

**Autoreferat z opisem dorobku i osiągnięć naukowych
związanych z postępowaniem habilitacyjnym**

Dr inż. Sebastian Borowski

Politechnika Łódzka
Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności

1. Dane podstawowe

Imię i nazwisko: Sebastian Borowski
Miejsce zatrudnienia: Politechnika Łódzka
Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności
Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii
ul. Wólczańska 171/173
90-924 Łódź

Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

wrzesień 1996 magister inżynier
Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, kierunek: Inżynieria Środowiska
Specjalność: Urządzenia Sanitarne
Praca magisterska: „Ocena oddziaływania na środowisko składowiska odpadów komunalnych dla m.Łodzi w Pałczewie”.
Kierujący pracą: dr hab. Tadeusz Górski, prof. PL

grudzień 2001 doktor nauk technicznych w zakresie Technologii chemicznej
Politechnika Łódzka, Wydział Chemii Spożywczej i Biotechnologii (obecnie Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności)
Praca doktorska: „Stabilizacja mieszanych osadów z oczyszczalni ścieków miejskich”
Promotor: prof. dr hab. Józef Stanisław Szopa

Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

grudzień 2001-grudzień 2002 Politechnika Łódzka, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii
asystent

styczeń 2003-do chwili obecnej Politechnika Łódzka, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii
adiunkt

2. Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 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.) jest cykl publikacji naukowych.

Tytuł osiągnięcia naukowego, które przedstawiam do oceny:

Kofermentacja odpadów organicznych z produkcji rolno-spożywczej i gospodarki komunalnej z osadami ściekowymi

Wyniki badań zostały zebrane i opisane w jednolitej cyklu pięciu publikacji:

Autor	Indywidualny wkład	Udział %
Sebastian Borowski	Koncepcja pracy, wiodący udział w planowaniu eksperymentów, przeprowadzenie badań, opracowanie wyników, wiodący udział w przygotowaniu publikacji, autor korespondencyjny.	70
Laurence Weatherley	Pomoc w zaplanowaniu eksperymentów, pomoc w interpretacji wyników, udział w przygotowaniu publikacji oraz korekta językowa manuskryptu.	30

H2. Borowski S., Domański J., Weatherley L. 2014. Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge. Waste Management 34: 513-521.

IF=3,22 (35 pkt. MNiSW)

Autor	Indywidualny wkład	Udział %
Sebastian Borowski	Koncepcja pracy, zaplanowanie eksperymentów, przeprowadzenie badań, opracowanie wyników, wiodący udział w przygotowaniu publikacji, autor korespondencyjny.	70
Jarosław Domański	Pomoc w opracowaniu koncepcji pracy, udział w badaniach.	20
Laurence Weatherley	Pomoc w interpretacji wyników, udział w przygotowaniu publikacji oraz korekta językowa manuskryptu.	10

H3. Borowski S. 2015. Co-digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. *Journal of Environmental Management* 147:87-94.

IF_{5-letni}=3,895 (35 pkt. MNiSW)

Autor	Indywidualny wkład	Udział %
Sebastian Borowski	Koncepcja pracy, za planowanie eksperymentów, przeprowadzenie badań, opracowanie wyników, wiodący udział w przygotowaniu publikacji, autor korespondencyjny.	100

H4. Borowski S., Kucner M. 2015. Co-digestion of sewage sludge and dewatered residues from enzymatic hydrolysis of sugar beet pulp. *Journal of the Air & Waste Management Association* 65: 1354–1364.

IF_{5-letni}=1,56 (20 pkt. MNiSW)

Autor	Indywidualny wkład	Udział %
Sebastian Borowski	Koncepcja pracy, zaplanowanie eksperymentów, udział w przeprowadzeniu badań, opracowanie wyników, przygotowanie publikacji, autor korespondencyjny.	80
Marcin Kucner	Udział w przeprowadzeniu badań, pomoc w opracowaniu wyników badań.	20

H5. Borowski S., Kubacki P. 2015. Co-digestion of pig slaughterhouse waste with sewage sludge. *Waste Management* 40: 119-126.

IF_{5-letni}=3,522 (35 pkt. MNiSW)

Autor	Indywidualny wkład	Udział %
Sebastian Borowski	Koncepcja pracy, zaplanowanie eksperymentów, udział w przeprowadzeniu badań, opracowanie wyników, przygotowanie publikacji, autor korespondencyjny.	80
Przemysław Kubacki	Udział w przeprowadzeniu badań oraz pomoc w opracowaniu wyników.	20

Powyższe publikacje zostały zebrane w *Załączniku 4*, natomiast oświadczenia współautorów odnośnie ich udziału w powstawaniu wspólnych publikacji stanowiących jednotematyczny cykl zostały zamieszczone w *Załączniku 5*.

Osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych zostało przedstawione w publikacjach o łącznej wartości współczynnika **IF = 17,236** (170 pkt. MMiSW).

Pozostałe osiągnięcia naukowe zostały przedstawione w publikacjach o wartości współczynnika IF = 19,319 (296 pkt. MMiSW)

Sumaryczny *Impact Factor* mojego dorobku publikacyjnego wynosi 36,557.

Łączna liczba punktów zgodnie z kryteriami MNiSW wynosi 466 pkt.

Wartość Indeksu Hirscha wg bazy Web of Science wynosi 5, zaś liczba cytowań 90 (bez autocytowań).

Według bazy Scopus, wartość Indeksu Hirscha wynosi 5, zaś liczba cytowań 89 (bez autocytowań).

3. Omówienie osiągnięć badawczych przedstawianych do oceny

Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2013 r., poz. 21 z późn. zm.) definiuje odpad jako każdą substancję lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest obowiązany. W myśl ustawy, odpadami są więc odpady komunalne, odpady zielone czy odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych. Osobną grupę stanowią osady ściekowe, różniące się znacząco składem fizykochemicznym, właściwościami i sposobami zagospodarowania od pozostałych odpadów. Ustawa definiuje również odpady ulegające biodegradacji, rozumiane jako te, które ulegają rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów. Jednakże, cytowane przepisy nie mają zastosowania do większości naturalnych substancji biodegradowalnych pochodzących z produkcji rolniczej lub leśnej, które podlegają pod inne regulacje prawne, w tym Ustawę z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2015 r., poz. 625) oraz Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 r. określające przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego.

Wobec tak skomplikowanego podziału, w przedstawionym osiągnięciu naukowym **odpady organiczne** definiuję jako odpady z produkcji rolno-spożywczej oraz gospodarki komunalnej ulegające biodegradacji, zarówno w warunkach tlenowych jak i beztlenowych, bez względu na ich przyporządkowanie prawne, jednakże nie zaliczam do tej grupy osadów ściekowych. Odpadami organicznymi opisywanymi w dalszej części niniejszego opracowania będą więc odchody zwierząt hodowlanych (gnojowica trzody chlewnej oraz pomiot kurzy), odpady poubojowe, odwodnione wysłodki buraczane po hydrolizie oraz organiczna frakcja odpadów komunalnych. Natomiast osadami ściekowymi są produkty uboczne oczyszczania ścieków wydzielane w osadnikach wstępnych i wtórnych. Zarówno odpady organiczne jak i osady ściekowe stanowią znaczną uciążliwość dla środowiska oraz zagrożenie sanitarne i muszą być unieszkodliwiane.

Odpady organiczne, którymi zajmowałem się w opisywanych badaniach, charakteryzują się zmiennym składem fizykochemicznym, w tym niekorzystnym bilansem C/N, co opisuję w dalszych częściach opracowania. Z drugiej jednak strony, wysoka zawartość związków organicznych sprawia, iż odpady te stanowią atrakcyjny materiał do produkcji biogazu, pod warunkiem przeprowadzenia korekty składu chemicznego poprzez zmieszanie z innymi odpadami i kofermentację.

Proces kofermentacji polega na beztlenowym przetwarzaniu co najmniej dwóch składników (odpadów), z których jeden składnik stanowi zwykle 50% lub więcej udziału w mieszaninie.

Poza poprawą bilansu składników organicznych i biogennych (proporcji C/N), kofermentacja daje możliwość wspólnego przetwarzania odpadów o różnej strukturze, uwodnieniu czy zawartości substancji potencjalnie toksycznych oraz pozwala na lepsze wykorzystanie dostępnej objętości komór fermentacyjnych. Do zalet zalicza się również intensyfikację produkcji biogazu, wyższy stopień rozkładu substancji organicznych oraz często lepsze właściwości produktu pofermentacyjnego (Alvarez i wsp. 2010; Esposito i wsp. 2012; Jędrzcak 2007; Silvestre et al. 2015; Shah et al., 2015).

Doświadczenie zdobyte w czasie wieloletniej współpracy z miejskimi oczyszczalniami ścieków woj. łódzkiego, m.in. w Łodzi, Piotrkowie Trybunalskim, Tomaszowie Mazowieckim, Zgierzu i Kutnie, a także studia literaturowe i badania prowadzone w trakcie doktoratu i później, zwróciły moją uwagę na szczególne cechy osadów ściekowych, jako uniwersalnego substratu do kofermentacji z innymi odpadami organicznymi:

- osady ściekowe charakteryzują się stosunkowo dużą homogenicznością i uwodnieniem, co sprawia, że mogą stanowić składnik mieszaniny, który rozcieńcza bardziej zagęszczone odpady organiczne, takie jak pomiot kurzy, wysłodki, kiszunka kukurydziana, czy odpady komunalne;
- osady ściekowe charakteryzują się relatywnie wysoką zawartością pierwiastków biogennych, niezbędnych do wzrostu bakterii i archeonów. Jednocześnie, podczas fermentacji beztlenowej osadów zwykle nie obserwuje się inhibicji metanogenezy spowodowanej podwyższonymi stężeniami amoniaku, powstającego z rozkładu związków organicznych, głównie białek;
- osady ściekowe są podatne na proces fermentacji beztlenowej, a uzysk metanu wynosi około 200-300 dm³CH₄/kg suchej masy organicznej (s.m.o.) (Appels i wsp. 2008; Athanasoulia i wsp. 2012; Bolzonella i wsp. 2012). Jednocześnie, proces fermentacji beztlenowej osadów przebiega bez większych zakłóceń, a rozruch instalacji biogazowych jest relatywnie krótki;
- dobre właściwości buforujące osadów umożliwiają okresowe wprowadzanie w ich strumień innych odpadów organicznych bez większych zakłóceń procesu fermentacji, co jest korzystne zarówno z punktu widzenia oczyszczalni jak i zewnętrznego dostawcy

odpadów, zwłaszcza w przypadku tych podmiotów, które dostarczają odpady nieregularnie;

- osady ściekowe z większości krajowych oczyszczalni charakteryzują się niskimi zawartościami metali ciężkich i innych substancji toksycznych;

Obecnie w kraju funkcjonuje 96 instalacji biogazowych o łącznej mocy elektrycznej 57,9 MW zlokalizowanych przy oczyszczalniach ścieków (Krupa 2015). Większość tych instalacji jest przewymiarowana i niedociążona, co daje możliwość ich wykorzystania do produkcji biogazu z odpadów organicznych zmieszanych z osadami ściekowymi na drodze kofermentacji.

Teza badań zrealizowanych w ramach osiągnięcia naukowego, które przedstawiam do oceny:

Zamierzeniem moich badań było wykazanie, iż odpady organiczne pochodzenia rolnospożywczego i komunalnego, które samodzielnie są trudne do fermentacji, można zmieszać z osadami ściekowymi i z powodzeniem poddawać kofermentacji w stabilnych warunkach uzyskując wysoką produkcję biogazu.

W szczególności, kofermentacja odpadów organicznych z osadami ściekowymi przynosić może następujące korzyści:

- wykorzystanie istniejących, przewymiarowanych komór fermentacyjnych w komunalnych oczyszczalniach ścieków do kofermentacji, zwiększenie ich efektywności oraz wyższe przychody dla oczyszczalni;
- zwiększenie potencjału produkcji biogazu bez konieczności budowy nowych instalacji biogazowych;
- ograniczenie strumienia odpadów organicznych trafiających na składowiska lub do instalacji przetwarzających te odpady w sposób energochłonny, drogi bądź uciążliwy dla środowiska;
- możliwość utylizacji odpadów w sposób przyjazny dla środowiska;

3.1. Charakterystyka osadów ściekowych wykorzystanych do badań

Osady ściekowe, które wykorzystywałem do badań, pobierane były z oczyszczalni ścieków w Łodzi oraz Kutnie.

Grupowa Oczyszczalnia Ścieków (GOŚ) w Łodzi to obecnie jeden z największych tego typu obiektów w Polsce, o średniej przepustowości 195 tys m³ ścieków/d oraz wydajności ponad 1 mln. RLM (Równoważna Liczba Mieszkańców). Natomiast obiekt w Kutnie obsługuje 20 tys. m³ ścieków/d oraz 130 tys. RLM. Oba obiekty są reprezentatywne dla kraju, gdyż stosują typowe rozwiązania technologiczne wykorzystywane w innych oczyszczalniach, w tym technologię osadu czynnego z biologicznym usuwaniem związków azotu i fosforu. Szczegółowa charakterystyka osadów ściekowych z GOŚ w Łodzi została przedstawiona w publikacjach H1, H2 oraz H4, natomiast osady z GOŚ w Kutnie zostały opisane w publikacjach H3 i H5.

