

ZAŁĄCZNIK 2

AUTOREFERAT

KRZYSZTOF ZIEMIŃSKI

1. Dane personalne

Imię i nazwisko: **Krzysztof Ziemiński**

Miejsce pracy: Politechnika Łódzka, Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności,
Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii
ul. Wólczańska 171/173
90-924 Łódź

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Magister inżynier: Politechnika Łódzka, Wydział Chemii Spożywczej; specjalność Chemia i Technologia Spożywcza, 1981r.

Doktor n. technicznych: Politechnika Łódzka, Wydział Chemii Spożywczej i Biotechnologii (doktorat z wyróżnieniem), 1993 r.

Tytuł rozprawy doktorskiej: Biodegradacja odcieku po produkcji erytromycyny

Promotor: prof. dr inż. Zdzisław Włodarczyk

Recenzenci: prof. dr hab. Kazimierz Jarosz
prof. dr hab. Józef Szopa

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1981 – 1983 – asystent stażysta, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PŁ

1983 – 1985 – asystent, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PŁ

1985 – 1993 – st. asystent, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PŁ

1993 – nadal – adiunkt, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PŁ

4. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) wskazuję cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie, zebranych pod wspólnym tytułem **„Zagospodarowanie lignocelulozowych odpadów przemysłu rolno- spożywczego - wytwarzanie i oczyszczanie biogazu”**

4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy

- [B-1]. Ziemiński K., Romanowska I., Kowalska M., 2012. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production. Waste Management, 32, 1131-1137 (IF₂₀₁₂ - 2,485, MNiSW - 30 pkt.)

(Indywidualny wkład: 80%, autor korespondencyjny, koncepcja pracy, wiodący udział w planowaniu doświadczeń, przeprowadzeniu badań oraz analizie i dyskusji wyników. Badania zostały sfinansowane z kierowanego przeze mnie projektu badawczego "Optymalizacja fermentacji metanowej wyśrodków buraczanych")

- [B-2]. Ziemiński K., Romanowska I., Kowalska-Wentel, M., Cyran, M., 2014. Effects of hydrothermal pretreatment of sugar beet pulp for methane production. Bioresource Technology, 166,187–193 (IF₂₀₁₄ - 4,494, MNiSW - 45 pkt)

(Indywidualny wkład: 80%, autor korespondencyjny, koncepcja pracy, wiodący udział w planowaniu doświadczeń, przeprowadzeniu badań oraz analizie i dyskusji wyników. Badania zostały sfinansowane z kierowanego przeze mnie projektu badawczego "Wpływ termohydrolizy wyśrodków na przebieg procesu fermentacji beztlenowej")

- [B-3]. Ziemiński K., Kowalska-Wentel M., 2015. Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse. Bioresource Technology, 180, 274-280 (IF₂₀₁₅ - 4,917, MNiSW - 45 pkt)

(Indywidualny wkład: 90%, autor korespondencyjny, koncepcja pracy, wiodący udział w planowaniu doświadczeń, przeprowadzeniu badań oraz analizie i dyskusji wyników. Badania zostały sfinansowane z kierowanego przeze mnie projektu badawczego "Optymalizacja fermentacji metanowej wyśrodków buraczanych")

- [B-4]. Ziemiński K., Kowalska-Wentel M., 2017. Effect of different sugar beet pulp pretreatments on biogas production efficiency. Applied Biochemistry and Biotechnology, 181(3),1211-1227 (IF* - 1.981, MNiSW - 20pkt)

(Indywidualny wkład: 90%, autor korespondencyjny, koncepcja pracy, wiodący udział w planowaniu doświadczeń, przeprowadzeniu badań oraz analizie i dyskusji wyników. Badania zostały sfinansowane z kierowanego przeze mnie projektu badawczego "Optymalizacja fermentacji metanowej wyśrodków buraczanych")

- [B-5]. Ziemiński K., Kopycki W., 2016. Impact of different packing materials on hydrogen sulfide biooxidation in biofilters installed in the industrial environment. Energy & Fuels, 30 (11), 9386–9395 (IF* - 3.282, MNiSW - 35 pkt)

(Indywidualny wkład: 90%, autor korespondencyjny, koncepcja pracy, wiodący udział w planowaniu doświadczeń, przeprowadzeniu badań oraz analizie i dyskusji wyników. Badania zostały sfinansowane z kierowanego przeze mnie projektu badawczego "Opracowanie innowacyjnej technologii biokonwersji zanieczyszczeń biogazu w obecności tlenowych form azotu w skali przemysłowej")

[B-6]. Ziemiński K., Kopycki W.. Patent EP 2767584B1. 6 kwietnia 2016. Method for reduction of carbon dioxide in biogas. (MNiSW - 25 pkt)

(Indywidualny wkład: 95%, wiodący udział w planowaniu doświadczeń, interpretacji i analizie wyników oraz przygotowaniu zgłoszenia. Badania zostały sfinansowane z kierowanego przeze mnie projektu badawczego "Opracowanie innowacyjnej technologii biokonwersji zanieczyszczeń biogazu w obecności tlenowych form azotu w skali przemysłowej")

*) IF za 2016 i 2017 r. dla ww. czasopism nie został podany, w związku z tym podano 5-letni IF.

Oświadczenia współautorów wraz z określeniem ich wkładu w powstanie pracy znajdują się w załączniku nr 7

5. Wprowadzenie

Przedmiotem badań, których wyniki zostały przedstawione w publikacjach prezentujących moje osiągnięcie naukowe w przewodzie habilitacyjnym, było ustalenie warunków hydrolizy odpadowej biomasy lignocelulozowej oraz intensyfikacji produkcji biogazu. Celem moich badań było także opracowanie biologicznej metody odsiarczania biogazu w obecności tlenowych form azotu. Ten obszar uwzględnia zarówno aspekt naukowy jak i technologiczny wytwarzania i oczyszczania biogazu.

Rozwój gospodarki niskoemisyjnej oraz ograniczenia wykorzystania zasobów nieodnawialnych są istotnymi założeniami europejskiego modelu biogospodarki. Problem badawczy, który podjąłem w swoich badaniach dotyczy ważnego obszaru jakim jest wzrost produkcji energii ze źródeł odnawialnych.

Rosnące ceny surowców pochodzących z upraw celowych, obawy przed uprawami monokulturowymi, znaczące ograniczenia związane z produkcją biopaliw pierwszej generacji, skłaniają do intensyfikacji badań nad możliwością rozwinięcia technologii zmierzających do wykorzystywania w szerszym zakresie odpadowej biomasy lignocelulozowej do wytwarzania paliw drugiej generacji (Chandra et al., 2012; Agbor et al., 2011). Jednym z najbardziej efektywnych nośników energii uzyskiwanej z tego typu surowców jest biogaz powstający w wyniku tzw. fermentacji beztlenowej.

Ten biologiczny proces definiowany jest jako zespół przemian, w których uczestniczą mikroorganizmy pochodzące z dwóch domen, bakterii i archeonów. Bakterie przeprowadzają rozkład wielkocząsteczkowych substancji organicznych i ich fermentację do niższych kwasów karboksylowych, alkoholi, ditlenku węgla, wodoru i wody. Ostatnim etapem jest metanogeneza, w której metaboliczna aktywność archeonów prowadzi do powstania biogazu

będącego głównie mieszaniną metanu (55-70%) i ditlenku węgla (30-45%) oraz w mniejszych ilościach siarkowodoru, siloksanów, azotu, amoniaku, tlenu, węglowodorów i pary wodnej (Gerardi, 2003). W dalszej części tekstu określenie fermentacja beztlenowa będzie rozumiane zgodnie z podaną wyżej definicją.

Szeroki przegląd literatury, dotyczący aktualnego stanu wiedzy na temat fermentacji beztlenowej oraz perspektyw i możliwości wykorzystania różnego typu odpadów organicznych do produkcji biogazu przedstawiłem w dwóch publikacjach przeglądowych (Ziemiński, Frąc; 2012; Frąc, Ziemiński, 2012).

Wzrost produkcji biogazu, uzależniony jest od dostępności i ceny wykorzystywanych substratów, uzyskiwanych z nich wydajnościach biogazu oraz tanich i efektywnych technologii jego oczyszczania. Jednak odzysk energii z odpadowej materii roślinnej, utrudnia złożona i zróżnicowana budowa jej składników. Głównym komponentem jest upakowany, niemal krystaliczny kompleks trzech biopolimerów; celulozy (20-55%), zbudowanej z łańcuchów β -D-glukozy, połączonych wiązaniami β -1,4-glikozydowymi, hemicelulozy (24-40%), składającej się przede wszystkim z reszty D-glukozy, D-galaktozy, D-mannozy, D-ksylozy, L-arabinozy, a także kwasów glukuronowego, galakturonowego i metyloglukuronowego oraz ligniny (1-25%) będącej polimerem jednostek fenylopropanowych, która nie tylko nadaje sztywność roślinom, ale również wykazuje odporność na rozkład mikrobiologiczny oraz procesy oksydacyjne. Obecność ligniny, krystaliczność celulozy oraz ograniczona dostępność powierzchni zmniejsza rozkład biomasy lignocelulozowej w warunkach beztlenowych, co limituje szybkość i wydajność uzyskiwanego biogazu (Frigon 2010).

Wykorzystanie tej materii roślinnej do produkcji paliw alternatywnych wymaga zatem opracowania skutecznych metod wstępnej dekrystalizacji celulozy, jej częściowej depolimeryzacji, rozpuszczenia hemiceluloz, zmian w strukturze ligniny bądź ich rozpuszczenia, a także odpowiedniego uwodnienia masy fermentacyjnej, modyfikacji stosunku C:N:P:S, czy zbilansowania składników mineralnych (Suhartini et al., 2014). Brakuje badań, które pozwalałyby zrozumieć zależności pomiędzy wpływem różnych metod hydrolizy biomasy lignocelulozowej, uzyskiwanymi produktami rozkładu, a wzrostem wydajności biogazu. **Zachodzi, zatem konieczność uzupełnienia tej wiedzy, szczególnie z uwzględnieniem odpadów, takich jak wysłodki czy wychmieliny, które do tej pory nie były brane pod uwagę, jako substrat w produkcji paliw alternatywnych oraz opracowanie wydajnych technologii ich hydrolizy.**

Różnice występujące we właściwościach fizycznych i chemicznych biomasy lignocelulozowej uniemożliwiają zastosowanie uniwersalnej metody jej wstępnego przetwarzania. W ostatnich latach badania koncentrują się nad wykorzystaniem do tego celu hydrolizy enzymatycznej oraz termicznej. Użycie preparatów enzymatycznych uważane jest

za najbardziej obiecujące do stosowania na dużą skalę (Kumar et al., 2009). Zwiększenie opłacalności ekonomicznej tego procesu uzależnione jest nie tylko od precyzyjnego doboru kompleksu enzymów, które charakteryzują się działaniem synergicznym, ale również od efektywności zmiany struktury i stopnia krystaliczności lignocelulozy, co zwiększa dostęp enzymów do powierzchni ściany komórkowej materiału roślinnego (Banerjee et al., 2010).

Rozwój produkcji biogazu zgodnie z dyrektywą 2003/30/WE, wiąże się z wdrażaniem innowacyjnych technologii obniżających koszty jego wytwarzania oraz ochroną środowiska. Podjęta problematyka w kolejnym etapie moich badań zmierzająca do efektywnego i ekologicznie bezpiecznego usuwania siarkowodoru z pozyskanego biogazu w sposób szczególny wpisuje się w te wymogi. W zależności od rodzaju surowca i sposobu realizacji procesu, stężenie siarkowodoru w biogazie może wynosić od 0,05 do 2% (Montebello et al., 2012). Ten toksyczny i odorotwórczy gaz bierze udział w powstawaniu kwasu siarkowego, powodującego korozję urządzeń. Jego obecność w spalonym biogazie nie tylko przyczynia się do wzrostu emisji SO_2 , ale prowadzi również do awarii układów kogeneracji, które są podstawą funkcjonowania każdej biogazowni (Abatzoglou, 2009).

Z uwagi na to, opracowanie skutecznych i opłacalnych ekonomicznie technologii oczyszczania biogazu jest rozwiązaniem niezbędnym do rozwoju energetyki opartej na tym ekologicznym paliwie. Wykorzystywane obecnie chemiczne oczyszczanie biogazu nie będzie stanowić w najbliższej przyszłości alternatywy dla metod biologicznych – ze względu na koszty reagentów, jak również konieczność zagospodarowania powstających odpadów.

6. Uzasadnienie celu badawczego

Rosnąca ilość odpadów roślinnych powstających w zakładach przemysłu spożywczego oraz duży nacisk, jaki kładzie się na rozwój odnawialnych źródeł energii przyczynia się w dużym stopniu do wzrostu zainteresowania fermentacją beztlenową jako metodą ich zagospodarowania. Zatem opracowanie przyjaznych dla środowiska skutecznych metod rozkładu zwartej struktury lignocelulozy, jest ważnym zagadnieniem aplikacyjnym. Harmonizuje ono z coraz większym zainteresowaniem budową własnych biogazowni przez duże zakłady przemysłu rolno - spożywczego. Tego typu działania związane są zarówno z aspektami środowiskowymi, jak i ekonomicznymi. Umożliwiają nie tylko zagospodarowanie powstających w wyniku procesów produkcyjnych odpadów; mogą również w sposób istotny wpływać na poprawę bilansu energetycznego lub osiąganego przez nie zysku ze sprzedaży tzw. zielonej energii. Biogaz doskonale nadaje się do produkcji energii elektrycznej oraz jako paliwo napędowe w silnikach spalinowych, o czym świadczą bogate doświadczenia krajów Unii Europejskiej. Dodatkową korzyścią jest możliwość wykorzystania osadu

pofermentacyjnego w rolnictwie, co związane jest z powrotem składników odżywczych do gleby, poprawą jej struktury oraz zmniejszeniem zużycia nawozów mineralnych.

Dostrzegając zalety wynikające z zagospodarowania odpadowej biomasy, we współpracy z firmą Südzucker Polska S.A, która jest częścią europejskiej Grupy Südzucker, największego producenta cukru w Europie, podjąłem się opracowania technologii fermentacji beztlenowej wysłodków buraczanych. Badania, które prowadziłem w latach 2008-2010, finansowane były przez firmę Südzucker (załącznik 4, II. F.7). Rozpoznanie wpływu hydrolizy wysłodków buraczanych na wzrost wydajności biogazu zainspirowało mnie do kontynuacji prowadzonych prac. Wysoka ocena uzyskiwanych efektów przez firmę Südzucker była powodem uzyskania finansowania także tych badań (załącznik 4, II. F.8), list od firmy (załącznik 4). Odzysk energii zawartej w tych odpadach stanowi istotne wyzwanie nie tylko w skali Polski. Jedna trzecia światowej produkcji cukru wytwarzana jest z buraków cukrowych. W Unii Europejskiej rocznie powstaje w przeliczeniu na suchą masę ok. 14 mln ton wysłodków, natomiast w Polsce ok. 0,6 mln ton. Ich wykorzystanie ograniczało się dotąd prawie wyłącznie jako pasza dla zwierząt przeżuwających.

Prowadzone badania rozszerzyłem, określając przydatność do procesów fermentacji beztlenowej także innych odpadów pochodzących z przemysłu rolno-spożywczego, takich jak wychmieliny browarnicze oraz wywar melasowy.

Na skutek szybkiego wzrostu globalnej produkcji etanolu – w ostatnich latach obserwuje się poważne trudności w zagospodarowaniu całej ilości powstającego wywaru melasowego. W Polsce około 25% produkcji alkoholu etylowego otrzymuje się z melasy. Produkcji 1 dm³ etanolu towarzyszy powstawanie od 8 do 15 dm³ wywaru melasowego (Syaichurrozi et al., 2013). W odróżnieniu od surowców skrobiowych, wywar melasowy nie nadaje się do produkcji pasz. Jego biodegradacja stanowi ogromne wyzwanie, zarówno z punktu widzenia ekonomicznego, jak i środowiskowego.

