

Autoreferat

o osiągnięciach w działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

Spis treści

1. Imię i Nazwisko.....	2
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	2
3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych.....	2
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.....	3
4 a. Tytuł osiągnięcia.....	3
4 b. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia.....	3
4 c. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	3
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....	16
5 a. Przed uzyskaniem stopnia doktora.....	16
5 b. Po uzyskaniu stopnia doktora.....	17
6. Informacja o działalności dydaktycznej, organizacyjnej, współpracy naukowej i popularyzacji nauki	27
7. Podsumowanie dorobku naukowego.....	31

1. Imię i nazwisko

Agnieszka Elwira Tuszyńska

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2001 r. – uzyskanie stopnia magistra inżyniera na kierunku inżynieria środowiska o specjalności inżynieria sanitarna na Wydziale Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej (obecnie: Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska), tytuł pracy magisterskiej „Projekt oczyszczalni ścieków dla wsi Bryzgiel o RLM = 1000 leżącej na terenie Wigierskiego Parku Narodowego”

2005 r. – uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska o specjalności technologia wody i ścieków na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, tytuł rozprawy doktorskiej „Wpływ substancji organicznej na natlenienie i efektywność usuwania zanieczyszczeń w złożach hydrofitowych”

3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

2001r. – 2005r. – stanowisko doktoranta Studium Doktoranckiego „Geotechnika i Inżynieria Środowiska” w Wydziale Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska (obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska) Politechniki Gdańskiej

2006r. – 2008r. - stanowisko asystenta w Katedrze Technologii Wody i Ścieków w Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

2006r. – 2008r. - stanowisko adiunkta w Zakładzie Ogrzewnictwa i Wentylacji w Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Akademii Techniczno-Rolniczej (obecnie: Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy)

2008r. – 2012r. - stanowisko adiunkta w Katedrze Technologii Wody i Ścieków w Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

2011 r. – 2017r. - stanowisko nauczyciela akademickiego w Wydziale Inżynieryjnym Wyższej Szkoły Zarządzania Środowiskiem w Tucholi

2012r. – do chwili obecnej - stanowisko adiunkta w Katedrze Inżynierii Sanitarnej w Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

a) Tytuł osiągnięcia

Analiza możliwości wykorzystania pofermentu jako źródła biodostępnego fosforu

b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia

Monografia:

Tuszyńska A. (2019) *Analiza możliwości wykorzystania pofermentu jako źródła biodostępnego fosforu*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, nr 153, Warszawa, 201s., ISBN: 978-83-63714-52-9

c) Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania

Technologia produkcji biogazu jest postrzegana jako jedno z najbardziej przyszłościowych rozwiązań w sektorze zagospodarowania odpadów i alternatywnej produkcji energii odnawialnej. W 2016 roku w Europie liczba biogazowni wynosiła ponad 17 tys. (o łącznej zainstalowanej mocy ok. 8300 MW_e), przy czym większość z nich stanowią biogazownie rolnicze. 80 % produkcji biogazu w Europie wytwarzają kraje wysokorozwinięte: Niemcy, Włochy, Francja i Wielka Brytania (Scarlat i in., 2018)¹. W Polsce biogazownie są zwykle postrzegane z oczyszczalniami ścieków stosującymi beztlenową stabilizację osadów ściekowych. Obecnie podobnie jak w innych krajach UE można zaobserwować znaczny wzrost liczby biogazowni rolniczych wykorzystujące substraty organiczne, przede wszystkim odpady hodowli zwierzęcej i produkcji rolno-spożywczej. Według danych z 2018 roku w polskich biogazowniach rolniczych wytwarzano około 400 mln m³ biogazu rolniczego, a łączna moc instalacji wynosiła 100,6 MW_e (Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa, KOWR, 2018). Ilość ta będzie systematycznie rosła ze względu na rozwój produkcji rolnej i intensyfikację produkcji i przetwórstwa rolno-spożywczej. Rosnąca liczba biogazowni rolniczych nie tylko w Europie ale i na świecie oznacza jednocześnie wzrost ładunku produktów ubocznych procesu fermentacji w postaci pulpy pofermentacyjnej (zwanej pofermentem). Produkty uboczne procesu fermentacji w biogazowniach rolniczych stanowią większy problem dla środowiska przyrodniczego niż biogazownie komunalne (zwykle zlokalizowane na terenie oczyszczalni ścieków i zakładów utylizacji odpadów). Obiektem komunalnym został narzucony obowiązek zagospodarowania i przetwarzania pofermentu przede wszystkim przez odwadnianie, suszenie i termiczne spalanie. Podczas, gdy biogazownie

¹ Scarlat N., Dallemand J. F., Fahl F. (2018) Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129: 457 - 472.

rolnicze napotykać zarówno na problem nadprodukcji pofermentu oraz niewłaściwe jego zagospodarowanie (Svoboda i in., 2013)². W praktyce oznacza to zwykle jego nadmierne rozsączanie w glebach prowadzące do nadmiernego obciążenia związkami biogennymi a także niekiedy ich niepożądaną infiltrację do wód podziemnych.

Ze względu na konieczność zwiększenia udziału energii odnawialnej w bilansie energetycznym i zmniejszenia wykorzystania paliw kopalnych konieczne są badania dotyczące nie tylko zwiększenia efektywności procesu oraz wykorzystania różnego rodzaju substratów, ale także zmniejszenia potencjalnego negatywnego oddziaływania obiektów przetwarzających różnego rodzaju odpady. Zgodnie z zasadami gospodarki cyrkulacyjnej produkcja energii powinna być powiązana z minimalizacją negatywnego oddziaływania produktów ubocznych procesu fermentacji. Dalsze inwestycje związane z rozwojem biogazowni wymagają poszukiwania rozwiązań problemu pofermentu.

W pracy podjęto analizę możliwości wykorzystania pofermentu jako źródła fosforu. Ograniczenie dostępności tego pierwiastka ze źródeł nieodnawialnych jest przyczyną poszukiwania alternatywnych źródeł fosforu np. ze ścieków, osadów komunalnych i przemysłowych, a także z pofermentu. Jest to zgodne z zasadami czystej produkcji, gdzie odpad przetwarzany jest na produkt, czy też możliwe jest odzyskanie z niego cennych surowców. Ze względu na wyczerpywanie się naturalnych źródeł fosforu (czemu towarzyszy wzrost cen surowców fosforowych) zagadnienia związane z poszukiwaniem alternatywnych jego źródeł są bardzo istotne.

Dotychczasowe wyniki badań ograniczały się do odzysku fosforu z pofermentu lub odcieków pofermentacyjnych powstałych podczas fermentacji osadów ściekowych lub odpadów komunalnych w biogazowniach komunalnych. Zaś w przypadku biogazowni rolniczych, doniesienia literaturowe opisujące odzysk związków biogennych dotyczyły wąskiej grupy odpadów rolniczych. Najczęściej poddawaną badaniom grupą odpadów były odchody zwierzęce lub odpady mleczarskie. Nie do końca rozpoznanym zagadnieniem jest wykorzystanie pofermentu do odzysku fosforu powstałego z fermentacji innych substratów pochodzenia rolniczego i spożywczego.

Celem pracy było rozpoznanie mobilności związków fosforu i możliwości ich odzysku w biodostępnej formie z pofermentu. Realizacja celu pracy wymagała przeprowadzenia badań substratów tzw. komponentów wsadowych (m.in. odpadów zwierzęcych, odpadów pochodzenia rolniczego i odpadów spożywczych) oraz produktów ubocznych otrzymanych w wyniku ich fermentacji. Kolejno prowadzono badania wpływu procesu fermentacji na transformację i mobilność związków fosforu we frakcji stałej, a następnie wykonano ocenę jakości odcieków w aspekcie możliwości wytrącania fosforu w biodostępnej formie (struwitu) a także ocenę potencjału nawozowego frakcji pofermentacyjnych.

² Svoboda N., Taube F., Wienforth B., Kluss C., Kage H., Herrmann A. (2013) Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. *Soil Tillage Res.* 130: 69 - 80.

Osiągnięcie celu pracy wymagało realizacji następujących zadań:

- 1) ocenę wpływu komponentów wsadowych na jakość produktów ubocznych fermentacji (frakcji stałej pofermentów i odcieków pofermentacyjnych);
- 2) analizę specyjną związków fosforu w surowcach i produktach ubocznych procesu fermentacji;
- 3) ocenę jakościową odcieków w aspekcie możliwości wytrącania biodostępnej formy fosforu;
- 4) określenie wartości nawozowych frakcji pofermentacyjnych.

Badania przeprowadziłam w dwóch obiektach w skali technicznej (biogazownia rolnicza Kożanówka i biogazownia rolnicza Przypisówka, zlokalizowane w woj. lubelskim) oraz w instalacji pilotowej (w komorze fermentacji w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej, ICHTJ w Warszawie). Badaniom poddałam wybrane odpady rolno-spożywcze, m.in.: wysłodki z buraka, wytloki z jabłek, gnojowicę bydlęcą, wywar gorzelniany, kiszonkę kukurydzy i mieszaniny poszczególnych substratów wprowadzane do fermentorów oraz pofermenty otrzymane z fermentacji poszczególnych monosubstratów i komponentów wsadowych. Próbkę pofermentów została następnie poddana separacji mechanicznej na frakcję stałą i frakcję ciekłą (odcieki pofermentacyjne).

Ad. 1. Wpływ komponentów wsadowych na jakość produktów ubocznych fermentacji

W celu oceny komponentów wsadowych na jakość produktów ubocznych fermentacji wykonałam następujące własności fizyczno-chemiczne:

- a) w komponentach wsadowych i frakcji stałej pofermentów – zawartości suchej masy i ogólnej masy organicznej, azotu Kiejdahla, jonów magnezu, wapnia, potasu, żelaza oraz pH;
- b) w odciekach pofermentacyjnych – zawiesiny ogólnej i zawiesiny organicznej, materii organicznej (ChZT), związków azotu ($\text{NH}_4\text{-N}$, N_{og}), jonów Mg, Ca, K, Fe oraz pH.

Zawartość suchej masy w analizowanych próbkach substratów zmieniała się od ok. 3 % do ponad 30 % s.m. Najniższą zawartość suchej masy zaobserwowałam w próbkach wywaru gorzelnianego i gnojowicy bydlęcej. Podczas, gdy próbki kiszonki kukurydzy i mieszaniny substratów z przeważającym udziałem tego surowca charakteryzowały się kilkukrotnie wyższą zawartością suchej masy. Ponadto substraty charakteryzowały się zarówno wysoką zawartością materii organicznej w suchej masie jak również zbliżonym jej udziałem. Średnia zawartość materii organicznej w substratach wynosiła ok. 80,0 %, a pozostałe ok. 20,0 % stanowiły substancje mineralne. W odniesieniu do frakcji stałej otrzymanej z fermentacji substratów, najwyższy udział materii organicznej w suchej masie stwierdziłam z fermentacji odpadów rolniczych (ok. 70,0 - 80,0 %), zaś najniższy (55,0 - 65,0 %) z fermentacji odpadów spożywczych, tj. z surowców wykazujących wysoką biodegradowalność (owoce i warzywa). Powszechnie uważa się, że frakcja stała pofermentu zawiera wysokie stężenia materii organicznej, zaś odcieki pofermentacyjne stanowią bogate źródło związków

azotu i innych składników pokarmowych (Tambone i Adani, 2017)³. Niemniej jednak wykazałam, że odcieki pofermentacyjne również zawierały wysokie stężenia materii organicznej i zawiesiny. Zawartość suchej masy we frakcji ciekłej pofermentów zmieniała się od 4,0 do ok. 10,0 %, podczas gdy zawartość materii organicznej od 20,0 do ponad 40,0 %, a wartości proporcji materii organicznej do suchej masy od 60,0 do ponad 70,0 %. Stężenie materii organicznej wyrażonej w ChZT w odciekach pofermentacyjnych zmieniały się w szerokim zakresie (od 3,5 do prawie 16 gO₂/L), przy czym wartości stężeń ChZT były związane z pochodzeniem pofermentu. Najwyższe wartości stężeń ChZT odnotowałam w odciekach z fermentacji wywaru gorzelnianego lub odchodów zwierzęcych, zaś najniższe w odciekach z fermentacji odpadów owocowo-warzywnych i lignocelulozowych odpadów rolniczych. Zaobserwowałam również, że współfermentowanie odchodów zwierzęcych z odpadami rolno-spożywczymi przyczyniła się do wzrostu wartości stężeń ChZT w odciekach. Udział takich pierwiastków jak: P, Mg, Ca, K i Fe był od ok. 3 do 9 - krotnie wyższy we frakcji stałej pofermentów w porównaniu z odciekami pofermentacyjnymi. Podczas, gdy najbardziej mobilnym pierwiastkiem okazał się N, którego udział we frakcji stałej pofermentów wynosił średnio 20,0 %. Określenie zawartości azotu ogólnego i jonów amonowych w analizowanych frakcjach pofermentów było istotne z punktu widzenia przestrzegania maksymalnych dawek azotu podczas nawożenia nimi gruntów rolnych (150 - 250 kgN/ha-rok, Dyrektywa 91/676/EWG⁴). Najwyższą zawartość azotu odnotowałam w próbkach frakcji stałej pofermentu z wywaru gorzelnianego, zaś wartości najniższe w próbkach z fermentacji odpadów z przewagą owoców i warzyw. Dominującą formą azotu w odciekach pofermentacyjnych stanowił azot amonowy powstający podczas hydrolizy białek i mocznika (składników substratów wsadowych) podczas procesu fermentacji. Szeroki zakres wartości stężeń jonów NH₄⁺ w ciekłej frakcji analizowanych pofermentów był związany z pochodzeniem surowców poddawanych fermentacji. Surowce wsadowe takie jak wywar gorzelniany i gnojowica bydłęca charakteryzowały się najwyższymi zawartościami azotu spośród wszystkich poddanych analizie surowców. Dlatego też najwyższe wartości stężeń jonów NH₄⁺ zaobserwowałam w odciekach z fermentacji tych odpadów, a najniższe wartości uzyskałam dla odcieków z fermentacji odpadów owocowo-warzywnych i lignocelulozowych odpadów rolniczych. Zaobserwowałam również, że współfermentowanie odchodów zwierzęcych lub wywaru gorzelnianego z odpadami rolno-spożywczymi przyczyniło się do wzrostu wartości stężeń jonów amonowych w odciekach. Określenie stężeń pozostałych makroelementów (m.in. potasu, magnezu, wapnia i żelaza) w odciekach pofermentacyjnych (które miałyby być stosowane do nawożenia upraw zielonych) jest również istotne z punktu widzenia nie przeżyźnienia tymi pierwiastkami gruntów rolnych (np. wartości zalecane dla

³ Tambone F., Adani F. (2017) Nitrogen mineralization from digestate in comparison to sewage sludge, compost and urea in a laboratory incubated soil experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*: 1 - 11.