Osady z Grupowej Oczyszczalni Ścieków (GOŚ) w Łodzi stanowiły mieszaninę osadu wstępnego oraz czynnego nadmiernego w średniej proporcji wagowej 1 : 1. Osady te były zagęszczone do około 5% suchej masy, a udział substancji organicznej wynosił blisko 75 % s.m. Stwierdziłem wysoką zawartość azotu i fosforu, tj. odpowiednio 5,8-6,8 % s.m. oraz 2,5-3,2 % s.m. Tak wysokie stężenia azotu, a zwłaszcza fosforu można wiązać z technologią oczyszczania ścieków w tej oczyszczalni, w której wykorzystuje się biologiczne usuwanie związków biogenych w komorach osadu czynnego wspomagane dodatkowo chemicznym strącaniem fosforanów. Azot i fosfor są w dużym stopniu wbudowywane w biomasę mikroorganizmów tworzących osad czynny, który sedymentuje w osadniku wtórnym, a jego część jest codziennie odprowadzana jako osad nadmierny do dalszej przeróbki. Dodatkowo, część fosforu jest usuwana wraz z osadem polkoagulacyjnym, który również wydzielany jest w osadniku wtórnym. Osady z GOŚ w Łodzi charakteryzowały się ponadto relatywnie niską zawartością metali (średnio 6,38 gFe/kg s.m., 855 mgZn/kg s.m., 301 mgCu/kg s.m., 82 mgPb/kg s.m., 42 mgCd/kg s.m.). Natomiast liczebność bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae* była typowa dla tego rodzaju osadów i wynosiła 5×10^7 - 17×10^7 jtk/gs.m. W osadach nie stwierdzono obecności bakterii z rodzaju *Salmonella*.

Oczyszczalnia ścieków w Kutnie również wykorzystuje technologię osadu czynnego ze zintensyfikowanym usuwaniem związków azotu i fosforu, jednak obiekt ten nie posiada osadnika wstępnego, a zatem cały osad wydzielany jest w osadniku wtórnym. Z tego powodu nie można określić jak duże udziały stanowią osad wstępny i wtórny w mieszaninie odprowadzanej z urządzeń do oczyszczania ścieków. Pod względem składu

fizykochemicznego, osady z GOŚ w Kutnie były zagęszczane do około 15% s.m., a udział substancji organicznej w suchej masie przekraczał 82%. Wysoka zawartość substancji organicznej w osadach może być spowodowana dużym udziałem ścieków socjalno-bytowych doprowadzanych do oczyszczalni i jednocześnie niskim udziałem ścieków przemysłowych. Natomiast duże zagęszczenie osadów wiąże się z zastosowaną technologią w badanym obiekcie, która polega na zagęszczaniu i bezpośrednio następującym po nim odwadnianiu osadów. Jest to spowodowane brakiem urządzeń do biologicznej stabilizacji osadów, a zatem cały osad jest odwadniany i poddawany wapnowaniu. Podobnie jak w przypadku osadów z GOŚ w Łodzi, również osady z oczyszczalni w Kutnie charakteryzowały się generalnie niskimi stężeniami metali ciężkich (średnio 947 mgZn/kg s.m., 343 mgCu/kg s.m., 59 mgPb/kg s.m., 32 mgCd/kg s.m.), natomiast zwraca uwagę wysoka zawartość azotu (7,1-7,4% s.m.) i fosforu (2,4-2,5 % s.m.). Za wysoką koncentrację związków biogenych w osadach odpowiada technologia oczyszczania ścieków, w szczególności reaktory osadu czynnego ze zintensyfikowanymi usuwaniem związków azotu i fosforu.

3.2. Kofermentacja odchodów zwierząt hodowlanych z osadami ściekowymi.

Odpady z hodowli zwierząt, w tym przede wszystkim gnojowica trzody chlewnej i pomiot kurzy, stanowią istotny problem ekologiczny z uwagi na znaczną uciążliwość zapachową, spowodowaną głównie dużą zawartością azotu organicznego i amonowego. Powoduje to niekontrolowaną emisję amoniaku, nawet w przypadku prawidłowo prowadzonej gospodarki tymi odpadami poprzez ich rolnicze wykorzystanie. Zagospodarowanie gnojowicy i pomiotu kurzego regulowane jest Ustawą z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2015 r., poz. 625). W myśl cytowanych przepisów, podmiot, który prowadzi chów lub hodowlę drobiu powyżej 40 000 stanowisk lub chów lub hodowlę świń powyżej 2000 stanowisk dla świń o wadze ponad 30 kg lub 750 stanowisk dla macior, zobowiązany jest do zagospodarowania co najmniej 70% gnojówki i gnojowicy na użytkach rolnych, których jest posiadaczem i na których prowadzi uprawę roślin, a pozostałe 30% może zostać dopuszczone do obrotu. Nakłada to istotne ograniczenia na hodowców, którzy muszą dysponować odpowiednio dużym arealem, aby możliwe było właściwe prowadzenie gospodarki owianymi odpadami. Wynika z tego potrzeba poszukiwania alternatywnych metod zagospodarowania odpadów pochodzących, w tym poprzez ich fermentację beztlenową, której produktem jest biogaz oraz poleferment stanowiący nawóz organiczny nie podlegający powyższymi ograniczeniom ustawowym.

Odchody zwierząt hodowlanych - gnojowica, a zwłaszcza pomiot kurzy - są substratami o potencjalnie wysokiej podatności na rozkład biologiczny. Jednakże, wspomniana wysoka zawartość azotu amonowego (niski iloraz C/N) sprawia, iż podczas fermentacji beztlenowej tych odpadów dochodzi do inhibicji metanogenezy (przez uwalniany amoniak), co skutkuje istotnym obniżeniem produkcji biogazu (Bujoczek i wsp. 2000; Fantozzi i Buratti 2009; Hansen i wsp. 1998; Magbanua i wsp. 2001). Powyższe problemy skłoniły mnie do przeprowadzenia badań nad kofermentacją gnojowicy oraz pomiotu kurzego z osadami ściekowymi.

W latach 2008-2010 kierowałem projektem pt. „Badania nad kofermentacją gnojowicy trzody chlewnej i odchodów kurzych z osadami ściekowymi” (nr N N523 452136). W ramach tego projektu po raz pierwszy podjęto się kofermentacji pomiotu kurzego z osadami ściekowymi oraz gnojowicą trzody chlewnej. W ramach tych badań, eksperymenty prowadzone były w warunkach statycznych (okresowych) oraz półciągłych. W badaniach statycznych ustaliłem najkorzystniejsze proporcje między poszczególnymi substratami pod kątem maksymalizacji produkcji biogazu. Następnie mieszaniny osadów ściekowych i odchodów zwierząt zostały poddane procesom fermentacji beztlenowej w warunkach półciągłych, gdzie określiłem wydajności produkcji biogazu i metanu w warunkach bardziej zbliżonych do tych zachodzących w komorach fermentacyjnych oczyszczalni ścieków. Wyniki tych badań opisałem w publikacjach **H1: Borowski S., Weatherley L. 2013. Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge. Bioresource Technology 142: 345-352. (IF₂₀₁₃=5,039, MNiSW=45)** oraz **H2: Borowski S., Domański J., Weatherley L. 2014. Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge. Waste Management 34: 513-521. (IF₂₀₁₄=3,22, MNiSW=35).**

Zastosowane do badań substraty pobierałem z fermy drobiu w Zgierzu (hodowla klatkowa kur niosek), hodowli trzody chlewnej w Bukowiu, a osady ściekowe z Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi. Przeprowadzona analiza fizykochemiczna substratów wykazała, iż ich skład fizykochemiczny nie różnił się znacząco. Osady ściekowe zawierały nieco więcej substancji organicznych (74-75 % s.m.), azotu (5,8-6,1 % s.m.) i fosforu (2,5-3,2% s.m.) w porównaniu z pozostałymi odpadami. Pomiot kurzy natomiast charakteryzował się najniższą zawartością metali, w tym metali ciężkich (320-390 mgZn/kg s.m., 47-139 mgCu/kg s.m., 39-42 mgPb/kg s.m., 820-850 mgAl/kg s.m., 17-19 mgCd/kg s.m.). Zbliżony był poziom zanieczyszczenia mikrobiologicznego, wyrażony wskaźnikami liczebności bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae*, który wahał się w granicach 10^6 - 10^7 jtk/g s.m. Biorąc pod uwagę wysokie stężenia azotu, można stwierdzić, iż zarówno

popiołu i gnojowicy, jak i osady ściekowe charakteryzowały się niskim ilorazem C/N, co mogło sugerować potencjalne problemy z fermentacją beztlenową tych substratów.

Wyniki badań wykazały, iż 30% dodatek gnojowicy bądź popiołu kurzego do osadów ściekowych jest najkorzystniejszy z punktu widzenia intensyfikacji procesu fermentacji beztlenowej. Jednostkowa produkcja biogazu i metanu z mieszaniny osadów ściekowych (70%) i popiołu kurzego (30%) wahała się w granicach 306-376 dm³/kg s.m.o. (200-250 dm³CH₄/kg s.m.o.). Dodatek popiołu kurzego do osadów powodował z jednej strony wzrost zawartości masy organicznej w mieszaninie, ale z drugiej strony odnotowałem znacznie wyższą zawartość azotu amonowego, w tym zwłaszcza jego niezdysoncjowanej formy – amoniaku - w cieczy pofermentacyjnej mieszaniny. Stężenie amoniaku wyniosło średnio 450 g/m³ i mogła już powodować inhibicję metanogenezy, co omawiam bardziej szczegółowo w następnym podrozdziale. Nieco inny przebieg procesu fermentacji beztlenowej odnotowałem w przypadku mieszaniny osadów ściekowych (70%) z gnojowicą trzody chlewnej (30%). W tym przypadku, jednostkowy uzysk biogazu wyniósł średnio nieco powyżej 400 dm³/kg s.m.o. (212-273 dm³CH₄/kg s.m.o.), a stężenie wolnego (niezdysoncjowanego) amoniaku nie przekraczało 90 g/m³. Natomiast kofermentacja mieszaniny trójskładnikowej była mniej efektywna, gdyż produkcja biogazu wahała się od 274 do 336 dm³/kg s.m.o. (184-228 dm³CH₄/kg s.m.o.), w zależności od zastosowanego czasu zatrzymania i obciążenia substratowego reaktora, przy czym, niższa wartość korelowała z wyższą koncentracją wolnego amoniaku. Należy jednak zauważyć, że przebieg wszystkich procesów był bardzo stabilny, o czym świadczy wysoki udział metanu w biogazie, który zawsze przekraczał 60%. Nie odnotowałem też zależności między koncentracją wolnego amoniaku, a zawartością metanu w biogazie, co może świadczyć o generalnie niskim wpływie tego gazu na proces metanogenezy. W trakcie prowadzenia procesów fermentacji badałem też mieszaniny pofermentacyjne pod kątem zawartości bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae*, w tym *E.coli*. Stwierdziłem, iż fermentacja beztlenowa prowadzona w warunkach mezofilnych (temp. 35⁰C) jest mało efektywną metodą higienizacji odpadów, ponieważ liczebność bakterii *Enterobacteriaceae*, we wszystkich przeprowadzonych seriach półciągłych obniżyła się jedynie o około 1 rząd wielkości. A zatem, odpady pofermentacyjne (poferment) nadal zawierały bakterie *Enterobacteriaceae* w liczbie 10⁵-10⁶ jtk/g s.m.

Podsumowując, głównym osiągnięciem badawczym opisanym w publikacjach H1 i H2 było wykazanie, iż możliwa jest wysoka produkcja biogazu (w tym metanu) w wyniku kofermentacji mieszanin dwu- i trójskładnikowych popiołu kurzego, gnojowicy i osadów ściekowych. Dotychczas nie prowadzono bowiem szerszych badań

nad kofermentacją wspomnianych odpadów. Wykazalem również, iż wydzielany amoniak oraz lotne kwasy tłuszczowe mają niewielki wpływ na stabilność procesu fermentacji beztlenowej oraz na stan sanitarny odpadów i osadów. Ponadto, opracowalem wytyczne techniczno-technologiczne do prowadzenia procesu kofermentacji osadów ściekowych z odpadami z hodowli drobiu i trzody chlewnej.

3.3. Kofermentacja odpadów komunalnych po hydromechanicznej separacji z osadami ściekowymi.

Odpady komunalne definiowane są jako odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niezawierające odpadów niebezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych (Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2013 r., poz. 21 z późn. zm.). Według danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS 2014), w Polsce wytwarza się ponad 140 milionów ton odpadów rocznie, z których ponad 11 mln. ton stanowią odpady komunalne. Ponad 63% masy zebranych odpadów komunalnych składowane jest na 431 kontrolowanych składowiskach odpadów, a jedynie 13% zebranych odpadów kierowane jest do biologicznego przetwarzania, głównie w instalacjach do kompostowania. Z drugiej strony, około 80% wytwarzanych odpadów komunalnych stanowi organiczna frakcja, która może być wykorzystana do produkcji biogazu.

Cytowane powyższe dane skłoniły mnie do badań nad możliwością fermentacji organicznej frakcji odpadów komunalnych (*Organic fraction of municipal waste*, OFMSW) oraz ich kofermentacji z osadami ściekowymi. W tym celu podjąłem współpracę z Zakładem Usług Komunalnych w Puławach, który umożliwił mi pobieranie odpadów do badań. Zakład ten jest właścicielem jedynej w Polsce instalacji do hydromechanicznej separacji odpadów komunalnych, pracującej według oryginalnej technologii BTA (Biotechnische Abfallverwertung GmbH & Co, obecnie BTA Company GmbH). Instalacja BTA w Puławach przetwarza około 22 tys. ton odpadów rocznie. Surowe odpady komunalne trafiają do pulpera, w którym są roztwarzane w wodzie i intensywnie mieszanne. Większość substancji organicznej zostaje rozpuszczona w wodzie i oddzielona od frakcji ciężkiej oraz frakcji lekkiej. Z pulpera zawiesina transportowana jest do hydrocyklonu, w którym oczyszczana jest z piasku, drobnego szkła i składników obojętnych. Zawiesinę tą stanowi organiczną frakcję odpadów komunalnych po hydromechanicznej separacji, którą wykorzystywałem do badań.

