniach, które miały na celu zastosowanie chromatografii żelowej do rozdzielenia substancji barwnych obecnych w wywarze z melasy buraczanej. W badaniach wykorzystano kolumny wypełnione żelem Sephadex G-25 i G-50. Umożliwiło to rozdzielenie na poszczególne frakcje melanoidyn, karmeli oraz produktów alkalicznego rozkładu inwertu zawartych w wywarze. Analizując chromatogramy stwierdzono, że liczba pików zależała od pH wywaru, który poddawano frakcjonowaniu. Najlepsze efekty rozdzielenia kolorantów z badanego wywaru uzyskano po zastosowaniu kolumny wypełnionej żelem Sephadex G-50 i podniesieniu pH wywaru do wartości 7,0. Wyniki badań zaprezentowano w publikacji (Załącznik 4, II.4.2.8).

Zagospodarowanie odpadów żywnościowych

W ostatnich latach w kręgu moich zainteresowań naukowych znalazła się tematyka zagospodarowania odpadów spożywczych, czyli organicznych pozostałości pochodzących z domowych kuchni, stołówek i restauracji, hoteli oraz zakładów produkujących żywność. Odpady te stają się coraz większym światowym problemem. Szacuje się, że około 1,3 mld ton żywności (warzywa, owoce, mięso, pieczywo i produkty mleczne) traci się w łańcuchu wytwórczym i logistycznym. Przyrost populacji i bogacenie się społeczeństwa powodują dalsze zwiększanie ilości tych odpadów.

We współpracy z Zakładem Gospodarowania Odpadami Gać Sp. z o.o. (Załącznik 4, III.2.2.8) przeprowadzono badania oceny wpływu napowietrzania, nawadniania, częstotliwości przewracania i czasu procesu na stabilizację frakcji organicznej stałych odpadów komunalnych w procesie kompostowania prowadzonym w pełnowymiarowej oczyszczalni mechaniczno-biologicznej. Materiały biodegradowalne, zwłaszcza odpady spożywcze, stanowią w takiej oczyszczalni zwykle ponad 50% wagowych strumienia odpadów komunalnych. Stwierdzono, że napowietrzanie, nawadnianie i czas procesu kompostowania miały wpływ na przebieg kompostowania, podczas gdy przewracanie (mieszanie) mechaniczne okazało się nieistotne. Stwierdzono również, że zwiększenie nawadniania szkodzi stabilizacji materiału. Wyniki badań opublikowano w artykule (Załącznik 4, II.4.1.8) i zaprezentowano w trakcie konferencji krajowej (Załącznik 4, II.7.2.5).

Moje badania naukowe były też związane z przetwarzaniem odpadów spożywczych na drodze fermentacji beztlenowej. W jej efekcie materia organiczna jest przekształcana w biogaz, który może być wykorzystywany jako paliwo do napędu jednostek kogeneracyjnych, produkujących energię elektryczną i ciepłą. Scharakteryzowano źródła odpadów spożywczych, ich właściwości fizykochemiczne i potencjał do produkcji biogazu. Przeanalizowano kolejne etapy fermentacji metanowej i jej dodatkowe zalety, jak zmniejszenie objętości suchej masy organicznej, eliminację zapachu zepsutej żywności i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z konwencjonalnym składowaniem odpadów. Wyniki badań przedstawiono w postaci publikacji (Załącznik 4, II.4.1.3). Wyniki wstępnych prac eksperymentalnych mających na celu wytwarzanie biogazu na drodze współfermentacji organicznej frakcji odpadów komunalnych zmieszanych z wywarem kukurydzianym i odpadami restauracyjnymi zostały zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych (Załącznik 4, II.7.2.11 i II.7.2.12).

Zajmowałem się także badaniami nad możliwością wykorzystania nanomateriałów węglowych do oczyszczania ścieków z jonów metali ciężkich. Materiałami posiadającymi bardzo dobre właściwości chemiczne oraz unikatowe cechy mechaniczne, które czynią z nich doskonałe adsorbenty, są fulareny, grafen i nanorurki węglowe. Obecnie czynnikiem limitującym komercyjne wykorzystanie tych materiałów jest przede wszystkim ich wysoka cena. Wyniki badań zostały przedstawione w artykule (Załącznik 4, II.4.1.9).

Moje doświadczenie związane ze stosowaniem różnych systemów oświetlenia w hodowlach mikroalg zapoczątkowało przy badaniach zrealizowanych we współpracy z naukowcami z Politechniki Wrocławskiej i Uniwersytetu Medycznego im. Piastów Śląskich we Wrocławiu. Badania te były związane z acesulfamem potasowym – zerokalorycznym związkem chemicznym stosowanym w przemyśle spożywczym jako słodzik. Można go znaleźć w niskokalorycznych napojach, alkoholach, herbatach rozpuszczalnych, przetworach owocowych, wyrobach cukierniczych i piekarniczych czy gumach do żucia. Związek ten nie ulega biotransformacji i jest wydalany w postaci niezmienionej z moczem, co skutkuje jego kumulowaniem się w środowisku wodnym. W przeprowadzonych badaniach przeanalizowana została skuteczność fotodegradacji z użyciem średniociśnieniowej lampy rtęciowej UV o mocy 100 W, zainstalowanej wewnątrz reaktora. Funkcję katalizatora pełnił dwutlenku tytanu domieszkowany azotem w zakresie od 0-5% masowych. Zaobserwowano usunięcie 90% cząsteczek po 80-100 minutach naświetlania roztworu wodnego acesulfamu potasowego, w zależności od początkowego stężenia zanieczyszczenia. Wyniki badań przedstawiono w publikacji (Załącznik 4, II.4.1.10).