⁴ Dyrektywa Rady z dnia 12 grudnia 1991 r. dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego (91/676/EWG).

potasu to 100 kg/ha-rok; Rollett i in., 2015⁵). W odciekach pofermentacyjnych najwyższymi wartościami stężeń charakteryzował się potas. Najwyższe stężenia Mg, Ca i Fe zaobserwowałam zaś w odciekach z fermentacji gnojowicy bydłowej (wartości wynosiły odpowiednio ok.: 0,15 g/L, 0,27 g/L oraz 0,03 g/L). Natomiast wartości stężeń Mg, Ca i Fe zarówno w odciekach z fermentacji odpadów zielonych włóknistych (kiszonka kukurydzy) jak i w odciekach z fermentacji odpadów z przemysłu spożywczego (wytłoki z jabłek i wysłodki z buraków) były kilkukrotnie niższe. Określenie wartości relacji azotu do fosforu (N : P) we frakcji stałej i ciekłej pofermentów było również istotne z punktu widzenia ograniczenia przeżyźnienia gruntów rolnych związkami fosforu (np. wartości zalecane dla fosforu to 60 kg/ha-rok; Rollett i in., 2015⁵). Obliczone wartości proporcji N : P były znacznie niższe we frakcji stałej pofermentów (wartości zmieniały się od 0,1 do 1,2) w porównaniu z odciekami pofermentacyjnymi (od ok. 2 do prawie 6). Frakcje pofermentacyjne charakteryzowały się niższymi wartościami ilorazu materii organicznej do azotu (MO : N) w porównaniu z ilorazami dla surowców wsadowych. Surowce wsadowe charakteryzowały się wartościami wskaźników MO : N zmieniającymi się od ok. 12 do 30. Wartości MO : N we frakcji stałej i ciekłej pofermentów zmieniały się odpowiednio: od ok. 10 do 26 oraz od 3 do 6 i były zbliżone do wartości prezentowanych w literaturze (Tambone i in., 2017)⁶.

Ad. 2. Analiza specyjacyjna związków fosforu w surowcach i produktach ubocznych procesu fermentacji

Ocenę znaczenia produktów ubocznych procesu fermentacji jako wtórnego źródła składników odżywczych przeprowadziłam na podstawie zawartości biologicznie dostępnego fosforu. Z przeglądu literatury wynika, że frakcje pofermentacyjne (frakcja stała pofermentu i odcieki pofermentacyjne) pochodzące z biogazowni rolniczych stanowią bogate źródło fosforu. Jednak wyniki badań ograniczają się zwykle do podawania ogólnej zawartości fosforu w produktach ubocznych fermentacji, zaś jest bardzo mało danych odnośnie udziału związków fosforu w formie labilnej i biodostępnej dla roślin w poszczególnych frakcjach pofermentacyjnych.

Podstawę wykonania oznaczeń poszczególnych połączeń fosforu w substratach i frakcji stałej pofermentów stanowił schemat frakcjonowania związków fosforu opisany w protokole *Standards in Measurements and Testing (SMT) Programme Extraction Protocol*. W ostatnich latach najczęściej stosowaną metodą specjacji związków fosforu (w odpadach, osadach ściekowych, w próbkach gleb czy też osadach dennych zbiorników wodnych) jest scharmonizowany SMT protokół (*Standards in Measurements and Testing (SMT) Programme extraction protocol*), który został zatwierdzony przez Komisję Europejską jako postulowana metoda do ekstrakowania określonych form fosforu (Pokhrel i

⁵ Rollett A., Taylor M., Chambers B., Litterick A. (2015) Guidance on Suitable Organic Material Applications for Land Restoration and Improvement: Final Report.

⁶ Tambone F., Orzi V., D'Imporzano G., Adani F. (2017) Solid and liquid fractionation of digestate: mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. *Bioresour. Technol.* 243: 1251 - 1256.

in., 2018)⁷. Dlatego też, przyjąłem niniejszą metodę specjacji fosforu w surowcach wsadowych i frakcji stałej pofermentów. W tej metodzie ekstrakcji, fosfor został podzielony na tzw. fosfor organiczny (frakcja OP) oraz fosfor nieorganiczny z wyszczególnieniem jego form w połączeniach z tlenkami i wodorotlenkami Al, Fe, Mg i Mn (jako frakcja NAIP) i w połączeniach z Ca (jako frakcja AP). Frakcja NAIP reprezentowała nietrwałe i wysoce rozpuszczalne formy fosforu takie, jak struwit ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) i uwodniony fosforan glinu ($AlPO_4 \cdot 2H_2O$), zaś frakcja OP - połączenia fosforu z materią organiczną, fosfolipidy, DNA, proste monoestry fosforanowe. Frakcję AP reprezentowały formy fosforu od umiarkowanej do niskiej rozpuszczalności, tj. dwuwodny fosforan dwuwapniowy ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$), słabo rozpuszczalny hydroksyapatyt ($Ca_5(PO_4)_2OH$), sole kwasu fitynowego i fosforan wapnia (Ajiboye i Akrinremi, 2007⁸; Turner i Leytem, 2004⁹). Natomiast w analizowanych odciekach pofermentacyjnych oznaczałem formy fosforu organicznego i nieorganicznego w zawiesinie i w postaci rozpuszczonej stosując ogólnie przyjętą metodę oznaczania fosforu z zastosowaniem kwasu wanadomolibdenowego. Metoda ta jest stosowana do oznaczania frakcji fosforu w próbkach ścieków i wody w celu oceny potencjalnej biodostępności fosforu i ryzyka eutrofizacji (Li i Brett, 2015)¹⁰. Dzięki tej metodzie analitycznej wyróżniłem fosfor ogólny (TP), fosfor ogólny rozpuszczony (TDP) oraz fosfor molibdenianowy reaktywny i niereaktywny w postaci rozpuszczonej i w zawiesinie (odpowiednio frakcje: SRP i SNRP oraz PRP i PNRP). Fosfor molibdenianowy reaktywny w postaci rozpuszczonej jest często utożsamiany z jonami ortofosforanowymi. Natomiast organiczne i najbardziej skondensowane związki fosforu zostały sklasyfikowane jako fosfor molibdenianowy niereaktywny (zarówno w postaci rozpuszczonej i w zawiesinie) (Li i Brett, 2015)¹⁰.

Na podstawie przeprowadzonych badań dowiodłem, że odchody zwierzęce i wywar gorzelniany stanowiły źródło najwyższej zawartości fosforu ogólnego (suma frakcji OP, NAIP i AP) w porównaniu z pozostałymi analizowanymi surowcami. W odpadach tych zawartość fosforu była ponad 10-krotnie wyższa w porównaniu z odpadami lignocelulozowymi (które zaliczane są do odpadów rolniczych) i z odpadami owocowo-warzywnymi. W surowcach wsadowych stwierdziłem obecność fosforu zarówno w formie organicznej (OP) jak i nieorganicznej (IP). We wszystkich analizowanych grupach odpadów zaobserwowałem największą zawartość fosforu we frakcji IP, zaś najmniejszą we frakcji OP. Odchody zwierzęce charakteryzowały się zawartością fosforu nieorganicznego: ok. 25,0 mg/g_{s.m.}, a odpady owocowo-warzywne: ok. 2,0 mg/g_{s.m.}. Również fosfor we

⁷ Pokhrel S. P., Milke M.W., Bello-Mendoza R., Buitrón G., Thiele J. (2018) Use of solid phosphorus fractionation data to evaluate phosphorus release from waste activated sludge. *Waste Manage.* 76: 90 - 97.

⁸ Ajiboye B., Akrinremi O.O. (2007) Phosphorus speciation of sequential extracts of organic amendments using nuclear magnetic resonance and x-ray absorption near-edge structure spectroscopies. *J. Environ. Qual.* 36: 1563 - 1576.

⁹ Turner B. L., Leytem A. B. (2004) Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: chemical speciation and a novel fractionation procedure. *Environ. Sci. Technol.* 38: 6101 - 6108.

¹⁰ Li B., Brett M. T. (2015) The relationship between operational and bioavailable phosphorus fractions in effluents from advanced nutrient removal systems. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12: 3317 - 3328.

frakcjach pofermentacyjnych występował głównie jako fosfor nieorganiczny a jego zawartość determinowała biomasa wsadowa. Uzyskane wyniki analizy specjacyjnej fosforu we frakcjach pofermentacyjnych znacznie różniły się od zawartości fosforu w innych suplementach nawozowych. Dla porównania w osadach ściekowych fosfor zwykle występował we frakcji organicznej i frakcji NAIP (udział tych biodostępnych form fosforu wynosił około 80,0 % w odniesieniu do całkowitej zawartości fosforu) (Xie i in., 2011)¹¹.

W przypadku analizy wpływu fermentacji na biodostępność fosforu, zdania są bardzo podzielone. Niektórzy autorzy twierdzą, że w pofermencie występuje większa zawartość fosforu biodostępnego dla roślin w porównaniu z substratem wsadowym (Möller i Müller, 2012)¹². Podczas gdy inni autorzy są przeciwnego zdania (Hjorth i in., 2010¹³; Khalid i in., 2011¹⁴). Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdziłam, że udział fosforu biodostępnego, tj. o wysokim potencjale mobilności (suma frakcji NAIP i OP) w produktach ubocznych fermentacji uległ znacznemu obniżeniu w porównaniu z zastosowanymi surowcami, a jego zawartość w poszczególnych frakcjach pofermentacyjnych determinowała biomasa wsadowa. Zawartość form fosforu o wysokim potencjale mobilności we frakcji stałej pofermentów uległa obniżeniu od ok. 8,0 do 20,0 % w porównaniu z surowcami wsadowymi. Najwyższą zawartość fosforu biodostępnego zaobserwowałam w próbkach frakcji stałej pofermentu z gnojowicy bydlęcej i wywaru gorzelnianego (odpowiednio 9,1 i 6,5 mg/g_{s.m.}) a jego udziały w tych frakcjach wynosiły odpowiednio: ok. 30,0 i 40,0 % w odniesieniu do fosforu ogólnego. Podczas gdy zawartość i udział fosforu biodostępnego w tych surowcach wsadowych wynosiły odpowiednio: 14,3 i 9,9 mg/g_{s.m.} oraz 44,0 i 42,0 %. Najniższą zawartość fosforu biodostępnego stwierdziłam w próbkach frakcji stałej pofermentów z odpadów spożywczych (owocowo-warzywnych) (0,7 mg/g_{s.m.}), a ich udział w odniesieniu do surowców wsadowych obniżył się o ok. 8,0 %.

Na podstawie wyników badań wykazałam pewną zależność pomiędzy skutecznością separacji pofermentów a zawartością fosforu organicznego i nieorganicznego (w zawiesinie) w odciekach pofermentacyjnych. Skuteczne rozdzielenie na frakcje pofermentu z gnojowicy bydlęcej lub wywaru gorzelnianego skutkowało niższym udziałem frakcji PRP i PNRP (fosforu w zawiesinie) w odciekach pofermentacyjnych, w porównaniu z odciekami z fermentacji lignocelulozowych odpadów roślinnych. W odciekach pofermentacyjnych pochodzących z wywaru gorzelnianego lub z fermentacji gnojowicy bydlęcej udział fosforu w zawiesinie stanowił odpowiednio 1,5 i 2,0 %, podczas gdy w odciekach z

¹¹ Xie C., Zhao J., Tang J., Xu J., Lin X., Xu X. (2011b) The phosphorus fractions and alkaline phosphatase activities in sludge. *Bioresource Technol.* 102: 2455 - 2461.

¹² Möller K., Müller T. (2012) Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth : A review. *Eng. Life Sci.* 12(3): 242 - 257.