Wychmieliny są odpadem powstającym podczas ekstrakcji olejku chmielowego z szyszek chmielowych. Roczna produkcja tego odpadu przekracza w Polsce 1000 ton, a w Niemczech ilość ta wynosi ponad 2 mln ton. Użycie tej materii roślinnej do skarmiania zwierząt jest ograniczone ze względu na obecność gorzkich kwasów: humulonów (α -kwasów) i lupulonów (β -kwasów) (Nikolic et al., 2005). W postaci nieprzetworzonej odpad ten znalazł zastosowanie jedynie jako nawóz. Na razie brak jest alternatywnych metod jego zagospodarowania, które miałyby szersze zastosowanie.

Stosowane obecnie technologie biologicznego utleniania siarkowodoru opierają się na wykorzystywaniu bakterii chemolitotroficznych, które w obecności nadmiaru tlenu utleniają siarkowodor do siarki elementarnej. Realizacja tego procesu wymaga zazwyczaj dostarczenia około 4% tlenu w stosunku do objętości oczyszczanego biogazu (Soreanu et al.

2009). Ten sposób odsiarczania biogazu wymaga szeregu zabezpieczeń ze względu na możliwość powstania mieszaniny wybuchowej metanu i tlenu, a także wpływa niekorzystnie na uzyskiwaną kaloryczność biogazu. Z uwagi na to wzrasta zainteresowanie procesami anoksydnymi, w których tlenowe formy azotu stanowią ostateczny akceptor elektronów. **Brakuje danych o przebiegu tych procesów, szczególnie prowadzonych w warunkach przemysłowych.** Wpływ na to mają m.in. wahania w składzie biogazu oraz dynamiczne zmiany stężenia H_2S , co stwarza trudności w zaprojektowaniu rozwiązania umożliwiającego uzyskanie biogazu o wysokim stopniu oczyszczenia.

Brakuje również informacji o strukturze i dynamice funkcjonowania biocenoz w takich układach w powiązaniu z parametrami technologicznymi prowadzonych procesów.

Dostrzegając problem związany z niewystarczającą ilością rozwiązań zapewniających właściwe uzdatnienie biogazu przy niskich nakładach inwestycyjnych i eksploatacyjnych, w roku 2009 opracowałem projekt i uzyskałem finansowanie badań nt. „Opracowanie nowatorskiej metody biokonwersji zanieczyszczeń biogazu w obecności tlenowych form azotu w skali przemysłowej” (POIG.01.03.01-10-196/09-05). Projekt ten, którym kierowałem do 2014 roku, współfinansowany był z funduszy Unii Europejskiej (załącznik 4,II. J.1). Badania realizowano przez konsorcjum naukowo- przemysłowe wspólnie z Grupową Oczyszczalnią Ścieków w Łodzi (GOŚ). W wyniku tych badań opracowano pierwszą w Polsce technologię biologicznego odsiarczania biogazu, w której wyeliminowano zwykle stosowane w tego typu procesach mieszanie biogazu z powietrzem. **Według mojej wiedzy są to w pełni oryginalne badania, nie natrafiłem na doniesienia literaturowe, które wskazywałyby na zastosowanie w skali przemysłowej rozwiązań podobnych do opracowanych w ramach niniejszego projektu.**

Uzyskanie środków finansowych na rozszerzenie ochrony własności intelektualnej rozwiązań powstałych w trakcie realizacji tych badań, było powodem ubiegania się o kolejny projekt. W roku 2013 opracowałem projekt oraz uzyskałem wsparcie finansowe „Opatentowanie innowacyjnych rozwiązań biologicznego odsiarczania biogazu” (UDA-POIG.01.03.02-10-101/11), który był współfinansowany z funduszy unijnych. Projektem kierowałem do września 2015 r. (załącznik 4,II. J.2).

Wszystkie opisane działania oraz realizowane badania były ukierunkowane na dogłębne poznanie i sukcesywne rozwiązywanie licznych problemów związanych z wykorzystaniem odpadów lignocelulozowych do produkcji biogazu oraz jego oczyszczaniem.

7. Cel i zakres pracy

Podstawowym **celem badań stanowiących moje osiągnięcie habilitacyjne było ustalenie zależności pomiędzy wpływem różnych metod depolimeryzacji składników biomasy lignocelulozowej na jakość i ilość produktów pozyskiwanych w wyniku tych procesów, a także na wydajność syntezy biogazu.**

Uzyskane wyniki zostały przedstawione w czterech oryginalnych artykułach naukowych, opublikowanych w renomowanych czasopismach biotechnologicznych o zasięgu międzynarodowym [B-1,B-2,B-3,B-4]. Wykonane badania zmierzały do zdefiniowania czynników wpływających na obróbkę lignocelulozy, jak również ustalenia zależności decydujących o wydajności procesu, przede wszystkim:

- jak skład preparatów enzymatycznych oraz aktywności poszczególnych enzymów pozwalają na uwalnianie z lignocelulozy związków podatnych na procesy fermentacji i wydajną syntezę biogazu [B-1],
- w jaki sposób temperatura w procesie termohydrolizy wyciągów w wodzie w stanie podkrytycznym LHW (ang. *Liquid Hot Water*), wpływa na destrukcję składników ściany komórkowej oraz metanogenezę [B-2],
- w jaki sposób zastosowanie mieszaniny wywaru melasowego i wyciągów buraczanych warunkuje efektywność hydrolizy enzymatycznej oraz procesów prowadzących do produkcji biogazu [B-3],
- jak różne metody obróbki wstępnej wyciągów buraczanych wpływają na wydajność biogazu oraz możliwy do osiągnięcia zysk energetyczny [B-4].

W kolejnym etapie zmierzano **do opracowania warunków biologicznego odsiarczania biogazu.** Wyniki badań udokumentowane są w publikacji w renomowanym czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym [B-5] oraz uzyskanym patencie międzynarodowym [B-6].

Podstawowym **celem tych badań było ustalenie wpływu parametrów procesu zapewniających efektywne i stabilne utlenianie siarkowodoru w obecności tlenowych form azotu w rzeczywistych warunkach technologicznych, przede wszystkim:**

- w jaki sposób kluczowe parametry operacyjne warunkują efektywność i kinetykę odsiarczania biogazu w biofiltrach z warstwą nawadnianą [B-5],
- w jaki sposób liczebność bakterii była uzależniona od materiału z którego wykonano złoża oraz parametrów technologicznych procesu [B-5],
- jak parametry technologiczne wpływają na możliwość usuwania ditlenku węgla z biogazu w prowadzonym procesie jego odsiarczania [B-6],

- w jaki sposób zmiana składu pożywki, stosowanej w procesie odsiarczania biogazu wpływa na uzyskiwane efekty tego procesu [B-5].

W punkcie 8,5 autoreferatu przedstawiłem także wyniki badań, które były podstawą dokonanych zgłoszeń patentowych w Europejskim Urzędzie Patentowym (załącznik 4, II. C.1.,C.2.,C.3.,C.4.,C.5.) oraz w Polskim Urzędzie Patentowym (załącznik 4, II. C.1.1.,C.2.1.,C.3.1.).

8. Omówienie osiągnięć badawczych przedstawionych do oceny

8.1. Wstępna obróbka enzymatyczna odpadów lignocelulozowych w celu zwiększenia efektywności produkcji biogazu

Substratem wykorzystywanym w procesie produkcji biogazu były odpadowe wysłodki buraczane oraz wychmieliny. Reprezentują one niejednorodną grupę odnawialnych odpadów lignocelulozowych powstających w przemyśle cukrowniczym oraz browarniczym. Wysoka zawartość błonnika w wysłódkach (85,1% s.m.) oraz w wychmielinach (57,7% s.m.) wskazuje na celowość wstępnej hydrolizy enzymatycznej – przed poddaniem ich fermentacji w warunkach beztlenowych. Postanowiłem wykorzystać do tego celu handlowe preparaty enzymatyczne. Zwróciłem uwagę na fakt, że zastosowanie zrównoważonych kompleksów enzymatycznych oraz ich odpowiedni dobór jest ważny dla skutecznej depolimeryzacji materii roślinnej wykorzystywanej w badaniach.

Wpływ wybranych handlowych preparatów enzymatycznych na przebieg procesu fermentacji beztlenowej uzyskanych hydrolizatów przedstawiłem w publikacji [B-1]:

Ziemiński K., Romanowska I., Kowalska M., 2012. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production. Waste Management, 32, 1131-1137 (IF₂₀₁₂ – 2,485, MNiSW- 30 pkt.)

W pracy przedstawiono wyniki eksperymentów zmierzających do określenia stopnia depolimeryzacji ściany komórkowej w zależności od rodzaju stosowanych preparatów enzymatycznych, ich dawki oraz czasu trwania hydrolizy. Wysłodki przed hydrolizą enzymatyczną rozdrobniono mechanicznie, natomiast wychmieliny nie były rozdrabniane – z uwagi na ich pylistą strukturę.

Badane odpady poddano działaniu preparatów enzymatycznych: endoglukanazy uzyskanej z *Trichoderma reesei* (Cellusoft Conc.L), endoglukanazy oraz ksylanazy uzyskanej z *Trichoderma longibrachiatum* (Celustar XL), ksylanazy oraz endoglukanazy uzyskanej z *Penicillium funiculosum* (OptimashVR), pektynazy (Agropect pomace). Okazało się, że preparaty Celustar XL i OptimashVR, które są mieszaniną endoglukanazy oraz ksylanazy, prowadziły proces hydrolizy wydajniej niż preparat Cellusoft zawierający jedynie

endoglukanazy – pomimo że ogólna aktywność celulolityczna tego preparatu była najwyższa.

Wykazano, że najlepszy efekt hydrolizy badanej materii organicznej zapewniała mieszanina preparatów enzymatycznych Celustar XL i Agropect pomace (użytych w stosunku objętościowym 3:1). Agropect jako jedyny z badanych preparatów wykazywał aktywność pektynolityczną. Najkorzystniejszy przyrost stężenia cukrów redukujących w hydrolizatach zaobserwowano stosując dawki preparatów enzymatycznych 0,01 cm³/g s.m. Przy tym stężeniu enzymów odnotowano po 1 dobie hydrolizy wysłodków oraz wychmielin wzrost stężenia cukrów redukujących odpowiednio o 88,9% oraz 59,4% - w odniesieniu do prób nie poddanych hydrolizie.

W wyniku przeprowadzonych badań udowodniłem, że pektynazy – zwiększając dostęp endoglukanaz do struktury ściany komórkowej – odgrywają fundamentalną rolę w depolimeryzacji materiałów lignocelulozowych, jakimi są wysłodki buraczane oraz wychmieliny. Ustaliłem, że naruszenie trwałej struktury kompleksu lignocelulozowego i uwolnienie cukrów prostych wpływa korzystnie na przebieg i wydajność fermentacji beztlenowej. Uzyskano wyższe wydajności biogazu w porównaniu z próbami nie poddanymi wcześniej działaniu enzymów, odpowiednio o 19% i 13%. Badania dotyczące hydrolizy enzymatycznej wychmielin oraz zastosowanie tego odpadu jako substratu w procesie fermentacji beztlenowej są nowatorskimi pracami dotyczącymi tego zagadnienia.

8.2. Zastosowania technologii LHW do hydrolizy wysłodków buraczanych

Złożona budowa lignocelulozy powoduje, że enzymatyczny rozkład biopolimerów wymaga długiego czasu hydrolizy. Było to impulsem do poszukiwania innych metod destrukcji ściany komórkowej badanej biomasy roślinnej.

Z uwagi na szereg zalet, proces LHW (hydrolizy w wodzie w stanie podkrytycznym; (ang. *Liquid Hot Water*) jest uważany za jeden z bardziej przydatnych do bezkatalitycznej depolimeryzacji lignocelulozy surowców roślinnych. Jednakże drastyczne warunki obróbki mogą przyczynić się do powstania związków niekorzystnie wpływających na przebieg i wydajność fermentacji beztlenowej. Celem badań było ustalenie optymalnych warunków hydrolizy oraz ocena wpływu uzyskanych hydrolizatów na produktywność biogazu. Wyniki tych badań przedstawiłem w publikacji [B-2]:

Ziemiński K., Romanowska I., Kowalska-Wentel M., Cyran M., 2014. Effects of hydrothermal pretreatment of sugar beet pulp for methane production. Bioresource Technology, 166, 187–193 (IF₂₀₁₄- 4,494, MNiSW - 45 pkt).

Wysłodki buraczane poddano hydrolizie LHW w temperaturach z zakresu 120-200°C. Skuteczność destrukcji ściany komórkowej oceniano na podstawie analizy jakościowej i ilościowej uwolnionych kwasów, aldehydów i cukrów znajdujących się w supernatancie hydrolizatów, a także cukrów, kwasów uronowych i lignin pozostałych w części stałej. Tak zaplanowane badania umożliwiły ocenę stopnia destrukcji poszczególnych składników lignocelulozy w zależności od stosowanej temperatury hydrolizy.

Najwyższe stężenie uwolnionej glukozy odnotowano po hydrolizie LHW wysłodków w temperaturze 160°C; wynosiło ono ok. 3,3 mg/ml i było 4-krotnie wyższe od uzyskanej w temperaturze 120°C. Zawartość ksylozy i mannozy w hydrolizatach, pochodzących prawdopodobnie z rozkładu hemicelulozy, wzrastała nieznacznie w zakresie temperatur 120-160°C. Stwierdzono ponadto, że stężenie kwasów i aldehydów we frakcji ciekłej hydrolizatu rośnie wraz ze wzrostem temperatury, osiągając w 200°C stężenie 1,61 mg/ml, przy czym udział kwasu p-hydroksybenzoesowego stanowi blisko 96%.

Wykazano, że dominującymi produktami w stałej pozostałości wysłodków po hydrolizie LHW w temperaturach 120-150°C była arabinoza, galaktoza oraz kwasy uronowe. Wynika to z faktu, że pektyna wysłodków buraczanych zawiera duże ilości kwasu d-galakturonowego oraz l-arabinozy, a jej łańcuch polimerowy zbudowany jest z reszt kwasu d-galakturonowego połączonych wiązaniami α -1,4- glikozydowymi.

Udział arabinozy w puli cukrów obniżał się w miarę wzrostu temperatury, od 66% w temperaturze 120°C do 2% w temperaturze 200°C, co wskazuje na termolabilność pektyny. Natomiast ksylany i glukomannan hemiceluloz są wysoce termostabilne. Ich rozkład zachodzi dopiero w temperaturach powyżej 180°C.

Wykazano, że najwyższą skumulowaną wydajność metanu, około 500 dm³/kg s.m.o., można uzyskać, poddając fermentacji beztlenowej hydrolizat otrzymany po obróbce wysłodków w temperaturze 160°C. Na uzyskiwane efekty metanogenezy wpływ miała największa ilość uwolnionych w tych warunkach cukrów prostych oraz niskie stężenie kwasów fenolowych.

Ustalono także, że wysokie stężenie kwasu p-hydroksybenzoesowego (1480 mg/dm³) uwolnionego z wysłodków po hydrolizie w temperaturze 200°C, wpływało niekorzystnie na wydajność metanu; produkcja wynosząca 424 dm³/kg s.m.o. była najniższą w odniesieniu do wszystkich prób poddanych fermentacji.

Wykazano, że mikroorganizmy biorące udział w przemianach anaerobowych mogą zaadaptować się do kwasu p-hydroksybenzoesowego, w stężeniu wynoszącym około 620 mg/dm³, który został uwolniony w procesie hydrolizy w temperaturze 170°C. Wydajność metanu po fermentacji beztlenowej hydrolizatów uzyskanych po obróbce

wysłodków w tej temperaturze była jedynie o ok. 2,5% niższa w odniesieniu do prób poddanych hydrolizie w temperaturze 160°C, w których stężenie kwasu p-hydroksybenzoesowego, wynosiło 181 mg/dm³.

W dostępnych źródłach literaturowych nie opisano dotąd badań, które by dokumentowały wpływ obróbki LWH na wydajność fermentacji beztlenowej wysłodków.