Celem moich badań na tym etapie było określenie potencjału produkcji biogazu z odpadów po hydromechanicznej separacji zarówno w układzie mono-fermentacji, jak i kofermentacji z osadami ściekowymi. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane w publikacji **H3: Borowski S. 2015. Co-digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. Journal of Environmental Management 147:87-94. (IF5-letni=3,895, MNiSW=35)**. Według mojej wiedzy, badania w zakresie kofermentacji osadów z odpadami komunalnymi po hydromechanicznej separacji nie były wcześniej podejmowane i publikowane.

Organiczna frakcja odpadów pochodząca z instalacji BTA w Puławach charakteryzowała się dużym uwodnieniem – średnia wartość suchej masy wynosiła zaledwie około 35 g/kg, a udział substancji organicznej w suchej masie odpadów wynosił 53%, co klasyfikuje je jako substraty o niskiej podatności na rozkład biologiczny (Pavan i wsp. 2000). Analiza elementarna omawianych odpadów wykazała też niską zawartość związków biogenych. Średnie stężenia azotu i fosforu w suchej masie odpadów wynosiły odpowiednio 20,8 gN/kg oraz 7,3 gP/kg i były ponad 3-krotnie niższe niż wartości odnotowane dla osadów ściekowych.

Badania nad kofermentacją OFMSW i osadów ściekowych prowadziłem w warunkach mezofilnych (35⁰C) oraz termofilnych (55⁰C). W warunkach mezofilnych, produkcja biogazu w procesie kofermentacji mieszaniny osadów ściekowych (50%) z OFMSW (50%) wynosiła od 449 do blisko 500 dm³/kg s.m.o. (283-316 dm³CH₄/kg s.m.o.) i była wyższa o ponad 50% od uzysku biogazu z odpadów oraz osadów ściekowych fermentowanych samodzielnie. Wykazałem również, iż kofermentacja prowadzona w warunkach termofilnych jest niekorzystna, gdyż powoduje wyraźne obniżenie produkcji biogazu, w tym metanu, co może być spowodowane inhibicją metanogenezy przez amoniak oraz lotne kwasy tłuszczowe (LKT). Uzysk biogazu w procesie termofilnej kofermentacji mieszaniny OFMSW z osadami wahał się w granicach 276-367 dm³/kg s.m.o., w zależności od zastosowanego obciążenia substratowego. W procesie tym stężenie wolnego amoniaku wahało się w granicach 563-1009 g/m³ natomiast stężenie LKT w granicach 4508-5744 g/m³. Wartości te były kilkukrotnie wyższe od tych odnotowanych w procesie mezofilnej kofermentacji. Amoniak jest jednym z głównych inhibitorów metanogenezy, ponieważ łatwo przenika do wnętrza komórek powodując podwyższenie pH treści komórkowej, hamuje również reakcje enzymatyczne. W opisywanych w podrozdziale 3.2, badaniach nad kofermentacją pomiotu kurzego, gnojowicy i osadów ściekowych, stwierdzona wartość progowa stężenia amoniaku powodująca inhibicję metanogenezy wynosiła około 450 gNH₃/m³. Można bez wątpliwości

stwierdzić, iż również wytwarzanie metanu w procesie termofilnej kofermentacji OFMSW z osadami było hamowane przez wydzielany amoniak, przy czym dłuższy czas zatrzymania sprzyjał temu procesowi. Jednak produkcja biogazu i metanu była również hamowana przez powstające lotne kwasy tłuszczowe będące produktami pośrednimi rozkładu beztlenowego.

Podsumowując ten etap badań można stwierdzić, iż kofermentacja odpadów komunalnych po hydromechanicznej separacji wraz z osadami ściekowymi pozwala na zwiększenie produkcji biogazu o blisko 50%, w stosunku do uzysku biogazu z samych tylko odpadów komunalnych oraz osadów. Udowodniłem, że proces fermentacji beztlenowej korzystniej jest prowadzić w warunkach mezofilnych, ponieważ podwyższenie temperatury fermentacji do 55°C powoduje inhibicję metanogenezy i obniżenie produkcji biogazu, co jest spowodowane znacznym wzrostem stężenia amoniaku oraz lotnych kwasów tłuszczowych.

3.4. Kofermentacja wysłodków buraczanych po hydrolizie enzymatycznej z osadami ściekowymi.

Wysłodki są cennym produktem ubocznym powstającym w procesie produkcji cukru z buraków cukrowych. Szacuje się, iż podczas przeróbki 1 tony buraków na cukier może powstawać nawet 330 kg wysłodków (Faug i wsp. 2011). Tradycyjnym sposobem zagospodarowania wysłodków jest ich odwadnianie i peletyzacja, a następnie wykorzystanie do żywienia zwierząt. Jest to jednak metoda mało opłacalna, ponieważ cukrownia może zużywać nawet 40% energii na odwadnianie i peletyzację (Zheng i wsp. 2012). Alternatywnym sposobem zagospodarowania wysłodków jest ich wykorzystanie do produkcji bioetanolu (Donkoh i wsp. 2012; Zheng i wsp. 2012).

Mając na uwadze wykorzystanie biomasy wysłodków buraczanych do produkcji biogazu, współtworzyłem koncepcję projektu pt. „Biomasa wysłodków cukrowiczych jako nowy surowiec do wytwarzania podłoży fermentacyjnych” (PBS1/B8/3/2012) finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Zadanie 9 tego projektu, prowadzone pod moim kierunkiem, polegało na zagospodarowaniu odpadów po produkcji etanolu (wysłodków po hydrolizie i odwadnianiu, a także wywaru) do wytwarzania biogazu. Ponieważ wysłodki po hydrolizie i odwadnianiu (*sugar beet pulp residues*, SBPR) są stosunkowo ubogie w związki biogenne, celowym wydaje się ich kofermentacja z osadami ściekowymi. Wyniki tych badań opisałem w publikacji H4: Borowski S., Kucner M. 2015. Co-digestion of

sewage sludge and dewatered residues from enzymatic hydrolysis of sugar beet pulp. *Journal of the Air & Waste Management Association* 65: 1354–1364. (IF_{5-letni}=1,56, MNiSW=20).

Skład chemiczny wysłodków po hydrolizie i odwadnianiu różnił się od składu typowych wysłodków surowych. Charakteryzował się niską zawartością azotu i fosforu, odpowiednio 19 g/kg s.m. oraz 1,4 g/kg s.m., oraz niskim udziałem polisacharydów. Stężenie celulozy wynosiło średnio 12,5% s.m., pektynu 6,1% s.m., natomiast hemicelulozy jedynie około 0,5% s.m. Jednocześnie odnotowałem wysokie stężenia cukrów prostych we frakcji płynnej SBPR, zwłaszcza glukozy (2456 g/m³), arabinozy (2119 g/m³), galaktozy (1953 g/m³) oraz kwasu galakturonowego (2909 g/m³). Przyczyną takiego składu było zastosowanie enzymów hydrolitycznych, które są głównie aktywne w stosunku do hemicelulozy i pektynu, a cukry proste stanowiły pozostałość po przeprowadzonej hydrolizie wysłodków.

Przeprowadzone testy fermentacji w warunkach statycznych wykazały podatność zhydrolizowanych i odwodnionych wysłodków na rozkład beztlenowy, a ilość wytworzonego metanu osiągnęła 526 dm³CH₄/kg s.m.o. Należy jednak pamiętać, iż wysoka produkcja metanu uzyskana w testach statycznych nie jest wyznacznikiem efektywności procesu fermentacji beztlenowej w warunkach przemysłowych, a jedynie świadczy o dużej zawartości związków organicznych, które mogą być przetworzone na metan. Testy w warunkach statycznych prowadzone są bowiem z wykorzystaniem inokulum (w moim przypadku były to osady z kolumn fermentacyjnych Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi), które jest bogate w pierwiastki biogenne niezbędne do zapewnienia optymalnego przebiegu procesu produkcji biogazu. Dlatego wyniki testów statycznych weryfikowane są w eksperymentach prowadzonych w warunkach półciągłych.

Jak już wspominałem, badane wysłodki charakteryzowały się niską zawartością azotu oraz bardzo niskim stężeniem fosforu, która w praktyce uniemożliwia ich wykorzystanie do produkcji biogazu w procesie mono-fermentacji. Dlatego w kolejnym etapie badań, wysłodki mieszane były w różnych proporcjach z osadami ściekowymi i poddawane kofermentacji w warunkach półciągłych. Stwierdziłem, iż dodatek zhydrolizowanych i odwodnionych wysłodków do osadów ściekowych powodował wzrost produkcji biogazu, jednocześnie objętościowy metanu w biogazie ulegał obniżeniu. W procesie kofermentacji osadów z 35% dodatkiem SBPR odnotowałem średni uzysk biogazu i metanu, odpowiednio 503 dm³/kg s.m.o. oraz 348 dm³CH₄/kg s.m.o. Zwiększenie udziału wysłodków w mieszaninie do 50% skutkowało wzrostem produkcji biogazu do 512 dm³/kg s.m.o., jednakże uzysk metanu zmniejszył się do 340 dm³CH₄/kg s.m.o. Przyczyną tego mogła być

wysoka koncentracja kwasów lotnych, wynosząca blisko 4000 g/m^3 (z okresowymi wzrostami nawet do 6000 g/m^3), przy czym kwas propionowy jako główny inhibitor metanogenezy stanowił 18% LKT. Drugą przyczyną niższej produkcji metanu mógł być wyższy udział wysłodków w mieszaninie, które składają się głównie z sacharydów, natomiast osady ściekowe są znacznie bogatsze w białka. Produkcja biogazu z sacharydów i białek jest zbliżona, natomiast biogaz uzyskany z fermentacji białek zawiera znacznie więcej metanu, w porównaniu z biogazem otrzymanym podczas fermentacji beztlenowej sacharydów.

Podsumowując, w tym etapie badań wykazałem, iż 35 % dodatek zhydrolizowanych i odwodnionych wysłodków do osadów ściekowych umożliwia zwiększenie produkcji biogazu o 50%, a metanu o 30%, w porównaniu z odpowiednimi wartościami otrzymanymi dla samych osadów. Jednocześnie, zbyt duży udział wysłodków w mieszaninie poddawanej kofermentacji powoduje wzrost stężenia lotnych kwasów tłuszczowych w komorze fermentacyjnej oraz obniżenie produkcji metanu. Wyniki tych badań pozwalają na opracowanie koncepcji kompleksowego zagospodarowania wysłodków cukrowniczych do produkcji bioetanolu i biogazu.

3.5. Kofermentacja odpadów poubojowych z osadami ściekowymi.

Odpady poubojowe mogą stanowić atrakcyjny materiał do produkcji biogazu z uwagi na dużą zawartość tłuszczów i białek. Teoretyczny uzysk biogazu z tłuszczów wynosi $1250 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.}$ o zawartości metanu około 67-68%, natomiast odpowiednie wartości dla białek wynoszą $700 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.}$ oraz 70-71% (Weiland 2010). Jednakże, wspomniana wysoka zawartość tłuszczów i białek powoduje iż, podczas fermentacji beztlenowej odpadów poubojowych, nawet w postaci rozcieńczonej, dochodzi do inhibicji produkcji biogazu przez uwalniany amoniak oraz kwasy tłuszczowe. Dużym problemem są zwłaszcza długolącuchowe kwasy tłuszczowe takie jak palmitynowy, stearynowy czy oleinowy, które adsorbują do kłaczków osadów oraz pojedynczych komórek bakterii i archeonów hamując ich procesy metaboliczne, a także powodują silne pienienie w komorach fermentacyjnych uniemożliwiając ich eksploatację (Cuetos i wsp. 2008; Hejufeld i Angelidaki 2009; Moestedt i wsp. 2016; Palatsi i wsp. 2011; Pitk i wsp. 2013). Rozwiązaniem tych problemów może być kofermentacja odpadów poubojowych z osadami ściekowymi.

Do badań wykorzystałem odpady poubojowe, które pobierałem z zakładu Pini Polonia w Kutnie. Pini Polonia jest obecnie jedynym z najbardziej nowoczesnych tego typu zakładów w Polsce o maksymalnej przepustowości 1000 sztuk trzody chlewnej w ciągu godziny.

W badaniach wykorzystałem następujące odpady: tkanka mięsna, jelita (odpady z jelicianin), odpady poflotacyjne oraz szczecina. Pozostałe frakcje odpadów poubojowych generowane w zakładzie nie były badane z uwagi na brak ich przydatności do procesów fermentacji (kości) lub inne sposoby ich zagospodarowania (krew). Charakterystyka odpadów poubojowych została przedstawiona w publikacji H5: Borowski S., Kubacki P. 2015. Co-digestion of pig slaughterhouse waste with sewage sludge. *Waste Management* 40: 119-126. (IF_{5-letni}=3,522, MNiSW=35).

Wszystkie frakcje odpadów charakteryzowały się wysoką zawartością azotu oraz tłuszczów (za wyjątkiem szczeciny) i jednocześnie dość niską zawartością fosforu. Kolejną ich cechą było małe uwodnienie oraz wysoki udział substancji organicznej w suchej masie, przekraczający nawet 95% s.m.