¹³ Hjorth M., Christensen K. V., Christensen M. L., Sommer S. G. (2010) Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice : A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30: 153 - 180.

¹⁴ Khalid A., Arshad M., Anjum M., Mahmood T., Dawson L. (2011) The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Manage.*, 31: 1737 - 1744.

fermentacji kosubstratów z przewagą kiszzonek, sumaryczny udział frakcji PRP i PNRP był ponad dwukrotnie wyższy. Zaobserwowałam również, że we wszystkich analizowanych odciekach pofermentacyjnych dominowała forma fosforu rozpuszczonego reaktywnego (frakcja SRP). Wysokie stężenia ortofosforanów w odciekach wynikały przede wszystkim z uwolnienia jonów fosforanowych z frakcji OP z powodu hydrolizy materii organicznej podczas procesu fermentacji.

Ad 3. Ocena jakości odcieków pofermentacyjnych w aspekcie możliwości wytrącania biodostępnej formy fosforu

Frakcja ciepla pofermentu bezpośrednio aplikowana na polach uprawnych (fertygacja), ze względu na wysoką zawartość składników odżywczych może być przyczyną przeżyźnienia gruntów. Substancje odżywcze takie jak N i P w odciekach z fermentacji odchodów zwierzęcych mogą występować w proporcjach N : P od 1 : 1 do 2,5 : 1, natomiast stosowane proporcje N : P dla upraw wynoszą od 3 : 1 do 15 : 1 (Rollett i in., 2015)⁵. Z tego powodu, gdy do nawożenia gruntów ornych stosuje się odcieki pofermentacyjne, istnieje duże ryzyko przeżyźnienia gruntów fosforem. Obliczone wartości proporcji N : P w moich badaniach zmieniały się od 2,7 do 5,7, czyli były to relacje niezbyt korzystne (ze względu na zbyt wysokie stężenia fosforu) w odniesieniu do fertygacji pól uprawnych. Dlatego też podjęłam próbę wytrącania struwitu z analizowanych odcieków pofermentacyjnych, aby polepszyć proporcję N : P w odciekach i jednocześnie, aby odzyskać pierwiastki biogenne w formie struwitu ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$). Analizowane odcieki charakteryzowały się wysokimi stężeniami jonów PO_4^{3-} i NH_4^+ , które z punktu widzenia odzysku tych pierwiastków stanowią cenny produkt. Zakres stężeń zmieniał się odpowiednio: od 0,23 do 0,65 g/L dla PO_4^{3-} oraz od 1,73 do 2,11 g/L dla NH_4^+ , chociaż najwyższe stężenia tych jonów stwierdzono w odciekach z fermentacji odchodów zwierzęcych i wywaru gorzelnianego, zaś najniższe z fermentacji odpadów lignocelulozowych. Analizowane odcieki pofermentacyjne charakteryzowały się wysokimi wartościami stężeń magnezu (od 0,01 do 0,22 g/L), co z ekonomicznego punktu widzenia związanego z produkcją struwitu jest o tyle istotne, gdyż nie zachodzi potrzeba stosowania wysokich dawek magnezu (co ogranicza koszty eksploatacji). Jednak stężenia Mg^{2+} w odciekach były niewystracające do wytrącania struwitu. Z przeprowadzonych badań wynikało, że proporcje Mg : P zmieniały się od 0,08 : 1 do 0,31 : 1. Niezbędna proporcja molowa Mg : P to 1 : 1, przy czym w skali technicznej powinna być wyższa i utrzymywana na poziomie od 1,1 : 1 do 1,6 : 1, zaś iloraz P : N powinien wynosić co najmniej 1 : 1 (Cieślik i Konieczka, 2017)¹⁵. Analizowane odcieki charakteryzowały się odczynem od 8,2 do 9,0 i temperaturą od 20 do 25 °C, a zgodnie z doniesieniami literaturowymi, optymalne zakresy pH i temperatury, w których bardziej efektywnie wytrącano kryształki struwitu mieściły się w zakresie

¹⁵ Cieślik B., Konieczka P. (2017) A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. J. Clean. Prod. 142: 1728 - 1740.

odpowiednio: 8,0 - 9,0 oraz 20 - 35 °C (Tansel i in., 2018¹⁶; Ye i in., 2014¹⁷; Moulessehoul i in., 2017¹⁸). Odcieki pofermentacyjne charakteryzowały się stężeniami związków biogenych zbliżonymi do zakresów, jakie występują w odciekach pochodzących z fermentacji osadów ściekowych w komunalnych oczyszczalniach ścieków. Jest to o tyle istotne, gdyż wytrącanie struwitu z odcieków w obiektach komunalnych jest już prowadzone w skali technicznej. Natomiast niewiele pozycji literaturowych odnosi się do usuwania lub odzysku fosforu z odpadów generowanych w biogazowniach rolniczych. O ile odzyskiwanie fosforu w postaci struwitu z surowych odchodów zwierzęcych lub odpadów z przemysłu mleczarskiego było już przedmiotem badań, o tyle tylko nieliczne prace dotyczyły tematyki odzysku fosforu z frakcji ciekłej pofermentów. Na podstawie przeglądu literatury stwierdziłam również, że większość opublikowanych prac dotyczyło wyników badań przeprowadzonych na ściekach syntetycznych (zbliżonym składem do odcieków z fermentacji odchodów zwierzęcych lub odpadów mleczarskich). Przeprowadzenie badań na rzeczywistych odciekach było celowym działaniem, gdyż np. odcieki syntetyczne nie odzwierciedlają w pełni jakości odcieków rzeczywistych. Dynamika wytrącania i krystalizacja struwitu w odciekach syntetycznych mogą się różnić od wyników badań z zastosowaniem odcieków rzeczywistych. Wytrącaniu struwitu w odciekach rzeczywistych może przeszkadzać obecność zawiesiny czy obecność pierwiastków takich jak wapń, żelazo lub potas (Le Corre i in., 2005¹⁹). Dlatego też w badaniach własnych (kierując się zaleceniami podawanymi w dostępnej literaturze) uwzględniłam obecność jonów wapniowych podczas ustalania optymalnej dawki magnezu do wytrącania struwitu. Odpowiednio dawki soli magnezu zostały tak dobrane, by jednocześnie wartości proporcji molowych magnezu do rozpuszczonego fosforu były na poziomie od 1,15 : 1 do 1,2 : 1 zaś wartość ilorazu molowego Ca : Mg poniżej 1. Zaobserwowałam, że stężenia jonów amonowych w „oczyszczonych” (tj. po wytrąceniu struwitu z odcieków) odciekach pofermentacyjnych uległy obniżeniu, lecz nadal wykazywały dużą zmienność: od 0,97 do 1,61 g/L, przy czym skuteczność usuwania jonów amonowych w analizowanych odcieków była zbliżona i wynosiła ok. 20,0 %. Nie stwierdziłam, by rodzaj dozowanego źródła magnezu miał wpływ na wzrost lub obniżenie efektywności usuwania jonów amonowych z odcieków pofermentacyjnych. Niezależnie od charakteru pochodzenia odcieków pofermentacyjnych i rodzaju zastosowanych zewnętrznych związków magnezu (do badań wybrałam MgCl₂, MgSO₄ i MgO) zaobserwowałam wysoką efektywność usuwania ortofosforanów (frakcji SRP) z odcieków (która zmieniała się od ok. 95,0 do 99,0 %). Oznaczało to, że jony PO₄³⁻ reagowały z

¹⁶ Tansel B., Lunn G., Monje O. (2018) Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: A review of magnesium-ammonia phosphate interactions. *Chemosphere* 194: 504 - 514.

¹⁷ Ye Z., Shen Y., Ye X., Zhang Z., Chen S., Shi J. (2014) Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: Property of aggregates. *Journal of Environmental Sciences* 26: 991 - 1000.

¹⁸ Moulessehoul A., Gallart-Mateu D., Harrache D., Djaroud S., de la Guardia M., Kameche M. (2017) Conductimetric study of struvite crystallization in water as a function of pH. *Journal of Crystal Growth* 471: 42 - 52.

¹⁹ Le Corre K. S., Valsami-Jones E., Hobbs P., Parsons S. A. (2005) Impact of calcium on struvite crystals size, shape and purity. *J. Cryst. Growth* 283: 514 - 522.

jonami Mg^{2+} i NH_4^+ i wytrącały się w formie struwitu z odcieków. Natomiast analizując frakcję organicznego fosforu rozpuszczonego (frakcja SNRP) stwierdziłam, że efektywność jej usunięcia z odcieków była znikoma (5,0 - 7,0 %). Natomiast stężenia frakcji fosforu w zawieszynie (frakcja PRP i frakcja PNRP) w „oczyszczonych” odciekach pofermentacyjnych uległy obniżeniu, chociaż nadal wykazywały dużą zmienność, odpowiednio: od ok. 0,1 do 0,7 g/L dla frakcji PRP i od ok. 0,05 do 0,15 g/L dla frakcji PNRP. Obecność chlorku magnezu w odciekach przyczyniła się do usunięcia fosforu we frakcjach PRP i PNRP średnio o 20,0 %. Zbliżoną efektywność usuwania fosforu w zawieszynie zaobserwowałam w odciekach po uprzednim dodaniu siarczanu magnezu, zaś najniższą przy użyciu tlenku magnezu (ok. 15,0 %). Usuwanie frakcji PRP i frakcji PNRP korelowało z efektywnością usuwania zawiesiny, a rodzaj zastosowanego źródła magnezu determinował tę skuteczność. Obecność chlorku magnezu w odciekach przyczyniła się do najbardziej efektywnego usuwania zawiesiny (średnio o 22,0 %). Zbliżoną wartość zaobserwowano w odciekach z dodatkiem siarczanu magnezu, zaś najniższą skuteczność uzyskano przy użyciu tlenku magnezu. Wytrącanie struwitu w odciekach przyczyniło się do usuwania fosforu ogólnego od ok. 75,0 do prawie 90,0 %. Najwyższą efektywność wytrącania fosforu zaobserwowano podczas dozowania $MgSO_4$, zaś najniższą efektywność z zastosowaniem tlenku magnezu. W odciekach, w których uprzednio wytrącono struwit, dominowała frakcja fosforu w zawieszynie i fosforu organicznego rozpuszczonego, których udział procentowy w odniesieniu do fosforu ogólnego zmieniał się odpowiednio od ok. 50,0 do ponad 70,0 % oraz od ok. 30,0 do 50,0 %. Stężenia żelaza w „oczyszczonych” odciekach pofermentacyjnych (po wytrąceniu struwitu) były na zbliżonym poziomie jak w wyjściowych próbkach odcieków pofermentacyjnych i uległy obniżeniu maksymalnie do 6,0 % w odniesieniu do stężeń w próbkach wyjściowych. Podobną sytuację zaobserwowałam w odniesieniu do stężeń jonów wapnia. Miało to szczególne znaczenie, ponieważ wskazuje, że jony fosforanowe ulegały wytrącaniu w formie struwitu a nie np. hydroksyapatytu. Również stężenie potasu uległo nieznacznemu obniżeniu w „oczyszczonych” odciekach pofermentacyjnych (maksymalnie do 12,0 % w odniesieniu do stężenia w próbkach wyjściowych). Przyjęłam zatem, iż występowała niska tendencja wytrącania się soli w odciekach, np. jako $MgKPO_4 \cdot 6H_2O$.

Wielkość cząstek wytrąconej zawiesiny struwitu ma duże znaczenie w aspekcie projektowania technologii odzysku struwitu. Np. można w ten sposób określić sposób separacji struwitu z roztworu. Na podstawie wykonanej analizy granulometrycznej otrzymałam informacje o wielkości wytrąconych cząstek struwitu. Zaobserwowałam, że kryształy charakteryzowały się różną wielkością, a ich maksymalne rozmiary w zależności od pochodzenia odcieków, w których się wytrącały, zmieniały się od 54 do 85 μm . Uzyskane wyniki badań potwierdziły przypuszczenia, że obecność czynników przeszkadzających (zawiesiny) może mieć wpływ na dynamikę wytrącania i krystalizacji struwitu. Pomimo zachowania zbliżonych parametrów wytrącania struwitu (wartości proporcji Mg : P i Ca : Mg, pH, temperatury, czasu reakcji i intensywności mieszania) badacze, którzy prowadzili prace tylko

na odciekach syntetycznych zaobserwowali wyższe rozmiary kryształków struwitu, co potwierdza, że odcieki syntetyczne nie odzwierciedlają w pełni jakości odcieków rzeczywistych, a dynamika wytrącania i krystalizacji struwitu w analizowanych odciekach rzeczywistych może znacznie się różnić od wyników badań z zastosowaniem odcieków syntetycznych.