8.3. Wpływ wywaru melasowego na syntezę biogazu z wysłodków buraczanych

Wysoka energochłonność zastosowanych metod wstępnej obróbki lignocelulozy opisanych w pracy (B-2) była impulsem do poszukiwania rozwiązań, które mogłyby wpłynąć na wzrost produkcji biogazu przy minimalnych nakładach energetycznych. Zwiększenie wydajności fermentacji beztlenowej odpadów lignocelulozowych wymaga uwodnienia masy fermentacyjnej oraz zbilansowania składników biogennych. Uznałem, że pożądane efekty można osiągnąć stosując wspólną fermentację wysłodków buraczanych z wywarem melasowym. **Są to badania oryginalne i według mojej wiedzy pierwsze opisywane w literaturze.** Uzyskane wyniki przedstawiłem w pracy [B-3]:

Ziemiński K., Kowalska-Wentel M., 2015, Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse. Bioresource Technology, 180, 274-280 (IF₂₀₁₅-4,917 MniSW - 45)

W badaniach wykorzystano mieszaninę wysłodków i wywaru melasowego, w której udział objętościowy wywaru stanowił 25, 50 i 75%. Najwyższą produktywność biogazu wynoszącą 598 ml/g s.m.o. uzyskano, poddając fermentacji beztlenowej mieszaninę z udziałem 25% wywaru. Wydajność biogazu była o 13% większa w porównaniu do tej, jaką uzyskano w wyniku fermentacji beztlenowej wysłodków buraczanych bez dodatku wywaru. Zwiększenie udziału wywaru w mieszaninie do 50 oraz 75% powodowało obniżenie wydajności biogazu do wartości odpowiednio 565 oraz 506 dm³/kg s.m.o..

Mieszaninę wysłodków i wywaru melasowego poddano wstępnej hydrolizie enzymatycznej, wykorzystując enzymy oraz ich dawki ustalone w badaniach opisanych w publikacji [B-1]. Zaobserwowano, że w efekcie hydrolizy enzymatycznej wysłodków buraczanych oraz mieszaniny zawierającej 75% wysłodków i 25% wywaru melasowego uzyskiwano zbliżone stężenia cukrów redukujących. Wzrost udziału wywaru w mieszaninie powodował pogarszanie efektów hydrolizy, co wpływało negatywnie na wydajność biogazu. Najwyższą wydajność wynoszącą około 765 dm³/kg s.m.o. uzyskano, poddając biodegradacji w warunkach beztlenowych mieszaninę wysłodków z dodatkiem 25% wywaru melasowego. Była ona wyższa o 28% w porównaniu do prób nie poddanych hydrolizie enzymatycznej,

oraz o 44% od uzyskanej podczas fermentacji samych wysłodków. Wstępna obróbka enzymatyczna mieszanin wysłodków i wywaru pozwoliła również na skrócenie czasu lag fazy procesu.

8.4. Wpływ obróbki mechanicznej i łagodnej hydrolizy termicznej wysłodków buraczanych na efektywność produkcji biogazu

Wcześniejsze wyniki sugerowały celowość zbadania, w jaki sposób obróbka mechaniczna oraz zastosowanie łagodniejszych warunków hydrolizy termicznej (w porównaniu do opisanych w publikacji B-2), a także połączenie tych metod wpłynie na wydajność hydrolizy enzymatycznej oraz fermentację beztlenową. W wyniku przeprowadzonych studiów literaturowych stwierdziłem, że brakuje tych informacji w odniesieniu do wysłodków buraczanych. Wybór sposobu wstępnej obróbki musi nie tylko uwzględniać wydajność biogazu, ale również opłacalność energetyczną zastosowanych rozwiązań. Uzyskane wyniki przedstawiłem w publikacji [B-4]:

Ziemiński K., Kowalska-Wentel M., 2017. Effect of different sugar beet pulp pretreatments on biogas production efficiency. Applied Biochemistry and Biotechnology, 181(3),1211-1227 (IF*-1.981, MniSW - 20 pkt)

Wykazano, że dwustopniowa obróbka polegająca na wstępnym rozdrobnieniu mechanicznym wysłodków i następnie hydrolizie enzymatycznej umożliwiła 5-krotny wzrost stężenia cukrów prostych – w porównaniu do hydrolizy enzymatycznej wysłodków nie poddanych rozdrobnieniu. Potwierdzono pozytywny wpływ rozdrobnienia materiału lignocelulozowego na wydajność oraz przebieg hydrolizy enzymatycznej. Ustalono, że rozdrobnienie wysłodków do rozmiaru 2,5 mm zapewnia najlepsze efekty. Zaobserwowano, że rozdrobnienie badanego materiału pozwala uzyskać w procesie fermentacji beztlenowej wydajność biogazu zbliżoną do uzyskanej w efekcie wykorzystania do procesu substratu nie rozdrobnionego, poddanego jedynie wstępnej hydrolizie enzymatycznej.

Całkowite stężenie cukrów redukujących było najwyższe w hydrolizacie uzyskanym po przeprowadzeniu wstępnej, dwustopniowej obróbce mechanicznej i termicznej wysłodków, poprzedzającej hydrolizę enzymatyczną. Ten sposób wstępnego przygotowania materiału lignocelulozowego umożliwia również uzyskanie najwyższych wydajności biogazu, wynoszących blisko 900 dm³/kg s.m.o. Niewiele niższe efekt (o ok. 10% lub 14%) otrzymano stosując po uprzedniej obróbce termicznej lub mechanicznej, hydrolizę enzymatyczną. Badania kinetyki produkcji biogazu pozwoliły ustalić, że najdłuższy czas lag fazy równy ok. 2 dni występował podczas fermentacji wysłodków bez ich obróbki wstępnej. Wstępna obróbka mechaniczna lub hydroliza enzymatyczna pozwoliła na skrócenie tego czasu odpowiednio o około 25% lub blisko 50%. Po zastosowaniu obróbki termicznej i hydrolizy

enzymatycznej wyśłodków – zarówno rozdrobnionych, jak i nierozdrobnionych – produkcja biogazu następowała z chwilą rozpoczęcia fermentacji beztlenowej.

Prowadzone badania umożliwiły wyznaczenie zależności między zapotrzebowaniem na energię elektryczną do wstępnej obróbki badanego odpadu a ilością energii, jaką można otrzymać w wyniku spalania uzyskanego biogazu w układzie kogeneracji. Wykazano, że wstępna obróbka mechaniczna lub hydroliza enzymatyczna wyśłodków powoduje wzrost ilości wytworzonego biogazu w odniesieniu do uzyskanej z wyśłodków nie poddanych obróbce odpowiednio o ok. 22% oraz 25%. Zauważono, że ilość energii jaką zużyto na rozdrobnienie wyśłodków była wyższa w porównaniu do obróbki enzymatycznej o ok. 50%. Z uwagi na to zysk energetyczny uzyskany ze spalania biogazu powstałego w wyniku fermentacji beztlenowej wyśłodków po wstępnej jednostopniowej obróbce mechanicznej był o 26,61% niższy w odniesieniu do uzyskanego dla wyśłodków nie poddanych wstępnej obróbce.

Wykazano, że zysk energetyczny jaki można teoretycznie uzyskać spalając biogaz wydzielony w wyniku fermentacji beztlenowej wyśłodków po wstępnej jednostopniowej mechanicznej obróbce oraz dwustopniowej obróbce termicznej i enzymatycznej był porównywalny, pomimo, że wydajność metanu po obróbce dwustopniowej była wyższa o ok. 54%. Uwzględniając te zależności wykazano, że hydroliza enzymatyczna jest najlepszym, ekonomicznie opłacalnym sposobem wstępnej obróbki wyśłodków buraczanych.

8.5. Efektywne odsiarczanie biogazu

Opracowanie sposobu zwiększenia efektywności uzyskiwania biogazu z odpadów lignocelulozowych, jak również kontakty z producentami biogazu, zgłaszającymi zapotrzebowanie na wydajne oraz łatwe w obsłudze i eksploatacji technologie do efektywnego oczyszczania biogazu, zainspirowały mnie do podjęcia prac nad możliwością jego oczyszczania, szczególnie z toksycznego siarkowodoru.

Konsorcjum naukowo-przemysłowe, jakie utworzyłem z Grupą Oczyszczalnią Ścieków w Łodzi (GOŚ), umożliwiło wykonanie kompleksowych badań dotyczących biologicznego oczyszczania biogazu w dynamicznych warunkach przemysłowych.

Wykorzystałem filtry biologiczne z warstwą nawadnianą TBFs (ang. *trickling biofilters*). Zapewniają one prawidłową kontrolę przebiegu procesu oraz charakteryzują się niskimi kosztami inwestycyjnymi i operacyjnymi. Powiększono skalę tych urządzeń od ułamkowo technicznej do półtechnicznej, co umożliwiało sprawdzenie powtarzalności wyników w powiązaniu ze zmiennymi parametrami technologicznymi. W badaniach testowano nieorganiczne wypełnienia, takie jak ceramiczne pierścienie Rashiga, keramzyt oraz kształtki wykonane z HDPE (ang. *High-Density Polyethylene*) oraz specyficzne konsorcjum

mikroorganizmów. Mikroorganizmy immobilizowane na wypełnieniach wyizolowano ze środowisk naturalnych, bogatych w siarkę, komór fermentacji beztlenowej oraz przewodów tłocznych biogazu. Badania ukierunkowałem na ustaleniu parametrów technologicznych procesu, które korzystnie wpływały na skład ilościowy i jakościowy wielogatunkowego konsorcjum mikroorganizmów tworzących błonę biologiczną biofiltrów, co zapewniało efektywne i stabilne oczyszczanie biogazu. Uzyskane wyniki przedstawiłem w publikacji [B-5]:

Ziemiński K., Kopycki J.W., 2016. Impact of different packing materials on hydrogen sulfide biooxidation in biofilters installed in the industrial environment. Energy & Fuels, 30 (11), 9386–9395 (IF* - 3.282, MNiSW - 35 pkt)

W wyniku badań potwierdziłem przyjętą tezę wykazując, że biogaz zanieczyszczony H_2S o wysokim stężeniu może być z powodzeniem oczyszczany w biofiltrze z warstwą nawadnianą TBFs. Uzyskaną ponad 98% skuteczność usuwania siarkowodoru z biogazu uwierzytelniono w licznych testach prowadzonych w warunkach przemysłowych, nie tylko w biogazowni zlokalizowanej na terenie GOŚ, ale również w biogazowni w Zduńskiej Woli. W opracowanej technologii wyeliminowano zwykle stosowane w tego typu procesach mieszanie biogazu z powietrzem, wykorzystując sole kwasu azotowego (V) jako ostateczny akceptor elektronów. Spowodowało to istotne zmniejszenie kosztów odsiarczania biogazu, umożliwi również wtłaczanie go do linii przesyłowych gazu ziemnego, co w najbliższej przyszłości może być bardziej opłacalne od wytwarzania energii w układach kogeneracyjnych. Nie zapewniają tego stosowane obecnie technologie biologicznego odsiarczania biogazu, w których dodatek powietrza w ilości około 4% w stosunku do objętości oczyszczanego biogazu, wyklucza ten sposób jego zagospodarowania i może wpływać także niekorzystnie na końcowe stężenie metanu. Utlenianie siarkowodoru w obecności nadmiaru tlenu prowadzi również do zakwaszania złoża biologicznego oraz wytrącania elementarnej siarki, co wymaga zastosowania dodatkowych urządzeń i reagentów. Opracowana technologia pozwoliła wyeliminować problem związany z zakwaszeniem środowiska. Utlenianie siarkowodoru przebiega z wytworzeniem siarczanów, co minimalizuje problem kolmatacji złoża.

Sposób mikrobiologicznego oczyszczania biogazu w obecności tlenowych form azotu zastrzeżono zgłoszeniem patentowym polskim oraz europejskim (załącznik 4, II. C.1., C.1.1.).

Ustalono, że efektywne i stabilne utlenianie siarkowodoru w rzeczywistych warunkach technologicznych było uzależnione od materiału z którego wykonano złoża, charakterystycznego składu pożywki oraz parametrów technologicznych procesu.

Rodzaj i kształt oraz porowatość wypełnienia biofiltrów to czynniki istotne wpływające na pracę tych urządzeń. Materiał z którego wykonane jest złożo powinien sprzyjać adhezji

i zasiedleniu przez mikroorganizmy przy jednoczesnym zachowaniu intensywnej wymiany masowej, zwilżaniu błony biologicznej oraz niewielkich zmianach ciśnienia. Niski ciężar oraz duża wytrzymałość mechaniczna, która nie powoduje zmian gęstości nasypowej w wyniku zagęszczania materiału filtracyjnego mają istotny wpływ na rozwiązania konstrukcyjne biofiltru i możliwość jego zastosowania w warunkach przemysłowych.

Wykazano, że najkorzystniejsze do konstrukcji złoż biologicznych były kształtki wykonane z HDPE. W porównaniu do innych wykorzystywanych w badaniach wypełnień uzyskano najmniejszą gęstość nasypową - 160 kg/m^3 oraz największą porowatość 79%. Ilość zatrzymanej cieczy na wypełnieniu (hold-up) ma znaczący wpływ na procesy wymiany masowej, wymianę ciepła, zwilżanie błony biologicznej oraz obniżenie ciśnienia w złożu. Przy natężeniu zraszania złoż wynoszącym około $1,0 \text{ m/h}$, stosowanym w realizowanych badaniach, całkowite zatrzymanie wody na wypełnieniu z tworzywa sztucznego wynosiło $0,83 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Mniej o 14% uległo zatrzymaniu na wypełnieniu wykonanym z pierścieni Rashiga, co może negatywnie wpływać na zwilżanie błony biologicznej, natomiast na wypełnieniu z keramzytu było wyższe o 79%, co powodowało wzrost oporów przepływu. Możliwość wykorzystania kształtek wykonanych z HDPE do konstrukcji złoż biologicznych w procesie odsiarczania biogazu oraz sposób mikrobiologicznego oczyszczania biogazu w obecności tlenowych form azotu zastrzegłem zgłoszeniem patentowym polskim i europejskim (załącznik 4, II. C.2. C.2.1.).

Określono wpływ zmiennych stężeń siarkowodoru w biogazie doprowadzanym do złoż na szybkość jego eliminacji oraz uzyskiwane obniżenie jego stężenia.

Wyniki badań przedstawiłem w publikacji [B-5].

Ziemiński K., Kopycki J. W., 2016. Impact of different packing materials on hydrogen sulfide biooxidation in biofilters installed in the industrial environment. Energy & Fuels, 30 (11), 9386–9395 (IF* - 3.282, MNiSW - 35 pkt)

Wykazano, że najwyższą efektywność usuwania siarkowodoru uzyskano stosując biofiltr, w którym błona biologiczna rozwijała się na wypełnieniu z tworzywa sztucznego. Badania realizowano przy stałej wartości EBRT (ang. *Empty Bed Retention Time*), wynoszącej 12,3 min. Ustalono, że stosując to złożo do wartości obciążenia ładunkiem siarkowodoru LR (ang. *Loading Rate*) wynoszącym $3,25 \text{ g/m}^3/\text{h}$, uzyskiwano wartości EC (ang. *Elimination Capacity*) równe LR, co skutkowało 100% utlenieniem siarkowodoru. Praca układu w zakresie wartości LR od $6,0$ do $6,7 \text{ g/m}^3/\text{h}$ umożliwiała usuwanie ładunku siarkowodoru z szybkością odpowiednio od $5,9$ do $6,6 \text{ g/m}^3/\text{h}$, co skorelowane jest z RE (ang. *Removal Efficiency*), jej średnia wartość, dla tych parametrów pracy złoża, wynosiła 98,7%. Wzrost obciążenia złoż ładunkiem siarkowodoru LR od $7,9$ do $8,5 \text{ g/m}^3/\text{h}$ powodował uzyskiwanie średniej wartości RE wynoszącej 96,8%.

W biofiltrach zawierających jako wypełnienie keramzyt oraz pierścienie Rashiga przy tych wartościach obciążeń uzyskana wartość RE wynosiła odpowiednio 94,1% oraz 40,5%.

Wykazano, że rodzaj i stężenie składników pożywki, głównie azotanów, w sposób istotny wpływało na uzyskiwaną efektywność usuwania siarkowodoru. W badaniach jako ostateczny akceptor elektronów wykorzystano azotan wapnia. Kationy wapnia mogą pełnić ważną rolę w tworzeniu spójności komórkowej biofilmów oraz korzystnie wpływać na wzrost mikroorganizmów. Ustalono, że w biofiltrze wypełnionym kształtkami z tworzywa sztucznego zapotrzebowanie na azotan wystarczający do pełnego utlenienia siarkowodoru wynosiło od 0,29 do 0,33 mg N-NO₃/ mg usuniętego H₂S. Istotny wpływ na skuteczność odsiarczania biogazu miało stężenie azotanów obecnych w pożywce zraszającej złożę. Obniżenie RE - do wartości 90%, następowało przy stężeniu N-NO₃⁻ wynoszącym 11,3 mg/dm³. Natomiast drastyczne załamanie procesu obserwowano obniżając stężenie azotanów do 4,5 mg /dm³.