Biosynteza astaksantyny

Moje zainteresowanie mikroalgami i produkcją naturalnej astaksantyny sięga 2013 roku. Nawiązałem wtedy nieformalną współpracę z firmą AlgaeLabs Sp. z o.o., działającą na terenie Wrocławskiego Parku Technologicznego. Firma do swojego prototypu fotobioreaktora typu airlift potrzebowała systemu, który pozwoliłby na automatyczne prowadzenie eksperymentów związanych z hodowlą mikroalg. Zagadnienie to stało się tematem wspólnie złożonego wniosku do projektu „Kumulacja Kompetencji – stażowy program angażowania pracowników naukowych w rozwój branż nano, bio, energia”, organizowanego przez Wrocławskie Centrum Badań EIT+. Wniosek zatytułowany „Oprogramowanie stanowiska do monitorowania, wizualizacji i sterowania procesem produkcji biomasy mikroalg w fotobioreaktorze” został pozytywnie oceniony przez komisję konkursową i skierowany do realizacji (Załącznik 4, III.2.3.1). Pod koniec stażu nastąpiło podpisanie

oficjalnego porozumienia o współpracy w zakresie realizacji wspólnych projektów o charakterze naukowym, innowacyjnym i gospodarczym pomiędzy Uniwersytetem Ekonomicznym we Wrocławiu i firmą AlgaeLabs (Załącznik 4, III.2.2.4).

Kontynuacja współpracy była związana z pierwszymi próbami prowadzenia eksperymentów w skali laboratoryjnej i optymalizacją warunków hodowli mikroalg. Istotną była możliwość modyfikowania parametrów hodowli: temperatury, barwy i natężenia oświetlenia oraz szybkości mieszania. W trakcie mojego pięciomiesięcznego stażu zatytułowanego „Opracowanie dokumentacji technicznej wielostanowiskowego mieszadła laboratoryjnego z komputerową regulacją temperatury oraz sterowaniem obrotami i natężeniem oświetlenia” powstał projekt i prototyp piętnastostanowiskowego mieszadła laboratoryjnego, które zostało wykorzystane do prowadzenia eksperymentów w skali laboratoryjnej (Załącznik 4, III.2.3.2). Przystępując do realizowania eksperymentów w większej skali pojawiła się konieczność przygotowania bardzo dużych ilości inokulum niezbędnego do zainicjowania hodowli. Koncepcja, projekt i prototyp systemu do przygotowania inokulum mikroalg powstały w trakcie osiemnastomiesięcznego stażu w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „Mozart” (Załącznik 4, III.2.3.3 i III.2.3.4).

Najważniejszym osiągnięciem zrealizowanym w ramach współpracy z firmą AlgaeLabs było przygotowanie wniosku i mój udział w projekcie dofinansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pod tytułem: „Pozyskiwanie metabolitów wtórnych z mikroalg i cyjanobakterii w oparciu o zautomatyzowany system fotobioreaktorów”, którym kierował prof. dr hab. inż. Paweł Kafarski z Politechniki Wrocławskiej (Załącznik 4, II.9.1.4). W trakcie realizacji projektu współpracowałem z firmą AlgaeLabs, pełniąc funkcję lidera projektu oraz zespołem naukowców Wydziału Chemii Uniwersytetu Opolskiego, prowadzonym przez dr. hab. Jacka Lipoka, prof. UO. W projekcie tym pełniłem funkcję kierownika zadania badawczego polegającego na optymalizacji warunków prowadzenia hodowli mikroalg *H. pluvialis*.

Wyniki kilkuletniej współpracy i badań naukowych związanych z doskonaleniem procesu biosyntezy naturalnej astaksantyny stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny technologii żywności i żywienia. Wypracowane efekty zostały przedstawione jako moje osiągnięcie naukowe, będące podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego (Autoreferat, punkt 4).

Bioekonomia i produkcja żywności

Jestem pomysłodawcą i założycielem Akademickiego Centrum Badań i Rozwoju BioR&D (od 2014 r.), będącego interdyscyplinarnym centrum kompetencyjnym skupiającym pracowników naukowych z różnych wydziałów Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu (Załącznik 4, III.2.1). W związku z działalnością w ramach Centrum, w kręgu moich zainteresowań naukowych pojawiły się tematy związane z bioekonomią, biogospodarką oraz problemami pojawiającymi się przy produkcji żywności.

Zajmowałem się przeprowadzeniem diagnozy stanu biogospodarki na świecie i w Polsce. Rozwój bioekonomii w Polsce będzie uzależniony od ścisłej współpracy pomiędzy pracownikami uczelni, administracją publiczną i przedsiębiorcami. W efekcie współpracy możliwe będzie upowszechnienie wyników badań naukowych i innowacji związanych z bioekonomią, a także poprawa sposobu zarządzania odnawialnymi zasobami biologicznymi oraz stworzenie nowych, zróżnicowanych rynków żywności i bioproduktów. Zwrócono uwagę, że osiągnięcie tych założeń będzie szczególnie uzależnione od stworzenia dogodniejszych warunków do wdrażania badań i innowacji w celu odwrócenia aktualnego spowolnienia wzrostu produktywności, do ukierunkowania badań na praktyczne i opłacalne rozwiązania, które zaowocują powstaniem bardziej zrównoważonego sektora rolnego, prowadzącego wydajną gospodarkę zasobami, do wymiany wiedzy w tym zakresie między nauką i praktyką oraz do uproszczenia procedur dla przedsiębiorstw pragnących uczestniczyć w projektach badawczych. Wyniki badań przedstawiono w publikacji (Załącznik 4, II.4.2.9) oraz zaprezentowano w postaci doniesienia na konferencji międzynarodowej (Załącznik 4, II.7.2.8).

Podjąłem się próby scharakteryzowania jednego z coraz częściej analizowanych zjawisk społecznych, jakim jest problematyka dokonywania zakupów produktów spożywczych z uwzględnieniem kraju jego pochodzenia. Zjawisko to nosi nazwę etnocentryzmu konsumenckiego i jest określane jako tendencja konsumentów do kupowania produktów pochodzących z ich ojczyzny i odrzucania dóbr wyprodukowanych za granicą. W trakcie badań zdiagnozowano postawy społeczne i preferencje konsumentów w odniesieniu do produktów lokalnych i regionalnych. Wpływ na poziom etnocentryzmu czy kosmopolityzmu konsumenckiego ma wiele czynników, takich jak: wiek, płeć, wykształcenie, poziom zamożności, miejsce zamieszkania czy status rodziny. Niektórzy konsumenci uważają produkty krajowe za lepsze jakościowo lub kierują się emocjami patriotycznymi. Bardzo duży wpływ na budowanie przewagi regionu ma położenie nacisku na wyjątkowo wysoką jakość

produktów regionalnych. Nadane produktom spożywczym europejskie certyfikaty świadczą o tym, że produkt nie jest podrobiony, zafałszowany czy o niskiej jakości. Wyniki badań zaprezentowano w publikacji (Załącznik 4, II.4.2.6). Z problematyką regionalnej żywności związane było także wystąpienie na konferencji krajowej (Załącznik 4, II.7.1.1).