Ad. 4. Ocena wartości nawozowych frakcji pofermentacyjnych

Największe znaczenie azotu i fosforu w przyrodzie wynika z ich przyswajalności przez rośliny (biodostępności). Mineralizacja azotu jest spowodowana przez określone procesy prowadzące do powstawania amoniaku lub azotu amonowego. Dotyczy to przemian związanych z procesami utleniająco-redukującymi i występowaniem azotu na różnych stopniach utleniania. O większości przemian azotu decyduje aktywność mikroflory glebowej. Ma to zasadnicze znaczenie dla roślin, ponieważ azot amonowy jest formą bezpośrednio pobieraną przez ich system korzeniowy, a także łatwo przekształca się dalej w azotany, które są jeszcze łatwiej wykorzystywane przez rośliny. Podczas gdy ilość fosforu pobieranego przez rośliny uzależniona jest od równowagi między wieloma związkami zawierającymi fosfor. Korzenie roślin, grzyby i bakterie zasiedlające glebę, wytwarzają fosfatazę kwaśną i alkaliczną, która hydrolizuje formy organiczne fosforu do jego nieorganicznych form rozpuszczalnych (H_3PO_4 , $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) bezpośrednio przyswajalnych przez rośliny. Należy podkreślić, że intensywność tych procesów zależy w znacznym stopniu od odczynu gleby. W Polsce ponad 50,0 % gleb użytkowanych rolniczo stanowią gleby kwaśne ($5,0 < pH < 6,0$) i bardzo kwaśne ($pH < 5,0$), gleby lekko kwaśne ($6,1 < pH < 6,7$) i obojętne ($6,8 < pH < 7,4$) stanowią 42,0 %, a jedynie 8,0 % gleb rolnych stanowią gleby zasadowe ($pH > 7,4$) (Gonet i in., 2015)²⁰.

Analiza udziału ilościowego form fosforu we frakcji stałej pofermentów dostarczyła istotnych informacji o jego różnej dostępności biologicznej. Przy ocenie roli frakcji stałej pofermentów jako potencjalnego źródła fosforu do nawożenia gruntów jego biologiczna dostępność jest ważniejsza niż całkowita zawartość tego pierwiastka. Według Psennera i in. (1984)²¹ formą fosforu o największej biologicznej dostępności w gruncie jest fosfor występujący w związkach organicznych i w połączeniach z tlenkami i wodorotlenkami Al, Fe, Mg i Mn, przy czym największa jego mobilność występuje w gruntach o pH w zakresie 5 - 7. Takim zakresem pH charakteryzują się w większości krajowe grunty orne (ich udział wynosi 92,0 % w odniesieniu do całkowitej powierzchni ziem uprawnych). Udział tych form fosforu w analizowanych frakcjach stałych pofermentów wynosił od ok. 30,0 do 50,0 % w odniesieniu do fosforu ogólnego, co oznacza, że frakcje stałe z otrzymanych pofermentów charakteryzowały się umiarkowaną zawartością fosforu biodostępnego. Najwyższą zawartość fosforu biodostępnego stwierdziłam w próbkach fermentacji odchodów zwierzęcych (ok.

²⁰ Gonet S., Smal H., Chojnicki J. (2015) Właściwości chemiczne gleb. W: Andrzej Mocek (red.): Gleboznawstwo, Wydawnictwo Naukowe PWN, ISBN 978-83-01-17944-6: 201 - 205.

²¹ Psenner R., Puckso R., Sager M. (1984) Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten. Arch. Hydrobiol./Suppl. 70: 111 - 155.

10,0 mg/g_{s.m.}), zaś najniższą w próbkach z fermentacji mieszaniny substratów z przewagą udziału wysłodków z buraka (ok. 1,0 mg/g_{s.m.}). Dla porównania w oborniku zwierzęcym zawartość fosforu wynosi średnio 3,9 mg/g s.m. (Niemiec, 1995)²². Natomiast udział procentowy formy fosforu najmniej mobilnej, tj. w połączeniach z wapniem stanowił od ok. 50,0 do 70,0 %. Pomimo, że ta forma fosforu nie była biodostępna, to jej udział we frakcjach stałych pofermentów stanowił ważny element w nawożeniu gruntów, ze względu na wysoką zawartość wapnia. Wapnowanie jest rolniczym sposobem kontroli kwaśnego odczynu gleb uprawnych. Obecnie niskie zużycie nawozów wapniowych przyczynia się do zwiększonej kwasowości gleb. Rozwiązaniem tego problemu może być aplikowanie na gruntach rolnych frakcji stałej pofermentów. Jej alkaliczny odczyn (z powodu wysokiej zawartości jonów wapniowych) może przyczynić się do zmniejszenia zakwaszenia gleby. Zawartość materii organicznej w suchej masie frakcji stałych wynosiła od ok. 50,0 do prawie 80,0 %. Odcieki pofermentacyjne również zawierały wysokie stężenia materii organicznej (20,0 - 40,0 %). Odcieki pofermentacyjne, z których uprzednio wytrącono struwit, zostały wskazane jako odpowiednie do zastąpienia azotowych nawozów mineralnych, ze względu na wysokie stężenia jonów amonowych (wartości zmieniały się od 0,97 do 1,61 g/L) i wysokiej wartości ilorazu N : P (od 14,3 do 20,1). Odnosząc się do polskich i europejskich zaleceń dotyczących granicznych wartości stężeń metali ciężkich w produktach ubocznych fermentacji, które można stosować w rolnictwie, stwierdziłam, że żadna z badanych próbek frakcji stałej pofermentów nie przekroczyła wartości stężeń maksymalnych. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość rolniczego wykorzystania frakcji pofermentacyjnych zgodnie z zasadami gospodarki cyrkulacyjnej.

Najważniejsze osiągnięcia wynikające z przeprowadzonych badań:

1. Po raz pierwszy przeprowadzono kompleksowe badania frakcji fosforu w komponentach wsadowych i produktach ubocznych procesu fermentacji generowanych w biogazowniach rolniczych. Do badań wybrano surowce reprezentujące odpady rolnicze, odpady spożywcze i odchody zwierzęce.
2. Analiza udziału ilościowego form fosforu we frakcji stałej i ciekłej pofermentów dostarczyła istotnych informacji o jego różnej dostępności biologicznej.
3. Wykazano, że fermentacja przyczyniła się do mobilności związków fosforu. Udział fosforu o wysokim potencjale mobilności we frakcjach pofermentacyjnych uległ obniżeniu o 8,0 - 20,0 % w porównaniu z udziałem w zastosowanych surowcach i stanowił od ok. 30,0 do 50,0 % w odniesieniu do fosforu ogólnego.

²² Niemiec W. (1995) Ekologiczne utylizacje odchodów zwierzęcych w gospodarstwach górskich. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, Kraków: 1 - 66.

4. Wykazano, że najwyższą zawartością fosforu biodostępnego charakteryzowała się frakcja stała pofermentu z fermentacji odchodów zwierzęcych (wartość średnia wynosiła ok. 10 mg/g_{s.m.}) zaś 10-krotnie niższą, frakcja z fermentacji odpadów owocowo-warzywnych.
5. Wykazano również, że odcieki pofermentacyjne charakteryzowały się wysokimi stężeniami jonów PO_4^{3-} i NH_4^+ . Przy czym najwyższe stężenia tych jonów stwierdzono w odciekach z fermentacji odchodów zwierzęcych i wywaru gorzelnianego, zaś najniższe z fermentacji odpadów lignocelulozowych.
6. Opracowana procedura wytrącania struwitu potwierdziła możliwość wytrącania biodostępnej formy fosforu (struwitu) z odcieków pofermentacyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników, niezależnie od rodzaju zastosowanego zewnętrznego źródła magnezu (MgO , MgCl_2 i MgSO_4), stwierdzono wysoką efektywność usuwania ortofosforanów z odcieków pofermentacyjnych (od 95,0 do 99,0 %), zaś skuteczność usuwania jonów amonowych wynosiła ok. 20,0 %.
7. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość rolniczego wykorzystania frakcji pofermentacyjnych zgodnie z zasadami gospodarki cyrkulacyjnej.

Możliwość wykorzystania wyników

1. Wykazano możliwość zastosowania odcieków pofermentacyjnych z biogazowni rolniczych do produkcji struwitu. Odcieki charakteryzowały się stężeniami związków biogennych zbliżonymi do zakresów, jakie występują w odciekach pochodzących z fermentacji osadów ściekowych w komunalnych oczyszczalniach ścieków i mogą stanowić alternatywne źródło odzysku fosforu.
2. Odcieki pofermentacyjne, z których uprzednio wytrącono struwit, zostały wskazane jako odpowiednie do zastąpienia azotowych nawozów mineralnych, ze względu na wysokie stężenia jonów amonowych (wartości zmieniały się od 0,97 do 1,61 g/L) i wysokiej wartości ilorazu N : P (od 14,3 do 20,1).
3. Wykazano możliwość zastosowania frakcji stałych pofermentów jako źródła biodostępnego fosforu do nawożenia gruntów.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

a) Przed uzyskaniem stopnia doktora

W 1996 r. rozpoczęłam studia na Politechnice Gdańskiej w Wydziale Inżynierii Środowiska (obecnie: Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska). Po pięciu latach studiów uzyskałam stopień magistra inżyniera na kierunku inżynieria środowiska o specjalności inżynieria sanitarna. Pracę dyplomową pt. „Projekt oczyszczalni ścieków typu SBR dla wsi Bryzgiel leżącej na terenie Wigierskiego Parku Narodowego”, którą wykonałam pod kierunkiem dra hab. inż. Bernarda Quanta, prof. PG, obroniłam w dniu 25 czerwca 2001 r. z wynikiem bardzo dobrym.

Bezpośrednio po ukończeniu studiów wyższych rozpoczęłam studia doktoranckie na kierunku geotechnika i inżynieria środowiska pod opieką prof. dr hab. inż. Hanny Obarskiej-Pempkowiak, która zainteresowała mnie problematyką oczyszczania ścieków z wykorzystaniem metody hydrofitowej. W 2003 roku zaproponowany zakres badań uzyskał dofinansowanie w postaci promotorskiego projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Informatyki pt. „Określenie zdolności respiracyjnych złóż hydrofitowych i filtrów w przydomowych oczyszczalniach ścieków podczas ich eksploatacji” (nr 3T09604926).

Rozprawę doktorską pt. „Wpływ substancji organicznej na natlenienie i efektywność usuwania zanieczyszczeń w złożach hydrofitowych” obroniłam 14 grudnia 2005 r. w Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej uzyskując tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, specjalność technologia wody i ścieków. Praca miała charakter eksperymentalny. Badania prowadziłam w trzech obiektach hydrofitowych. Celem eksperymentu było rozpoznanie dynamiki rozkładu i akumulacji materii organicznej w złożach hydrofitowych nawadnianych ściekami, jak również określenie warunków wykluczających jej akumulację w gruncie. Wyniki badań związane z tematyką pracy doktorskiej przed uzyskaniem stopnia doktora opublikowałam w 16 recenzowanych pracach (załącznik 4: punkt II.A. poz. 9; punkt II.E.2. poz. 8 i 9; punkt II.E.3. poz. 16 - 19; punkt II.E.4. poz. 40 - 42; punkt II.E.5. poz. 47; punkt II.E.6. poz. 61 - 65.)

W okresie studium doktoranckiego odbyłam liczne zagraniczne staże w niemieckich ośrodkach naukowych (Technische Universität München; Fraunhofer Gesellschaft Stuttgart) i państwowych (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz; Wasserwirtschaftamt Hof; Wasserwirtschaftamt Nürnberg; Wasserwirtschaftamt München). Uczestniczyłam również w kursach zawodowych w firmach projektowo-wykonawczych w Monachium i Berlinie (Fa. AKUT GmbH; Fa. Schlegel GmbH & Co.KG). W 2003 r. w ramach stażu naukowego w bawarskich urzędach gospodarki wodnej mogłam zapoznać się z nowoczesnymi technologiami inżynierii ekologicznej, podstawami prawa wodnego Unii Europejskiej, Niemiec i Bawarii oraz zintegrowanego zarządzania zasobami wodnymi zgodnie z wytycznymi Agendy 21. Dwa lata później zostałam

stypendystką programu DAAD (Deutsche Akademische Austauschdienst) i odbyłam sześciomiesięczny staż naukowy w Katedrze Ochrony Wody i Gospodarki Odpadami (Lehrstuhl und Laboratorien für Wassergüte und Abfallwirtschaft) na Politechnice Monachijskiej (Technische Universität München), gdzie pod opieką prof. Petera Wilderera prowadziłam badania związane z moją pracą doktorską.

Podczas pobytu w Niemczech uczestniczyłam również w kursach i seminariach podnoszących moje kwalifikacje naukowe. Dotyczyły one analizy mikrobiologicznej osadu czynnego (kurs prowadzony przez ATV-DVWK w Augsburgu), natomiast na zaproszenie Bawarskiego Ministerstwa Ochrony Środowiska dwukrotnie wzięłam udział w seminariach poświęconych tematyce zintegrowanego zarządzania zasobami wodnymi.