Zmiany wartości pH pożywki były w niewielkim stopniu uzależnione od stężenia siarkowodoru obecnego w oczyszczanym biogazie, co mogło być wynikiem buforującego działania diwodorofosforanu potasowego KH₂PO₄, będącego składnikiem pożywki.

Skład pożywki stosowanej w technologii biologicznego oczyszczania biogazu zastrzeżono europejskim zgłoszeniem patentowym (załącznik 4, II. C.5.).

Ważnym etapem prowadzonych prac było zbadanie ilości oraz zmienności zbiorowisk bakteryjnych, wypełnień biofiltrów odsiarczających biogaz w powiązaniu z parametrami technologicznymi oraz efektywnością prowadzonych procesów.

Wykazano, że powierzchnia HDPE wyraźnie sprzyja adhezji mikroorganizmów. Stwierdzono, że ten materiał z pośród wykorzystywanych w badaniach jest najlepszym nośnikiem biomasy. Największa liczebność mikroorganizmów zasiedlających to wypełnienie ($6,3 \times 10^8$ jtk/g suchego nośnika), występowała w jego dolnej części przy średnim stężeniu siarkowodoru w dopływającym biogazie wynoszącym 525 mg/m³. Można to tłumaczyć większą różnorodnością dostępnych źródeł pokarmu w tej części złoża. W jego środkowej i górnej części koncentracja mikroorganizmów była niższa i wynosiła odpowiednio, $5,7 \times 10^7$ oraz $4,6 \times 10^8$ jtk/g suchego nośnika. Wzrost stężenia siarkowodoru w dopływającym biogazie do wartości średniej 1680 mg/m³, spowodował istotne zmniejszenie liczby bakterii we wszystkich biofiltrach. Dla kolumny wypełnionej kształtkami z tworzywa sztucznego liczba bakterii w dolnej i górnej części kolumny wynosiła odpowiednio $4,5 \times 10^6$ oraz $3,1 \times 10^6$ jtk/g suchego nośnika. Przy tej koncentracji mikroorganizmów uzyskiwano jednak wysoką ponad 94% efektywność usuwania siarkowodoru.

Analiza genów kodujących 16S rRNA wszystkich amplikonów w badanej próbce całkowitego bakteryjnego DNA wykazała, że dominującą grupą mikroorganizmów były bakterie, ponad 99,6% wszystkich mikroorganizmów zasiedlających system, podczas gdy

archeony stanowiły jedynie ułamek procenta. Najwyraźniej organizmy należące do tej domeny nie utrzymują się w analizowanych układach badawczych z powodu niesprzyjających warunków dla ich wzrostu i rozwoju.

Analizy genetyczne pozwoliły oszacować zawartość bakterii w biofilmie na różnych poziomach filogenetycznych. Zidentyfikowano bakterie należące do klasy *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria* i *Gammaproteobacteria* oraz licznych rodzajów i gatunków. Ustalono, że korzystnie konsorcjum mikrobiologiczne, umożliwiające efektywne odsiarczanie biogazu złożone jest z gatunków: *Citrobacter werkmanii*, *Denitratisoma oestradiolicum*, *Denitrobacter permanens*, *Limnohabitans parvus*, *Luteibacter anthropi*, *Methylothermobacter versatilis*, *Oxalobacter vibrioformis*, *Propionivibrio dicarboxylicus*, *Ralstonia insidiosa*, *Rhodanobacter fulvus*, *Rhodanobacter ginsenosidimutans*, *Rhodanobacter lindaniclasticus*, *Thermomonas fusca*, *Thiobacillus thioparus*, *Thiobacillus thiophilus*, *Thiomonas intermedia*, *Thiomonas perometabolis*, *Vogesella perlucida*, *Ralstonia detusculanense*, *Aminobacter aminovorans*, *Comamonas composti*.

Stwierdzono, że bakterie *Ralstonia insidiosa* dominują w wypełnieniu z tworzywa sztucznego we wszystkich jego warstwach, drugim co do liczebności zidentyfikowanym gatunkiem jest *Thiomonas intermedia*. Kolejne najobficiej występujące w środkowej i górnej części wypełnienia to *Thiobacillus thiophilus* oraz *Propionivibrio dicarboxylicus*.

Zauważono również, że we wszystkich badanych złożach dominują bakterie, których nie udało się zakwalifikować do gatunku. Taka sytuacja może wynikać z niedoskonałości metod wykorzystywanych w analizie lub zbyt niskiego progu czułości tych analiz. Może to być również związane z wciąż nie do końca poznaną ogromną bioróżnorodnością świata mikroorganizmów. Skład konsorcjum mikrobiologicznego oczyszczającego biogaz w obecności tlenowych form azotu zastrzeżono zgłoszeniem patentowym (załącznik 4, II. C.4.)

Znaczna grupa mikroorganizmów chemolitotroficznych jest zdolna do utleniania siarkowodoru. Mikroorganizmy te do tworzenia nowego materiału budulcowego, mogą korzystać z CO₂ jako nieorganicznego źródła węgla oraz energii chemicznej, pochodzącej z procesów utleniania H₂S. Wykazano, że konsorcjum mikroorganizmów biorące udział w procesie desulfuryzacji umożliwia obniżenie stężenia ditlenku węgla obecnego w oczyszczanym biogazie o ponad 25%. Rozszerza to możliwość zastosowania opracowanej technologii nie tylko do oczyszczania biogazu, ale również zmniejszania emisji ditlenku węgla emitowanego przez różne gałęzie przemysłu. **To odkrycie umożliwiło uzyskanie patentu europejskiego [B-6].**

Ziemiński K., Kopycki W.. Patent EP2767584B1. 6 kwietnia 2016. Method for reduction of carbon dioxide in biogas.

Ustalono, że opracowana technologia może zostać wykorzystana do produkcji biometanu, który jest biogazem oczyszczonym z siarkowodoru, ditlenku węgla, związków azotu, a także organicznych związków krzemu. Jego właściwości dorównują CNG (ang. *Compressed Natural Gas*). Produkcja tego paliwa rozszerza możliwość wykorzystania biogazu, nie tylko do dominującego obecnie spalania w urządzeniach kogeneracyjnych, ale umożliwi także wtłaczanie go do sieci przesyłowych gazu ziemnego lub zastosowanie jako nośnika energii w transporcie samochodowym.

Zastosowanie konsorcjum mikrobiologicznego i pożywki mikrobiologicznej do produkcji biometanu, w szczególności jako paliwa silnikowego zastrzeżono zgłoszeniem patentowym (załącznik 4, II. C.3.).

9. Podsumowanie najważniejszych osiągnięć opisanych badań

Opisane działania oraz realizowane projekty badawcze były ukierunkowane na opracowanie spójnej technologii otrzymywania biogazu z odpadów organicznych, zwłaszcza lignocelulozowych, oraz biologicznej metody oczyszczania biogazu, głównie z siarkowodoru.

Za najważniejsze osiągnięcia badań zaprezentowanych w jednotematycznym cyklu publikacji uważam:

1. Wykazanie, że skuteczna depolimeryzacja odpadowej biomasy lignocelulozowej wymaga zastosowania kompleksu enzymów: endoglukanazy, ksylanazy oraz pektynazy. Pektynazy, zwiększając dostęp endoglukanazy do substratu, odgrywają fundamentalną rolę w depolimeryzacji lignocelulozy.
2. Ustalenie, że synergiczne działanie endoglukanazy, ksylanazy oraz pektynazy powoduje ponad trzykrotny wzrost stężenia cukrów redukujących w zhydrolizowanej biomase lignocelulozowej wyśrodków i wychmielin w porównaniu do hydrolizatów uzyskanych jedynie z wykorzystaniem endoglukanazy. Destrukcja polisacharydów strukturalnych w wyniku wstępnej enzymatycznej hydrolizy zwiększa wydajność uzyskiwanego biogazu około 20%.
3. Wykazanie, że odpady lignocelulozowe można skutecznie poddać hydrolizie w wodzie w stanie podkrytycznym, jednakże poszczególne frakcje lignocelulozy w różnym stopniu są wrażliwe na działanie wysokiej temperatury. Stwierdziłem termolabilność pektyny. Ustaliłem, że wysoka termostabilność składników hemicelulozy, takich jak ksylan czy glukomannan ogranicza jej rozkład do łatwo fermentowalnych sacharydów. Wykazałem, że najwyższą efektywność hydrolizy można uzyskać w temperaturze 160°C, w której ilość uwolnionej glukozy, jest

4-krotnie wyższa od uzyskanej w temperaturze 120°C. Wykazałem, że stężenie kwasów i aldehydów wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, przy czym udział kwasu p-hydroksybenzoesowego w puli kwasów i aldehydów wynosi blisko 96%.

4. Wykazanie, że wysokie stężenie kwasu p-hydroksybenzoesowego (1480 mg/dm³) uwalnianego w wyniku hydrolizy wysłodków w temperaturze 200°C wpływa niekorzystnie na wydajność metanogenezy. Mikroorganizmy biorące udział w procesie fermentacji beztlenowej mogą zaadaptować się do kwasu p-hydroksybenzoesowego w stężeniu nieprzekraczającym 620 mg/dm³.
5. Ustalenie, że wstępna hydroliza enzymatyczna mieszaniny wysłodków z dodatkiem 25% wywaru melasowego, naruszenie struktury lignocelulozowej, uwolnienie cukrów prostych, zbilansowanie proporcji C:N, jaki również stężenia: sodu, wapnia, magnezu, żelaza, potasu, a także cynku czy miedzi, ważnych dla przebiegu metanogenezy, intensyfikuje wydajność biogazu o 28% w porównaniu do prób nie poddanych hydrolizie enzymatycznej oraz nawet o ponad 45% w porównaniu do uzyskanej podczas fermentacji wysłodków nie uzupełnionych wywarem oraz nie poddanych hydrolizie enzymatycznej.
6. Wykazanie, że wzrost stężenia pożądanych produktów rozkładu lignocelulozy, głównie cukrów redukujących, które umożliwią uzyskanie wysokiego stopnia odzysku energii w procesie fermentacji beztlenowej jest uzależnione od sposobu wstępnej obróbki. Najwyższą wydajność biogazu zapewnia fermentacja beztlenowa hydrolizatu uzyskanego w wyniku obróbki termicznej wysłodków w połączeniu z hydrolizą enzymatyczną. W tych warunkach wydajność jest o 75% wyższa od uzyskanej podczas fermentacji wysłodków nie poddanych obróbce. Zaobserwowałem również, że rozdrobnienie wysłodków intensyfikuje proces metanogenezy. Wydajność biogazu jaką można uzyskać w wyniku fermentacji wysłodków rozdrobnionych do długości włókna około 2,5 mm, jest o około 20% wyższa w porównaniu do prób nie poddanych rozdrobnieniu.
7. Określenie nakładów energetycznych oraz osiąganych zysków w zależności od sposobu obróbki wstępnej materiału lignocelulozowego. Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie zależności między zapotrzebowaniem na energię elektryczną zużytą na wstępną obróbkę materiału, a ilością energii jaką można otrzymać w wyniku spalania uzyskanego biogazu w układzie kogeneracji. Wykazałam, że zysk energetyczny jaki można teoretycznie uzyskać spalając biogaz wydzielony w wyniku fermentacji beztlenowej wysłodków po wstępnej jednostopniowej mechanicznej obróbce oraz dwustopniowej obróbce termicznej i enzymatycznej jest porównywalny pomimo, że wydajność metanu z wysłodków po obróbce dwustopniowej jest wyższa o 54%. Ustaliłem, że wraz ze wzrostem ilości operacji technologicznych

zmierzających do depolimeryzacji wyśłodków zysk energetyczny wyraźnie maleje. Uwzględniając te zależności wykazałem, że hydroliza enzymatyczna może być najlepszym, ekonomicznie opłacalnym sposobem wstępnej obróbki wyśłodków.

8. Określenie kluczowych parametrów operacyjnych wpływających na efektywność i kinetykę usuwania siarkowodoru z biogazu w warunkach przemysłowych. Wykazałem, że biofiltry z biomasą immobilizowaną na kształtkach z tworzywa sztucznego w zakresie obciążeń złoża ładunkiem siarkowodoru od 1,8 do 6,7 g/m³/h oraz stężeniu NO₃⁻ w pożywce nie niższym niż 50 mg/dm³ umożliwiają obniżenie stężenia siarkowodoru w oczyszczanym biogazie o ok. 99%.
9. Wykazanie, że kształtki wykonane z tworzywa sztucznego sprzyjają adhezji mikroorganizmów i są korzystniejszym nośnikiem biomasy niż pierścienie Raschiga czy keramzyt. Ustaliłem, że wzrost obciążenia złoża ładunkiem siarkowodoru powyżej 6,7 g/m³/h, wpływa niekorzystnie na rozwój mikroorganizmów zasiedlających wszystkie poziomy złoż biologicznych oraz na stabilność konsorcjum bakterii istotnych w procesie defosfatacji biogazu.
10. Określenie składu konsorcjum mikroorganizmów zasiedlających złoża biologiczne oraz ustalenie dominujących jednostek taksonomicznych na różnych poziomach tych złoż.
11. Wykazanie, że konsorcjum mikroorganizmów biorących udział w procesie utleniania siarkowodoru umożliwia obniżenie stężenia ditlenku węgla obecnego w oczyszczanym biogazie o około 25%. Stwarza to możliwość zastosowania opracowanej technologii do produkcji biometanu lub oczyszczania gazów przemysłowych i umożliwia połączenie elementów poznawczych i aplikacyjnych opracowanej technologii.
12. Określenie wytycznych technologicznych fermentacji beztlenowej odpadów organicznych w tym lignocelulozowych. Wyzaczyłem kluczowe parametry mające wpływ na efektywność i kinetykę produkcji biogazu. Opracowałem technologię zapewniającą efektywne biologiczne odsiarczanie biogazu. Technologia została zweryfikowana w warunkach przemysłowych w skali półtechnicznej i zastrzeżona zgłoszeniami patentowymi.

10. Możliwość wykorzystania uzyskanych wyników

Obserwowany wzrost wykorzystania odpadowej materii lignocelulozowej, która może stanowić cenny substrat w produkcji biogazu wzmacnia zainteresowanie badaniami jej depolimeryzacji. Kluczowe potrzeby badawcze w dziedzinie produkcji i wykorzystania biogazu obejmują poszukiwanie nowych substratów, intensyfikację procesu przy zminimalizowanym negatywnym wpływie na środowisko naturalne, korzystnych nakładach finansowych w stosunku do uzyskiwanej produkcji energii oraz wdrażanie efektywnych technologii oczyszczania biogazu. Badania prezentujące moje osiągnięcie naukowe w przewodzie habilitacyjnym poszerzają wiedzę w tym zakresie oraz mają istotne znaczenie aplikacyjne. Wyniki opracowanej przeze mnie technologii fermentacji beztlenowej wysłodków, które wskazują na możliwość uzyskania wysokich wydajności biogazu z tego materiału lignocelulozowego, były podstawą do podjęcia przez firmę Südzucker decyzji o budowie i uruchomieniu w roku 2012 pierwszej w Polsce biogazowni o mocy 2 MW, w której wykorzystuje się jako substrat wyłącznie wysłodki, list od firmy (załącznik 4).

W ramach realizacji badań odsiarczania biogazu opracowałem założenia i uruchomiłem nowatorską instalację w skali półtechnicznej do biologicznego odsiarczania biogazu. Technologia ta w Plebiscycie Łódź Sukcesu, została uznana za jedno z najważniejszych wydarzeń promujących miasto. Rezultaty projektu okazały się na tyle zadowalające dla władz Grupowej Oczyszczalni Ścieków, że podjęto decyzję o podpisaniu umowy licencyjnej pomiędzy Politechniką Łódzką a Grupową Oczyszczalnią Ścieków w Łodzi na sprzedaż i uruchomienie instalacji przemysłowej do biologicznego odsiarczania biogazu, list od firmy (załącznik 4).