Pierwszy etap badań polegał na określeniu maksymalnych uzysków biogazu i metanu z odpadów poubojowych. W tym celu przeprowadziłem testy w warunkach statycznych, którym poddałem określone frakcje odpadów poubojowych, a także, dla porównania, osady ściekowe. Dodatkowo przeprowadziłem badania uzysku biogazu i metanu dla mieszaniny odpadów poubojowych, skomponowanej tak aby odzwierciedlała rzeczywiste wielkości generowane w zakładzie Pini Polonia, tj. 50% jelit, po 21% tkanki mięsnej oraz odpadów poflotacyjnych, a także 8% szczeciny. Wyniki tych badań opisałem w publikacji H5. Wykazałem bardzo wysoki uzysk metanu z tkanki mięsnej oraz jelit, wynoszący odpowiednio 976 dm³CH₄/kg s.m.o. oraz 826 dm³CH₄/kg s.m.o. Uzysk metanu z odpadów poflotacyjnych wynosił 585 dm³CH₄/kg s.m.o., natomiast ze szczeciny jedynie 53 dm³CH₄/kg s.m.o. Dla porównania, produkcja metanu z osadów ściekowych w próbach statycznych wynosiła 371 dm³CH₄/kg s.m.o.

W kolejnym etapie badań przeprowadziłem kofermentację mieszaniny odpadów poubojowych z osadami ściekowymi, w warunkach półciągłych. Mieszanina odpadów poubojowych (skomponowana jak w opisanych powyżej testach statycznych) dodawana była do osadów ściekowych w ilości wagowej 30% oraz 50%. Według mojej wiedzy, kofermentacja osadów z tak dużym udziałem odpadów poubojowych nie była wcześniej badana. Produkcja biogazu z mieszaniny zawierającej 30% odpadów poubojowych oraz 70% osadów osiągnęła 750 dm³/kg s.m.o. (514 dm³CH₄/kg s.m.o.). Dla porównania, maksymalny uzysk biogazu w serii kontrolnej (osady ściekowe bez dodatków) wynosił 360 dm³/kg s.m.o. (257 dm³CH₄/kg s.m.o.). Zwiększenie udziału odpadów poubojowych do 50% w mieszaninie skutkowało dalszym wzrostem produkcji biogazu do blisko 900 dm³/kg s.m.o. (609 dm³CH₄/kg s.m.o.), jednakże przy takich proporcjach odnotowałem niewielką inhibicję

metanogenezy i oznaki niestabilności procesu fermentacji spowodowane wysokimi stężeniami lotnych kwasów tłuszczowych. Średnia koncentracja LKT w tym procesie wynosiła 3774 g/m^3 , jednakże maksymalna odnotowana wartość dochodziła do 5500 g/m^3 . Interesująco przedstawiał się profil kwasów tłuszczowych. Podczas fermentacji osadów ściekowych jako mono-substratu, dominującym kwasem był kwas octowy, który stanowił około 60% LKT, kwasy propionowy i masłowy stanowiły odpowiednio około 15-16% oraz 12% LKT, natomiast stężenia pozostałych kwasów były niewielkie. Dodatek odpadów poubojowych wyraźnie wpływał na profil kwasów tłuszczowych. W procesie kofermentacji mieszaniny 50% odpadów poubojowych oraz 50% osadów, kwas octowy stanowił niecałe 40% LKT, natomiast propionowy 22% LKT. Wyraźnie wzrosła też zawartość kwasów karboksylowych rozgałęzionych, zwłaszcza izomasłowego, co było oznaką niestabilności procesu fermentacji beztlenowej. Analizując wartości bezwzględne LKT warto odnotować, iż stężenie kwasu propionowego, który jest głównym inhibitorem metanogenezy spośród wszystkich lotnych kwasów tłuszczowych, osiągnęło 950 g/m^3 podczas kofermentacji (50% odpady poubojowe + 50 % osady) i było ponad 3-krotnie wyższe od odnotowanego podczas mono-fermentacji osadów ściekowych.

Podsumowując, w tym etapie badań wykazałem, iż kofermentacja odpadów poubojowych z osadami ściekowymi pozwala na blisko 3-krotne zwiększenie uzysku biogazu, w porównaniu z produkcją biogazu z samych osadów. Stwierdziłem, iż dodatek odpadów poubojowych do osadów ściekowych wpływa na zmianę profilu kwasów tłuszczowych powstających podczas fermentacji, powodując wyraźny wzrost stężenia kwasu propionowego, który jest głównym inhibitorem metanogenezy, oraz wzrost stężeń kwasów karboksylowych rozgałęzionych. Ponadto wykazałem, iż możliwa jest kofermentacja osadów ściekowych z dużym udziałem odpadów poubojowych, dochodzących do 50% udziału masowego.

3.6. Podsumowanie - najważniejsze osiągnięcia badań przedstawione do oceny, zawarte w jednotematycznym cyklu publikacji

Najważniejsze osiągnięcia naukowe moich badań opisanych w jednotematycznym cyklu publikacji:

- 1) Wykażałem, iż możliwa jest wysoka produkcja biogazu (w tym metanu) w wyniku kofermentacji mieszanin dwu- i trójskładnikowych pomiotu kurzego, gnojowicy i osadów ściekowych charakteryzujących się niekorzystnym bilansem C/N.
- 2) Wykażałem, iż odpady komunalne po hydromechanicznej separacji są podatne na rozkład beztlenowy (wbrew wcześniejszym doniesieniom literaturowym), a ich kofermentacja z osadami ściekowymi w zakresie temperatur mezofilnych pozwala na wzrost produkcji biogazu nawet o 50%;
- 3) Udowodniłem, że proces kofermentacji beztlenowej korzystniej jest prowadzić w warunkach mezofilnych, ponieważ podwyższenie temperatury fermentacji do 55⁰C powoduje inhibicję metanogenezy i obniżenie produkcji biogazu, co jest związane ze znacznym wzrostem stężenia amoniaku oraz lotnych kwasów tłuszczowych.
- 4) Udowodniłem, iż proces mezofilnej kofermentacji beztlenowej jest mało efektywną metodą higienizacji osadów i odpadów, gdyż obniżenie liczebności bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae* wynosi jedynie około 1 rząd wielkości. Wykazałem również, iż wydzielany amoniak oraz lotne kwasy tłuszczowe w niewielkim stopniu wpływają na stan sanitarny odpadów i osadów ściekowych poddawanych fermentacji.
- 5) Wykażałem, iż możliwe jest prowadzenie kofermentacji osadów ściekowych z dużym udziałem odpadów poubojowych. Kofermentacja osadów ściekowych z dodatkiem 50% odpadów poubojowych pozwala na blisko 3-krotne zwiększenie uzysku biogazu (w tym metanu), w porównaniu z produkcją biogazu z samych osadów.
- 6) Wykażałem, iż dodatek odpadów poubojowych do osadów ściekowych wpływa na zmianę profilu lotnych kwasów tłuszczowych powstających podczas fermentacji, powodując wyraźny wzrost stężenia kwasu propionowego, który jest głównym inhibitorem metanogenezy, oraz wzrost stężeń kwasów karboksylowych rozgałęzionych.
- 7) Wykażałem, iż 35 % dodatek zhydrolizowanych i odwodnionych wysłodków do osadów ściekowych umożliwia zwiększenie produkcji biogazu o 50%, a metanu o 30%, w porównaniu z odpowiednimi wartościami uzysków dla samych osadów. Jednocześnie, zbyt duży udział wysłodków w mieszaninie poddawanej kofermentacji powoduje wzrost

stężenia lotnych kwasów tłuszczowych w komorze fermentacyjnej oraz obniżenie produkcji metanu.

- 8) Wykazałem, iż stężenia amoniaku oraz lotnych kwasów tłuszczowych powodujące inhibicję produkcji biogazu są różne, w zależności od rodzaju przetwarzanych odpadów oraz zastosowanych parametrów procesu fermentacji beztlenowej, tj. temperatury, czasu zatrzymania oraz obciążenia substratowego.
- 9) Opracowałem wytyczne techniczno-technologiczne do prowadzenia procesu kofermentacji osadów ściekowych z odpadami z hodowli drobin i trzody chlewnej, odpadami poubojowymi, organiczną frakcją odpadów komunalnych oraz wyłódkami po hydrolizie enzymatycznej.

Cytowana literatura:

- 1) Alvarez J.A., Otero L., Lema J.M., **2010**. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of Agro-industrial waste. *Bioresource Technology* 101: 1153-1158.
- 2) Appels L., Baeyens J., Degreve J., Dewil R., **2008**. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34: 755-781.
- 3) Athanasoulia E., Melidis P., Aivasidis A., **2012**. Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. *Renewable Energy* 47: 147-151.
- 4) Bolzonella D., Cavinato C., Fatone F., Pavan P., Cecchi F., **2012**. High rate mesophilic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge: A pilot scale study. *Waste Management* 32: 1196-1201.
- 5) Bujoczek G., Oleszkiewicz J., Sparling R., Cenkowski S., **2000**. High solid anaerobic digestion of chicken manure. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76: 51-60
- 6) Cuetos M.J., Gomez X., Otero M., Moran A., **2008**. Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal* 40: 99-106.
- 7) Donkoh E., Degenstein J., Ji Y., **2012**. Process integration and economics evaluation of sugar beet pulp conversion into ethanol. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 5: 52-61. (open access at <http://www.ijabe.org>).
- 8) Esposito G., Frunzo L., Panico A., Pirozzi F., **2012**. Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes. *Environmental Technology* 33: 2733-2740.
- 9) Fang C., Boe K., Angelidaki I., **2011**. Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure. *Water Research* 45: 3473-3480.
- 10) Fantozzi F., Buratti C., **2009**. Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester. *Bioresource Technology* 100: 5783-5789.
- 11) GUS, **2014**. *Ochrona środowiska 2014*. Główny Urząd Statystyczny, Departament Badań Regionalnych i Środowiska, ZWS, Warszawa. (www.stat.gov.pl).
- 12) Hansen K.H., Angelidaki I., Ahring B.K., **1998**. Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia. *Water Research* 32: 5-12
- 13) Hejnfelt A., Angelidaki I., **2009**. Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. *Biomass Bioenergy* 33: 1046-1054.
- 14) Jędrzak A., **2007**. *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. Warszawa, PWN.
- 15) Krupa K., **2015**. *Zrównoważona energetyka biogazowa w oczyszczalniach ścieków*. *Polityka Energetyczna* 18: 101-112.
- 16) Magbanua Jr. B.S., Adams T.T., Johnston P., **2001**. Anaerobic codigestion of hog and poultry waste. *Bioresource Technology* 76: 165-168.
- 17) Moestel J., Nordell E., Shakeri Yekta S., Lundgren J., Marti M., Sundberg C., Ejlertsson J., Svensson B.H., Ejlertsson A., **2016**. Effects of trace element addition on process stability during anaerobic co-digestion of OFMSW and slaughterhouse waste. *Waste Management* 47, 11-20.
- 18) Palatsi J., Vinas M., Guivernau M., Fernandez X., Flotats X., **2011**. Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: main process limitations and microbial community interactions. *Bioresource Technology* 102: 2219-2227.

- 19) Pavan P., Battistoni P., Mata-Alvarez J, Cecchi F. **2000**. Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. *Water Science and Technology* 41: 75-81.
- 20) Pitk P., Kaparaju P., Palatsi J., Affes R., Vilu R., **2013**. Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: methane production efficiency and process limitations. *Bioresource Technology* 134, 227–232.
- 21) Shah F.A., Mahmood Q., Rashid N., Pervez A., Raja I., Shah M.M., 2015. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 627–642.
- 22) ~~Silvestre G., Bonmati A., Fernández B.~~ **2015**. Optimisation of sewage sludge anaerobic digestion through co-digestion with OFMSW: Effect of collection system and particle size. *Waste Management* 43, 137–143.
- 23) Weiland P., **2010**. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology & Biotechnology* 85: 849-860.
- 24) Zheng Y., Yu C., Cheng Y., Lee C., Simmons C.W., Dooley T.M., Zhang R., Jenkins B.M., VanderGheynst J.S., **2012**. Integrating sugar beet pulp storage, hydrolysis and fermentation for fuel ethanol production. *Applied Energy* 93: 168-175.

4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych

Pozostałe prowadzone przez mnie prace badawcze mieszczą się głównie w czterech obszarach tematycznych:

- 1) Badanie zmienności składu odcieków pofermentacyjnych oraz wykorzystanie metod fizykochemicznych i biologicznych do ich oczyszczania;
- 2) Stabilizacja dwustopniowa termofilno-mezofilna osadów ściekowych i odpadów organicznych;
- 3) Dezodoryzacja pomiotu kurzego oraz kompostu z wykorzystaniem mikroorganizmów immobilizowanych na nośnikach mineralnych;
- 4) Intensyfikacja produkcji biogazu z odpadów lignocelulozowych.