Równoległe z pracą naukową zdobywałam również doświadczenie zawodowe. Jako asystent projektanta odbyłam staże w niemieckich firmach prowadzących działalność projektowo-doradczą oraz wykonawczą w zakresie inżynierii sanitarnej. Byłam odpowiedzialna m.in. za przygotowanie koncepcji oraz dokumentacji projektowo-technicznych dla oczyszczalni ścieków komunalnych. Ponadto uczestniczyłam w procesie projektowo-wykonawczym sieci wodociągowych i kanalizacji sanitarnej. Wykonane projekty wspomnianych obiektów pozwoliły mi zdobyć, tak ważne w pracy na uczelni technicznej, doświadczenie zawodowe. M.in. w okresie między 2004 i 2005 rokiem w ramach partnerskiego projektu bfz GmbH i SINAENCO byłam projektantem i koordynatorem budowy oczyszczalni hydrofitowej, stanowiącej biologiczny stopień oczyszczania ścieków pochodzących z przemysłu tekstylnego dla miejscowości Toritama w Brazylii. Podczas pobytu w Brazylii na zaproszenie Uniwersytetu w Recife wygłosiłam referat poświęcony naturalnym metodom oczyszczania ścieków (załącznik 4: punkt II.L. poz. 17). Staże naukowo-badawcze w Niemczech rozwinęły moje umiejętności badawcze oraz organizacyjne. Poznałam nowe techniki eksperymentalne, nawiązałam także liczne kontakty z naukowcami z Niemiec. Rozpoczęta współpraca jest kontynuowana do dnia dzisiejszego. Od 2004 roku jestem członkiem międzynarodowego Projektu Transferu Technologii Wodnych (Projekt Technologietransfer Wasser - TTW) z siedzibą w Bawarskim Ministerstwie Ochrony Środowiska.

b) Po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora mój dorobek naukowy obejmuje następujące obszary tematyczne:

- 1) usuwanie zanieczyszczeń ze ścieków w obiektach komunalnych;
- 2) gospodarka ściekowo-osadowa z uwzględnieniem wzrostu produkcji energii odnawialnej w obiektach komunalnych;
- 3) innowacyjne rozwiązania usuwania i odzysku związków biogenych ze ścieków w gospodarce komunalnej.

Ad. 1.

Celem podjętych badań było określenie skuteczności usuwania zanieczyszczeń ze ścieków w: a) ekologicznych systemach oczyszczających oraz b) konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków.

Usuwanie zanieczyszczeń ze ścieków w ekologicznych systemach oczyszczających

Zainteresowania naukowe dotyczące usuwania zanieczyszczeń ze ścieków w ekologicznych systemach oczyszczających zostały przedstawione w publikacjach: punkt II.A. poz. 3 - 8; punkt II.E.1. poz. 4; punkt II.E.2. poz. 6 i 7, punkt II.E.3. poz. 13, 14; punkt II.E.4. poz. 29 - 34, 36, 38; punkt II.E.5. poz. 44; punkt II.E.6. poz. 56, 58 - 60 (załącznik 4).

Ekologiczne systemy oczyszczające (w jęz. ang. *Ecological Treatment Systems - ETS*) są wzorowane na wprowadzanych w Europie Zachodniej i Ameryce Północnej systemach określanych jako „*constructed wetlands*”, których praca symuluje warunki hydrauliczne oraz siedliskowe naturalnych ekosystemów bagiennych. Hydrofitowa metoda oczyszczania ścieków jest procesem biologicznym zachodzącym z udziałem mikroorganizmów heterotroficznych oraz roślin wodnych i wodolubnych, egzystujących w odpowiednio zaprojektowanych systemach z podpowierzchniowym przepływem ścieków (w jęz. ang. *Vegetated Submerged Beds - VSB*) lub z powierzchniowym przepływem ścieków (w jęz. ang. *Free Water Surface - FWS*). Na skutek specyficznych warunków umożliwiających rozwój charakterystycznych roślin następuje intensyfikacja procesów utleniania i redukcji, które - wspomagane przez procesy sorpcji, sedymentacji i asymilacji - umożliwiają usuwanie znacznej części zanieczyszczeń ze ścieków. Ekologiczne systemy oczyszczające wykorzystuje się do usuwania zanieczyszczeń ze źródeł punktowych (oczyszczalnie hydrofitowe) i obszarowych (buforowe strefy roślinne) oraz do odwadniania i unieszkodliwiania osadów ściekowych. Zdolność obiektów ETS do usuwania zanieczyszczeń ze ścieków zależy od wielu czynników środowiskowych, do których zaliczyć należy m.in.: zmienne warunki tlenowe, temperaturę, jak również odczyn ścieków, czy też obciążenie ładunkiem materii organicznej.

Początkowo wyżej wymieniony temat był kontynuacją zagadnień podjętych w rozprawie doktorskiej. Badania przeprowadzone w systemach VSB wykazały, że materia organiczna występująca w zawieszynie podatnej na rozkład i trudno rozkładalnej biologicznie znacząco wpłynęły na zdolność ścieków do ich biodegradacji i warunkowały wysoką skuteczność usuwania zanieczyszczeń w analizowanych obiektach. Stwierdzono, że obciążenie zawiesziną organiczną złóż hydrofitowych z podpowierzchniowym pionowym przepływem ścieków poniżej 4,0 g/m²d zapewniało właściwą eksploatację złóż z wyeliminowaniem zjawiska jej nadmiernej akumulacji. Natomiast dla złóż z podpowierzchniowym poziomym przepływem ścieków dopuszczalne obciążenie zawiesziną organiczną wynosiło ≤ 14,0 g/m²d. Wykazano, że w złożach, w których wartości obciążeń były poniżej wartości dopuszczalnych efektywność usuwania zanieczyszczeń wynosiła średnio: 70,0 % dla

BZT₅ oraz około 60,0 % dla ChZT i zawiesiny ogólnej. Dzięki otrzymaniu finansowania z MNiSW i WFOŚiGW w Gdańsku w ramach realizacji trzech projektów badawczych (przy czym realizacja dwóch projektów przebiegała pod moim kierunkiem) (załącznik 4: punkt II. J. poz. 6 i 7 oraz punkt III.F.) w latach 2009 - 2012 prowadziłam badania w trzech systemach typu FWS - w Kartuzach, Swarzewie i Żarnowcu zlokalizowanych w woj. pomorskim. Analizowane obiekty skutecznie usuwały ze ścieków zawiesinę o rozmiarze cząstek powyżej 100 µm. Ponadto obiekty te charakteryzowały się wysoką efektywnością usuwania zawiesiny ogólnej ze ścieków wynoszącą ponad 80,0 %. Skuteczność usuwania materii organicznej (wyrażona w BZT₅) była również znacząca i wynosiła od 60,0 do 75,0 %. Ekologiczne systemy oczyszczające z powierzchniowym przepływem ścieków zapewniały również skuteczne usuwanie ze ścieków frakcji zawiesinowej fosforu na poziomie 40,0 %. Jednak wraz z usuwaniem ze ścieków zawiesiny zaobserwowano wtórne zjawisko zanieczyszczenia ścieków fosforem pochodzącym od deponowanej w osadach dennych zawiesiny. Zaobserwowano, że w zależności od zmieniających się warunków fizyczno-chemicznych zachodzących w ekologicznych systemach oczyszczających zmieniał się udział form specyjalnych fosforu w osadach, a tym samym zmieniały się warunki równowagi fosforu pomiędzy ściekami i osadem, co wpływało na efektywność usuwania fosforu w tych obiektach. O trwałości deponowania lub szybkości uwalniania fosforu z osadów decydował charakter wiązań chemicznych, w których ten pierwiastek występował. Przeprowadzone badania występowania mobilnych form fosforu w osadach dennych obiektów FWS miały kluczowe znaczenie przy ocenie ilości fosforu (który został uwolniony w wyniku chemicznego rozpuszczania związków mineralnych i mikrobiologicznego rozkładu materii organicznej i powtórnie włączony do obiegu biologicznego) powodując wzrost produkcji pierwotnej. Na podstawie przeprowadzonych badań, wykazano, że fosfor wysoce mobilny był w połączeniach z żelazem i materią organiczną. Spadek udziału tych form fosforu wzdłuż profilu pionowego osadów pobranych z analizowanych obiektów świadczył o intensywnym uwalnianiu pierwiastka z osadów. Z powodu występujących okresowo warunków beztlenowych w systemach dochodziło do redukcji Fe³⁺ do Fe²⁺ a tym samym do rozpuszczenia kompleksów Fe-P i ponownego uwolnienia jonów fosforanowych do ścieków. Stwierdziłam ponadto istotną korelację ($r = 0,79$) pomiędzy zawartością materii organicznej w osadach a zawartością fosforu w materii organicznej. Uzyskane wyniki pozwoliły mi wnioskować, że większość fosforu zakumulowana w analizowanych osadach występowała w połączeniach z frakcją zawiesinową trudno rozkładalną i podatną na rozkład biologiczny. W Swarzewie i Kartuzach udział tej frakcji fosforu uległ wraz z głębokością profilów osadów obniżeniu z ok. 70,0 % w warstwie powierzchniowej do 40,0 % na głębokości 30 cm. Obniżenie udziału tej frakcji fosforu wzdłuż profilów pionowych osadów świadczył o intensywnym uwalnianiu pierwiastka z osadów. Zaobserwowałam np., że przy dobrych warunkach tlenowych uwalnianie fosforu związanego z materią organiczną zdecydowanie przeważało nad procesami akumulowania w osadach. Formy fosforu związanego z wapniem i magnezem były mniej mobilne, gdyż ich udział wzrastał wraz z

głębokością w profilach pionowych osadów. Dostępność tych form fosforu była związana z odczynem ścieków przepływających przez systemy ETS. Przy wartościach pH od 7,2 do 8,5 następowało wytrącanie jonów fosforanowych w formie fosforanu wapnia. Analizowane ścieki charakteryzowały się zbliżonymi wartościami odczynu, co spowodowało do powstania nierozpuszczalnych w wodzie połączeń fosforu z wapniem i akumulację pierwiastka w osadach.

Reasumując uzyskane wyniki mają istotne znaczenie w odniesieniu do zapewnienia prawidłowej pracy i eksploatacji ekologicznych systemów oczyszczających. Informacje te mogą być pomocne szczególnie przy projektowaniu obiektów ETS do oczyszczania ścieków o niekorzystnym składzie lub gdy jest wymagane bardzo efektywne usuwanie związków fosforu i substancji organicznej w celu ochrony wód powierzchniowych przed eutrofizacją.

Usuwanie zanieczyszczeń ze ścieków w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków

Zainteresowania naukowe dotyczące usuwania zanieczyszczeń ze ścieków w konwencjonalnych oczyszczalniach ścieków zostały przedstawione w publikacjach: punkt II.A. poz. 1 i 2; punkt II.E.2 poz. 5; punkt II.E.3. poz. 12; punkt II.E.4. poz. 21 i 27 (załącznik 4). Uzyskane wyniki badań zostały również zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach naukowych - punkt II.E.6. poz. 49, 53 i 55 (załącznik 4).

Prawidłowa eksploatacja biologicznych oczyszczalni ścieków z podwyższonym usuwaniem związków biogennych zależy w znacznym stopniu od dostępności wystarczających ilości odpowiednich (biodegradowalnych) związków organicznych (źródeł węgla). Związki te powinny zaspokajać potrzeby trzech grup drobnoustrojów, w tym bakterii denitryfikacyjnych, mikroorganizmów defosfatacyjnych i denitryfikujących bakterii akumulujących polifosforany. Ze względu na ograniczone ilości biodegradowalnych związków organicznych w dopływających ściekach, trzy grupy mikroorganizmów muszą konkurować o te same substraty, co w konsekwencji może prowadzić do zakłóceń prawidłowej pracy oczyszczalni. W praktyce w tym celu stosuje się zewnętrzne źródła węgla organicznego. Pierwsza grupa dotyczy produktów handlowych (metanol, etanol, kwas octowy, octan sodu lub glukoza). Pomimo ich udowodnionej skuteczności bariery ekonomiczne stanowią zasadniczą przeszkodę w ich stosowaniu w oczyszczalniach ścieków. Ze względu na wysokie koszty komercyjnych związków, produkty uboczne lub materiały odpadowe zyskują w ostatnim czasie większe znaczenie jako "alternatywne" zewnętrzne źródła węgla. Do alternatywnych źródeł węgla można zaliczyć np. odpady z destylarni - oleje fuzlowe. Wpływ dodatku olejów fuzlowych był przedmiotem badań pod względem właściwości metabolicznych denitryfikujących bakterii akumulujących polifosforany. Analizowałam zdolność osadu czynnego niezaklimatyzowanego i poddanego aklimatyzacji po dodaniu olejów fuzlowych do usuwania związków biogennych ze ścieków. Wyniki badań zostały opublikowane w międzynarodowym czasopiśmie *Bioprocess and Biosystems*

Engineering (IF = 2,139) oraz przedstawione w formie prezentacji ustnej na międzynarodowej konferencji IWA Specialist Conference "*Nutrient removal and recovery: moving innovation into practice*", która odbyła się w Gdańsku w 2015 r. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na sformułowanie wniosków, że dla niezaklimatyzowanej biomasy szybkości uwalniania i poboru związków fosforu (w jęz. ang. phosphate release/uptake rate -PRR/PUR) oraz szybkość redukcji azotu azotanowego (w jęz. ang. nitrate utilization rate - NUR) były niskie i zbliżone do szybkości uzyskanych w teście referencyjnym. Dla zaaklimatyzowanej biomasy PUR i NUR wzrosły znacząco, tj. odpowiednio 3,5 i 2,7 krotnie. Na podstawie symulacji modelowych oszacowano, że aktywność bakterii DPAO i denitryfikacyjnych organizmów heterotroficznych odpowiadała odpowiednio około 20,0 % i 80,0 % całkowitego NUR.

We współpracy z Katedrą Chemii i Towaroznawstwa Przemysłowego Akademii Morskiej w Gdyni oraz z Przedsiębiorstwem Komunalnym – Spółką Wodno-Ściekową w Swarzewie brałam również udział w realizacji badań związanych z oceną wpływu obecności surfaktantów w ściekach na skuteczność usuwania zanieczyszczeń w komunalnych oczyszczalniach ścieków.