Cytowana Literatura

1. Agbor V.B., Sparling R., Cicek N., Berlin A., Levin D.B., 2011. Biomass pretreatments: fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, 29 (6), 675-685.
2. Chandra R., Takeuchi H., Hasegawa T., 2012. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes. A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3), 1462-1476
3. Gerardi M.H., 2003. The microbiology of anaerobic digesters. *Wastewater Microbial Series*. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1-177.
4. Frigon J.C., Guiot S.R., 2010. Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review. *Biofuels Bioproducts Biorefining*, 4 (4), 447-458.
5. Ziemiński K., Frąć M., 2012. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass. Transformations, stages and microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, 11 (18), 4127-4139.

6. Frąc M., Ziemiński K., 2012. Methane fermentation process for utilisation of organic waste. *International Agrophysics*, 26, 1, 317-330.
7. Suhartini S., Heaven S., Banks Ch.J., 2014. Comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of sugar beet pulp. Performance dewaterability and foam control. *Bioresour Technology*, 152, 202–211.
8. Kumar P., Barrett D.M., Delwiche M.J., Stroeve P., 2009. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 48, 3713–3729.
9. Banerjee G., Car S., Scott-Craig J.S., Borrusch M.S., Bongers M., Walton J.D., 2010. Synthetic multi-component enzyme mixtures for deconstruction of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technology*, 101(23), 9097-9105.
10. Montebello A.M., Fernández M., Almenglo F., Ramírez M., Cantero D., Baeza M., Gabriel D., 2012. Simultaneous methylmercaptan and hydrogen sulfide removal in the desulfurization of biogas in aerobic and anoxic biotrickling filters. *Chemical Engineering Journal*, 200-202, 237-246.
11. Abatzoglou N., Boivin S., 2009. A review of biogas purification processes. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 3, 42–71.
12. Syaichurrozi I., Budiyo B., Sumardiono S., 2013. Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresour Technology*, 149, 390–397.
13. Nikolic D., Li Y., Chadwick L.R., Pauli G.F., Breemen R.B., 2005. Metabolism of xanthohumol and isoxanthohumol, prenylated flavonoids from hops (*Humulus lupulus* L.) by human liver microsomes. *Journal of Mass Spectrometry*, 40, 289–299.
14. Soreanu G., Béland M., Falletta P., Ventresca B., Seto P., 2009. Evaluation of different packing media for anoxic H₂S control in biogas. *Environmental Technology*, 30, 1249–1259.

11. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Moje pozostałe zainteresowania naukowo-badawcze mieszczą się w następujących obszarach tematycznych:

1. Obróbka chemiczna spirytusów surowych
2. Zastosowanie drożdży do biodegradacji odcieku po produkcji antybiotyków.
3. Fermentacja beztlenowa odcieku po produkcji erytromycyny (badania w ramach rozprawy doktorskiej).
4. Biodegradacja węglowodorów stanowiących zanieczyszczenie powietrza.
5. Zastosowanie procesu biofiltracji do oczyszczania gazów odlotowych powstających w wyniku spalania odpadów przemysłowych.
6. Stabilizacja osadów ściekowych
7. Optymalizacja procesów fermentacji beztlenowej odpadów organicznych
8. Korozja biologiczna w liniach przesyłowych gazu ziemnego.

11.1. Obróbka chemiczna spirytusów surowych

W początkowym okresie mojej działalności naukowej kontynuowałem badania tematycznie związane z pracą magisterską nt. „Wpływ obróbki chemicznej surowych spirytusów melasowych na wartość próby Langa otrzymywanych rektyfikatów”. W wyniku procesu fermentacji alkoholowej obok etanolu powstają także inne związki, których stężenie jest uzależnione od warunków przebiegu fermentacji, składu wykorzystywanych podłoży, a także budowy aparatury odpędowej. Zanieczyszczenia wpływające na jakość spirytusów, to związki karbonylowe (aldehydy, ketony), fuzle, półacetale, acetale, metanol, kwasy organiczne, estry i inne. W prowadzonych badaniach określiłem wpływ chemicznych metod uzdatniania spirytusów surowych na jakość uzyskiwanych z nich rektyfikatów. Ich czystość oceniałem na podstawie próby Langa - czasu odbarwienia nadmanganianu potasowego w badanych spirytusach.

Rezultaty badań zostały opublikowane w dwóch publikacjach, których byłem współautorem.

Publikacje

1. Gwardys S., **Ziemiński K.**, 1983. Zależność między zawartością niektórych zanieczyszczeń w spirytusach rektyfikowanych a próbę Langa. Część I. Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny, 4, 13-15.
2. Gwardys S., **Ziemiński K.**, 1983. Zależność między zawartością niektórych zanieczyszczeń w spirytusach rektyfikowanych a próbę Langa. Część II. Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny, 6, 9-11.

11.2. Zastosowanie drożdży do biodegradacji odcieku po produkcji erytromycyny

W ramach współpracy pomiędzy Instytutem Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PŁ a Tarchomińskimi Zakładami Farmaceutycznymi Polfa w roku 1984 rozpocząłem badania nad opracowaniem technologii mającej na celu zastosowanie drożdży do biodegradacji odcieku po produkcji erytromycyny. Ten rodzaj odcieku odprowadzany z zakładu zasługiwał na szczególną uwagę ze względu na jego znaczne ilości oraz wysokie obciążenie ładunkiem substancji organicznej. Ustaliłem, że najlepszą przydatność do tego celu wykazują drożdże *Trichosporon cutaneum*. Uzyskałem przyrost biomasy rzędu 2-4 g/m³, przy jednoczesnym obniżeniu ChZT odcieku o około 40%. Stwierdziłem, że obecność erytromycyny w niewielkim stopniu hamuje proces drożdżowania. Przy zwykle oznaczanym w odcieku resztkowym stężeniu antybiotyku 30 – 100 µg/dm³, obniżenie przyrostu biomasy w stosunku do próby kontrolnej wynosiło ok. 5-7%. Skład chemiczny drożdży był podobny do spotykanych w drożdżach paszowych pochodzących z typowych podłoży konwencjonalnych (melasa, wywar melasowy). Nie wykryto w nich obecności erytromycyny.

Rezultaty badań dotyczące określenia możliwości zastosowania drożdży do biodegradacji odcieku po produkcji erytromycyny zostały przedłożone Tarchomińskim Zakładom, a wyniki dla których Zakład wyraził zgodę na opublikowanie, przedstawiłem jako współautor w postaci artykułu w czasopiśmie naukowym oraz doniesień na dwóch konferencjach krajowych.

Publikacje

1. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., 1988. Próby zdrożdżowania wywaru melasowego z dodatkiem odcieku po produkcji erytromycyny. Zeszyty Naukowe PŁ Technologia i Chemia Spożywcza, 41, 127-134.

Konferencje

1. Włodarczyk Z., **Ziemiński K.**, 1986. Próby zdrożdżowania odcieku po produkcji erytromycyny. XVII Sesja Naukowa KTiCHŻ PAN „Doskonalenie procesów biotechnologicznych w przemyśle spożywczym”, Łódź, 26-27 VI. 1986. Materiały s. 529-532.
2. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., 1988. Próby zdrożdżowania odcieku po produkcji erytromycyny. Materiały seminarium Naukowego CPBP 04.11 „Doskonalenie procesów biotechnologicznych”. Łódź, 9-10. IX. 1988. Materiały s. 66-70.

11.3. Fermentacja beztlenowa odcieku po produkcji erytromycyny

Wykorzystanie drożdży do biodegradacji odcieku po produkcji erytromycyny okazało się zbyt kosztownym rozwiązaniem dla Polfy Tarchomin, z tego powodu w 1986 roku zaniechano dalszych badań w tym kierunku. W roku 1987 podjąłem próbę kontynuacji tego tematu, proponując zamiast drożdżowania proces fermentacji beztlenowej. Ten sposób ograniczenia ładunku substancji organicznej obecnej w odcieku został pozytywnie oceniony przez kierownictwo Polfy Tarchomin. W badaniach prowadzonych w latach 1987-1992 wykazałem, że w warunkach anaerobowych można z wysoką skutecznością poddawać

biodegradacji odciek po produkcji erytromycyny. Zaprojektowałem i zastosowałem z dużym powodzeniem do realizacji tego celu fermentory z wypełnieniem. Było to na ówczesne czasy pionierskie rozwiązanie, którego skuteczność potwierdziłem podczas badań wykonanych w skali mikrotechnicznej na terenie Polfy Tarchomin. Uzyskałem przy krótkim 9 dobowym czasie retencji obniżenie wartości ChZT o ponad 75%. Skracając czas zatrzymania ścieków w fermentorze do jednej doby osiągnięto blisko 40% obniżenie ChZT.

Istotnym osiągnięciem było również opracowanie skojarzonej dwustopniowej fermentacji beztlenowo-tlenowej, z wykorzystaniem beztlenowych złóż biologicznych jako I stopień oczyszczania oraz tlenowych złóż biologicznych jako II stopień oczyszczania. Pozwoliło to na uzyskanie ponad 70% redukcji wskaźnika ChZT przy stosunkowo krótkim, 2-dobowym czasie przebywania odcieku w układzie.

Stopień doktora nauk technicznych w zakresie technologii chemicznej uzyskałem w 1993 roku za rozprawę nt. „Fermentacja beztlenowa odcieku po produkcji erytromycyny”, wykonaną pod kierunkiem prof. Zdzisława Włodarczyka. Praca doktorska decyzją Rady Wydziału Chemii Spożywczej została wyróżniona.

Rezultaty badań dotyczące określenia możliwości fermentacji beztlenowej odcieku po produkcji erytromycyny przedstawiłem jako współautor w postaci artykułu w czasopiśmie naukowym, na dwóch konferencjach zagranicznych, konferencji międzynarodowej oraz pięciu konferencjach krajowych.

Publikacja

1. **Ziemiński K.**, Kokuszko Z., 1991. Fermentacja metanowa odcieku po produkcji erytromycyny. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Technologia i Chemia Spożywcza, 45, 115-130.

Konferencje

1. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., Kokuszko Z., Gałaj M., 1987. Semi-continuous methane fermentation after production of erythromycin. 9th ISCC "Continuous Culture in Biotechnology and Environment Conservation", Hradec Kralove, 19–24.07.1987. Materiały s. 28.
2. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., 1989. Biodegradation of the effluent from the production of erythromycin. V Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Wysokoefektywne metody oczyszczania ścieków i odnowa wody”. Kraków, 25-27 09.1989. Materiały t.2, s.111-112.
3. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., Kokuszko Z., 1990. Fermentacja metanowa odcieku po produkcji erytromycyny. Sympozjum Naukowe CPBP 04.11 „Doskonalenie procesów biotechnologicznych”. Łódź, 13-14.12.1990. Materiały s. 124-128.
4. Włodarczyk Z., Gwadrys S., Kokuszko Z., Kosiek E., Nielepkowicz-Charczuk A., **Ziemiński K.**, Gałaj M., 1990. Mikrobiologiczna utylizacja wybranych odpadów roślinnych i odcieków przemysłowych. „Utylizacja odcieków przemysłowych”. Sympozjum Naukowe CPBP 04.11 „Doskonalenie procesów biotechnologicznych”. Łódź, 13-14.12.1990. Materiały s. 327-344.
5. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., Ostaszewski M., 1992. Methane fermentation of liquid waste after the production of erythromycin. "Biotechnology in Central European Initiative Countries". Vienna 1992. Materiały s. P22.
6. **Ziemiński K.**, Włodarczyk Z., Ostaszewski M., 1993. Fermentacja metanowa odcieku po produkcji erytromycyny w fermentorach z wypełnieniem. II Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe, Biotechnologia Środowiska. Ustroń 9-10.12.1993. Materiały s. 24-26.

7. **Ziemiński K.**, 1994. Biodegradacja ciekłych odpadów po produkcji antybiotyków. Konferencja Naukowo Techniczna „Odpady Medyczne”. Poznań 1994. Materiały s. 21-29.

11.4. Biodegradacja węglowodorów stanowiących zanieczyszczenie powietrza

Po doktoracie kontynuowałem współpracę z Polfą Tarchomin w ramach tematu badawczego dotyczącego ograniczenia zanieczyszczenia powietrza związkami organicznymi wykorzystywanymi podczas produkcji antybiotyków.

W pierwszy etapie badań dokonałem izolacji i selekcji drobnoustrojów mających uzdolnienia do biodegradacji wybranych węglowodorów (toluen, chloroform, aldehyd mrówkowy, aceton, n-butanol). Źródłem pozyskiwania mikroorganizmów były preparaty handlowe wykorzystywane do biodegradacji zanieczyszczeń zawartych w ściekach oraz bakterie środowiskowe pobrane z terenu zakładu. Na podstawie uzyskanych wyników wytypowano szczepy wykazujące najlepszy wzrost w podłożach z dodatkiem badanych węglowodorów. W kolejnym etapie prowadzonych badań interesowała mnie możliwość zastosowania reaktorów z wypełnieniem do biodegradacji węglowodorów. Opracowałem i skonstruowałem biofiltry, które wykorzystywałem do badań laboratoryjnych oraz przemysłowych prowadzonych na terenie Polfy Tarchomin. Wykonane badania wykazały wysoką skuteczność procesu biofiltracji do usuwania z powietrza rozpuszczalników organicznych takich, jak n-butanol, octan n-butyli czy aceton, wykorzystywanych w procesie ekstrakcji antybiotyków. W prowadzonych badaniach testowałem między innymi możliwość zastosowania różnych wypełnień, które zapewniałyby wysoką koncentrację mikroorganizmów. Badałem również szybkość biodegradacji poszczególnych rozpuszczalników. W procesie biofiltracji acetonu w zakresie obciążeń substratowych od 5,3 do 91,7 g/m³ h uzyskano obniżenie stężenia o ok. 99%. Maksymalną szybkość procesu biofiltracji równą 95,8 g/m³·h osiągnięto przy obciążeniu substratowym złoża wynoszącym 96,5 g/m³h. Najwyższy efekt oczyszczania, wynoszący 91% uzyskano dla n-butanolu oraz octanu n-butyli, stosując obciążenia substratowe wynoszące odpowiednio 92,95 mg/m³s oraz 12,4 mg/m³s. W badaniach tych testowane było złożo wykonane z włókien kokosowych.

Z uwagi na przekształcenia, jakie następowały w Polfie Tarchomin oraz zaprzestanie w roku 2003 produkcji erytromycyny, prowadzone prace związane z ograniczeniem zanieczyszczenia powietrza związkami wykorzystywanymi podczas produkcji antybiotyków, nie uzyskały dalszego wsparcia ze strony Zakładu i nie były kontynuowane.

Rezultaty badań dotyczących możliwości usuwania węglowodorów stanowiących zanieczyszczenie powietrza przedstawiłem jako współautor dwóch artykułów w czasopiśmie międzynarodowym, dwóch artykułów w czasopiśmie krajowym oraz doniesienia na konferencji międzynarodowej i czterech konferencjach krajowych.

Publikacje

1. Motyl.W., **Ziemiński K.**, 1998. Wykorzystanie metod biotechnologicznych do oczyszczania gazów z zanieczyszczeń organicznych. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 2, 60-63.
2. **Ziemiński K.**, Szopa J., 2000. Biofiltracja jako skuteczna metoda biodegradacji lotnych węglowodorów. *Zeszyty Naukowe Chemia Spożywcza i Biotechnologia*, 63, 63-64.
3. **Ziemiński K.**, Pielech- Przybylska K., Szopa J., 2004. Microbiological decomposition of selected hydrocarbons occurring as air pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 53 (3), 189.
4. Pielech-Przybylska K., **Ziemiński K.**, Szopa J., 2006. Acetone biodegradation in a trickle-bed biofilter. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 57 (4), 200-206.