4.1. Badanie zmienności składu odcieków pofermentacyjnych oraz wykorzystanie metod fizykochemicznych i biologicznych do ich oczyszczania

Eksploatacja komór fermentacyjnych w oczyszczalniach ścieków oraz biogazowniach rolniczych i przemysłowych wiąże się z koniecznością zagospodarowania odpadów pofermentacyjnych (pofermentu). W przypadku oczyszczalni ścieków, osady po fermentacji są zwykle odwadniane oraz wykorzystywane do nawożenia gruntów lub poddawane obróbce termicznej (suszenie i spalanie). Powstająca podczas odwadniania ciecz jest najczęściej odprowadzana bezpośrednio do biologicznej części oczyszczalni (komór osadu czynnego). Powoduje to wzrost ładunku zanieczyszczeń w oczyszczanych ściekach (zwłaszcza wzrost stężeń azotu i fosforu) i zwiększone obciążenie komór biologicznych, a często problemy eksploatacyjne takie jak puchnięcie i pienienie osadu czynnego. W przypadku biogazowni, zagospodarowanie cieczy pofermentacyjnej jest bardziej skomplikowane, ponieważ obiekty te zwykle nie są wyposażone w urządzenia do oczyszczania ścieków.

Jakość cieczy powstających podczas fermentacji oraz odwadniania osadów ściekowych i odpadów, a także sposoby ich oczyszczania były przedmiotem moich zainteresowań już w czasie wykonywania pracy doktorskiej. Wykazałem, iż zastosowana technologia termofilnej stabilizacji osadów ściekowych w istotny sposób wpływa na zawartość zanieczyszczeń w cieczy nadosadowej, powodując kilkukrotny wzrost ładunku ChZT oraz azotu i fosforu. Po uzyskaniu stopnia doktora, kontynuowałem badania w opisywanym kierunku. Ich celem było określenie wpływu technologii stabilizacji

i odwadniania osadów ściekowych na jakość powstających w tych procesach cieczy, w tym przede wszystkim na zawartość azotu i fosforu.

Przeprowadziłem ponadto badania cieczy osadowych powstających w kilku oczyszczalniach ścieków województwa łódzkiego (II.E.3). Do badań pobierałem ciecze z zagęszczaczy, komór stabilizacji tlenowej i beztlenowej oraz z pras filtracyjnych osadów. Wykazałem, iż niezależnie od oczyszczalni, ciecze osadowe po fermentacji beztlenowej charakteryzują się znacznie większym zanieczyszczeniem niż te odprowadzane z urządzeń do tlenowej stabilizacji. Ponadto wykazałem, iż na jakość cieczy osadowych ma wpływ nie tylko zastosowana technologia oczyszczania ścieków oraz stabilizacji osadów, ale również prawidłowo prowadzony proces kondycjonowania osadów. Przykładowo, zawartość azotu i fosforu w cieczy po odwadnianiu przefermentowanych osadów w oczyszczalni ścieków w Piotrkowie Trybunalskim wynosiła średnio 186 gN/m^3 oraz 29 gP/m^3 , natomiast w przypadku takiej samej cieczy pochodzącej z Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi, średnie wartości wynosiły 554 gN/m^3 oraz 41 gP/m^3 . Obie oczyszczalnie wyposażone są w wydzielone komory fermentacyjne, jednakże obiekt w Piotrkowie Trybunalskim stosuje konwencjonalny proces oczyszczania ścieków, natomiast w oczyszczalni w Łodzi stosowany jest system zintegrowanego usuwania węgla, azotu i fosforu w komorach osadu czynnego, co ma wpływ na skład osadów ściekowych oraz pośrednio na jakość cieczy pofermentacyjnych.

W ramach opisywanego obszaru tematycznego zajmowałem się również wykorzystaniem metod fizykochemicznych do oczyszczania odcieków pofermentacyjnych (II.E.19). Badaniom poddawałem ciecze po fermentacji mieszaniny osadów ściekowych, odpadów poubojowych oraz organicznej frakcji odpadów komunalnych. Porównałem trzy fizykochemiczne metody oczyszczania odcieków pofermentacyjnych: koagulacja i chemiczne strącanie z wykorzystaniem koagulantów i flokulantów, utlenianie chemiczne nadtlenkiem wodoru w obecności soli żelaza (II) (reakcja Fentona), a także usuwanie fosforu w reakcji wytrącania fosforanu amonowo-magnezowego (struwitu). Wykazałem, iż najskuteczniejszym sposobem oczyszczania odcieku pofermentacyjnego na drodze chemicznej jest połączenie wspomnianych metod, dzięki czemu można uzyskać 95% redukcję ładunku ChZT oraz 97% redukcję ładunku azotu amonowego, a oczyszczona ciecz jest praktycznie pozbawiona zawiesiny.

Od roku 2011 pełnię funkcję promotora pomocniczego pana mgr Przemysława Kubackiego, który realizuje pracę doktorską pt. "Oczyszczanie cieczy po fermentacji beztlenowej i odwadnianiu odpadów organicznych" na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska PL (promotorem pracy jest prof. dr hab. Ewa Liwarska-Bizukojć).

W pierwszym etapie badań, poddaliśmy fermentacji beztlenowej kilkanaście różnych grup odpadów, co miało na celu wygenerowanie i zbadanie cieczy pofermentacyjnych pochodzących z różnych źródeł. Z danych uzyskanych podczas tych badań wynikało, iż skład cieczy pofermentacyjnych jest bardzo zróżnicowany. Ciecze po fermentacji odpadów z hodowli i uboju trzody chlewnej charakteryzowały się najwyższym zanieczyszczeniem, biorąc pod uwagę zawartości związków organicznych i biogenych. Stężenia azotu i fosforu w tych cieczach przekraczały 2300 gN/m^3 oraz 550 gP/m^3 , natomiast wartość ChZT dochodziła do $30 \text{ kgO}_2/\text{m}^3$. Ciecz po fermentacji kisielki była bogata w wapń (467 g/m^3), potas (705 g/m^3) oraz żelazo (374 g/m^3), natomiast odpady komunalne generowały ciecze o najmniejszym stopniu zanieczyszczenia. Wyniki tych badań zostały przedstawione w publikacji II.A.5. Obecnie prowadzimy badania nad wykorzystaniem metody osadu czynnego do oczyszczania odcieków pofermentacyjnych. W tym celu zaprojektowaliśmy i skonstruowaliśmy stanowisko badawcze składające się z dwóch reaktorów sekwencyjnych SBR wyposażonych w układy do napowietrzania, mieszania oraz dozowania odcieków. Przeprowadzone zostały już badania nad cieczami pofermentacyjnymi pochodzącymi z oczyszczalni ścieków w Łodzi, a w dalszym etapie badane będą ciecze po fermentacji innych odpadów organicznych. Wyniki tych badań zostaną wkrótce przedstawione w formie publikacji.

Tematyka oczyszczania i zagospodarowania odcieków pofermentacyjnych z biogazowni rolniczych, komunalnych i przemysłowych stała się motywacją do złożenia projektu badawczego w programie GEKON – Generator Konceptji Ekologicznych. W tym celu powołane zostało konsorcjum naukowe, składające się z Politechniki Łódzkiej, Uniwersytetu Jagiellońskiego (Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii, zespół dr hab. Przemysław Malca), Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie (Wydział Biotechnologii i Ogródnictwa, zespół dr hab. Pawła Kaszyckiego) oraz firmy EKOSPOT Sp. z o.o.

W roku 2015 konsorcjum otrzymało finansowanie projektu badawczego nr GEKON1/O3/213552/28/2015 pt. „Biokonwersja odpadów pofermentacyjnych z biogazowni: ochrona wód i paliwo III generacji”, w kwocie 2 850 914 zł. W projekcie tym pełnię funkcję kierownika, natomiast firma EKOSPOT jest liderem. Zadaniem projektu jest opracowanie technologii biokonwersji odpadów pofermentacyjnych (faza B+R) i jej wdrożenie w przemysłowej biogazowni w Kutnie (faza W). Konceptja badawcza opiera się na wykorzystaniu mikroglonów i osadu czynnego do oczyszczania odcieku po fermentacji odpadów organicznych w procesie produkcji biogazu.

Na potrzeby realizacji powyższych badań, zaprojektowałem instalację do fermentacji beztlenowej odpadów, w skali ulankowo technicznej (reaktory o pojemności czynnej 50 dm³). Instalacja ta z powodzeniem funkcjonuje od listopada 2015 roku i pełni jednocześnie funkcję generatora cieczy pofermentacyjnej. Obecnie realizuję zadanie badawcze nr 3 polegające na opracowaniu taniej i skutecznej metody odwadniania odpadów pofermentacyjnych. W kolejnym etapie badań zaprojektowana i wykonana zostanie instalacja do oczyszczania odcieków pofermentacyjnych, a w przypadku uzyskania dofinansowania fazy W projektu, wybudowana zostanie w biogazowni w Kutnie oczyszczalnia w skali przemysłowej.

Publikacje:

- 1) Borowski S. 2004. Jakość cieczy osadowych powstających w procesie przeróbki osadów ściekowych. Forum Eksploatatora 16: 10-12.
- 2) Kubacki P., Borowski S. 2014. Charakterystyka fizyczno-chemiczna i metody oczyszczania odcieku pofermentacyjnego. Przemysł Chemiczny 93: 528-530. IF_{5-letni}=0,332 (15 pkt. MNiSW).
- 3) Borowski S., Kubacki P. 2015. Zastosowanie koagulantów i flokulantów w procesie oczyszczania odcieku pofermentacyjnego. Ekologia i Technika 23: 60-64. (5 pkt. MNiSW).
- 4) Borowski S., Wojtczak M., Dziugan P. 2005. Anaerobic digestion of sewage sludge from wastewater treatment plant in Łódź. Proceedings of the IWA Specialized Conference on Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, Kraków 19-21 września: 1317-1321.
- 5) Borowski S., 2010. Ekspertyza oceniająca wydajność projektowanej biogazowni w Kutnie wraz z założeniami techniczno-technologicznymi niezbędnymi do jej uruchomienia, Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PL, Łódź.

4.2. Stabilizacja dwustopniowa termofilno-mezofilna osadów ściekowych i odpadów organicznych

Proces mezofilnej fermentacji beztlenowej jest powszechnie stosowany do wytwarzania biogazu oraz do stabilizacji osadów ściekowych i odpadów organicznych, jednakże nie zapewnia on higienizacji przetwarzanych odpadów, które nadal stanowią zagrożenie sanitarne. Prawidłowo prowadzona mezoofilna fermentacja beztlenowa z wysokim uzyskiem biogazu umożliwia redukcję liczebności mikroorganizmów patogennych jedynie o 1-2 rzędy wielkości, co wykazałem w publikacjach H1 i H2 wchodzących w skład cyklu składającego się na moje osiągnięcie naukowe (patrz podrozdział 3.2). Podwyższenie temperatury fermentacji beztlenowej do zakresu termofilnego (55-60⁰C) znacząco zwiększa efektywność biobójczą procesu, jednakże nie gwarantuje uzyskania produktu który spełniałby wymagania sanitarne nakładane przez przepisy prawne (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. z 2015 r.,

poz. 257). Termofilna fermentacja beztlenowa jest procesem mniej stabilnym, w porównaniu z fermentacją prowadzoną w warunkach mezofilnych, i już niewielkie wahania temperatury czy składu chemicznego doprowadzanych substratów mają niekorzystny wpływ na uzysk biogazu. Ponadto, w temperaturze 55-60°C, w znacznie większym stopniu powstają niezdysonowane formy azotu amonowego i lotnych kwasów tłuszczowych, które są głównymi inhibitorami metanogenezy (H3). Rozwiązaniem może być proces dwustopniowy, termofilno-mezofilny, który łączy zalety i zmniejsza wady stabilizacji mezofilnej i termofilnej.

Pierwszym badanym przeze mnie wariantem stabilizacji mezofilno-termofilnej, był proces tlenowo-beztlenowy (II.A.1). Ustaliłem, iż stabilizacja przebiega najkorzystniej, gdy wstępny tlenowy proces termofilny prowadzony jest przy czasie zatrzymania (*hydraulic retention time*, HRT) 24 godziny, a mezofilna fermentacja beztlenowa w stopniu drugim przy HRT=20 dni. W takich warunkach, średni uzysk biogazu wynosił 480 dm³/kg s.m.o., a w przefermentowanym osadzie nie stwierdzono obecności bakterii z grupy coli oraz *Salmonella* sp. Wykazałem, iż wstępny tlenowy stopień termofilny pozwala na wygenerowanie dużej ilości lotnych kwasów tłuszczowych (średnio 4400 g/m³), które są podstawowym substratem do produkcji biogazu. W omawianych badaniach skupiłem się również na przemianach azotu i fosforu w osadach i cieczy osadowej, a także na zmianach właściwości filtracyjnych osadów. Stwierdziłem, iż w cieczy po fermentacji dwustopniowej jest nieco wyższe stężenie azotu ogólnego (*total Kjeldahl nitrogen*, TKN), tj. około 2800 g/m³, w tym formy amonowej stanowiącej średnio 75% TKN. Dla porównania, w procesie kontrolnym beztlenowej stabilizacji mezofilnej, średnie stężenie TKN w cieczy pofermentacyjnej wynosiło 2160 g/m³, a frakcja amonowa stanowiła aż 87% TKN. Stwierdziłem też, iż podwyższona temperatura w stopniu tlenowym powoduje z jednej strony wzrost szybkości reakcji hydrolizy białek i uwalnianie azotu amonowego, lecz z drugiej strony amoniak jest też usuwany wraz z gazami odlotowymi na drodze desorpcji gazowej, ponieważ w warunkach termofilnych nie zachodzi nityfikacja. Wykazałem ponadto, iż wstępny proces tlenowy wpływa niekorzystnie na właściwości filtracyjne osadów, ponieważ intensywne naporowierzenie powoduje rozdrobnienie kłaczków osadów i zmniejszenie ich podatność na odwadnianie. Czas ssania kapilarnego, który dla osadów surowych wynosił około 20 s, zwiększył się do ponad 300 s po procesie dwustopniowym, co świadczyło o znacznym pogorszeniu odwadniałości tych osadów.