Jednym z zanieczyszczeń trafiających do oczyszczalni komunalnych wraz ze ściekami są surfaktanty. Związki te mają szerokie zastosowanie w przemyśle włókienniczym, papierniczym, kosmetycznym i farmaceutycznym. Znajdują również zastosowanie w produkcji żywności i nawozów sztucznych farb i lakierów. Ze względu na szerokie zastosowanie surfaktantów w środkach czystości stosowanych w gospodarstwach domowych, znaczne ich ilości przedostają się do ścieków komunalnych. Istotne zatem wydało się podjęcie badań, które dotyczyły następujących zagadnień: a) określenia zmian w strukturze osadu czynnego pod wpływem surfaktantu oraz b) wpływu surfaktantu anionowego LAS na mobilność frakcji fosforu w osadzie czynnym w zmiennych warunkach fizyczno-chemicznych. Do określenia składu granulometrycznego osadu czynnego oraz określenia zmian jakim on ulega pod wpływem obecności w ściekach surfaktantu anionowego wykorzystano laserowy analizator dyfrakcyjny Mastersizer 2000. Badania przeprowadzono dla różnych stężeń surfaktantu anionowego, zarówno typowych dla ścieków komunalnych, jak i występujących w ściekach przemysłowych. Do wykonania analiz pobrano próbki osadu czynnego bezpośrednio z komory napowietrzania komunalnej oczyszczalni ścieków w Swarzewie. Tło pomiarów stanowił natleniony osad czynny. Jako anionowy surfaktant, zastosowano liniowy dodecylobenzenosulfonian sodu (LAS). Analizowałam wpływ dodatku surfaktantu na zmianę wielkości kłaczków osadu czynnego. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że testowane dawki surfaktantu znacząco wpłynęły na jakość osadu czynnego. Obecność surfaktantu anionowego przyczyniła się do zmiany dystrybucji rozmiarów kłaczków. Stężenie LAS poniżej 200 mg/dm³ w osadzie powodowało znaczne rozdrobnienie jego kłaczków, zaś wyższe stężenie ich aglomerację. Największe i najszybsze zmiany w rozkładzie wielkości kłaczków osadu zaobserwowano po dodaniu środka powierzchniowo czynnego w stężeniu 100 mg/dm³. Kolejna tematyka badawcza dotyczyła wpływu obecności w

ściekach surfaktantu anionowego na ich mobilność form fosforu w osadzie czynnym. Przeprowadzone badania stosunków ilościowych frakcji fosforu dostarczyły istotnych informacji o trwałości kumulacji i tempie uwalniania tego pierwiastka z osadu czynnego do ścieków. Materiał badawczy stanowiły próbki ścieków komunalnych i osadu czynnego pobrane z miejskiej oczyszczalni w Swarzewie. Prace prowadzono w skali laboratoryjnej w sekwencyjnym reaktorze biologicznym (SBR). Przeprowadzono specjację fosforu dla sześciu serii pomiarowych różniących się warunkami w jakich przetrzymywano osad czynny. Do trzech serii pobrano osad czynny przetrzymywany w warunkach beztlenowych z dodatkiem surfaktantu w stężeniach 10 i 100 mg/dm³ i osad bez surfaktantu. Kolejne trzy serie badań wykonano w osadzie czynnym po napowietrzeniu bez i z dodatkiem surfaktantu w tych samych stężeniach. Uzyskane wyniki badań pozwoliły wnioskować, iż podczas fazy tlenowej, obecny w osadzie surfaktant LAS utrudniał kumulowanie w nim fosforu. Zdolność pobierania i magazynowania związków fosforu przez bakterie w natlenionym osadzie czynnym z dodatkiem LAS uległa obniżeniu w porównaniu do badań realizowanych z osadem bez surfaktantu. Proces ten nasilił się wraz ze wzrostem stężenia dodawanego surfaktantu. Wyniki badań zostały opublikowane w m.in. w recenzowanych czasopismach naukowych *Ecological Chemistry and Engineering* oraz *Inżynieria Morska i Geotechnika*.

Ad. 2.

W latach 2013 - 2017 prowadziłam prace badawcze uczestnicząc w zespole naukowym pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Jacka Mąkini, w ramach międzynarodowego projektu naukowo-badawczego współfinansowanego ze środków funduszy norweskich pt. „*Integrated technology for improved energy balance and reduced greenhouse gas emissions at municipal wastewater treatment plants*”. Celem projektu było praktyczne zastosowanie zasad zrównoważonej gospodarki ściekowo-osadowej w komunalnych oczyszczalniach ścieków, uwzględniające aspekty technologiczne, energetyczne i ekonomiczne oraz emisję gazów cieplarnianych. W ramach zadania pt. „*Increasing primary sludge production by coagulation and flocculation process in a primary clarifier*” powyższego projektu brałam udział w badaniach dotyczących analizy wpływu dodatku polimerów organicznych i koagulantów do ścieków na: a) efektywność usuwania związków organicznych ze ścieków; b) szybkości procesów biologicznych w części biologicznej komunalnej oczyszczalni ścieków; c) odzysk łatwo rozkładalnej biologicznie frakcji substancji organicznej z wygenerowanego osadu wstępnego oraz d) wydajność produkcji biogazu w beztlenowej komorze fermentacyjnej na podstawie zwiększonej produkcji osadu wstępnego.

Materiał badawczy stanowiły próbki ścieków surowych i osadu czynnego, które pobierano z dwóch komunalnych oczyszczalni ścieków zlokalizowanych w Gdańsku i Gdyni. W badaniach zastosowano trzy komercyjne polimery organiczne oraz, jako punkt odniesienia koagulant ZnSO₄. Eksperymenty przeprowadzono ze ściekami surowymi poddanymi dwugodzinnej sedymentacji bez i z

dotatkem analizowanych reagentów. Badania w warunkach laboratoryjnych prowadzono w specjalnie skonstruowanym urządzeniu laboratoryjnym do pomiaru szybkości biochemicznych procesów oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego. W analizowanych próbkach ścieków i osadów wykonywano oznaczenia pomiaru stężeń m.in. frakcji materii organicznej, związków azotu i fosforu. Celem określenia zależności pomiędzy zwiększoną produkcją osadu wstępnego a produkcją metanu wykorzystano do obliczeń model matematyczny - Anaerobic Digestion Model 1 (ADM1). Na podstawie wyników uzyskanych podczas prowadzonych badań w warunkach laboratoryjnych stwierdzono, że średnia skuteczność usuwania materii organicznej ze ścieków surowych poddanych dwugodzinnej sedymentacji bez dodatku reagentów utrzymywała się na poziomie 30,0 %. Natomiast po dodaniu do ścieków polimerów organicznych efektywność uległa znacznej poprawie i wzrosła prawie dwukrotnie. Wyniki badań pozwoliły stwierdzić, że testowane polimery organiczne wpłynęły również na zwiększoną produkcję osadu wstępnego. Średnia objętość wytrąconego osadu z jednego litra ścieków surowych zmieniała się od ok. 15 do 40 cm³. Podwyższone strącanie związków organicznych ze ścieków przy pomocy analizowanych polimerów nie spowodowało zakłóceń procesów biologicznych: szybkości uwalniania i poboru fosforanów ze ścieków (PRR/PUR) oraz szybkości poboru azotanów ze ścieków (NUR). Natomiast usunięcie znacznej ilości materii organicznej występującej we frakcji koloidalnej i w zawieszynie po dodaniu siarczanu cynku spowodowało obniżenie szybkości procesów biologicznego usuwania fosforanów oraz azotanów ze ścieków, odpowiednio o 30,0 % podczas prowadzonych eksperymentów dwufazowych i o 20,0 % podczas eksperymentów jednofazowych. Wykonane symulacje matematyczne przy zastosowaniu oprogramowania ADM1 pozwoliły na sformułowanie wniosku, iż wstępne strącanie chemiczne związków organicznych ze ścieków surowych może przyczynić się do przyspieszenia procesów beztlenowych oraz poprawy produkcji biogazu. Analiza matematyczna wykazała, że zastosowanie polimerów organicznych może przyczynić się do zwiększonej wydajności produkcji biogazu. Po wykonaniu serii badań w warunkach laboratoryjnych kontynuowano badania w warunkach technicznych w oczyszczalni ścieków w Słupsku. Dodatek polimerów organicznych przyczynił się do zwiększonego usunięcia zawiesziny ze ścieków surowych (na poziomie ok. 70,0 %) i nie zakłócił pracy części biologicznej oczyszczalni. Wyniki badań zostały zaprezentowane na trzech seminariach naukowo-technicznych w 2014, 2015 i 2016 r. w Gdańsku, Gliwicach i Poznaniu (zorganizowanych w ramach realizacji powyższego projektu) oraz czterech międzynarodowych konferencjach (w 2014 r. na 2nd IWA Specialized International Conference ecoSTP2014 w Veronie we Włoszech; w 2015 r. na IWA Specialist Conference - Nutrient Removal and Recovery: moving innovation into practice w Gdańsku; w 2015 r. na 12th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies w Hong Kongu w Chinach; w 2017 r. na IWA Specialist Conference Sustainable Wastewater Treatment and Resource Recovery: Research, Planning, Design and Operation w Chongqing w Chinach) i spotkały się z dużym zainteresowaniem m.in. eksploatatorów oczyszczalni i przedstawicieli

urzędów zainteresowanych problematyką ochrony środowiska. Obecnie w przygotowaniu jest manuscript pt. „*Effect of enhanced primary treatment on recovery of biodegradable COD from primary sludge and biological processes in the activated sludge system*” do czasopisma z listy JCR.

Ad 3.

Zagadnienia związane z tematem "*Innowacyjne rozwiązania usuwania i odzysku związków biogenych ze ścieków w gospodarce komunalnej*" przedstawione zostały w następujących publikacjach: punkt II.E.1. poz. 1 - 3; punkt II.E.4. poz. 24 - 25, 28, 35, 37 - 39, punkt II.E.6. poz. 48, 50 (załącznik 4).

Celem podejmowanych aktywności naukowych było przedstawienie możliwości innowacyjnych rozwiązań usuwania i odzysku fosforu i azotu na: a) terenach o rozproszonej zabudowie oraz b) w obiektach gospodarki komunalnej.

W Polsce ok. 40,0 % ludności mieszka na terenach wiejskich. W przypadku mniejszych emitorów zanieczyszczeń mamy do czynienia z pewnym paradoksem – wprawdzie poszczególne emitery są niewielkie, jednak wysoki sumaryczny ładunek związków biogenych, pochodzący od małych emitorów stwarza niekorzystne konsekwencje dla środowiska. Chociaż ilość ścieków wiejskich jest mniejsza w porównaniu z obszarami zurbanizowanymi, to mają one wyższe stężenia zanieczyszczeń. Obecnie na terenach wiejskich w Polsce działa tylko około 2000 oczyszczalni z kanalizacją zbiorczą, które obsługuje 5,0 % wsi (ok. 20,0 % całej ludności wsi). Głównym powodem tak małej liczby oczyszczalni jest charakter zabudowy przestrzennej wsi polskiej, który wyraźnie nie sprzyja budowie obszarowych systemów kanalizacyjnych. Ze względu na niekorzystną specyfikę zabudowy polskiej wsi, wieloletnie zaniedbania w budowie kanalizacji i ogromne potrzeby wprowadzenia na tych obszarach wyłącznie „miejskich systemów kanalizacyjnych” jest ze względów ekonomicznych nieuzasadnione. W większości lokalizacji wiejskich budowa takich systemów jest również nieracjonalna ze względów technologicznych, ekonomicznych jak i potrzeb środowiskowych. Szacuje się też, że na ogólną liczbę ok. 3 milionów gospodarstw rolniczych aż 75,0 % pozbywa się ścieków bytowych bez oczyszczania. W celu poprawy jakości życia w połączeniu z ochroną środowiska szczególnie na terenach wiejskich promuję innowacyjne rozwiązania jednoczesnego zagospodarowania i recyklingu ścieków bytowych przy jednoczesnym usuwaniu i odzysku z nich związków biogenych. W ostatnich latach w ramach międzynarodowego Programu EQUAL dotyczącego ogólnej strategii zrównoważonego rozwoju i ekologicznej sanitacji nawiązałam współpracę z projektantami ze Szwecji. Współpraca dotyczy projektowania i promowania alternatywnego rozwiązania zagospodarowania ścieków bytowych poprzez separację uryny oraz przerób pozostałych odpadów na kompost. Właściwie odseparowana uryna pozwala na powtórne wykorzystanie w obiegu przyrodniczym co najmniej 70,0 % fosforu oraz 50,0 % azotu obecnego w ludzkich odchodach. Przy tym technologii z zastosowaniem toalet separacyjnych całkowicie

rozwiązują problem gospodarki ściekowo-osadowej, zapewniając jednocześnie przyrodnicze wykorzystanie produktów finalnych. Doświadczenia zdobyte w czasie uczestnictwa w Programie EQUAL zawarłam w dwóch monografiach oraz w licznych artykułach naukowo-technicznych o zasięgu krajowym i międzynarodowym. W pracach przedstawiłam wyniki badań oraz wskazówki praktyczne, poparte doświadczeniami uzyskanymi z analizy pracy obiektów istniejących. Niniejsze prace poświęcone tej tematyce mogą służyć rozpowszechnieniu wśród projektantów, instalatorów i inwestorów informacji o alternatywnych sposobach zagospodarowania ścieków bytowych na terenach wiejskich w Polsce.