W kolejnych badaniach zajmowałem się analizą i charakterystyką bieżących problemów istniejących w polskim pszczelarstwie. Zidentyfikowane zostały najważniejsze zagrożenia tej branży i aktualnie występujące bariery jej rozwoju. Spośród wielu zagrożeń, obok warrozy i zgnilca amerykańskiego, najpoważniejszym wydaje się zespół masowego ginięcia pszczoły miodnej (Colony Collapse Disorder). Zespół ten stanowi główną przyczynę zmniejszania się populacji pszczół na wielu obszarach. Brak znajomości przyczyn występowania tego zjawiska uniemożliwia pszczelarzom podjęcie działań naprawczych i może doprowadzić wręcz do konieczności sztucznego zapylania roślin. Duże zaniepokojenie wśród polskich pszczelarzy wywołuje także występowanie miodu cementowego, którego właściwości uniemożliwiają jego dalszą obróbkę. Pszczelarze nie mają możliwości sprawdzenia, czy miód pod zasklepem nie będzie miał właściwości miodu cementowego. Postępującym problemem w ostatnich latach w Polsce jest także spadająca liczba pszczelarzy zawodowych. Nie zatrzymało tego procesu nawet założenie w 2004 roku Stowarzyszenia Pszczelarzy Zawodowych, niezależnego od Polskiego Związku Pszczelarskiego. Wyniki badań opublikowano w artykule (Załącznik 4, II.4.2.10).

W swoich badaniach zajmowałem się również karmelem, będącym najstarszym barwnikiem stosowany przy produkcji żywności. Posiada on zdolność barwienia na kolory od bladej żółci po głęboki brąz i stanowi ponad 80% wagowych wszystkich barwników dodawanych do żywności. Oprócz scharakteryzowania właściwości różnych rodzajów karmelu i ich zastosowania, zwrócono uwagę na problem potencjalnie toksycznych właściwości związków powstających w trakcie karmelizacji. Proces ten zachodzi w temperaturze przekraczającej 120°C i pH wyższym od 9 i niższym od 3. Powstają wtedy pośrednie związki α -dikarbonylowe zwane deoksyozonami, które są zaangażowane w tworzenie trzech typowych O-heterocyklicznych związków: 5-hydroksymetylofurfuralu, hydroksydimetylofuranonu i hydroksyacetylofuranu. Podczas ogrzewania cukru ze związkami amonowymi powstaje szereg związków heterocyklicznych, między innymi pochodne imidazoli. Do grupy tej należą między innymi 2- i 4-metyloimidazol (2-MeI, 4-MeI) oraz 2-acetylo-4-(1,2,3,4)-tetrahydroksybutyloimidazol (THI). Substancje te są podejrzewane o właściwości cytotoksyczne, genotoksyczne, mutagenne i rakotwórcze. Wyniki badań zostały przedstawione w publikacji (Załącznik 4, II.4.2.7).

Komputerowe wspomaganie badań naukowych

Od początku pracy naukowej wykorzystywałem swoją wiedzę i umiejętności związane z automatyką i tworzeniem specjalistycznego oprogramowania wspomagającego prowadzenie badań naukowych. Większość moich prac eksperymentalnych była prowadzona na samodzielnie przygotowanych systemach badawczych.

Do prowadzenia badań związanych z opracowaniem nowej metody sterowania hodowlą drożdży piekarskich przygotowałem komputerowo wspomagany system wraz ze specjalnym oprogramowaniem pozwalającym na dozowanie pożywki do bioreaktora w oparciu o funkcję logistyczną. Rozwiązanie to zostało przedstawione w publikacji (Załącznik 4, II.4.2.3).

Biorąc udział w badaniach nad dekoloryzacją buraczanego wywaru melasowego, w których eksperymenty były prowadzone w trzech bioreaktorach laboratoryjnych Biostat[®]B, przygotowałem oprogramowanie umożliwiające monitorowanie i zapisywanie parametrów procesowych w trakcie wielodniowych eksperymentów. Członkowie zespołu badawczego dodatkowo uzyskali możliwość zdalnego podglądu wyników za pomocą komputera, tabletu lub smartfona podłączonych do Internetu. Wyniki badań opisano w publikacji (Załącznik 4, II.4.2.4) oraz przedstawiono w trakcie konferencji krajowej (Załącznik 4, II.7.1.3).

Będąc członkiem Akademickiego Centrum Badań i Rozwoju BioR&D nawiązałem współpracę z polskim producentem nowoczesnych stanowisk dydaktycznych, firmą P.P.U. „MICRO” (Załącznik 4, III.2.2.11). W trakcie prac badawczo-rozwojowych przygotowałem i wdrożyłem specjalistyczne oprogramowanie do monitorowania przebiegu eksperymentów wykonywanych na stanowiskach dydaktycznych. Oprogramowanie to usprawniło i podniosło jakość ćwiczeń praktycznych realizowanych przez uczniów i studentów wielu szkół i uczelni wyższych w Polsce (Załącznik 4, III.5.1 do III.5.25). Wyniki prac badawczo-rozwojowych zamieszczono w publikacji (Załącznik 4, II.4.1.6).

Obecnie we współpracy z firmą PROMIS-TECH Sp. z o.o. (Załącznik 4, III.2.2.23) prowadzę prace badawczo-rozwojowe nad opracowaniem metody automatycznego pomiaru wilgotności względnej produktów spożywczych suszonych w pulsofluidalnych suszarniach mikrofalowych pracujących w trybie ciągłym.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Współpraca z pracownikami naukowymi z zagranicznych i krajowych ośrodków badawczych rozpoczęła się w moim przypadku zaraz po zatrudnieniu na uczelni.