W ramach omawianego obszaru badawczego zajmowałem się również dwustopniowym procesem termofilno-mezofilnym prowadzonym w całości w warunkach

beztlenowych (II.A.6). Badania prowadziłem z wykorzystaniem mieszaniny osadów ściekowych oraz odpadów komunalnych pochodzących z hydromechanicznej separacji. Wykazałem, że proces dwustopniowy pozwala na znaczące zwiększenie uzysku biogazu, w porównaniu z kontrolną jednostopniową fermentacją mezofilną. Przy zastosowaniu czasów zatrzymania w stopniu termofilnym i mezofilnym odpowiednio $HRT_T=1$ d oraz $HRT_M=14$ d, sumaryczna produkcja metanu wynosiła $333 \text{ dm}^3\text{CH}_4/\text{kg s.m.o.}$ i była prawie 1,5-krotnie wyższa od uzysku metanu w procesie jednostopniowym mezofilnym. A zatem wstępny beztlenowy proces termofilny okazał się bardziej efektywny, w porównaniu z procesem tlenowym. Jednakże, gdy czas zatrzymania w reaktorze beztlenowym termofilnym został wydłużony do 2 dni, produkcja biogazu i metanu znacząco obniżyła się do około $185 \text{ dm}^3\text{CH}_4/\text{kg s.m.o.}$ Stwierdziłem, iż wydłużenie czasu zatrzymania w stopniu termofilnym sprzyjało uwalnianiu amoniaku, który doprowadzany wraz z osadami do komory mezofilnej II stopnia powodował wyraźną inhibicję metanogenezy. Ponadto odnotowałem, iż wraz ze wzrostem stężenia amoniaku w reaktorze mezofilnym, zmienił się też profil lotnych kwasów tłuszczowych. W szczególności odnotowałem znaczny wzrost zawartości kwasu propionowego (głównego inhibitora metanogenezy spośród wszystkich LKT) przekraczając wartość 1200 g/m^3 . A zatem wykazałem, iż w przypadku substratów o niskim stosunku C/N, zastosowanie procesu dwustopniowego ma sens jedynie wtedy, gdy czas zatrzymania w stopniu termofilnym będzie krótki umożliwiając intensyfikację hydrolizy polimerów organicznych, ale nie dopuszczając do intensywnego rozkładu białek z uwalnianiem amoniaku i kwasów lotnych.

Publikacje:

- 1) **Borowski S.** 2003. Termofilna stabilizacja tlenowa osadów ściekowych. *Forum Eksploatora* 11: 11-13.
- 2) **Borowski S.** 2003. Dwustopniowa tlenowo-beztlenowa stabilizacja osadów ściekowych. *Forum Eksploatora* 12: 10-13.
- 3) **Borowski S., Szopa J.** 2007. Experiences with the dual digestion of municipal sewage sludge. *Bioresource Technology* 98: 1199-1207. **IF₂₀₀₇=3,103** (24 pkt. MNiSW)
- 4) **Borowski S.,** 2015. Temperature-phased anaerobic digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation* 105: 106-113. **IF_{5-letni}=2,377** (30 pkt. MNiSW)

4.3. Dezodoryzacja pomiotu kurzego oraz kompostu z wykorzystaniem mikroorganizmów immobilizowanych na nośnikach mineralnych

W latach 2007-2011 byłem głównym wykonawcą zadania nt. „Opracowanie nowego biopreparatu mikrobiologicznego służącego do usuwania odorów z kompostu oraz pomiotu kurzego. Sprawdzenie działania biopreparatu w warunkach laboratoryjnych”, realizowanego w ramach projektu badawczego zamawianego PBZ-MEiN-5/2/2006 „Nowe metody i technologie dezodoryzacji w produkcji przemysłowej, rolniej i gospodarce komunalnej”. Zadanie realizowałem we współpracy z Zakładem Mikrobiologii Technicznej Instytutu Technologii Fermentacji i Mikrobiologii (zespół dr hab. Beaty Gutarowskiej, prof. PL), a także z dwoma ośrodkami: Uniwersytetem Przyrodniczym we Wrocławiu (Wydział Biologii i Hodowli Zwierząt, zespół prof. dr hab. Romana Kołacza) oraz Uniwersytetem Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy (Katedra Chemii Środowiska, zespół prof. dr hab. Janusza Hermanna).

W ramach badań, wyizolowane zostały szczepy bakterii oraz grzybów wykazujące aktywność w usuwaniu związków odorowych z pomiotu kurzego i kompostu. Szczepy te zostały naniesione na nośniki mineralne: perlit, bentonit oraz mieszaninę obu minerałów. Wytworzony w ten sposób biopreparat badany był pod kątem skuteczności dezodoryzacji kompostu i pomiotu kurzego w warunkach laboratoryjnych oraz ułamkowo technicznych. Sposób nanoszenia mikroorganizmów na nośniki został opatentowany – patent nr P-393863 „Sposób otrzymywania biopreparatu do usuwania związków odorowych z pomiotu kurzego”, twórcy: Sebastian Borowski, Beata Gutarowska, Bogumił Brycki, Roman Kołacz. Preparat mikrobiologiczny wykazywał blisko 90% skuteczność usuwania m.in. amoniaku, siarkowodoru, metyloamii, kwasu izomasłowego oraz tioli. Stwierdzono również znaczące obniżenie stężeń aminokwasów, które mogą być prekursorami azotowych związków odorowych. Ponadto ustalono, iż preparat może być przechowywany przez okres 4 miesięcy bez wyraźnej zmiany w żywotności drobnoustrojów, niezależnie od temperatury przechowywania (4-37°C).

Mój udział w badaniach polegał na zaprojektowaniu i wykonaniu stanowiska laboratoryjnego do prowadzenia dezodoryzacji kompostu i pomiotu kurzego oraz opracowaniu metodyki pomiaru stężeń związków odorowych. Ponadto brałem udział w badaniach nad wyizolowaniem szczepów bakterii i grzybów zdolnych do usuwania związków odorowych z pomiotu i kompostu. Wraz z zespołem opracowałem też metodę nanoszenia mikroorganizmów na nośniki mineralne.

Wyniki badań nad wykorzystaniem aktywnych mikroorganizmów do dezodoryzacji kompostu i pomiotu kurzego opisano w publikacjach II.A.2,3,4,7,8,9; II.E.8,9,10,13,17,18 oraz zaprezentowano na konferencjach III.B.4,7,8,9,11,15.

Warto również zaznaczyć, iż wieloletnie badania prowadzone nad biopreparatem zaowocowały międzynarodowymi wyróżnieniami: złotym medalem na Targach Wynalazczości w Seulu (2-5.12.2010), srebrnym medalem na Salonie Innowacji w Genewie (8.04.2011) oraz brązowym medalem i wyróżnieniem na Wystawie Technologii w Malezji (17-19.02.2011) - załącznik 8.

Badania kontynuuję w ramach projektu nr PBS2/B8/14/2014 „Innowacyjny biopreparat dezodoryzujący dla drobiarskich pomieszczeń produkcyjnych” finansowanego przez NCBiR. W projekcie tym jestem głównym wykonawcą zadania nr 5 pt. Dopracowanie i wybór formy biopreparatu. Na potrzeby realizacji tego projektu zostało utworzone konsorcjum naukowe składające się z następujących podmiotów: Politechnika Łódzka (Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii), Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie (Wydział Medycyny Weterynaryjnej, zespół dr hab. Tadeusza Bakuły), Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu (Wydział Biologii i Hodowli Zwierząt, zespół prof. dr hab. Romana Kołacza i prof. dr hab. Zbigniewa Dobrzańskiego), Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy (Katedra Chemii Środowiska, zespół prof. dr hab. Janusza Hermanna), JHJ sp. z o. o.

W ramach zadania 5 zmodernizowałem instalację do prowadzenia badań dezodoryzacji pomiotu kurzego, dostosowując ją do projektu. Wraz z partnerem przemysłowym, firmą JHJ, opracowałem 3 formy biopreparatu, które następnie były testowane we wspomnianej instalacji. Brałem udział również w innych zadaniach tego projektu prowadzonych w naszym Instytucie, co zostało już udokumentowane w publikacjach naukowych II.A.7 oraz II.A.9. W ramach zadania 2 pt. „Wpływ lotnych związków odorowych występujących w pomiole ptasim na tkanki drobiowe”, przygotowywałem próbki lotnych związków odorowych do testów cytotoksyczności i genotoksyczności. W zadaniu 4 pt. „Wpływ dodatku ekstraktu z *Yucca schidigera* na efektywność usuwania związków odorowych z pomiotu drobiowego” uczestniczyłem w badaniach efektywności usuwania związków odorowych przez ekstrakt z *Yucca schidigera*. Przygotowywałem również biopreparat do badań w ramach zadania 6, pt. „Opracowanie dawkowania biopreparatu” oraz zadania 7 pt. „Skuteczność usuwania związków odorowych z pomiotu drobiowego”. Wymiernym rezultatem projektu będzie innowacyjny biopreparat służący do dezodoryzacji pomiotu kurzego, który firma JHJ we współpracy z Politechniką Łódzką planuje wdrożyć do produkcji.

Publikacje:

- 1) Breza-Boruta B., Hermann J., Paluszak Z., Troczyński M., Borowski S., Gutarowska B., Wojewódzki P., 2010. Prognozowanie i zapobieganie emisji odorów i bioserozoli do środowiska w przemyśle rolnospożywczym i gospodarce komunalnej, Współczesna problematyka odorów (Małgorzata Szynkowska i Jerzy Zwoliński, red.), WNT, Warszawa, s. 408-451. (4 pkt. MNiSW)
- 2) Gutarowska B., Borowski S., Durka K., Korczyński M., Kolacz R. 2009. Selekcja drobnoustrojów zdolnych do usuwania związków odorowych z pomiotu kurzego, Przemysł Chemiczny 88: 440-445. IF₂₀₀₉=0,332 (15 pkt. MNiSW)
- 3) Borowski S., Gutarowska B., Durka K., Korczyński M., Opaliński S., Kolacz R. 2010. Dezodoryzacja nawozu organicznego metodą biologiczną, Przemysł Chemiczny 89: 318-322. IF₂₀₁₀=0,29 (20 pkt. MNiSW)
- 4) Gutarowska B., Matusiak K., Borowski S., Rajkowska A., Brycki B. 2014. Removal of odorous compounds from poultry manure by microorganisms on perlite - bentonite carrier. Journal of Environmental Management 141: 70-76. IF₂₀₁₄=2,723 (35 pkt. MNiSW)
- 5) Matusiak K., Borowski S., Opaliński S., Bakula T., Kolacz R., Gutarowska B., 2015. Impact of a microbial-mineral biopreparation on microbial community and deodorization of manures. Acta Biochimica Polonica 62: 791-798. IF_{5-letni}=1,595 (15 pkt. MNiSW)
- 6) Oleksy M., Dobrzański Z., Matusiak K., Borowski S., Gutarowska B., Korczyński M., 2015. Fizykochemiczne i biologiczne metody dezodoryzacji – aspekty teoretyczne i praktyczne (Physicochemical and biological methods of deodorization – theoretical and practical aspects). Przemysł Chemiczny 95: 213-219. IF_{5-letni}=0,332 (15 pkt. MNiSW)
- 7) Matusiak K., Oleksy M., Borowski S., Nowak A., Korczyński M., Dobrzański Z., Gutarowska B., 2016. The use of *Yucca schidigera* and microbial preparation for poultry manure deodorization and hygienization. Journal of Environmental Management 170: 50-59. IF_{5-letni}=3,895 (35 pkt. MNiSW)
- 8) Durka K., Gutarowska B., Borowski S., Pielech-Przybylska K., Irzyniec Z., Korczyński M., Kolacz R. 2010. Ocena efektywności usuwania związków odorowych z pomiotu kurzego przez aktywną mikroflorę, Ekologia i Technika 104: 12-20. (6 pkt. MNiSW)
- 9) Durka K., Gutarowska B., Pielech-Przybylska K., Borowski S., Irzyniec Z., Paluszak Z., Hermann J. 2010. Ocena efektywności usuwania związków odorowych z kompostu przez aktywne bakterie. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 31: 71-83. (6 pkt. MNiSW)
- 10) Durka K., Gutarowska B., Borowski S. 2011. Biopreparation for the removal of odors from poultry manure. Sepsis 4: 102. (2 pkt. MNiSW)
- 11) Durka K., Gutarowska B., Borowski S., Brycki B., Rembisz D., Kleczyk M. 2012. Efektywność biologicznego usuwania odorowych związków lotnych z pomiotu kurzego. Ochrona przed Koroną 55 (9s/A): 215-218. (4 pkt. MNiSW)
- 12) Matusiak K., Gutarowska B., Borowski S. 2013. Charakterystyka mikroorganizmów zdolnych do usuwania odorowych związków lotnych z pomiotu kurzego. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 41: 89-101. (5 pkt. MNiSW)

Patenty:

- 1) Patent nr P-393863, pt. „Sposób otrzymania biopreparatu do usuwania związków odorowych z pomiotu kurzego”, autorzy – Borowski Sebastian, Gutarowska Beata, Brycki Bogumił, Kolacz Roman – uzyskano w 2015 roku.
- 2) Zgłoszenie patentowe nr P-415395 wniesione dnia 18.12.2015 r., pt. „Metoda dezodoryzacji i higienizacji pomiotu drobiowego z wykorzystaniem biopreparatu i ekstraktu roślinnego *Yucca schidigera*”, autorzy – Matusiak Katarzyna, Gutarowska Beata, Borowski Sebastian, Burchardt Hieronim.
- 3) Zgłoszenie patentowe nr P.416658 wniesione dnia 29.03.2016 r. pt. „Kompozycja pożywki mikrobiologicznej do hodowli szczepów współtworzących biopreparat dezodoryzujący”, autorzy Makowski Krzysztof, Gutarowska Beata, Matusiak Katarzyna, Borowski Sebastian, Burchardt Hieronim.