W przypadku komunalnych oczyszczalni ścieków w konwencjonalnym podejściu osady pofermentacyjne przed ich końcowym zagospodarowaniem są rozdzielane na dwie frakcje - stałą i ciekłą (odcieki). Po odwodnieniu osadów najczęściej odcieki kierowane są na początek układu technologicznego oczyszczania ścieków. Coraz częściej jednak w oczyszczalniach stosuje się boczne linie usuwania związków azotu, a najnowszy trend przyjmuje stosowanie technologii odzysku związków azotu i fosforu ze względu na ich wysokie stężenia w odciekach. Wymierne korzyści takich rozwiązań to m.in. obniżenie ładunków związków biogenych w odciekach zawracanych do ponownego ich biologicznego oczyszczania; minimalizacja zastosowania chemikaliów do strącania fosforu przyczyniająca się do obniżenia kosztów; ograniczenie powstawania struwitu w komorach fermentacji nawet do 90,0 %. Rozwiązania zastosowane w Holandii, Niemczech, Szwajcarii, Japonii i Austrii, ich rozwój oraz dowiedziona efektywność ekonomiczna, w chwili obecnej wytyczają zasady gospodarki związkami fosforu dla obiektów komunalnych, a konieczność dostosowania się do wymagań dyrektyw EU 91/271 (The Urban Wastewater Treatment) uzasadnia rozwój technologii odzysku fosforu. Z dniem 1 stycznia 2016 r. Szwajcaria stała się pierwszym krajem w świecie, w którym odzysk i recykling fosforu z osadów ściekowych stał się obowiązkowy. Również w październiku 2017 r. weszło w życie w Niemczech nowe rozporządzenie w sprawie osadów ściekowych, które mówi, że oczyszczalnie o wielkości powyżej 50 000 OLM posiadają podobnie jak w Szwajcarii również obowiązek odzyskiwania fosforu z osadów ściekowych. Mowa w nim o zaprzestaniu wykorzystywania osadów jako nawozów i o rozpoczęciu opracowywania jak najbardziej skutecznego procesu odzyskiwania fosforu i innych składników odżywczych. Oczyszczalnie ścieków, w których zawartość fosforu w suchej masie osadu wynosi powyżej 2,0 % mają obowiązek odzyskiwania fosforu z osadów lub z popiołów (jako produktu końcowego po spalania osadów). Obecnie wymagania w zakresie odzysku pierwiastków w Niemczech wynoszą 50,0 % z osadu i 80,0 % z popiołów. Patrząc w przyszłość, z dużym prawdopodobieństwem również w pozostałych krajach europejskich zacznie obowiązywać odzysk związków biogenych z produktów odpadowych generowanych w oczyszczalniach ścieków, tym bardziej, że obecnie rolnicze wykorzystywanie osadów ściekowych nie jest już dozwolone w Holandii, Danii i niektórych landach Austrii. Zaciekawiona tą tematyką badawczą miałam możliwość przeprowadzenia badań związanych z

odzyskiem związków biogenych (w formie wytrąconego struwitu) w odciekach pochodzących z obiektów komunalnych w ramach realizacji dwóch międzynarodowych projektów - projektu badawczego pt.: „*Regional Sustainable Biogas Solutions*” w ramach programu Europejskiej Współpracy Terytorialnej i Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa (Interreg South Baltic Project) oraz projektu badawczego pt. „*Pomeranian Biogas Model*” współfinansowanego ze środków funduszy norweskich, w ramach programu Polsko-Norweska Współpraca Badawcza. Uzyskane wyniki badań zostały zaprezentowane m.in. na 12 międzynarodowej konferencji pt. „*Metody zagospodarowania osadów ściekowych*” zorganizowanej przez firmę ABRYS w 2018 roku w Poznaniu oraz ogólnopolskiej konferencji pt. „*Pomorski Biogaz*”, która odbyła się w 2016 r. w Gdańsku. Od 2017 roku działania naukowe z wyżej wymienionego obszaru poszerzam o badania związane z wpływem kosubstratów na jakość generowanych odcieków pofermentacyjnych w biogazowniach komunalnych w aspekcie odzysku z nich związków fosforu. Obecnie badania realizuję w ramach dwóch projektów badawczych o akronimach: DEZMETAN (Projekt pt.: „*Opracowanie technologii przygotowania substratów wykorzystywanych w kofermentacji metanowej metodami dezintegracji*” współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego) oraz MODEON (Projekt pt.: „*Modelowa gospodarka osadowa w oczyszczalni ścieków zorientowana na zwiększenie produkcji energii odnawialnej i odzysk związków biogenych*” współfinansowany przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku). Na podstawie dotychczas uzyskanych wyników badań w warunkach laboratoryjnych, opracowano koncepcję zintegrowanej dwustopniowej technologii oczyszczania odcieków pofermentacyjnych i odzysku związków biogenych w skali pilotowej, natomiast z otrzymanych środków finansowych w ramach projektu DEZMETAN zostanie wybudowana instalacja do wytrącania struwitu z odcieków. W roku 2019 planowane jest przeprowadzenie badań w skali pilotowej. Obecnie w przygotowaniu są dwa manuskrypty pt.: „*The influence of various physico-chemical process parameters on simultaneous deamination and struvite crystallization - review*” oraz „*Wpływ kosubstratów poddawanych procesowi fermentacji na usuwanie i odzysk związków biogenych z pofermentu*”. W przygotowaniu jest również referat pt.: „*Dissolved organic phosphorus and nitrogen in digester liquors from agricultural biogas plants*”, który zostanie w tym roku zaprezentowany na 10th IWA International Symposium on Waste Management Problems in Agro-Industries w Rhodes w Grecji.

6. Informacja o działalności dydaktycznej, organizacyjnej, współpracy naukowej i popularyzacji nauki

Działalność dydaktyczna

Działalność dydaktyczną rozpoczęłam w czasie Studium Doktoranckiego w Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska (WILiŚ) Politechniki Gdańskiej (PG). W latach 2005 - 2006 w ramach otrzymanego stypendium DAAD prowadziłam cykl wykładów w języku niemieckim o tematyce związanej z oczyszczaniem wody i ścieków w Katedrze Ochrony Wody i Gospodarki Odpadami Politechniki Monachijskiej. W latach 2006 - 2008 prowadziłam zajęcia na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy (WBAiŚ, UTP) (kierunek: inżynieria środowiska; studia I i II stopnia, stacjonarne i niestacjonarne). W latach 2011 - 2017 prowadziłam zajęcia na Wydziale Inżynieryjnym (WI) Wyższej Szkoły Zarządzania Środowiskiem w Tucholi (WSZŚ w Tucholi) (kierunek: inżynieria środowiska, studia I stopnia, niestacjonarne). Obecnie prowadzę zajęcia na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej (kierunek: inżynieria środowiska, studia I i II stopnia, stacjonarne i niestacjonarne). Prowadzone przez mnie zajęcia obejmowały następujące przedmioty:

- *wykłady*: toksykologia środowiska (WBAiŚ UTP w Bydgoszczy), technologia wody i ścieków (WI WSZŚ w Tucholi), mechanika płynów (WI WSZŚ w Tucholi);
- *seminaria*: seminarium dyplomowe (WI WSZŚ w Tucholi; WILiŚ PG);
- *ćwiczenia audytoryjne*: hydraulika (WBAiŚ UTP w Bydgoszczy), mechanika płynów (WI WSZŚ w Tucholi), technologia wody i ścieków (WI WSZŚ w Tucholi), chemia ogólna (WILiŚ PG), ochrona powietrza (WILiŚ PG), instalacje budowlane (WILiŚ PG);
- *ćwiczenia laboratoryjne*: technologia wody i ścieków (WBAiŚ UTP w Bydgoszczy; WI WSZŚ w Tucholi; WILiŚ PG), chemia ogólna (WILiŚ PG);
- *ćwiczenia projektowe*: technologia wody i ścieków (WI WSZŚ w Tucholi), naturalne metody oczyszczania ścieków (WILiŚ PG), instalacje sanitarne (WILiŚ PG), wodociągi (WILiŚ PG).

Opracowałam autorski program zajęć - wykłady z przedmiotu toksykologia środowiska. Współpracowałam również przy opracowaniu programu ćwiczeń projektowych i audytoryjnych z przedmiotów naturalne metody oczyszczania ścieków oraz ochrona powietrza.

W roku 2012 został wydany przez Wydawnictwo Seidel-Przywecki z siedzibą w Warszawie podręcznik akademicki pt. „Kanalizacja. Projektowanie, wykonanie, eksploatacja”, którego jestem współautorką (załącznik 4: punkt II E.1. pozycja 1). Jest to pierwszy na polskim rynku tego typu podręcznik, w którym przedstawiono m.in. charakterystyczne wymagania nowych rozwiązań technicznych - w fazie projektu, realizacji i eksploatacji. Obok dominujących aspektów obliczeniowych poruszono także problemy formalne oraz nawiązano do aspektów prawno-

administracyjnych. Dotychczasowa literatura pochodzi z lat 40-50 lat i w zasadzie dotyczy technologii jeszcze starszych. W podręczniku przedstawiono dezaktualizację powszechnie akceptowanych standardów projektowania kanalizacji. Do chwili obecnej jej odbiorcami - oprócz studentów i pracowników naukowych - stali się pracownicy biur projektowych oraz przedstawiciele władz terytorialnych (w tym pracownicy starostw, urzędów gmin i urzędów miasta). W 2013 r. otrzymałam nagrodę za osiągnięcia dydaktyczne Rektora Politechniki Gdańskiej za współautorstwo niniejszego podręcznika akademickiego (załącznik 4: punkt III D. pozycja 2).

Pierwszy dyplom magisterski zrealizowany został pod moim kierunkiem w 2006 roku. Od tego czasu byłam opiekunem ponad 100 prac dyplomowych w tym 54 prac magisterskich, wielokrotnie powierzano mi recenzje prac. M.in. wyniki dwóch prac dyplomowych, pierwszej - związanej z odzyskiem związków biogennych ze ścieków bytowych, drugiej - dotyczącej ekologicznej sanitacji na terenach o zabudowie rozproszonej, realizowanych pod moim kierunkiem, zostały opublikowane w latach 2013 i 2014 w czasopiśmie branżowym „Wodociągi-Kanalizacja” (załącznik 4: punkt II E.4. pozycje: 24, 25, 28).

Wielokrotnie byłam organizatorką i opiekunką studenckich wycieczek dydaktycznych zarówno w kraju, jak i za granicą. M.in. latach 2003 i 2005 opiekowałam się grupą młodych naukowców w ramach odbywającego się cyklicznie programu „Young Scientists Programme” organizowanego przez stronę niemiecką (ATV- DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.), który realizowano w Berlinie (2003 r.) i Monachium (2005 r.). W 2014 r. byłam opiekunem naukowym grupy studentów reprezentujących uczelnie wyższe (Politechnikę Gdańską, Politechnikę Koszalińską, Politechnikę Krakowską i WSZŚ w Tucholi) uczestniczących w obozie naukowym zorganizowanym przez Wyższą Szkołę Zarządzania Środowiskiem w Tucholi (załącznik 4: punkt III Q.). Celem obozu było zapoznanie się z metodyką przeprowadzania badań i analiz pozwalających na opracowanie planu ochrony środowiska oraz stanu zanieczyszczenia wybranej miejscowości. Zadaniem, z jakim zmierzyli się studenci podczas pobytu, była identyfikacja źródeł emisji zanieczyszczeń wody, gleby i powietrza w miejscowości Tleń (woj. kujawsko-pomorskie). Rozwiązanie problemu studenci zaprezentowali pod moim kierunkiem na V Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Ogrzewanie i wentylacja w przemyśle i rolnictwie” w 2014 r.

Ponadto poza uczelniami w trakcie swojej pracy i studium doktoranckiego podejmowałam działania na rzecz samorządów w zakresie doradztwa oraz szkoleń o tematyce związanej z ochroną i oczyszczaniem wód i ścieków oraz gospodarką odpadami. Uczestniczyłam w doształcaniu zawodowym skierowanym do przedstawicieli samorządów w Polsce (Urząd Miasta w Gdańsku, Urząd Miasta w Gdyni) i zagranicą (Niemcy, Brazylia) w ramach współpracy z Ministerstwem Ochrony Środowiska Bawarii (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz i SINAENCO). Aktywność ta przejawiała się m.in. przez wygłaszanie odczytów z zakresu problematyki wodno-ściekowej (załącznik 4: punkt II L. pozycje: 6, 12, 17).