Udział w projektach realizowanych w ramach 4-go i 5-go Programu Ramowego Unii Europejskiej był okazją do rozwijania umiejętności pracy zespołowej w międzynarodowym środowisku. Istotny wpływ na ścieżkę mojego rozwoju naukowego miało nawiązanie kontaktów i wnioski wyciągnięte z wyjazdów do zagranicznych ośrodków naukowych, zrealizowanych w latach 2011 i 2012. W ramach projektu „Kuźnia Kadr 2, czyli wzmocnienie potencjału rozwojowego Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu poprzez rozszerzenie oferty edukacyjnej i szkolenia kadry dydaktycznej” (nr projektu: POKL.04.01.01-00-057/09) uczestniczyłem w dwóch stażach naukowo-dydaktycznych w Stockholm University w Szwecji (Department of Organic Chemistry, osoba przyjmująca prof. Jacek Stawiński) oraz w University of Limerick w Irlandii (Department of Electronic & Computer Engineering, osoba przyjmująca dr John Nelson). Szczególnie ważny dla mojego rozwoju naukowego był staż w Irlandii, w prywatnym uniwersytecie z czterdziestoletnimi tradycjami. Projekty naukowo-badawcze, z którymi miałem okazję zapoznać się w trakcie gościnnego pobytu, były realizowane na zlecenie albo we współpracy naukowców z firmami komercyjnymi. Bardzo często w projektach tych wykorzystywane były nowoczesne, komputerowo wspomagane systemy pomiarowo-sterujące. Pod wpływem tego wyjazdu moje działania naukowe zostały ukierunkowane na rozwiązywanie problemów i realizację projektów we współpracy z podmiotami z otoczenia gospodarczego.

Jednym z takich działań był udział w 2013 roku w projekcie „Komercjalizacja drogą do sukcesu” (nr projektu POKL. 04.02.00-00-010/11). Projekt ten miał na celu podniesienie umiejętności pracowników uczelni wyższych w zakresie zarządzania badaniami naukowymi i pracami rozwojowymi oraz komercjalizacji rezultatów prac badawczych. Dodatkową korzyścią z udziału w projekcie były wyjazdy do jednej z największych europejskich instytucji zajmujących się badaniami stosowanymi – Towarzystwa Fraunhofera (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Niemcy). Były to wizyty we Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF w Magdeburgu oraz we Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI w Dreźnie. Wyjazdy do niemieckich ośrodków uświadomiły mi, jak w praktyce może wyglądać efektywna współpraca pomiędzy naukowcami i firmami komercyjnymi.

W 2014 roku uczestniczyłem w pięciodniowym wyjeździe do innowacyjnych firm czeskich w Libercu i jego okolicach. Jest to region silnie związany z nanotechnologiami i ich przemysłowym zastosowaniem. Nowoczesne maszyny i technologie, z których korzystają czescy przedsiębiorcy, zostały opracowane we współpracy z Instytutem Nanomateriałów, Zaawansowanych Technologii i Innowacji (Institute for Nanomaterials, Advanced

Technologies and Innovations) Politechniki w Libercu (Technical University of Liberec, Czechy). W trakcie pobytu miałem okazję poznać możliwości, zaplecze techniczne i sposób funkcjonowania jednostki działającej w ramach uczelni wyższej, ale nastawionej wyłącznie na prowadzenie projektów badawczo-rozwojowych.

Ostatni wyjazd studyjny we wrześniu 2020 roku zatytułowany „Innowacyjna technologia chowu bydła mięsnego na przykładzie polskich i czeskich gospodarstw hodowlanych” był związany z moim zaangażowaniem się jako członka Akademickiego Centrum Badań i Rozwoju BioR&D w „Sieć na rzecz innowacji w rolnictwie i na obszarach wiejskich - SIR”. Wyjazd zorganizowany przez Dolnośląski Ośrodek Doradztwa Rolniczego we Wrocławiu pozwolił na poznanie innowacyjnych metod stosowanych w hodowli bydła mlecznego i mięsnego, kóz i owiec oraz koni. Oprócz nowoczesnego sprzętu i maszyn rolniczych uczestnicy mieli okazję zobaczyć wysokiej klasy przetwórnię mleka, w której produkowane są jogurty i mleko butelkowane.

Obecnie w moich działaniach naukowo-badawczych koncentruję się na współpracy z firmami z otoczenia gospodarczego. Z powodzeniem realizuję prace badawczo-rozwojowe będące odpowiedzią na potrzeby zgłaszane przez firmy komercyjne.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

W okresie zatrudnienia w Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu i Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu prowadziłem wykłady, ćwiczenia, zajęcia laboratoryjne i seminaria na studiach dziennych i zaocznych, stacjonarnych i niestacjonarnych, miejscowych i zamiejscowych, jednolitych (pięcioletnich) i na studiach pierwszego stopnia. Prowadziłem również wykłady i zajęcia ćwiczeniowe dla studentów studiów doktoranckich (trzeciego stopnia).

Realizowane przedmioty i ich forma:

- | | |
|--|-----------------------|
| • Komputerowe wspomaganie produkcji | zajęcia laboratoryjne |
| • Podstawy automatyki z elementami elektroniki | zajęcia laboratoryjne |
| • Podstawy komputerowego wspomaganie procesów technologicznych | zajęcia laboratoryjne |
| • Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich | wykład |
| • Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich | ćwiczenia |
| • Metrologia | zajęcia laboratoryjne |
| • Wybrane aspekty rozwoju osobistego i naukowego | wykład |

- | | |
|--|-----------------------|
| · Wybrane aspekty rozwoju osobistego i naukowego | ćwiczenia |
| · Automatyzacja i robotyzacja procesów produkcyjnych | zajęcia laboratoryjne |
| · Seminarium inżynierskie | seminarium |

Pragnę nadmienić, że na podstawie okresowej oceny mojej działalności dydaktycznej, wynikającej z opinii studentów, byłem zawsze pozytywnie sklasyfikowany przez wydziałową komisję oceniającą. Również osoby hospitujące moje zajęcia oceniły je na ocenę bardzo dobrą. Od 2010 roku dodatkową korzyścią dla studentów, wynikającą z mojej współpracy z firmami komercyjnymi, jest aktywny udział praktyków w procesie dydaktycznym. W trakcie prowadzonych przeze mnie wykładów studenci mieli okazję uczestniczenia w prezentacjach przeprowadzonych przez przedstawicieli firm: Insert, ASTOR, WAGO, JUMO.