Konferencje

1. **Ziemiński K.**, Motyl W., 1995. Wpływ wybranych związków chemicznych na efektywność działania biopreparatów. Symposium Naukowo Techniczne „Biotechnologia Środowiska” Ustroń – Jaszowiec 6-8. 12.1995. Materiały s. 18-19.
2. Motyl.W., **Ziemiński K.**, Szopa J.,1998. Selekcja mikroorganizmów tlenowych degradujących węglowodory stanowiące zanieczyszczenie powietrza. Symposium Naukowo- Techniczne „Metody i Technologie Oczyszczania Ścieków Przemysłowych”. Kaziemierz Dolny 6-8.05.1998. Materiały s.175-180.
3. **Ziemiński K.**, Pielech-Przybylska K., Szopa J., 2001. Mikrobiologiczny rozkład wybranych węglowodorów stanowiących zanieczyszczenie powietrza. II Konferencja Naukowa „Rozkład i Korozja Mikrobiologiczna Materiałów Technicznych”. Łódź. Materiały s. 274-279.
4. **Ziemiński K.**, Pielech-Przybylska K., Szopa J., 2003. Mikrobiologiczny rozkład acetonu. III Konferencja Naukowa „Rozkład i Korozja Mikrobiologiczna Materiałów Technicznych”. Łódź 2003. Materiały s.137-139.

11.5. Zastosowanie biofiltracji do oczyszczania gazów odlotowych powstających w wyniku spalania odpadów przemysłowych

Badania nad możliwością zastosowania procesu biofiltracji do biodegradacji węglowodorów, rozpoczęte w Polsce Tarchomin kontynuowałem, nawiązując współpracę z Oczyszczalnią Ścieków w Tomaszowie Mazowieckim. Jej celem było zbadanie możliwości zastosowania procesu biofiltracji do oczyszczania gazów powstających w wyniku spalania odpadów przemysłowych.

W pierwszym etapie prowadziłem badania nad doбором zespołu drobnoustrojów o uzdolnieniach do redukcji tlenków azotu i siarki. Wykazałem właściwości szczepu *Pseudomonas fluorescens* do redukcji tlenków azotu. Uzyskałem obniżenie stężenia azotanów (V) oraz azotanów (III) odpowiednio o 86 oraz 90%. Opracowałem zaprojektowałem i uruchomiłem na terenie spalarni prototypową instalację do biologicznego oczyszczania spalin. W wyniku przeprowadzonych badań wykazałem, że gazy odlotowe wstępnie schłodzone do temp. 28°C można z dużym powodzeniem oczyszczać metodą biofiltracji. Uzyskano ponad 90% obniżenie stężenia tlenków azotu i siarki. Zaobserwowano również możliwość usuwania ze spalin węglowodorów alifatycznych i aromatycznych ze skutecznością odpowiednio 74% oraz 43%.

Efektem zrealizowanych badań była publikacja oraz doniesienia na konferencji międzynarodowej. Brak zgody zakładu uniemożliwił szersze opublikowanie tych interesujących badań.

Publikacja

1. **Ziemiński K.**, Solecka M., 2006. Mikrobiologiczny rozkład tlenków azotu. Ochrona Przed Korozją. Nr 9s/A, 112-116.

Konferencje

1. **Ziemiński K.**, Solecka M., 2006. Mikrobiologiczny rozkład tlenków azotu „Rozkład i Korozja Mikrobiologiczna Materiałów Technicznych”. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa. Łódź. 06-08.09. 2006.
2. **Ziemiński K.**, 2009. Biologiczne oczyszczanie gazów odlotowych. V Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Rozkład i Korozja Mikrobiologiczna Materiałów Technicznych”. Łódź. 7–9. 09. 2009. Materiały s.187-198.

11.6. Stabilizacja osadów ściekowych

Zagospodarowanie osadów ściekowych jest ważnym i aktualnym problemem dla wielu oczyszczalni ścieków komunalnych jak i przemysłowych. Zmienny skład tych odpadów, a także zawartość w nich metali ciężkich, ogranicza lub uniemożliwia ich przyrodnicze wykorzystanie oraz decyduje o wyborze metod które mogą być zastosowane do ich utylizacji. Fermentacja beztlenowa jest jednym z ważnych procesów stosowanych do stabilizacji osadów ściekowych, zmniejszenia ich objętości oraz higienizacji. Jednak obecne w osadach jony metali ciężkich, mogą negatywnie wpływać na metanogenezę, obniżając lub całkowicie hamując syntezę biogazu. Graniczne stężenie metali ciężkich w osadach powodujące obniżenie efektywności procesu fermentacji beztlenowej nie jest dokładnie określone. W wyniku nawiązanej w roku 1995 współpracy z Zakładami Włókien Chemicznych Wistom S.A., prowadziłem badania mające na celu opracowanie sposobu beztlenowej biodegradacji nadmiernych osadów ściekowych powstających podczas oczyszczania ścieków w tych zakładach oraz określenie wpływu metali ciężkich na przebieg tego procesu.

W prowadzonych badaniach wykazałem, że stężenie cynku 57-67 mg/dm³, miedzi 130–190 mg/dm³, niklu 40-47 mg/dm³, chromu 317-370 mg/dm³, kadmu 28-40 mg/dm³ oraz ołowiu 540-1080 mg/dm³, w fermentowanych osadach, nie hamowało w istotny sposób aktywności metanogenów. Stwierdziłem, że decydujący wpływ na przebieg i uzyskiwane efekty fermentacji osadów zawierających wysokie stężenie jonów metali ciężkich mają warunki prowadzenia procesu, temperatura, wartość pH oraz obecności jonów siarczkowych, które w reakcji z metalami powodują powstawanie trudno rozpuszczalnych siarczków metali.

Jedną z metod uzdatniania osadów ściekowych do postaci nawozu organicznego jest proces ich kompostowania wspólnie z frakcją bioodpadów organicznych na przykład słomy. Skrócenie czasu mineralizacji ma istotne znaczenie dla ekonomicznej opłacalności tego

rozwiązania. W wyniku współpracy z oczyszczalnią ścieków w Warcie prowadziłem badania, w warunkach przemysłowych, które miały określić wpływ preparatów enzymatycznych na intensyfikację procesu kompostowania. Do badań wykorzystałem enzymy proteolityczne uzyskane w procesie biosyntezy szczepu *Aspergillus niger* oraz *Bacillus subtilis*. Wykazałem, że dodatek enzymów do kompostowanego materiału powoduje wyraźną intensyfikację procesu mineralizacji substancji organicznej. Uzyskane wyniki były o ok 200% korzystniejsze w odniesieniu do prób nie traktowanych dodatkiem enzymu.

Wyniki zrealizowanych badań dotyczących intensyfikacji kompostowania osadów ściekowych oraz wpływu metali ciężkich na proces fermentacji beztlenowej osadów przedstawiłem jako współautor jednego artykułu oraz jednego doniesienia na konferencji. Brak zgody zakładów uniemożliwił szersze opublikowanie tych badań.

Publikacja

1. **Ziemiński K.**, Boniecki P., 2011. Intensification of sewage sludge composting. *Biotechnology and Food Science*. 75, (1), s.15-28.

Konferencja

1. **Ziemiński K.**, Motyl W., 1997. Wpływ wybranych metali ciężkich na proces beztlenowej biodegradacji osadów. V Ogólnopolskie Sympozjum Naukowo Techniczne „Biotechnologia Środowiska”. Ustroń – Jaszowiec 10-12. 12. 1997. Materiały s. 27.

11.7. Optymalizacja procesów fermentacji beztlenowej odpadów organicznych

W wyniku współpracy nawiązanej z Instytutem Agrofizyki PAN w Lublinie, brałem udział jako wykonawca w projekcie nt. "Opracowanie innowacyjnego biopreparatu do optymalizacji procesu fermentacji metanowej odpadów organicznych" LIDER/24/48/I-2/10/NCBiR/2011. W badaniach realizowanych w latach 2011-2014 przeprowadziłem optymalizację procesu fermentacji beztlenowej mieszaniny odpadów z przetwórstwa rolno-spożywczego.

W pierwszy etapie badań określiłem istotne parametry technologiczne tego procesu: temperaturę fermentacji, obciążenie substratowe reaktorów, czas retencji, zapewniające maksymalną wydajność biogazu. W kolejnym etapie pracy ustaliłem wpływ opracowanego biopreparatu o aktywności 22 U/cm³, pozyskanego ze szczepu grzyba z rodzaju *Trichoderma*, na proces fermentacji beztlenowej badanych odpadów. Stwierdziłem, że preparat enzymatyczny wprowadzany bezpośrednio do komory fermentacyjnej powodował wzrost wydajności biogazu o ok. 9,5%, w stosunku do fermentacji odpadów bez dodatku enzymu. Wykazałem, że korzystniejszym rozwiązaniem jest przeprowadzenie wstępnej enzymatycznej hydrolizy odpadów i poddanie uzyskanych hydrolizatów fermentacji beztlenowej. Dowiodłem również, że temperatura, w której przeprowadza się proces

wstępnej hydrolizy odpadów, ma istotny wpływ na ilość i skład uzyskiwanego biogazu. Najwyższą wydajność biogazu odnotowano poddając odpady wstępnej hydrolizie w temperaturze 50°C, była ona o około 30% wyższa niż bez wstępnej obrobki enzymatycznej.

Wyniki zrealizowanych badań dotyczących wpływu opracowanego preparatu enzymatycznego na intensyfikację wydajności fermentacji beztlenowej przedstawiłem w czasopismach międzynarodowych, doniesieniu na konferencji zagranicznej, doniesieniu na konferencji międzynarodowej oraz w postaci zgłoszenia patentowego.

Publikacje

1. **Ziemiński K.**, Frąc M., 2012. Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass. Transformations, stages and microorganisms. African Journal of Biotechnology, 11 (18), 4127-4139.
2. Frąc M., **Ziemiński K.**, 2012. Methane fermentation process for utilisation of organic waste. International Agrophysics, 26, 1, 317-330.
3. Gryta A., Oszust K., Brzezińska M., **Ziemiński K.**, Bilińska-Wielgus N., Frąc M., 2017. Methanogenic community composition of organic waste mixture in an anaerobic bioreactor. International Agrophysics. 31, 327-338.
4. Oszust K., Pawlik A., Grzegorz J., **Ziemiński K.**, Cyran M., Siczek A., Gryta A., Bilińska-Wielgus N., Frąc M., 2017. Characterization and Influence of the Enzymatic Metaferm Biopreparation for Biogas Yield Enhancement. BioResources.12, 3, 6187-6206.

Konferencje

1. Frąc M., **Ziemiński K.**, Oszust K., Gryta A., Bilińska N., 2013. Biodegradation of organic waste in the anaerobic digestion – benefits of the co-fermentation process. Book of abstracts of 21st International Symposium on Environmental Biogeochemistry, Wuhan, China 13-18 October 2013. Materiały s.73.
2. Frąc M., Gryta A., Oszust K., Bilińska N., **Ziemiński K.**, 2014. Analiza metagenomiczna genu 16S rDNA wykorzystująca sekwencjonowanie nowej generacji w ocenie składu konsorcjum bakterii występujących w masie fermentacyjnej. XLVIII Międzynarodowe Sympozjum „Mikrobiologia a Ochrona Środowiska”. Warszawa, 07-10.09.2014. Materiały s. 32. (III miejsce w konkursie na najlepszy poster, prezentowany podczas konferencji).

Zgłoszenie patentowe

1. Frąc M., Gryta A., Oszust K., Siczek A., Bilińska N., **Ziemiński K.**, Pawlik A., Janusz G.. Zgłoszenie patentowe: P.409138. 08 sierpień 2014 Nowy szczep grzyba *Trichoderma atroviride* G79/11, sposób otrzymywania biopreparatu do fermentacji metanowej odpadów organicznych z wykorzystaniem tego szczepu oraz sposób prowadzenia fermentacji metanowej odpadów organicznych z zastosowaniem biopreparatu.

11.8. Korozja biologiczna w liniach przesyłowych gazu ziemnego

Zdobytą wiedzę i doświadczenie związane z identyfikacją mikroorganizmów bytujących w środowisku biogazu starałem się wykorzystać nawiązując w roku 2011 współpracę z Mazowiecką Spółką Gazowniczą Sp.z.o.o.. Zaowocowała ona uzyskaniem zgody na rozpoczęcie badań dotyczących występowania korozji mikrobiologicznej w liniach

przesyłowych gazu ziemnego oraz ocenę wpływu stosowanych powłok antykorozyjnych na biodegradację.

Wstępne badania wykazały obecność mikroorganizmów wewnątrz linii przesyłowych gazu ziemnego. W pobranych próbach zidentyfikowano obecność bakterii należących m.in. do rodziny *Enterobacteriaceae*, *Peptococcaceae*, *Clostridiaceae*. Przeprowadzona identyfikacja genetyczna pozwoliła na scharakteryzowanie bakterii wchodzących w skład konsorcjum mikroorganizmów bytujących w gazociągach. Wśród dominujących zidentyfikowano *Desulfosporosinus meridiei* czy *Ralstonia insidiosa*. Jednocześnie wykazałem, że gatunek *Ralstonia insidiosa* był również najobficiej występującym mikroorganizmem w biofiltrach wykorzystywanych do odsiarczania biogazu.

Planowane dalsze badania będą związane z określeniem składu konsorcjum mikroorganizmów i ich naturalnej selekcji w zależności od rodzaju transportowanego gazu oraz rodzaju materiału z którego wykonano gazociągi. Zagadnienie to jest także tematem rozprawy doktorskiej, w której pełnię rolę promotora pomocniczego (załącznik 4, III. K. 2).

Wyniki badań przedstawiłem jako współautor artykułu w czasopiśmie krajowym oraz międzynarodowym, doniesieniach na konferencji międzynarodowej oraz na konferencji krajowej.

Publikacje

1. **Ziemiński K.**, Klimek L., Żakowska Z., Staniszevska A., 2012. Problemy biokorozji w liniach przesyłowych gazu ziemnego. Ochrona przed korozją Nr9s/A/2012, 45-50.
2. Staniszevska A., Kunicka-Styczyńska A., **Ziemiński K.**, 2017. Microbiological contamination of underground gas storage facilities and natural gas pipelines. Postępy Mikrobiologii. 56 (4), 381–388.

Konferencje

1. **Ziemiński K.**, Klimek L., Żakowska Z., Staniszevska A., 2012. Problemy biokorozji w liniach przesyłowych gazu ziemnego. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Rozkład i Korozja Mikrobiologiczna Materiałów Technicznych”. Łódź, 14-26.09. 2012.
2. **Ziemiński K.**, Klimek L., Staniszevska A., 2012. Korozja biologiczna. II Konferencja KOR-GAZ-NET. Słok, 7 - 9 marca 2012. Materiały s. 1-4.
3. Staniszevska A., Jastrzębska M., **Ziemiński K.**, 2017. The influence of the internal microbiome on the materials used for construction of the transmission natural gas pipelines in the Lodz Province. International Conference Energy Environment and Material Systems. Polanica Zdrój, 13-15. 09.2017.

12. Sumaryczne zestawienie dorobku naukowego

Jestem autorem lub współautorem 26 oryginalnych prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach zagranicznych i krajowych (w tym 12 w czasopismach z listy JCR), 2 publikacji przeglądowych opublikowanych w języku angielskim i 3 prac w czasopiśmie popularno-naukowym. Jestem autorem lub współautorem 42 doniesień prezentowanych na konferencjach i seminariach międzynarodowych oraz krajowych zamieszczonych

w materiałach konferencyjnych w tym 3 wystąpień ustnych na konferencjach międzynarodowych. Jestem również współautorem 1 międzynarodowego patentu, a także 5 międzynarodowych zgłoszeń patentowych oraz 3 zgłoszeń w polskim urzędzie patentowym. Jestem autorem 22 opracowań naukowych w formie raportów z realizacji projektów badawczych oraz 14 ekspertyz wykonanych zarówno dla firm międzynarodowych jak również o kapitale polskim. Kierowałem dwoma projektami badawczymi współfinansowanymi przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego. Brałem także udział w 5 projektach badawczych w roli wykonawcy.

Osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych przedstawiono w publikacjach o łącznej wartości współczynnika IF - 17,159* (IF 5 letni wynosi 22,136) oraz 200 pkt. MNiSW.

Sumaryczny *Impact Factor* wynosi - 23,557* (IF 5 letni 28,204) oraz 405 pkt MNiSW.

*) *Impact Factor* w roku ukazania się pracy lub 5-letni IF, jeżeli praca została opublikowana w latach 2016-2017.