Konferencje:

- 1) **Borowski S.**, Gutarowska B. Odor removal from the environment through the action of microorganisms. International Symposium on "NEW RESEARCH IN BIOTECHNOLOGY" USAMV Bucharest, Romania, November 20-12, 2008.
- 2) Durka K., Gutarowska B., **Borowski S.**, Pielech-Przybylska K., Irzyniec Z., Korczyński M., Kolacz R. 2009. Ocena efektywności usuwania związków odorowych z pomiotu kurzego przez aktywną mikroflorę, *Materiały V Międzynarodowej Konferencji Naukowej nt. Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych*, ITRiM, Łódź: 125.
- 3) Durka K., Gutarowska B., Pielech-Przybylska K., **Borowski S.**, Irzyniec Z., Paluszak Z., Hermann J. 2009. Ocena efektywności usuwania związków odorowych z kompostu przez aktywną mikroflorę, *XLIII Międzynarodowe Sympozjum Mikrobiologiczne nt. Wkład mikrobiologii w rozwój rolnictwa i ochrony środowiska – 90-lecie mikrobiologii w Polsce*, 02-05.09, Warszawa: 37-38.
- 4) Durka K., Gutarowska B., **Borowski S.** 2012. Uzdolnienia biochemiczne mikroorganizmów usuwających związki odorowe z pomiotów. *46 Międzynarodowa Konferencja Naukowa pt. Mikrobiologia w ochronie zdrowia człowieka i środowiska*, 3-6 czerwca, Bydgoszcz.
- 5) Matusiak K., Gutarowska B., **Borowski S.** 2014. Biopreparation to odorous compounds removal. *XVI IEB3 Symposium*, Łódź: 90.
- 6) **Borowski S.**, Matusiak K., Pielech-Przybylska K., Gutarowska B., Makowski K., Kubacki P., 2015. Optymalizacja formy biopreparatu do dezodoryzacji drobiarskich pomieszczeń produkcyjnych. *XL Międzynarodowe Seminarium Naukowo Techniczne „Chemistry for Agriculture”*, 29 listopada - 2 grudnia 2015, Karpacz.
- 7) Borowski S., Matusiak K., Pielech-Przybylska K., Gutarowska B., 2016. A novel method of poultry manure deodorization by active microorganisms. *International Conference on Engineering & Technology, Computer, Basic & Applied Science*. Beijing, China, March 21-22.

Nagrody:

- 1) Gold Prize presented to Gutarowska Beata, **Borowski Sebastian**, **Korczyński Mariusz**, **Kolacz Roman** from Poland in recognition of excellent and creative efforts to invent BIOPREPARATION FOR REMOVAL OF ODORS FROM POULTRY MANURE, exhibited at the Seoul International Invention Fair 2010, organized by the Korean Invention Promotion Association in Seoul, KOREA, December 2-5, 2010.
- 2) *Medaille d'argent pour l'invention: Preparation biologique pour neutraliser les odeurs du Fekier des volailles*, de remettre a B.Gutarowska, **S.Borowski**, **M.Korczyński**, **R.Kolacz** *Salon International des Inventions*, Geneve, le 8 avril 2011.
- 3) Bronze Medal presented to Technical University of Lodz, Institute Technology Fermentation & Microbiology, B.Gutarowska, **S.Borowski**, **B.Erycki**, **M.Korczyński**, **R.Kolacz**, for the invention/innovation of BIOPREPARATION FOR REMOVAL OF ODORS FROM POULTRY MANURE. Malaysia Technology Expo 2011, 17-19 February 2011, Kuala Lumpur.
- 4) Special Award presented to Beata Gutarowska, **Sebastian Borowski**, **Bogumił Erycki**, **Mariusz Korczyński**, **Roman Kolacz**, for valuable idea entitled: BIOPREPARATION FOR REMOVAL OF ODORS FROM POULTRY MANURE. Presented at 10th Malaysia Technology Expo, 10th Invention & Innovation Awards, 17-19 February 2011 in Kuala Lumpur, Malaysia.
- 5) Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Instytutu Technologii Fermentacji i Mikrobiologii Politechniki Łódzkiej, za projekt pod nazwą „Biopreparat do usuwania odorów z pomiotu kurzego”. Twórcy: dr Beata Gutarowska, dr inż. Sebastian Borowski, dr Mariusz Korczyński, prof. dr hab. Roman Kolacz.

4.4. Intensyfikacja produkcji biogazu z odpadów lignocelulozowych

Substancje organiczne zawarte w odpadach są często złożonymi polimerami organicznymi, które są mało podatne lub wręcz nie podatne na hydrolizę i proces fermentacji beztlenowej. W szczególności biomasa roślinna, składająca się głównie z lignocelulozy, wymaga wstępnej obróbki przed skierowaniem jej do produkcji biogazu. W przypadku osadów ściekowych, wstępna obróbka enzymatyczna lub termochemiczna wykorzystywana jest przede wszystkim do niszczenia ścian komórkowych mikroorganizmów będących głównym składnikiem tych osadów. Efektem jest zwiększenie podatności osadów na proces fermentacji beztlenowej, co skutkuje wyższą produkcją biogazu. Istotne jest jednak, aby koszty takiej obróbki nie przekroczyły przychodów związanych z dodatkowym uzyskiem biogazu z odpadów. Powyższe przesłanki skłoniły mnie do podjęcia badań nad termochemiczną obróbką wstępną odpadów organicznych w celu intensyfikacji produkcji biogazu.

W roku 2011 podjąłem współpracę z firmą Instal Warszawa S.A., z którą zawiązałem konsorcjum naukowe na potrzeby projektu nr UDA-POIG.01.04.00-14-145/11, pt. „Intensyfikacja produkcji biogazu w komunalnej oczyszczalni ścieków wykorzystująca odpady poczyszczalniowe”. Nasze zadanie w ramach projektu polegało na wykorzystaniu cieczy pofermentacyjnej bogatej w amoniak do hydrolizy chemicznej osadów ściekowych, celem zwiększenia uzysku biogazu. Ponadto, zastosowaliśmy do obróbki wstępnej kwas siarkowy, wodorotlenek sodu oraz enzymy wyprodukowane przez szczepy *Aspergillus niger*. Badania prowadzone były na substratach testowych (wysłodki, słoma, tektura oraz liście), a także na osadach ściekowych. Wykazaliśmy, iż termochemiczna hydroliza umożliwia ponad 40-krotne zwiększenie zawartości cukrów redukujących, oraz blisko 20-krotne zwiększenie LKT w substratach testowych, a związki te są podstawowymi substratami do produkcji biogazu.

Wyniki tych badań zostały opublikowane w II.A.10 oraz zaprezentowane na konferencjach naukowych III.B.12,13,16.

Mój wkład w opisywane badania polegał na opracowaniu koncepcji hydrolizy termochemicznej osadów ściekowych i odpadów pochodzenia roślinnego poprzez wykorzystanie do tego celu cieczy pofermentacyjnych bogatych w amoniak. Wspólnie z zespołem, opracowaliśmy metodykę badawczą, zaprojektowaliśmy i wykonaliśmy stanowisko badawcze do prowadzenia hydrolizy termochemicznej oraz przeprowadziliśmy eksperymenty z wykorzystaniem substratów testowych oraz osadów

ścielkowych. Efektem tych prac jest, poza wymienionymi wyżej publikacjami, zgłoszenie patentowe nr P-414796, pt. „Sposób obróbki wstępnej słomy żytniej przeznaczonej na surowiec do procesów biotechnologicznych”.

Publikacje i patenty:

- 1) Domański J., Borowski S., Marchut-Mikolajczyk O., Kubacki P., 2016. Pretreatment of rye straw with aqueous ammonia for conversion to fermentable sugars as a potential substrates in biotechnological processes. *Biomass and Bioenergy* 91: 91-97.
- 2) Domański J., Borowski S. 2014. Chemical pretreatment of sugar beet pulp. XVI IBBS Symposium, Łódź: 180.
- 3) Domański J., Borowski S., Kubacki P., 2014. Leaves as potential substrates for biotechnological processes. XVI IBBS Symposium, Łódź: 181.
- 4) Domański J., Borowski S., Kubacki P., Drodziński P., 2015. Hydrolyza chemiczna liści. XL Międzynarodowe Seminarium Naukowo Techniczne „Chemistry for Agriculture”, 29 listopada – 2 grudnia 2015, Karpacz.
- 5) Zgłoszenie patentowe nr P-414796 wniesione dnia 16.11.2015 r., pt. Sposób obróbki wstępnej słomy żytniej przeznaczonej na surowiec do procesów biotechnologicznych, autorzy Domański Jarosław, Polewczyk Arkadiusz, Borowski Sebastian.

5. Sumaryczne zestawienie dorobku naukowego

Jestem autorem lub współautorem 31 publikacji, w tym 15 prac w czasopismach będących na liście filadelfijskiej oraz 2 rozdziałów w monografiach.

W chwili obecnej 3 publikacje są w recenzji w czasopismach z listy filadelfijskiej (łącznie impact factor 9,59). Jestem autorem lub współautorem 18 doniesień naukowych prezentowanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych, w tym 2 referatów ustnych na konferencjach międzynarodowych. Ze względu na aplikacyjny charakter moich badań, część z nich zostało opublikowane w czasopismach branżowych, skierowanych do pracowników zajmujących się biotechnologią i ochroną środowiska.

Prace oryginalne i przeglądowe publikowałem w następujących czasopismach:

- Acta Biochimica Polonica (IF=1,595) 1
- Biomass & Bioenergy (IF=4,273) 1
- Bioresource Technology (IF=5,039) 2
- Ekologia i Technika 5
- Forum Eksploatatora 3
- International Biodeterioration and Biodegradation (IF=2,377) 1
- Journal of the Air & Waste Management Association (IF=1,56) 1
- Journal of Environmental Management (IF=2,723) 3

- Ochrona przed Korozją 4
- Przemysł Chemiczny (IF=0,332) 4
- Waste Management (IF=3,22) 2
- Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 2

Ponadto, jestem współautorem 3 zgłoszeń patentowych oraz 1 patentu. Uczestniczyłem, bądź dalej uczestniczę w 9 projektach badawczych, w tym w 3 projektach jako kierownik.

Wśród najważniejszych projektów w których brałem udział można wyróżnić: projekt badawczy zamawiany nr **PBZ-MEiN-5/2/2006** nt. „Nowe metody i technologie dezodoryzacji w produkcji przemysłowej, rolniej i gospodarce komunalnej” (realizowany w latach 2007-2010) oraz projekt współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego nr UDA-POIG.01.04.00-14-145/11, nt. „Intensyfikacja produkcji biogazu w komunalnej oczyszczalni ścieków wykorzystująca odpady poczyszczalniowe” (realizowany w latach 2012-2015).

Obecnie jestem kierownikiem dużego projektu badawczego GEKON1/O3/213552/28/2015 pt. „Biokonwersja odpadów pofermentacyjnych z biogazowni: ochrona wód i paliwo III generacji”, finansowanego przez NCBIR w ramach programu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych. Projekt ten jest realizowany we współpracy z firmą Ekospot, która jest liderem, a efektem prac będzie wdrożenie technologii oczyszczania odcieków pofermentacyjnych w powstającej biogazowni przemysłowo-utylicyjnej w Kutnie.

Od kilku lat aktywnie angażuję się w recenzowanie manuskryptów publikacji naukowych. Łącznie wykonałem 73 recenzje do czasopism polskich i zagranicznych, w tym:

- Bioresource Technology 40
- Energy Conversion and Management 10
- Environmental Technology 6
- Waste Management 4
- Energy and Fuels 3
- Journal of Environmental Management 3
- Journal of Cleaner Production 2
- International Journal of Environmental Science and Technology 1
- Chemical Engineering Journal 1
- Renewable Energy 1

- Water Research 1
- Inżynieria i Ochrona Środowiska 1

Jako aktywny recenzent manuskryptów do czasopisma *Bioresourc Technology*, otrzymałem dwukrotnie prestiżowe wyróżnienie (za lata 2013 oraz 2014): „Outstanding reviewer” (załącznik 8).

6. Współpraca z przemysłem

Współpracę z przemysłem i gospodarką komunalną rozpocząłem już w trakcie wykonywania pracy doktorskiej w latach 1996-2001, w ramach której badałem osady ściekowe z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Tomaszowie Mazowieckim. Jednym z celów mojej współpracy w tamtym okresie była pomoc w rozwiązaniu gospodarki osadami ściekowymi w tej oczyszczalni. W kolejnych latach już po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem współpracę z oczyszczalnią w Tomaszowie, a także współpracowałem z oczyszczalniami ścieków w Łodzi, Kutnie, Piotrkowie Trybunalskim, Zgierzu, Sieradzu, Aleksandrowie Łódzkim, głównie w zakresie przeróbki i zagospodarowania osadów ściekowych. Efektem tej współpracy były liczne prace dyplomowe inżynierskie i magisterskie zrealizowane pod moją opieką, a także publikacje, m.in. II.E.3, II.E.19.