Przez kilka lat sprawowałem opiekę naukową w charakterze promotora pomocniczego mgr. inż. Pawła Mikulskiego, studenta Interdyscyplinarnego Programu Studiów Doktoranckich na Wydziale Inżynieryjno-Ekonomicznym Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Efektem tej współpracy są trzy wspólne publikacje naukowe (Załącznik 4, II.4.1.3, II.4.1.6 i II.4.1.9). Sprawowałem także opiekę naukową nad studentem Piotrem Pietruszką, który wygłosił referat zatytułowany "Zdalne sterowanie warunkami hodowli mikroalg *Haematococcus pluvialis*" w trakcie III Ogólnopolskiej Konferencji Młodych Naukowców Nauk Przyrodniczych „Wkraczając w świat nauki 2016” (Załącznik 4, II.8.3).

Od 2006 do 2021 roku pełniłem funkcję opiekuna koła naukowego Akademicka Grupa Fotograficzna, działającego przy Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu. Działalność koła była nastawiona na poszerzanie wiedzy związanej z fotografią reklamową i zasadami przygotowania i obróbki zdjęć na potrzeby marketingu, materiałów reklamowych oraz nabyciem przez studentów umiejętności praktycznego posługiwania się sprzętem fotograficznym i oświetleniem studyjnym.

Pełniłem funkcję promotora siedmiu prac inżynierskich na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych pierwszego stopnia. Wszystkie zrealizowane prace inżynierskie były pracami praktycznymi. Byłem również recenzentem 21 prac inżynierskich na studiach pierwszego stopnia oraz 9 prac magisterskich na studiach drugiego stopnia.

W latach 2010 do 2014 pełniłem funkcję trenera i współwykonawcy w projektach edukacyjnych dofinansowanych z funduszy Unii Europejskiej, realizowanych przez Stowarzyszenie Rozwoju Przedsiębiorczości z Wrocławia. Były to projekty podnoszące kwalifikacje kobiet nieaktywnych zawodowo, ludzi młodych, nauczycieli szkół podstawowych

i średnich oraz osób pragnących uruchomić działalność gospodarczą (Załącznik 4, II.14.5 do II.14.11).

W trakcie zatrudnienia na uczelni brałem udział w następujących szkoleniach i warsztatach podnoszących kwalifikacje dydaktyczne:

- 1997/1998 r. Półroczny kurs pedagogiczny dla nauczycieli akademickich prowadzony przez Międzywydziałowe Studium Pedagogiczne Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu,
- 17-19.11.2008 r. Kurs: System wizualizacyjny Wonderware InTouch, część I - tworzenie i serwisowanie aplikacji (Kurs obsługi i programowania systemu wizualizacyjnego Wonderware InTouch 10.0). Organizator: Astor Sp. z o.o. oddział Wrocław, dyplom nr 3182ITP396,
- 14-16.10.2009 r. Kurs LabVIEW Basics II, Organizator: National Instruments, Certyfikat,
- 17-18.06.2010 r. Dobór, zastosowanie i programowanie przemienników częstotliwości firmy LS Industrial Systems. Organizator: Aniro Grupa Handlowa Sp. z o.o.,
- 19.04-24.05.2012 r. Szkolenie: „Sztuka przygotowywania multimedialnych prezentacji. Wizualizacja przekazu jako jeden z atrakcyjniejszych nośników informacji”. Kuźnia Kadr II, nr projektu: POKL.04.01.01-00-057/09,
- 11-13.02.2013 r. Szkolenie: Komercjalizacja osiągnięć naukowych. W ramach projektu Komercjalizacja drogą do sukcesu, nr projektu: POKL.04.02.00-00-010/11,
- 21.06.2013 r. Szkolenie dla nauczycieli szkół technicznych o profilu elektrycznym i elektronicznym. Organizator: WAGO ELWAG Sp. z o.o.,
- 25.10.2013 r. National Instruments: Certified LabVIEW Associate Developer. Certyfikat nr 100-313-5703,
- grudzień 2013 r. Szkolenie „Podstawy obsługi programu Adobe Photoshop” współfinansowane przez Unię Europejską w ramach EFS. Projekt Kuźnia Kadr IV, nr projektu: POKL.04.01.01-00-311/10. Certyfikat nr 01/12/2013,
- 18-22.11.2013 r. i 13-17.01.2014 r. Szkolenie: „Przyszłość rozwojowa żywności” współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach EFS, POKL 2007-2013, Priorytet IV Szkolnictwo wyższe i nauka, Działanie 4.2 Rozwój kwalifikacji kadr systemu B+R i wzrost świadomości roli nauki w rozwoju gospodarczym. Projekt UDA POKL.04.02.0000090/11 00,
- 09.04.2014 r. Szkolenie firmy Relpol z programowania przekaźników NEED. Certyfikat,