Index Hirscha:

- **według bazy *Web of Science* wynosi 5, a suma cytowań 72 (bez autocytowań).**
- **według bazy *Scopus* wynosi 6, a suma cytowań 111 (bez autocytowań).**
- **według bazy *Publish of Perish* wynosi 6, a suma cytowań 211 (bez autocytowań).**

Miarą uznania dla prowadzonych przeze mnie badań było powierzenie mi do recenzji 23 publikacji w czasopismach międzynarodowych:

1. Waste Management (IF- 4,669)	5
2. Bioprocess and Biosystems, Engineering (IF- 2,028)	3
3. Bioresource Technology (IF- 6,102)	2
4. Chemical Engineering Journal (IF- 6,159)	1
5. Biotechnology for Biofuels) (IF- 5,203)	1
6. Journal of Industrial and Engineering Chemistry (IF- 4,421)	1
7. Journal of Industrial and Engineering Chemistry (IF- 3,949)	1
8. Energy & Fuels (IF- 3,282)	1
9. Process Biochemistry (IF-2,9641)	1

10. Engineering in Life (IF- 2,186)	1
11. International Journal of Applied Science and Engineering (IF- 2,14)	1
12. Grass and Forage Science (IF -2,008)	1
13. Waste and Biomass Valorization (IF- 1,555)	1
14. International Journal of Food Engineering (IF- 0,96)	1
15. Environmental Engineering and Management (IF- 0,795)	1
16. Environment Protection Engineering (IF- 0,652)	1

Zbiorcze zestawienie dorobku naukowego uwzględniając podział na poszczególne formy aktywności wraz z punktacją przedstawiono w załączniku 4.

13. Współpraca z przemysłem

Moja działalność naukowo- badawcza była i jest ściśle ukierunkowana na prowadzenie badań we współpracy z przedsiębiorstwami. Realizacja wspólnych projektów, grantów naukowo-badawczych, przyczyniła się nie tylko w istotnym stopniu do rozwoju nauki, ale także innowacyjnej gospodarki i wzrostu konkurencyjności firm.

W latach 1996-2017 wykonałem 37 projektów zleconych w tym 22 prace badawcze (załącznik 4 II. F,1-9,1-13.), a także 14 ekspertyz (załącznik 4,III. M. 1-14) dla podmiotów gospodarczych o kapitale polskim jak i zagranicznym. Ściśle współpracowałem z dziewięcioma oczyszczalniami ścieków (załącznik 4, III. F.1-9). Działania te stworzyły perspektywę nie tylko do prowadzenia badań w ramach tworzonych konsorcjów naukowo-przemysłowych, ale również do realizacji prac doktorskich oraz dyplomowych we współpracy z przedsiębiorstwami. Prace badawcze wykonywane dla wielu zakładów o różnorodnym profilu produkcji, umożliwiły mi poszerzanie wiedzy naukowej oraz dały możliwość jej efektywnego zastosowania w praktyce przemysłowej.

13.1. Prace badawcze zrealizowane we współpracy z firmami o kapitale zagranicznym

Współpracę badawczą z firmami o kapitale zagranicznym rozpocząłem w roku 1998 prowadząc z firmą Cargill, badania nad opracowaniem założeń technologicznych modernizacji zakładowej oczyszczalni ścieków oraz rozeznania możliwości zastosowania do tego celu procesu fermentacji beztlenowej i technologii membranowych. Wykazałem, że korzystniejsze jest oczyszczanie ścieków o wysokim ładunku substancji organicznej w warunkach beztlenowych. Ten sposób biodegradacji ścieków umożliwił zmniejszenie

ładunku substancji organicznej o ok. 60% oraz miał pozytywny wpływ na kolejny, tlenowy stopień ich oczyszczania z wykorzystaniem osadu czynnego. Jako końcowy etap opracowanej technologii oczyszczania zaproponowałem zastosowanie procesu nanofiltracji. Takie rozwiązanie dawało możliwość powtórnego wykorzystania uzyskanej wody do wybranych procesów produkcyjnych. Opracowałem również koncepcję usprawnienia pracy istniejącej oczyszczalni zakładowej proponując technologię AO (ang. Anoxic-Oxic). Badania wykazały, że rozwiązanie to poprawiało w istotny sposób efekty oczyszczania, powodowało również ograniczenie wzrostu bakterii nitkowatych (załącznik 4, II. F.2).

W 2001 roku we współpracy z firmą Master Foods prowadziłem badania mające na celu określenie wpływu ścieków zakładowych na działanie sekwencyjnych biologicznych reaktorów (SBR) (załącznik 4, II. F.5). Efektywność pracy tych urządzeń jest uzależniona zarówno od składu doprowadzanych ścieków, jak również precyzyjnego ustalenia czasu ich przetrzymania podczas realizacji poszczególnych faz oczyszczania. W wyniku przeprowadzonych badań dokonałem optymalizacji pracy reaktorów. Określiłem graniczne obciążenia układu ładunkiem substancji organicznej, dobrałem optymalne czasy zatrzymania ścieków w poszczególnych etapach oczyszczania. Dokonałem oceny wpływu przeprowadzonych zmian na morfologię osadu czynnego.

Ważnym doświadczeniem badawczym, jak i naukowym była współpraca z dwoma międzynarodowymi zakładami papierniczymi International Paper Kwidzyn (załącznik 4, II. F.3) oraz Arctic Paper Kostrzyn (załącznik 4, II. F.6). We współpracy z tymi firmami prowadziłem badania nad określeniem wpływu zmiennego składu ścieków papierniczych na mikroorganizmy osadu czynnego wraz z oceną uzyskiwanych efektów oszyszczania. W firmie Arctic Paper Kostrzyn funkcjonuje jedno z niewielu rozwiązań stosowanych w Polsce do biologicznego oczyszczania ścieków opartych na technologii BAS (ang. *Biofilm Activated Sludge*).

W prowadzonych badaniach określiłem wpływ mechanicznego oddzielenia zawiesin obecnych w ściekach na obniżenie substancji organicznej. Wykazałem, że zastosowanie procesu koagulacji pozwala zmniejszyć ładunek substancji organicznej o 76%. Stwierdziłem w badanych ściekach niekorzystną proporcję C:N oraz C:P, co ograniczało rozwój mikroorganizmów osadu czynnego. Korekta tych wartości wyraźnie intensyfikowała proces biodegradacji ścieków papierniczych.

Szczególnie interesujące były badania, które wykonałem dla International Paper Kwidzyn. W zakładzie tym funkcjonuje jedyna w Polsce oczyszczalnia, w której do napowietrzania mikroorganizmów osadu czynnego wykorzystuje się czysty tlen. Specyficzny skład mikroorganizmów tworzących osad czynny w tej oczyszczalni wymagał opracowania metodyki jego oceny. Określiłem podstawowe właściwości morfologiczne kłaczek osadu oraz dominujące grupy mikroorganizmów charakterystyczne dla tego typu oczyszczalni.

Badania te przyczyniły się do oceny pracy oczyszczalni ścieków na podstawie zmian konsorcjum mikroorganizmów tworzących osad czynny.

Moje wieloletnie kontakty z firmami zagranicznymi zaowocowały w 2008 współpracą z firmą Südzucker. Podjęty przeze mnie problem utylizacji wysłodków buraczanych doprowadził do opracowania i wdrożenia na skalę przemysłową technologii fermentacji beztlenowej tej lignocelulozowej materii. Prowadzone badania wykazały możliwość intensyfikacji tego procesu na drodze enzymatycznej lub hydrolizy termicznej, a także poprzez uzupełnienie składu wysłodków dodatkiem wywaru melasowego.

W tym roku, we współpracy z firmą Südzucker przystąpiłem do opracowania ważnego dla rozwoju tego przedsiębiorstwa tematu badawczego, jakim jest możliwość oczyszczania ścieków cukrowniczych i odcieku po procesie fermentacji beztlenowej. **Powierzenie mi kolejnego tematu badawczego przez tę międzynarodową firmę jest niewątpliwie wynikiem uznania, dla jakości prowadzonych przeze mnie prac badawczych, list od firmy (załącznik 4).**

13.2. Prace badawcze zrealizowane we współpracy z firmami polskimi

Współpracę z firmami o kapitale polskim rozpocząłem w roku 1994 prowadząc badania wspólnie ze Śląskimi Zakładami Rafineryjnymi. Zmierały one do określenia przydatności handlowych preparatów mikrobiologicznych do oczyszczania ścieków zakładowych. Prace realizowane w warunkach laboratoryjnych oraz przemysłowych wykazały, że ten sposób biodegradacji węglowodorów ropopochodnych może zapewnić obniżenie ich stężenia w ściekach o około 35%.

Kontakty z firmami „Wistom”, „Paula”, „Arpo” (załącznik 4, II. F.11), umożliwiły mi kontynuację i rozszerzenie tematyki badawczej podjętej w pracy doktorskiej. Prowadziłem prace zmierzające do określenia możliwości rozkładu w warunkach beztlenowych osadów ściekowych, odpadów owocowo - warzywnych oraz tłuszczów. Określiłem optymalne parametry procesu dla tego typu substratów, które zapewniały uzyskiwanie maksymalnej wydajności biogazu, list od firmy (załącznik 4). Doświadczenia te wykorzystałem podczas współpracy z Oczyszczalnią Ścieków w Zduńskiej Woli, dla której opracowałem technologię współfermentacji osadów ściekowych z odpadami tłuszczowymi, list od firmy (załącznik 4).

We współpracy z Miejską Oczyszczalnią Ścieków w Zgierzu prowadziłem w latach 2000 – 2004 badania, mające na celu zastosowanie fermentacji beztlenowej do przetwarzania odpadów miejskich, a także dezodoryzacji powietrza powstającego podczas kompostowania odpadów. Prace te związane były z planem budowy kompostowni dla miasta Zgierza.

Badania obejmujące eliminację uciążliwości zapachowej kontynuowałem również we współpracy z Cukrownią Wieluń. Odory powstające w wyniku przetrzymywania ścieków w lagunach są problemem dla wielu cukrowni. Opracowana przeze mnie technologia nie tylko znacząco ograniczyła powstawanie związków odorowych, ale również spowodowała obniżenie ładunku substancji organicznej oraz azotu amonowego.

Badania prowadzone we współpracy z jednym z największych zakładów koncentratów spożywczych Cykoria doprowadziły do opracowania i wdrożenia technologii oczyszczania ścieków zakładowych, umożliwiającej uzyskanie wskaźników pozwalających na ich bezpośrednie odprowadzanie do wód powierzchniowych, list od firmy (załącznik 4).

Dla jednego z największych producentów kabli w Polsce, zakładów Tele-Fonika Kable określiłem możliwość biologicznego oczyszczania ścieków pochodzących z procesu wulkanizacji kabli. Ustaliłem wpływ tego typu ścieków na pracę złożeń obrotowych.

Zdobytą wiedzę i doświadczenie wykorzystałem w badaniach, które prowadzę w Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi (GOŚ). Współpracę z tą firmą nawiązałem w roku 2002 realizując tematy badawcze związane z oceną przyczyn puchnięcia osadu czynnego. Zaowocowały one utworzeniem konsorcjum naukowo-badawczego oraz uzyskaniem w 2009 roku finansowania badań dotyczących opracowania metody biokonwersji zanieczyszczeń biogazu w obecności tlenowych form azotu. Uzyskany projekt współfinansowany był z funduszy Unii Europejskiej. Wyniki badań wykazały, że biogaz o wysokim stężeniu siarkowodoru może być z powodzeniem oczyszczany w biofiltrze z warstwą nawadnianą (ang. *trickling biofilters*). Istotnym problemem podczas energetycznego wykorzystania biogazu jest zawartość w nim nie tylko siarkowodoru, ale także lotnych siloksanów VMS (ang. *Volatile Methylosiloxanes*). Wykonane we współpracy z Instytutem Nafty i Gazu w Krakowie analizy potwierdziły możliwości usuwania tych związków na drodze biologicznej. W uruchomionej w GOŚ instalacji w skali półtechnicznej do biologicznego odsiarczania biogazu stwierdzono możliwość obniżenia stężeń, oktametylotrisiloksanu -L3, dekametylotetrasiloksanu- L4, heksametylocyklotrisiloksanu- D3 i dekametylocyklopentasiloksanu -D5. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość opracowania technologii jednoczesnego usuwania z biogazu siarkowodoru i siloksanów z wykorzystaniem biofiltru z warstwą nawadnianą. Umożliwia to opracowanie innowacyjnej i przełomowej technologii w zakresie oczyszczania biogazu, list od firmy (załącznik 4).

W 2016r. wspólnie z pracownikami Instytutu Agrofizyki PAN oraz Grupowej Oczyszczalni Ścieków powołałem konsorcjum naukowo-badawcze i aplikowałem do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju o finansowanie badań nt. „Opracowanie i wdrożenie w skali przemysłowej innowacyjnej technologii jednoczesnej biokonwersji siloksanów oraz siarkowodoru stanowiących zanieczyszczenie biogazu”. Wniosek, mimo pozytywnej oceny recenzentów nie został jednak w końcowej fazie oceny zarekomendowany do finansowania.

Ponieważ większość prowadzonych badań posiadała wartość gospodarczą, i mogła zostać wykorzystana w praktyce przemysłowej przez firmy konkurencyjne, informacje o wynikach prac były i są objęte klauzulą poufności i nie mogą zostać opublikowane w czasopiśmie naukowych. Jedynie częściowa zgoda firmy Südzucker umożliwiła mi szersze opublikowanie wybranych wyników prowadzonych prac badawczych dotyczących możliwości zastosowania fermentacji beztlenowej do odzysku energii z wysłoków.

14. Ekspertyzy

Po uzyskaniu stopnia doktora ważną częścią mojego rozwoju naukowego było opracowanie szeregu ekspertyz dla firm międzynarodowych, o kapitale polskim oraz władz samorządowych.

Współpracę z firmami o kapitale zagranicznym w zakresie opracowania ekspertyz rozpocząłem w 1996 roku przygotowując dla zakładów „Winiary” Nestle ekspertyzę, mającą na celu określenie sposobu zagospodarowania odpadów powstających na terenie zakładu (załącznik 4, III. M.3.). Dokonałem oceny ilościowej i jakościowej odpadów, zaproponowałem sposób ich zagospodarowania w świetle obowiązujących regulacji prawnych. Kontynuacją tych prac było powierzenie mi wykonania projektu przebudowy i modernizacji oczyszczalni zakładowej z uwzględnieniem budowy podczyszczalni ścieków (załącznik 4, III. M.6.). W przyjętym rozwiązaniu opracowałem wysoko efektywny proces usuwania związków węgla i azotu oraz zastosowanie flotacji, która była ostatnim etapem oczyszczania ścieków. Było to w tym czasie pionierskie podejście do oczyszczania ścieków przemysłowych. Wykonany projekt został wykorzystany do przeprowadzenia modernizacji zakładowej oczyszczalni ścieków.

W roku 2011 wykonałem dla firmy Südzucker ekspertyzę umożliwiającą wybór rozwiązań technologicznych dotyczących budowy biogazowni opartej na opracowanej przeze mnie technologii fermentacji beztlenowej wysłoków. Wskazałem na problemy eksploatacyjne, jakie mogą wystąpić w wyniku zastosowania określonych technologii. Wytypowałem najkorzystniejsze rozwiązanie umożliwiające efektywną fermentację tego materiału lignocelulozowego.

Do najważniejszych ekspertyz wykonanych dla firm krajowych zaliczyć mogę:

1. Ekspertyzę wykonaną w 2005 dla Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Ostrów Wielkopolski, oceniającą budowę oczyszczalni ścieków dla miasta Ostrowa Wielkopolskiego i gmin przyległych (załącznik 4, III. M.9.). W tym obszernym opracowaniu dokonałem weryfikacji i oceniłem poprawność założeń oraz rozwiązań technologicznych wybudowanej oczyszczalni dla miasta Ostrów

Wielkopolski. Ustaliłem możliwość osiągnięcia przez tę oczyszczanie założonych efektów technologicznych.