W 2007 r. byłam opiekunem studentów studiów stacjonarnych na kierunku budownictwo na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

W latach 2011 i 2012 byłam członkiem Komisji Programowej na Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Przez pięć lat licząc od 2012 r. byłam członkiem Rady Konsultacyjno-Programowej kierunku inżynieria środowiska w Wyższej Szkole Zarządzania Środowiskiem w Tucholi. Od 2016 roku jestem członkiem Wydziałowej Komisji ds. Oceny Parametrycznej i Kategoryzacji (WKOPiK) Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki

W latach 2005 - 2017 roku brałam udział czternastokrotnie w organizacji międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych, seminariów i workshopów (załącznik 4: punkt III C.). Wspólnie z zespołami z Katedry Technologii Wody i Ścieków i Katedry Inżynierii Sanitarnej Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej m.in. w latach 2015 i 2016 brałam udział w organizacji dwóch konferencji międzynarodowych (IWA Specialist Conference - Nutrient Removal and Recovery: moving innovation into practice oraz 8th Eastern European Young Water Professionals Conference, IWA YWP) jak również w 2005 r. i 2009 r. w ogólnopolskich konferencjach naukowych. Byłam również dwukrotnie sekretarzem konferencji naukowych cyklicznie organizowanych przez Wyższą Szkołę Zarządzania Środowiskiem w Tucholi, które odbyły się w latach 2013 - 2014. Zaś ramach realizowanego polsko-norweskiego projektu naukowo-badawczego uczestniczyłam w przygotowaniu sześciu workshopów i trzech seminariów, które miały miejsce w Gdańsku, Poznaniu, Gliwicach i Oslo (Norwegia). Obecnie uczestniczę w przygotowaniu ogólnopolskiej konferencji naukowej p.t.: „*Innowacje w Inżynierii Środowiska*”, która odbędzie się w czerwcu b.r. w Gdańsku.

Jako kierownik i wykonawca uczestniczyłam w siedmiu projektach badawczych w tym trzech międzynarodowych m.in. w ramach „Polsko-Norweskiej Współpracy Badawczej” i programu Europejska Współpraca Terytorialna i Europejski Instrument Sąsiedztwa (Interreg South Baltic Project) (załącznik 4: punkty: II J. oraz III F.). Pozostałe projekty były finansowane przez MNiSW oraz WFOŚiGW w Gdańsku. Obecnie biorę udział w realizacji dwóch projektów badawczych: MODEON - współfinansowany przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku oraz DEZMETAN - współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (załącznik 4: punkt II J. pozycje: 1, 2). M.in. ze środków, które pozyskane zostały z projektów badawczych, zakupiona została aparatura pomiarowa do laboratoriów, tj. piec muflowy, wagi, zestaw Oxi-Top do pomiaru tlenu w gruncie i szafa termostatyczna. Z pozyskanych środków z Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku zakupiono granulometr laserowy firmy Malvern Instruments Ltd 2000. Ze środków otrzymanych w

ramach projektu MODEON opracowano koncepcję zintegrowanej dwustopniowej technologii oczyszczania odcieków pofermentacyjnych i odzysku związków biogenych w skali pilotowej. Natomiast z otrzymanych środków finansowych w ramach projektu DEZMETAN zostanie wybudowana instalacja do wytrącania struwitu z odcieków.

Byłam również autorem i współautorem łącznie 9 opracowań i dokumentacji prac badawczych (załącznik 4: punkt II F.) oraz 7 ekspertyz naukowych (załącznik 4: punkt III M.).

Swoje kompetencje zawodowe (naukowe, dydaktyczne) poszerzałam dzięki uczestnictwu w licznych kursach, szkoleniach, stażach krajowych i zagranicznych (załącznik 4: punkt III L.). Od 2002 roku odbyłam łącznie piętnaście staży i szkoleń, w tym trzynaście w zagranicznych instytucjach m.in. w Niemczech, Portugalii oraz Brazylii.

W ostatnich latach nawiązałam również bliższą współpracę z biurami projektowymi ze Szwecji, m.in. w ramach programu EQUAL „Budujmy razem” w ramach ogólnej strategii zrównoważonego rozwoju i ekologicznej sanitacji. W szczególności dotyczy to alternatywnego rozwiązania zagospodarowania ścieków w splukiwanej biotoalecie poprzez separację uryny oraz przerób pozostałych odpadów na kompost. Systemy te są realistycznymi rozwiązaniami, zgodnymi z nowoczesnymi celami Ramowej Dyrektywy Wodnej UE oraz Zrównoważonego Rozwoju. Stąd też w celu poprawy jakości życia w połączeniu z ochroną środowiska szczególnie na terenach wiejskich promuję innowacyjne rozwiązania recyklingu ścieków bytowych. Artykuły, których jestem współautorką, mogą przyczynić się do rozpowszechnienia wśród studentów, projektantów, instalatorów i inwestorów informacji o alternatywnych sposobach zagospodarowania ścieków bytowych. Współpraca ze stroną szwedzką zaowocowała również wydaniem dwóch monografii (załącznik 4: punkt II E.1, pozycje: 2, 3). Jako członkini Międzynarodowego Projektu Transferu Technologii Wodnych (Projekt Technologietransfer Wasser - TTW) z siedzibą w Bawarskim Ministerstwie Ochrony Środowiska brałam udział w seminariach i projektach poświęconych tematyce *Integrated Water Resource Management*. Współpraca ze stroną niemiecką zaowocowała również wydaniem szeregu publikacji naukowych (załącznik 4: punkt II E.2, pozycja: 6; punkt II E.4., pozycje: 22, 23, 36, 40, 42; punkt II E.6., pozycja 64).

W ramach współpracy zagranicznej uczestniczyłam w szeregu konferencjach i seminariach międzynarodowych (siedemnastokrotnie). Biorę również czynny udział w krajowych konferencjach tematycznych (od 2002 r. - szesnastokrotnie). Wygłoszone na konferencjach referaty zostały opublikowane m.in. w formie rozdziałów w monografiach oraz jako artykuły recenzowane w dziele zbiorowym w języku o zasięgu międzynarodowym i krajowym.

Na prośbę redakcji czasopism o zasięgu międzynarodowym i krajowym zredagowałam piętnaście recenzji artykułów, w tym do *Ecological Engineering*, *Environmental Technology*, *Desalination*, *Journal of Environmental Management*, *African Journal of Biotechnology*, *Life Science*

Journal, Environment Protection Engineering, Bioprocess and Biosystems Engineering, Geoderma, Chemical Engineering Journal.

Moja działalność na rzecz współpracy naukowej i popularyzacji nauki została doceniona trzema nagrodami JM Rektora Politechniki Gdańskiej za wybitne prace organizacyjne oraz za wyróżniającą działalność badawczo-rozwojową.

7. Podsumowanie dorobku naukowego

Przed uzyskaniem stopnia doktora

W latach 2001 - 2005 opublikowałam łącznie 16 prac naukowych. Byłam m.in. współautorką pracy opublikowanej w czasopiśmie posiadającym IF, dwóch artykułów recenzowanych w dziele zbiorowym w języku o zasięgu międzynarodowym, czterech artykułów stanowiących rozdziały w monografiach o zasięgu krajowym, trzech artykułów w czasopismach recenzowanych (w tym jeden artykuł w jęz. niemieckim) oraz pięciu artykułów w materiałach konferencyjnych (w tym dwóch w jęz. o zasięgu międzynarodowym).

W latach 2003 - 2005 byłam głównym wykonawcą grantu promotorskiego pt. „Określenie zdolności respiracyjnych złóż hydrofitowych i filtrów w przydomowych oczyszczalniach ścieków podczas ich eksploatacji”.

Wyniki wykonanych przeze mnie badań przedstawiłam na konferencjach w formie wygłoszonych ośmiu referatów.

Ponadto byłam współautorką dwóch ekspertyz związanych z możliwością zastosowania metody hydrofitowej do oczyszczania ścieków komunalnych i unieszkodliwiania osadów ściekowych.

W latach 2002 - 2005 odbyłam dziesięć zagranicznych kursów i staży naukowych w niemieckich ośrodkach naukowych oraz w firmach projektowo-wykonawczych. Niezwykle dla mnie cenny okazał się pobyt naukowy w Niemczech w ramach przyznanego półrocznego stypendium naukowego DAAD.

Po uzyskaniu stopnia doktora

W latach 2006 - 2019 opublikowałam łącznie 58 prac naukowych, w tym m.in.: osiem prac w czasopismach wyróżnionych przez bazę Journal Citation Reports (w czasopismach: Bioresource Technology, Ecological Engineering, Water Science and Technology, Bioprocess and Biosystems Engineering, Biochemical Engineering Journal, Przemysł Chemiczny, Rocznik Ochrona Środowiska, Polish Journal of Environmental Studies,), trzy monografie i jeden podręcznik akademicki o zasięgu krajowym, trzy artykuły stanowiące rozdziały w monografiach o zasięgu międzynarodowym, sześć artykułów stanowiących rozdziały w monografiach o zasięgu krajowym, dwadzieścia prac w

czasopismach recenzowanych i innych wydawnictwach ciągłych oraz trzynastie publikacji w materiałach konferencyjnych.

Powyższe prace powstały w ramach projektów badawczych. W latach 2009 - 2012 kierowałam dwoma projektami badawczymi finansowanymi przez MNiSW oraz przez WFOŚiGW w Gdańsku. Byłam wykonawcą w jednym krajowym projekcie finansowanym przez WFOŚiGW w Gdańsku oraz trzech projektach międzynarodowych w ramach programu „Polsko-Norweska Współpraca Badawcza” realizowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz programu Europejska Współpraca Terytorialna i Europejski Instrument Sąsiedztwa. Obecnie biorę udział (jako wykonawca) w dwóch projektach naukowo-badawczych współfinansowanych ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego oraz ze środków WFOŚiGW w Gdańsku.

Współuczestniczyłam w wykonaniu trzynastu raportów, opracowań zbiorowych i ekspertyz (w tym jednej w Niemczech) związanych tematycznie z ochroną wód i oczyszczaniem ścieków.

W 2007 r. uczestniczyłam w stażu naukowym w Portugalii. W latach 2008 - 2013 odbyłam trzy specjalistyczne kursy naukowe w Polsce. W 2018 r. odbyłam staż zawodowy w niemieckim biurze projektowym. Staże naukowo-zawodowe w Niemczech rozwinęły moje umiejętności badawcze oraz organizacyjne. Poznałam nowe techniki eksperymentalne, nawiązałam także liczne kontakty z naukowcami z Niemiec. Rozpoczęta od 2004 r. współpraca jest kontynuowana do dnia dzisiejszego. Jestem członkiem międzynarodowego Projektu Transferu Technologii Wodnych (Projekt Technologietransfer Wasser - TTW) z siedzibą w Bawarskim Ministerstwie Ochrony Środowiska.

Również niezwykle cenne było dla mnie uczestnictwo w jedenastu konferencjach zagranicznych oraz dwunastu konferencjach i seminariach krajowych i możliwość wygłoszenia dziewięciu referatów oraz prezentacji czterech posterów.

Wartości poznawcze i aplikacyjne moich prac nauko-badawczych zostały docenione pięcioma nagrodami Rektora Politechniki Gdańskiej, w tym: za osiągnięcia naukowe; za wyróżniającą działalność badawczo-rozwojową; za wybitne prace organizacyjne oraz za osiągnięcia dydaktyczne.

Statystyka prac naukowych

Sumaryczny współczynnik oddziaływania wszystkich opublikowanych przeze mnie prac naukowych (Impact Factor) zgodnie z listą Journal Citation Reports (JCR) wynosi $IF = 15,97$. Sumaryczna wartość punktacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (PM) wynosi $PM = 535,0$. Natomiast liczba punktów z uwzględnieniem wkładu własnego (przed i po doktoracie) to 280,1. Liczba cytowań prac naukowych według bazy Web of Science (WoS) wynosi 64 (bez autocytowań - 61), natomiast h-index jest równy 4.

W tabeli 1 zestawiono dorobek naukowy przed i po uzyskaniu stopnia doktora.

Tabela 1. Zestawienie dorobku naukowego przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Lp.	Rodzaj osiągnięcia	Liczba	
		przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
1	Publikacje, w tym:	16	58
	w czasopismach z listy JCR	1	8
	monografie i podręczniki	0	4
	rozdziały w monografiach i artykuły recenzowane w dziele zbiorowym o zasięgu międzynarodowym	2	3
	rozdziały w monografiach i artykuły recenzowane w dziele zbiorowym o zasięgu krajowym	4	6
	w czasopismach recenzowanych i innych wydawnictwach ciągłych	3	20
	w wydawnictwie zbiorowym i materiałach konferencyjnych	5	13
	publikacje elektroniczne	1	4
2	Uczestnictwo w projektach badawczych, w tym:	1	7
	międzynarodowych	0	3
	krajowych	1	4
3	Osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	1	3
4	Udział w komitetach organizacyjnych/naukowych konferencji, seminariów, workshopów	1	14
5	Wygłoszenie referatów (R) i prezentacja posterów (P) na konferencjach	8 (R)	9 (R) 4 (P)
6	Twórcze prace zawodowe, w tym:	3	13
	opracowania zbiorowe, dokumentacja prac badawczych	2	7
	ekspertyzy i opinie	1	6
7	Krajowe i zagraniczne staże	10	5
8	Promotor prac dyplomowych, w tym:	0	115
	inżynierskich	0	61
	magisterskich	0	54
9	Cytowania (bez autocytowań)	0	64 (61)
10	Indeks Hirscha	0	4
11	Impact Factor	1,19	14,78
12	Punkty wg MNiSW	54,0	481,0
	z uwzględnieniem udziału własnego	19,9	260,2

Agnieszka Tuszyńska