-
- 30.06.2014 r. Kurs „Tworzenie aplikacji na panelach operatorskich ASTRAADA HMI oraz konfiguracja i programowanie sterowników zintegrowanych z panelami Horner APG”. Organizator: Akademia ASTOR. Certyfikat nr: WRO/119/MW/43,
 - 04.07.2014 r. Kurs „Kontrolery GE PACSystems RX3i/RXi oraz układy RSTi I/O”. Organizator: Akademia ASTOR. Certyfikat nr: WRO/123/MW/47,
 - 25.02.2015 r. Konferencja techniczna „Automatyzacja w zakładach produkcyjnych”, Organizator: Axon Media. Certyfikat,
 - 25.09.2015 r. Szkolenie „Oznakowanie CE ze szczególnym uwzględnieniem badania kompatybilności elektromagnetycznej w procedurach oceny zgodności”. Organizator: Wrocławskie Centrum Transferu Technologii,
 - 08.12.2015 r. Szkolenie „Ochrona przeciwwybuchowa ATEX”. Organizator: Phoenix Contact. Certyfikat,
 - 18.05.2016 r. Szkolenie „Sterowanie przekształtnikiem SINAMICS V20 za pomocą LOGO! 8”. Organizator: Siemens,
 - 17.06.2016 r. Szkolenie „Komunikacja przemysłowa - zdalne zarządzanie oraz sterowanie maszyn i procesów”. Organizator: Astor,
 - 24.06.2016 r. Szkolenie „Astraada One – programowanie sterowników PLC w CoDeSys z wbudowanym dostępem zdalnym”. Organizator: Astor,
 - 04.07.2016 r. Szkolenie „System monitoringu mediów EnVidis”. Organizator: Astor,
 - 26.08.2016 r. Szkolenie „INTERFACE ELECTRONIC – Rozwiązania WAGO w zakresie modułów interfejsowych” Organizator: WAGO ELWAG Sp. z o.o., Certyfikat,
 - 21.10.2016 r. Szkolenie „Wizualizacja CoDeSys w sterownikach WAGO-I/O-SYSTEM” Organizator: WAGO ELWAG Sp. z o.o., Certyfikat,
 - 16-17.11.2016 r. Szkolenie „Podstawy programowania sterowników sieciowych WAGO-I/O_SYSTEM” Organizator: WAGO ELWAG Sp. z o.o., Certyfikat,
 - 26.06.2017 r. Warsztaty „Programowanie serwonapędów Astraada SRV w środowisku CODESYS”. Organizator: Astor,
 - 10.10.2017 r. Szkolenie „Konfiguracja systemów sterowania GE w oparciu o rozwiązania CPE100 i RSTi-EP”. Organizator: Astor,
 - 18.10.2017 r. Warsztaty "Strategie optymalizacji procesów hodowlanych w bioreaktorach". Organizator: Labo Baza, Certyfikat,
 - 19.10.2017 r. Szkolenie „Systemy kontroli i sterowania z wykorzystaniem sterowników PLC firmy Phoenix Contact”. Organizator: Phoenix Contact,

- 14.02.2018 r. Seminarium „Systemy komunikacji przemysłowej w dobie IIoT i Przemysłu 4.0”. Organizator: Elmark,
- 23.02.2018 r. Szkolenie „Funkcjonalność i programowanie sterowników EL Piast”. Organizator: EL-Piast, Certyfikat,
- 12.04.2018 r. Seminarium „ASTOR Tour 2018”, Organizator: Astor,
- 29.05.2018 r. Warsztaty “Wonderware InTouch Machine Edition”, Organizator: Astor,
- 10.10.2019 r. Seminarium “Najnowsze rozwiązania technologiczne dla chemii analitycznej”, Organizator: SHIM-POL,
- 21.02.2020 r. Szkolenie dla służb utrzymania ruchu, Organizator: JUMO Sp. z o.o., Certyfikat,
- 18.03.2021 r. Szkolenie i warsztaty praktyczne „Technika regulacji”, Organizator: JUMO Sp. z o.o., Certyfikat.

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

6.2.1. Organizacja konferencji naukowych

Brałem czynny udział w przygotowaniu i zorganizowaniu międzynarodowych i ogólnopolskich konferencji naukowych związanych z naukami przyrodniczymi, suplementami diety, nutraceutykami i zdrową żywnością.

- Pełniłem funkcję członka komitetu naukowego i organizacyjnego międzynarodowej konferencji „International Conference on Dietary Supplements - challenges and chances”, zorganizowanej w dniach 18-19 listopada 2021 roku (Załącznik 4, II.8.8).
- W latach 2014 do 2019 byłem członkiem komitetu organizacyjnego i sekretarzem sześciu edycji Ogólnopolskiej Konferencji Młodych Naukowców Nauk Przyrodniczych „Wkraczając w świat nauki” odbywających się na terenie Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Liczba uczestników w poszczególnych edycjach konferencji wynosiła od 74 do 191 osób, afiliowanych w od 28 do 40 krajowych jednostkach naukowych (Załącznik 4, II.8.1 do II.8.6).
- Pełniłem funkcję sekretarza komitetu organizacyjnego I Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Dolny Śląsk jako lider w sektorze nutraceutyków, żywności prozdrowotnej i suplementów diety”, która miała miejsce w dniu 15 listopada 2019 r. na terenie Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. W konferencji uczestniczyło 90 osób z siedmiu jednostek naukowych i firm komercyjnych (Załącznik 4, II.8.7).

6.2.2. Działalność w organizacjach zawodowych

W trakcie pracy naukowej zostałem członkiem krajowych organizacji zawodowych.

- Od dnia 1 stycznia 2008 roku jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności (Załącznik 4, II.10.1). Przez dwie kadencje, w latach 2015 do 2021, pełniłem z wyboru funkcję członka Komisji Rewizyjnej Wrocławskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności (Załącznik 4, II.10.2 i II.10.3).
- Od 1 stycznia 2012 roku należę do Stowarzyszenia Naukowo-Technicznego Inżynierów i Techników Przemysłu Spożywczego (Załącznik 4, II.10.4).
- Jestem pomysłodawcą, współzałożycielem i członkiem Akademickiego Centrum Badań i Rozwoju BioR&D (www.acbir.ue.wroc.pl), działającego od 28 lutego 2014 r. przy Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu i pełniącego funkcję interdyscyplinarnego centrum kompetencyjnego nastawionego na współpracę z firmami z otoczenia gospodarczego (Załącznik 4, III.2.1).

6.2.3. Działalność organizacyjna w macierzystej uczelni

- W roku akademickim 2013/2014 pełniłem funkcję przewodniczącego komisji rekrutacyjnej na studia niestacjonarne I i II stopnia na Wydziale Inżynieryjno-Ekonomicznym Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
- W dniu 12 kwietnia 2016 r. zostałem wybrany na członka kolegium elektorskiego z grupy pozostałych nauczycieli akademickich do wyboru Dziekana i Prodziekanów na Wydziale Inżynieryjno-Ekonomicznym Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu na kadencję 2016-2020.
- W kadencji 2016-2020 zostałem powołany do sprawowania funkcji członka Senackiej Komisji do spraw Współpracy z Biznesem Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
- Od 1 października 2016 r. do 30 września 2019 r. pełniłem z wyboru funkcję członka Rady Wydziału Inżynieryjno-Ekonomicznego Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu jako przedstawiciel pracowników niesamodzielných. Po przemianowaniu wydziału na Wydział Inżynierii Produkcji, sprawowałem od 25 października 2019 r. do 30 września 2020 r. funkcję członka Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu w grupie pracowników badawczych i badawczo-dydaktycznych zajmujących stanowiska adiunkta i asystenta.
- W kadencji 2016-2019 byłem członkiem Wydziałowej Komisji do spraw Dydaktyki.