Za najistotniejszą uważam wieloletnią współpracę z firmą Ekospot Sp. z o.o. w Łodzi, którą rozpocząłem w 2008 roku. Firma Ekospot buduje w Kutnie instalację do termiczno – biologicznego przetwarzania odpadów oraz produkcji biogazu. Aktywnie uczestniczyłem i nadal uczestniczę w projektowaniu tej instalacji, w szczególności opracowałem technologię zagospodarowania masy pofermentacyjnej oraz oczyszczania odcieków po odwadnianiu przefermentowanych odpadów. W roku 2010 wykonałem ekspertyzę oceniającą wydajność projektowanej instalacji w Kutnie wraz z założeniami techniczno-technologicznymi niezbędnymi do jej uruchomienia. Wraz ze spółką Ekospot zrealizowałem projekt nr 68/WDB/DPP/14 pt. "Znaczące ulepszenie technologii produkcji biogazu poprzez wykorzystanie jako substratu odpadów poubojowych wraz z ich wstępną hydrolizą enzymatyczną ", w ramach "Programu Wsparcie w ramach dużego bonu - Edycja 2014 r". Aktualnie jestem kierownikiem dużego projektu badawczego nr GEKON1/O3/213552/28/2015 pt. „Biokonwersja odpadów pofermentacyjnych z biogazowni: ochrona wód i paliwo III generacji”, finansowanego w ramach programu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych. Na potrzeby tego projektu zostało powołane

konsorcjum naukowo-przemysłowe, którego liderem jest firma Ekospot. Będąc stałym współpracownikiem Ekospot, podjąłem również współpracę z niemiecką firmą Rehau-Energy Solutions GmbH. Firma ta jest głównym projektantem biogazowni w Kutnie. W ramach współpracy, wielokrotnie uczestniczyłem w spotkaniach zarówno w siedzibie firmy Plauen (Niemcy), jak i w Kutnie. Efektem tej współpracy jest opracowana technologia przetwarzania odpadów wraz z produkcją biogazu oraz zagospodarowaniem masy pofermentacyjnej. Ponadto, pomagałem firmie Rehau przy projektowaniu innych biogazowni rolniczych i komunalnych na terenie Polski i Niemiec.

Za równie istotną uważam wieloletnią współpracę z firmą Aqua-Processer Sp. z o.o. z Gorzowa Wielkopolskiego. W ramach współpracy z tą firmą, aktywnie uczestniczyłem w projektowaniu systemów autotermicznej termofilnej stabilizacji tlenowej osadów w nowo powstałych oczyszczalniach ścieków Biały Bór, Borne-Sulinowo oraz Grzaniąca zlokalizowanych w powiecie szczecineckim, woj. zachodniopomorskie. Po uruchomieniu tych oczyszczalni, prowadziłem w 2012 roku pracę naukowo-badawczą nt. „Ocena pracy instalacji termofilnej stabilizacji tlenowej w oczyszczalniach ścieków Biały Bór i Borne-Sulinowo”, finansowaną przez firmę Aqua-Processer. Obecnie nadal pomagam firmie przy projektowaniu i eksploatacji nowych obiektów, w tym otwartej w lutym 2016 roku oczyszczalni ścieków w miejscowości Zbąszyń (powiat nowotomyski).

Od roku 2013 współpracuję z zakładem Faurecia Automotive Polska w Grójcu, który jest producentem wyposażenia samochodów oraz metalowych konstrukcji siedzeń. W ramach tej współpracy zrealizowałem pracę naukowo-badawczą pt. „Usprawnienie funkcjonowania oczyszczalni ścieków przemysłowych zakładu Faurecia w Grójcu”.

Kolejną firmą z którą prowadzę współpracę jest Przedsiębiorstwo Instalacji Przemysłowych INSTAL WARSZAWA S.A. W latach 2012-2015 wspólnie z tą firmą zrealizowałem projekt nr UDA-POIG.01.04.00-14-145/11, nt. „Intensyfikacja produkcji biogazu w komunalnej oczyszczalni ścieków wykorzystująca odpady pooczyszczalniowe”

W ostatnich latach współpracuje również z firmą JHJ Sp. z o.o. przy realizacji projektu badawczego nr PBS2/B8/14/2014 pt. „Innowacyjny biopreparat deodoryzujący dla drobiarskich pomieszczeń produkcyjnych”. Dotychczasowymi efektami tej współpracy są wspólne zgłoszenie patentowe, 3 publikacje naukowe oraz manuskrypt publikacji złożony do czasopisma Journal of Environmental Management (w recenzji).

Od kilkunastu lat zajmuję się również realizacją projektów rekultywacji wysypisk oraz wyrobisk poeksploatacyjnych dla podmiotów prywatnych oraz gmin, głównie z terenu

województwa łódzkiego. Jestem autorem bądź współautorem 34 projektów rekultywacji wysypisk oraz wyrobisk poeksploatacyjnych.

7. Współpraca z krajowymi i międzynarodowymi jednostkami naukowymi

Od roku 2006 współpracuję z Uniwersytetem Przyrodniczym we Wrocławiu (prof. dr hab. Zbigniew Dobrzański, prof. dr hab. Roman Kołacz, dr hab. Mariusz Korczyński, dr hab. Sebastian Kołaczyński z Katedry Higieny Środowiska i Dobrostanu Zwierząt) oraz z Uniwersytetem Techniczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy (prof. dr hab. Janusz Hermann oraz dr inż. Piotr Wojewódzki z Katedry Chemii Środowiska). Wspólnie braliśmy udział w dwóch projektach badawczych pt. „Nowe metody i technologie dezodoryzacji w produkcji przemysłowej, rolnej i gospodarce komunalnej” oraz „Innowacyjny biopreparat deodoryzujący dla drobiarskich pomieszczeń produkcyjnych”. W ramach tego drugiego projektu współpracuję również z Uniwersytetem Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie (dr hab. Tadeusz Bakula, Wydział Medycyny Weterynaryjnej).

W roku 2014 rozpocząłem współpracę z dr hab. Przemysławem Malcem z Uniwersytetu Jagiellońskiego (Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii) oraz dr hab. Pawłem Kaszyckim z Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie (Wydział Biotechnologii i Ogrodnictwa). Wspólnie utworzyliśmy konsorcjum naukowe na potrzeby realizacji projektu badawczego pt. „Biokonwersja odpadów pofermentacyjnych z biogazowni: ochrona wód i paliwo III generacji”, w ramach programu GEKON.

Od roku 2002 współpracuję z prof. Laurence Weatherley'em z Uniwersytetu w Kansas, Chemical and Petroleum Engineering Department (USA). Każdego roku organizuję wykłady Profesora dla studentów International Faculty of Engineering PL w ramach przedmiotów Environmental Biotechnology, Environmental Protection oraz Ecological Aspects of Biotechnology. Profesor Weatherley uczestniczył jako ekspert w moim projekcie pt. „Kofementacja gnojowicy trzody chlewnej i odchodów kurzych z osadami ściekowymi”. Efektem tej współpracy były dwie prace dyplomowe magisterskie studentów Karoliny Gudaj oraz Artura Dębca, a także dwie wspólne publikacje naukowe I.B.1 oraz I.B.2.

Współpracuję również z zespołem prof. Bolin Zhang z Beijing Forestry University. W roku 2012 byłem promotorem pracy dyplomowej magisterskiej studentki Xiaojie Zhou, a w marcu bieżącego roku odbyłem staż naukowy w Beijing Forestry University.

8. Działalność dydaktyczna

Od 1996 roku do chwili obecnej prowadzę wykłady, ćwiczenia laboratoryjne i projektowe na kierunkach: Biotechnologia, Technologia Żywności i Żywienia Człowieka oraz Ochrona Środowiska Wydziału Biotechnologii i Nauk o Żywności PL, a także zajęcia w języku angielskim na kierunku Biotechnology (International Faculty of Engineering, IFE).

Opracowałem nowe programy nauczania 6 przedmiotów, w tym 3 w języku angielskim:

- Environmental Biotechnology (wykłady i ćwiczenia laboratoryjne) – przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Biotechnology, IFE;
- Environmental Protection (wykłady) - przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Biotechnology, IFE;
- Ecological Aspects of Biotechnology (wykłady) - przedmiot obowiązkowy dla studentów II stopnia kierunku Biotechnology, IFE;
- Ochrona Przyrody, Zagrożenia Cywilizacyjne i Zrównowagony Rozwój (wykład i projekt) – przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Ochrona Środowiska;
- Aparatura w Ochronie Środowiska (projekt) – przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Ochrona Środowiska;
- Ekologiczne Aspekty Biotechnologii (wykład) - przedmiot obowiązkowy dla studentów II stopnia kierunku Biotechnologia;

Ponadto prowadziłem bądź nadal prowadzę zajęcia z następujących przedmiotów, jak również jestem współautorem ich programów:

- Biotechnologia w Ochronie Środowiska (wykłady i ćwiczenia laboratoryjne) – przedmiot obowiązkowy dla studentów Studium Doktoranckiego przy Wydziale Biotechnologii i Nauk o Żywności, PL.
- Biotechnologia Środowiska (ćwiczenia laboratoryjne) – przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Biotechnologia;
- Technologia Oczyszczania Ścieków (ćwiczenia laboratoryjne) - przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Ochrona Środowiska;
- Mikrobiologiczne aspekty w ochronie środowiska (ćwiczenia laboratoryjne) – przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Ochrona Środowiska;

- Gospodarka wodno-ściekowa w zakładach przemysłu spożywczego (ćwiczenia laboratoryjne) – przedmiot obowiązkowy dla studentów I stopnia kierunku Technologia Żywności i Żywnienia

Byłem opiekunem 28 prac inżynierskich (w tym 2 prac w języku angielskim) oraz 28 prac magisterskich (w tym 11 prac w języku angielskim). Ponadto byłem opiekunem naukowym studentki z programu Erasmus: Sophie Rodriguez Goncalves z Portugalii.

Zrecenzowałem 10 prac inżynierskich i magisterskich, w tym 7 prac w języku angielskim. Aktualnie pełnię funkcję promotora ponowniczego przewodu doktorskiego mgr inż. Przemysława Kubackiego pt. „Oczyszczanie cieczy po fermentacji beztlenowej i odwadnianiu odpadów organicznych” (pod kierunkiem prof. dr hab. Ewy Liwarskiej-Bizukojć).

Za osiągnięcia w pracy dydaktyczno-wychowawczej, naukowej i organizacyjnej w latach 2004-2015 otrzymałem łącznie 11 nagród JM Rektora Politechniki Łódzkiej. W 2015 roku zostałem odznaczony przez Prezydenta RP Brązowym Medalem za Długoletnią Służbę.

9. Działalność organizacyjna

Aktywnie angażuję się w działalność organizacyjną Politechniki Łódzkiej. W latach 2006, 2009 i 2012 brałem udział w pracach Komitetu Organizacyjnego IV, V i VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej nt. „Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych”, organizowanej przez Instytut Technologii Fermentacji i Mikrobiologii PL. W roku 2014 byłem członkiem Komitetu Organizacyjnego XVI International Biodeterioration and Biodegradation Symposium. Od roku 2014 jestem również członkiem międzynarodowej organizacji Biodeterioration and Biodegradation.

W latach 2003-2007 pełniłem funkcję opiekuna roku studiów dziennych inżynierskich kierunku Ochrona Środowiska.

Wielokrotnie organizowałem wycieczki dydaktyczne dla studentów do Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi, zorganizowałem również wyjazd dydaktyczny do Kampinoskiego Parku Narodowego. Nieprzerwanie od roku 2002 organizuję wykłady Profesora Laurence Weatherley’a z Uniwersytetu w Kansas, dla studentów kierunku Biotechnologia, IFE.

W roku 2008 jako członek Komisji Akredytacyjnej przygotowywałem akredytację kierunku Ochrona Środowiska, byłem również członkiem Wydziałowej Komisji

Programowej ds. tego kierunku Od roku 2014 jestem członkiem Wydziałowej Komisji Programowej ds. kierunku Biotechnologia Środowiska. Aktywnie uczestniczyłem w tworzeniu programu studiów dla tego kierunku w oparciu o efekty kształcenia, a od 2014 roku pełnię funkcję koordynatora.

Od roku 2015 uczestniczę w tworzeniu kierunku międzyuczelnianego Biogospodarka. W tym samym roku otrzymałem z rezerwy Rektora PŁ dofinansowanie remontu laboratorium dydaktycznego w Zespole Ochrony Środowiska, którego będę kierownikiem. Jestem współautorem projektu tego laboratorium, a od stycznia 2016 roku koordynuję jego remont.

W dniu 5 marca 2015 r. zostałem powołany przez Ministerstwo Gospodarki, Departament Innowacji i Przemysłu do pracy w grupie roboczej ds. innowacyjnych technologii przetwarzania i odzyskiwania wody oraz zmniejszających jej zużycie, *Krajowych Inteligentnych Specjalizacji*. Jestem również członkiem grupy roboczej *Zrównoważony Kampus* Politechniki Łódzkiej - od 2013 roku.

W ramach działalności organizacyjnej na Politechnice Łódzkiej rozwijam również swoją pasję, którą jest fotografia. W latach 2010-2011 byłem opiekunem Akademickiej Grupy Fotograficznej FOCUS przy Politechnice Łódzkiej. Zorganizowałem również wystawę fotograficzną „The Best of Poland – Polska w obiektywie” – Biblioteka Główna Politechniki Łódzkiej, 18.01-06.02.2011 r.

Sebastian Borowski