2. Ekspertyzy wykonane w roku 2009 oraz 2010 dla Zakładu Wodociągów i Kanalizacji Łódź. Ich celem było określenie wpływu wartości wskaźników zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych do urządzeń kanalizacyjnych Miasta Łodzi. Na podstawie charakterystyki sieci kanalizacyjnej oraz ilości i jakości wprowadzanych do urządzeń kanalizacyjnych ścieków, określiłem ich wpływ na pracę Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi. Wysoka ocena wykonanej ekspertyzy, list od firmy (załącznik 4), była powodem zlecenia mi kolejnego opracowania dotyczącego ustalenia wpływu ścieków pochodzących z punktów zlewnych na urządzenia kanalizacyjne oraz na skład ścieków miejskich, a także pracę GOŚ. Określiłem dopuszczalne wartości wybranych wskaźników zanieczyszczeń ścieków z punktów zlewnych, których przekroczenie może negatywnie wpływać na funkcjonowanie GOŚ (załącznik 4, III. M.10.M.11.).
3. Ekspertyzę wykonaną w 2011 dla Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Zduńskiej Woli określającą podatność ścieków przemysłowych na proces ich biodegradacji oraz wpływ na osad czynny w oczyszczalni ścieków w Zduńskiej Woli (załącznik 4, III. M.12). Na podstawie charakterystyki chemicznej ścieków powstających w poszczególnych zakładach produkcyjnych znajdujących się na terenie miasta oraz wykonanych testach minimalnego stężenia hamującego, dokonałem oceny wpływu ścieków przemysłowych na mikroorganizmy osadu czynnego, pracę oczyszczalni ścieków oraz uzyskiwane efekty oczyszczania. Wytypowałem rodzaje ścieków mających istotnie negatywny wpływ na pracę oczyszczalni, list od firmy (załącznik 4).

Wykonałem również szereg ekspertyz, które miały na celu określenie sposobu oczyszczania ścieków, ich wpływ na odbiornik oraz możliwość zagospodarowania powstających odpadów produkcyjnych (załącznik 4, III. M.1 - M.14).

Wiedza i doświadczenie zdobyte podczas opracowywania ekspertyz są ważną częścią mojego dorobku naukowego.

15. Współpraca z krajowymi i międzynarodowymi jednostkami naukowymi

Moja współpraca z jednostkami naukowymi datuje się od 1991 roku. W tym okresie w jednostce badawczej Tarchomińskich Zakładów Farmaceutycznych Polfa odbyłem

dwumiesięczny staż. Efektem było opracowanie metody oznaczania pozostałości antybiotyku w odcieku uzyskanym w wyniku oczyszczania ścieków po produkcji erytromycyny w procesie fermentacji beztlenowej.

Wiele prac badawczych, które zrealizowałem dotyczyło zastosowania nowych rozwiązań technologicznych w praktyce przemysłowej. Kontakty z firmą Nijhuis Industries (Holandia), wiodącym dostawcą innowacyjnych technologii oczyszczania ścieków, uzdatniania i dezynfekcji wód, nawiązałem w roku 1995. Umożliwiły mi poszerzenie wiedzy dotyczącej możliwości zastosowania procesu flotacji do oczyszczania ścieków przemysłowych, zapoznałem się także z nowoczesnymi rozwiązaniami stosowanymi w oczyszczaniu wód procesowych. W roku 1995 oraz 1996 uczestniczyłem w dwóch wyjazdach studyjnych do Textilfabrik in Chemnitz oraz Anheuser-Busch InBev GmbH Co.KG), podczas których zapoznałem się z nowoczesnymi rozwiązaniami technologicznymi w zakresie oczyszczania ścieków w przemyśle tekstylnym oraz spożywczym.

Zastosowanie wiedzy naukowej w praktyce przemysłowej było także impulsem do podjęcia współpracy z firmą AAT (Abwasser- Und Abfalltechnik) GmbH. Kontakty te oraz wyjazdy studyjne do biogazowni, które zostały zaprojektowane i zbudowane przez firmę ATT GmbH zaowocowały utworzeniem w 2015 roku konsorcjum naukowo przemysłowego oraz aplikowaniem o środki finansowe na realizację projektu badawczego nt „Innovative technology for bioconversion of agricultural and food industry waste” w ramach działania Horyzont 2020. Zaproponowana technologia będąca przedmiotem projektu składała się z szeregu innowacyjnych rozwiązań dotyczących zastosowania metod biotechnologicznych do oczyszczania biogazu, intensyfikacji produkcji biogazu poprzez wprowadzanie preparatów enzymatycznych wzbogacanych dodatkiem biostymulatorów wzrostu archeonów metanogennych wraz z nowatorskim sposobem optymalizacji jakości wsadu do fermentatora. Istotnym elementem rozwiązania była również hydrofitowa technologia odwadniania i stabilizacji osadów uwodnionych. Projekt pomimo wysokich ocen nie uzyskał jednak finansowania.

Od roku 2007 współpracuję z Katedrą Biotechnologii Środowiskowej Politechniki Śląskiej (zespół prof. dr hab. Beaty Cwaliny). Wynikiem tej współpracy był udział Pani Profesor od 2009 roku, w charakterze konsultanta w kierowanym przeze mnie projekcie pt. "Opracowanie nowatorskiej metody biokonwersji zanieczyszczeń biogazu w obecności tlenowych form azotu w skali przemysłowej".

Od 2014 współpracuję również z Katedrą Biotechnologii Środowiskowej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w zakresie badań genetycznych oraz interpretacji wyników metagenomicznych dotyczących biocenoz kolumn odsiarczających biogaz.

W wyniku współpracy z Instytutem Nafty i Gazu. Państwowy Instytut Badawczy, Kraków, nawiązanej w 2012 roku udowodniłem, że siloksany mogą być skutecznie usuwane z biogazu na drodze biologicznej. Wyniki tych badań mają istotne znaczenie dla rozwoju prac nad biokonwersją siloksanów, które stanowią istotne zagrożenie dla układów kogeneracji. Rezultaty tych prac były podstawą do powołania konsorcjum naukowo przemysłowego i aplikowania do Narodowego Centrum Badan i Rozwoju o finansowanie badań.

W latach 2011- 2013 współpracowałem z Wydziałem Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Badania dotyczyły określenia zależności zatrzymania cieczy (*hold-up*) od natężenia zraszania dla wypełnień, które wybrano jako nośniki błony biologicznej w biofiltrach do przemysłowego usuwania siarkowodoru z biogazu. Wynikiem tych badań było dokonanie zgłoszenia patentowego (załącznik 4, II. C.2.).

W 2009 nawiązałem współpracę z Instytutem Hodowli i Aklimatyzacji Roślin - Państwowy Instytut Badawczy w Radzikowie. Jej efektem było określenie zmian składu polisacharydów, kwasów uronowych oraz ligniny Klasona w wysłódkach buraczanych poddawanych hydrolizie termicznej oraz wspólna publikacja [B-3].

W 2011 rozpocząłem współpracę z Instytutem Agrofizyki PAN w Lublinie. Zakres współpracy obejmował badania podatności na proces fermentacji beztlenowej mieszanin odpadów rolno spożywczych. Określiłem wpływ hydrolizy termicznej oraz enzymatycznej na wydajność uzyskiwanego biogazu. Ustaliłem wpływ opracowanego w Instytucie Agrofizyki preparatu enzymatycznego na przebieg procesu fermentacji beztlenowej. Badania te realizowałem w ramach projektu nt. "Opracowanie innowacyjnego biopreparatu do optymalizacji procesu fermentacji metanowej odpadów organicznych" w którym byłem wykonawcą. Wyniki uzyskane w ramach projektu zostały opublikowane oraz zaprezentowane na konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym (załącznik 4, II. A.5.6. II. B. 9.10.).

Od 2015 roku współpracuję z Zakładem Technologii Papieru i Przetwórstwa Papierniczego Politechniki Łódzkiej. Współpraca dotyczy badań nad określeniem podatności hydrolizatów uzyskanych z różnych gatunków drzew na proces fermentacji beztlenowej i wydajności uzyskiwanego biogazu.

16. Działalność dydaktyczna

Od 1984 roku do chwili obecnej prowadzę lub prowadziłem zajęcia dydaktyczne dla studentów wydziału: Biotechnologii i Nauk o Żywności, kierunku Biotechnologia, Technologia Żywności i Żywienia Człowieka, Ochrona Środowiska oraz Wydziału Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska a także międzywydziałowego Kolegium Towaroznawstwa PŁ,

Opracowałem nowe programy nauczania dla następujących przedmiotów:**Lata 1993 - 2003**

Biotechnologia w ochronie środowiska - wykład dla studentów kierunku Biotechnologia Środowiska

Technologia oczyszczania ścieków - wykład dla studentów kierunku Ochrony Środowiska

Ochrona środowiska wykład dla studentów wydziału:

- Chemii Spożywczej i Biotechnologii (obecnie Biotechnologii i Nauk o Żywności)
- Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

wykłady fakultatywne:

Ekosystem osadu czynnego dla studentów kierunku Biotechnologia Środowiska

Mikroflora osadu czynnego – dla studentów kierunku Ochrona Środowiska

W latach 2003 – 2017 opracowałam nowe programy nauczania dla następujących przedmiotów

- Gospodarka wodno ściekowa w zakładach przemysłu spożywczego - kierunek Technologia Żywności i Żywnienie Człowieka, 15 godzin wykładów i 45 godzin zajęć laboratoryjnych.
- Technologia oczyszczania wody i ścieków – kierunek Biotechnologia Środowiska, 45 godzin wykładów i 51 godzin zajęć laboratoryjnych.
- Aparatura w ochronie środowiska- kierunek Ochrona Środowiska, 30 godzin wykładów
- Mikrobiologiczne aspekty w ochronie środowiska- kierunek Biotechnologia Środowiska, 8 godzin – projekt.
- Ekotechnologie - międzywydziałowe Kolegium Towaroznawstwa, wykład 15 godzin

wykład fakultatywny - Gospodarka odpadami niebezpiecznymi - studia I stopnia, kierunek Biotechnologia Środowiska, wykład 15 godzin, ćwiczenia 15 godzin.

W latach 1993-2016 byłem opiekunem 42 dyplomowych prac magisterskich i 44 prac inżynierskich kierunku Biotechnologia, Ochrona Środowiska, w tym jednej pracy dla kierunku Science and Technology, Centrum Kształcenia Międzynarodowego (w języku angielskim) oraz 4 prac końcowych, słuchaczy Studiów Podyplomowych „Mikrobiologia, Higiena i Jakość w Przemśle” oraz Postęp, technologia i jakość w przemyśle cukrowniczym”. Byłem recenzentem 11 prac inżynierskich (w tym jednej w języku angielskim) oraz 5 prac magisterskich. Wielokrotnie byłem członkiem komisji na egzaminach inżynierskich i magisterskich. Byłem opiekunem 2 prac wykonywanych w zagranicznych jednostkach

naukowch Alborg University Department of Life Science, Section of Environmental Engineering Denmark oraz University of Aveiro, Portugal. Byłem także, opiekunem naukowym studentki z Francji, uczestniczącej w programie Erasmus oraz oceniałem wykonaną w czasie jej pobytu pracę zaliczającą Biotechnology Project. Jestem obecnie promotorem pomocniczym przewodu doktorskiego nt. „Deterioracja materiałów stosowanych do budowy linii przesyłowych gazu ziemnego przez mikroorganizmy autochtoniczne tych obiektów”.

Za osiągnięcia w działalności dydaktyczno-wychowawczej i naukowej w latach 1984-2016 otrzymałem liczne nagrody JM Rektora Politechniki Łódzkiej. W roku 2011 zostałem odznaczony Srebrnym Medalem za Długoletnią Służbę, a w roku 2013 otrzymałem odznakę Zasłużony dla Politechniki Łódzkiej.

17. Działalność organizacyjna, działalność popularyzująca naukę

W trakcie mojej pracy zawodowej realizowałem wiele zadań organizacyjnych i popularyzujących naukę na rzecz Uczelni i Wydziału. Będąc członkiem wydziałowej komisji ds. współpracy z przemysłem (1993-2008), dążyłem do upowszechnienia partnerskiego modelu współpracy świata nauki i biznesu. Byłem inicjatorem oraz przewodniczącym komitetu organizacyjnego

- **Symposium Naukowo Technicznego nt. Metody i Technologie Oczyszczania Ścieków Przemysłowych. Kaziemierz Dolny. 06-08.05. 1998.**

- **Konferencji nt. Biologiczne oczyszczanie biogazu. Łódź 16. 02. 2010.**

W wyniku mojej wieloletniej owocnej współpracy z Grupową Oczyszczalnią Ścieków podczas tej konferencji nastąpiło uroczyste podpisanie umowy o wzajemnej współpracy pomiędzy Wydziałem Biotechnologii i Nauk o Żywności a Grupową Oczyszczalnią Ścieków w Łodzi.

- **Konferencji nt. Technologie oczyszczania biogazu. Łódź. 25. 05. 2012.**

Organizacja we współpracy z Grupową Oczyszczalnią Ścieków w Łodzi.

- **Konferencji nt. Energetyczne wykorzystanie biogazu w województwie łódzkim. 19.09.2013.**

Konferencja ta była powiązana z odbywającym się w dniach 16 – 20 września 2013 Bioeconomy Week.- II Międzynarodowym Kongresem Bioekonomii. Honorowy patronat nad konferencją objął Marszałek Województwa Łódzkiego

- **Symposium Ochrona własności intelektualnej w pracach badawczych – Łódź. 11.07. 2013**

W ramach działalności upowszechniającej naukę byłem inicjatorem oraz organizatorem odbywających się w Instytucie Technologii Fermentacji i Mikrobiologii szeregu

szkoleń dla pracowników przemysłu: nt. Jakość wody w przemyśle (2000, 2003), Metody identyfikacji mikroorganizmów powodujących puchnięcie osadu czynnego (2004-2005), Technologie oczyszczania ścieków (2005-2006). W szkoleniach tych brałem również czynny udział jako wykładowca. Od 2009 roku jestem wykładowcą na studiach podyplomowych, nt. Mikrobiologia, higiena i jakość w przemyśle, a od 2016 roku prowadzę także wykłady na studiach podyplomowych nt. „Postęp, technologia i jakość w przemyśle cukrowniczym”. Brałem czynny udział w konferencji popularno naukowej „Woda dla życia” która odbywała się w ramach Łódzkich Dni Wody. Łódź 17-19.06.2005. W 2012 reprezentowałem Politechnikę Łódzką na V Międzynarodowym Europejskim Forum Gospodarczym, podczas którego, w panelu dyskusyjnym wypowiadałem się na tematy związane z rozwojem odnawialnych źródeł energii.

W latach 1985-2004 uczestniczyłem w egzaminach wstępnych na Politechnikę Łódzką. Byłem także 4-krotnie obserwatorem z ramienia Politechniki Łódzkiej na egzaminach maturalnych łączonych z egzaminem wstępnym. Brałem także udział w akcjach promujących Politechnikę Łódzką w szkołach średnich. W latach 1995–1998, byłem zastępcą opiekuna roku studiów dziennych na kierunku Biotechnologia. Od 1993 do 1996 byłem także zastępcą przewodniczącego wydziałowej komisji ds. praktyk. W latach 1996--2007 byłem członkiem wydziałowej komisji dydaktycznej dla kierunku Ochrona Środowiska.

W ramach działalności związanej z podnoszeniem jakości kształcenia organizowałem wielokrotnie wycieczki dydaktyczne do oczyszczalni ścieków oraz zakładów przemysłowych. Byłem pomysłodawcą i utworzyłem stanowiska dydaktyczne do prowadzenia procesu fermentacji beztlenowej, oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego oraz biofiltracji.

Utworzyłem od podstaw specjalistyczne laboratorium Ochrony Środowiska. Koordynowałem zarówno prace remontowo - budowlanymi jak również przygotowywałem specyfikacje przetargowe, które umożliwiły zakup, ze środków pozyskanego przeze mnie projektu, nowoczesnej aparatury naukowo-badawczej o wartości ok. 1 mln zł. Pozwala to na prowadzenie badań i analiz zgodnie z obowiązującymi standardami światowymi.

Brąłem czynny udział w organizacji obchodów 60-lecia Politechniki Łódzkiej. W ramach obchodów 70 lecia Politechniki Łódzkiej, w zorganizowanym z tej okazji konkursie „Nauka się Opłaca”, opracowany i kierowany przeze mnie projekt nt. „Opracowanie nowatorskiej metody biokonwersji zanieczyszczeń biogazu w obecności tlenowych form azotu w skali przemysłowej”, znalazł się w gronie 3 projektów badawczych, które zostały uznane za ważne dla rozwoju oraz budowy pozytywnego wizerunku Politechniki Łódzkiej, co znalazło również swój wyraz w specjalnym wydaniu czasopisma The Warsaw Voice.

Krzysztof Ziemiński