- W kadencji 2016-2019 pełniłem funkcję opiekuna specjalności Inżynieria Produktów Żywnościowych i Inżynieria Bioproduktów studiów I stopnia na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji.
- W dniu 9 stycznia 2020 r. zostałem powołany na członka Wydziałowej Komisji ds. Jakości Badań Naukowych.
- Od 22 października 2020 roku pełnię funkcję członka Uczelnianej Komisji Dyscyplinarnej dla Doktorantów na kadencję 2020-2024.
- Od 30 września 2020 r. jestem członkiem uczelnianego zespołu w projekcie pod nazwą „Uczelnia dostępna - strona www.ue.wroc.pl”.
- Od 8 lutego 2021 r. sprawuję funkcję członka zespołu roboczego do spraw opracowania strategii rozwoju dyscypliny właściwej dla Wydziału Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.

6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę

Realizując badania związane z osiągnięciem naukowym brałem czynny udział w działaniach mających na celu popularyzację nauki i promowanie innowacyjnych rozwiązań opracowanych w projektach z moim udziałem.

Telewizja, radio, prasa

- Jako kilkukrotny beneficjent programów stażowych, w marcu 2022 r. brałem udział w reportażu telewizji Wrocław TV „Program Mozart łączy wrocławską naukę z biznesem”, promującym Miejski Program Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej "MOZART",
- 24 stycznia 2019 roku byłem gościem redaktora Leszka Mordarskiego na antenie Radia Wrocław w audycji pod tytułem „Świat nauki” poświęconej możliwościom pozyskiwania astaksantyny z wykorzystaniem mikroalg i fotobioreaktorów,
- W kwietniu 2022 roku udzieliłem wywiadu do Biuletynu Informacyjnego Urzędu Miejskiego Wrocławia pod tytułem „Regularna teoria powinna sprawdzać się w meczu”. Wywiad promował współpracę pomiędzy środowiskiem akademickim a firmami komercyjnymi.

Imprezy wystawiennicze

- W dniach 15-16 października 2015 r., wspólnie z przedstawicielami firmy AlgaeLabs, brałem udział w III edycji Międzynarodowych Targów Innowacji i Nowych Technologii INNO-TECH EXPO 2015 w Kielcach (Załącznik 4, III.2.4.1). Na stoisku targowym prezentowane były zarówno otrzymywane produkty (astaksantyna, spirulina), jak również

innowacyjny prototyp fotobioreaktora typu air-lift o objętości roboczej 10 dm³ wraz z komputerowym systemem pomiarowo-sterującym do prowadzenia hodowli organizmów fototroficznych. Relacja ze stoiska targowego, połączona z wywiadem ukazała się na antenie ogólnopolskiej telewizji TVN Turbo.

- Prezentowałem fotobioreaktory i komputerowe systemy wspomagające prowadzenie eksperymentów związanych z hodowlą mikroalg i produkcją astaksantyny w trakcie Dolnośląskich Dni Innowacji zorganizowanych w dniach 28-29 września 2019 r. przez Wrocławską Radę Federacji Stowarzyszeń Naukowo Technicznych NOT (Załącznik 4, III.2.4.2). Impreza była szeroko promowana i relacjonowana w telewizji ECHO24, na antenie Radia RAM i Radia Wrocław oraz na portalach internetowych związanych z Wrocławiem.

Pokazy i prezentacje

- Od wielu lat staram się popularyzować wśród dzieci i młodzieży nietypowe sposoby wykorzystania komputerów do budowy układów automatyki i rozwiązywania złożonych problemów z wykorzystaniem technik sztucznej inteligencji. W trakcie prelekcji zawsze podkreślam, jak ważne jest przyswajanie wiedzy interdyscyplinarnej i umiejętności programowania urządzeń mikroprocesorowych. Brałem udział w dziewięciu edycjach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki (edycja VII, XV-XXII) w roku 2004 i w latach od 2012 do 2019, jako autor lub współautor pokazów zatytułowanych: „Komputer nie tylko do gier”, „Czy komputer może zaopiekować się Twoim akwariem?”, „Czy Twój laptop potrafi zaparzyć herbatę?”, „Sztuczna inteligencja komputera. Rzeczywistość czy fikcja?”, „Bionika - sztuczne organizmy i światy. Nauka czy zabawa?”, „Fascynujący mikroświat wirtualnych organizmów”.

Publikacje popularnonaukowe

- Jestem autorem publikacji popularnonaukowych związanych z branżą automatyki przemysłowej:
 - Borowiak D.: „Przełączniki Relpolu na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu”. *Elektrosystemy* 2015, 182, 66-67,
 - Borowiak D.: „Przełączniki Relpolu na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu”. *Portal* 2015, 21, 48-49,
 - Borowiak D.: „Przełączniki firmy Relpol na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu”. *Automatyka Podzespoły Aplikacje* 2015, 104, 68-69.

7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej

7.1. Współpraca z otoczeniem gospodarczym

Znaczącym osiągnięciem w mojej pracy naukowej jest intensywna współpraca z podmiotami z otoczenia gospodarczego. Od 2013 roku sześciokrotnie brałem udział w programach stażowych nastawionych na rozwój i poszerzenie współpracy pomiędzy pracownikami naukowymi uczelni wyższych i podmiotami gospodarczymi. Łącznie zrealizowałem siedemdziesiąt trzy miesiące stażu polegającego na wykonywaniu projektów badawczo-rozwojowych na rzecz firm komercyjnych (przez jeden dzień w tygodniu). Chciałbym podkreślić, że każdorazowy udział w projekcie stażowym i pozyskanie dofinansowania odbywały się na drodze konkursowej (np. program Mozart), poprzez ocenę wniosków złożonych przez partnerstwa utworzone z firmy komercyjnej i pracownika naukowego uczelni wyższej. W każdym ze staży pełniłem funkcję kierownika projektu, a efekty zrealizowanych prac badawczo-rozwojowych były wdrożone w firmie partnerskiej.

We współpracy z podmiotami z otoczenia gospodarczego zrealizowałem następujące staże:

- 02.04 do 30.11.2013 r. Ośmiomiesięczny staż realizowany w firmie AlgaeLabs Sp. z o.o. pod tytułem: „Oprogramowanie stanowiska do monitorowania, wizualizacji i sterowania procesem produkcji biomasy mikroalg w fotobioreaktorze”, kierownik projektu (Załącznik 4, III.2.3.1),
- 01.04.2014 r. do 30.08.2014 r. Pięciomiesięczny staż w firmie AlgaeLabs Sp. z o.o. Tytuł stażu: „Opracowanie dokumentacji technicznej wielostanowiskowego mieszadła laboratoryjnego z komputerową regulacją temperatury oraz sterowaniem obrotami i natężeniem oświetlenia”, kierownik projektu (Załącznik 4, III.2.3.2),
- 01.10.2015 r. do 31.03.2017 r. Osiemnastomiesięczny staż w firmie AlgaeLabs Sp. z o.o. w ramach IV edycji (2015/2016) Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „Mozart”. Tytuł stażu: „Autonomiczne stanowisko przygotowania materiału inokulacyjnego do produkcji biomasy mikroalg”, kierownik projektu (Załącznik 4, III.2.3.3 i III.2.3.4),
- 01.10.2017 r. do 30.09.2018 r. Dwunastomiesięczny staż w firmie EKOLOGIS Laboratorium Badań Środowiskowych s.c. Piotr Szymański, Wojciech Szymański w ramach VI edycji (2017/2018) programu „Mozart”. Tytuł stażu: „Innowacyjny system pobierania próbek powietrza i gazów do analizy zanieczyszczeń środowiskowych ze zdalnym dostępem”, kierownik projektu (Załącznik 4, III.2.3.5),

- 01.10.2018 r. do 31.03.2020 r. Osiemnastomiesięczny staż w firmie ERG Zakład Usług Technicznych s.c. w ramach VII edycji (2018/2019) programu „Mozart”. Tytuł stażu: "Komputerowe stanowisko do automatycznego wzorcowania czujników i przetworników ciśnienia", kierownik projektu (Załącznik 4, III.2.3.6 i III.2.3.7),
- 1.10.2021 r. do 30.09.2022 r. Dwunastomiesięczny staż w firmie PROMIS-TECH Sp. z o.o. w ramach X-tej edycji (2021/2022) programu „Mozart”. Tytuł stażu: "Opracowanie metody pomiaru wilgotności względnej produktów spożywczych w suszarniach mikrofalowych pracujących w trybie ciągłym", kierownik projektu (Załącznik 4, III.2.3.8).

7.2. Nagrody i wyróżnienia

Opracowane i wdrożone w firmie AlgaeLabs Sp. z o.o. innowacyjne, komputerowe systemy pomiarowo-sterujące, które wspomagały prowadzenie badań naukowych związanych ze wskazanym osiągnięciem naukowym, zostały wyróżnione i nagrodzone w konkursach krajowych i regionalnych:

- w dniu 20 listopada 2018 r. otrzymałem nagrodę II stopnia w Konkursie Wrocławskiej Rady Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT „Za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki” zrealizowane w 2017 roku, za zgłoszenie konkursowe pod tytułem: „Komputerowe systemy wspomagające biosyntezę astaksantyny w fotobioreaktorach”,
- w dniu 13 czerwca 2019 r. zostałem uhonorowany tytułem „Mistrz Techniki FSNT-NOT 2018/2019” w dziedzinie biotechnologii, przyznany przez Ogólnopolską Komisję Konkursu Mistrz Techniki Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT, za zgłoszenie konkursowe pod tytułem „Komputerowe systemy wspomagające biosyntezę astaksantyny w fotobioreaktorach”. Uroczyste wręczenie nagrody miało miejsce w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, w trakcie IV-go Światowego Zjazdu Inżynierów Polskich i XXVI Kongresu Techników Polskich,
- w dniu 19 lutego 2022 roku, za efekty mojej współpracy z otoczeniem gospodarczym, zostałem uhonorowany indywidualną Nagrodą Ministra Edukacji i Nauki za znaczące osiągnięcia w zakresie działalności wdrożeniowej.

Wyniki moich badań naukowych związanych z opracowaniem nowej metody optymalizacji dopływu pożywki w hodowli drożdży piekarskich bazującej na funkcji logistycznej uzyskały w dniu 15 stycznia 2014 r. wyróżnienie w Konkursie Wrocławskiej Rady Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT „Za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki” zrealizowane w 2012 roku.

Na wniosek Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego i na podstawie Postanowienia Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 15 października 2012 r. zostałem odznaczony Brązowym Medalem za Długoletnią Służbę.

Za moje osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej otrzymałem nagrodę indywidualną Rektora Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu: I-go stopnia za rok 2018, II-go stopnia za lata 2010, 2013, 2019 i 2021. Za osiągnięcia organizacyjne zrealizowane w latach 2018 i 2019 uzyskałem nagrody indywidualne II-go stopnia. Jestem także laureatem nagrody II-go stopnia w „Programie doskonałości naukowo-badawczej INTEREKON” za rok 2022, finansowanym w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019-2022 (nr projektu 015/RID/2018/19).

Otrzymałem także listy gratulacyjne: w dniu 1 października 2001 r. z rąk Rektora Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu za zakwalifikowanie projektu naukowego do 5 Programu Ramowego Unii Europejskiej, w dniu 30 września 2008 r., z rąk Rektora Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, za osiągnięcia w pracy naukowej w 2007 roku oraz 1 października 2022 r., za osiągnięcia w obszarze organizacyjnym zrealizowane w 2021 roku.

Wrocław, 14.12.2022 r.



