

dr inż. Jerzy Mikosz

Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska

Wydział Inżynierii Środowiska

Politechnika Krakowska

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

jmikosz@pk.edu.pl

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko	1
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	1
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	1
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.....	2
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	2
4.2. Autor, rok wydania, tytuły publikacji, wydawnictwo, recenzenci wydawniczy	2
4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	2
4.3.1. Wprowadzenie	2
4.3.2. Omówienie celu naukowego wykonanych prac.....	3
4.3.3. Omówienie osiągniętych wyników.....	4
4.3.4. Możliwości zastosowania osiągniętych wyników.....	15
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.....	16
5.1. Przed uzyskaniem doktoratu.....	16
5.2. Po doktoracie	17
5.2.1. Aktywność krajowa.....	17
5.2.2. Aktywność międzynarodowa	21
6. Podsumowanie osiągnięć i dorobku	22
6.1. Działalność naukowo-badawcza.....	22
6.2. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska	23
6.3. Działalność organizacyjna.....	25

1. Imię i nazwisko

Jerzy Piotr Mikosz

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

1988 **Magister inżynier inżynierii środowiska**

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej.

Praca magisterska pod tytułem: „*Efektywność działania oraz zalecenia eksploatacyjne dla oczyszczalni ścieków w Jarosławiu na podstawie badań rozruchowych*”. Promotor: dr inż. Wiesława Styka.

1994 **Master of Public Affairs**

The University of Texas at Austin, Lyndon B. Johnson School of Public Affairs (USA).

Praca magisterska pod tytułem: „*Water management reform in Poland: A step toward eco-development*”. Promotorzy: prof. David Eaton, prof. Jurgen Schmandt.

1999 **Doktor nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska**

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska.

Rozprawa doktorska pod tytułem: „*Zastosowanie dynamicznej symulacji komputerowej do wyboru strategii biologicznego usuwania związków biogenych ze ścieków miejskich*”. Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Kurbiel, recenzenci: prof. dr inż. Marek Roman, dr hab. inż. Krzysztof Bartoszewski, dr hab. inż. Wojciech Dąbrowski.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2000–obecnie **Adiunkt** w Katedrze Technologii Środowiskowych (poprzednio Zakład Oczyszczania Wody i Ścieków), Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej.

2009–2013 Zastępca ds. naukowych Dyrektora Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej.

2002–2008 Prodziekan Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej.

1994–1995 **Staż naukowy** w Lyndon B. Johnson School of Public Affairs, The University of Texas at Austin (USA).

1990–2000 **Asystent** w Zakładzie Oczyszczania Wody i Ścieków, Instytut Inżynierii Sanitarnej i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej (w latach 1992-1995 urlopowany celem odbycia studiów i stażu naukowego).

1988–1990 **Asystent stażysta** w Zakładzie Oczyszczania Wody i Ścieków, Instytut Inżynierii Sanitarnej i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. poz. 595 ze zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie pt.:

„Teoretyczne i praktyczne aspekty matematycznego modelowania procesu wielofazowego osadu czynnego z uwzględnieniem emisji N₂O”

4.2. Autor, rok wydania, tytuły publikacji, wydawnictwo, recenzenci wydawniczy

1. **Mikosz Jerzy** (2017) *Teoretyczne i praktyczne aspekty matematycznego modelowania procesu wielofazowego osadu czynnego z uwzględnieniem emisji N₂O*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia 543, seria Inżynieria Środowiska; redaktor naukowy: prof. dr hab. inż. Anna M. Anielak; recenzenci: prof. dr hab. inż. Stanisław Biedugnis, prof. dr hab. inż. Jan Pawełek (Zał. 5.1).
MNiSW: **25 pkt.**
2. **Mikosz Jerzy** (2015) Determination of permissible industrial pollution load at a municipal wastewater treatment plant, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 12, Iss. 3, s. 827-836 (Zał. 5.2).
IF (2015): **2,344**; MNiSW (2015): **30 pkt.**; cytowania w Web of Science: **6**
3. **Mikosz Jerzy** (2016) Analysis of greenhouse gas emissions and the energy balance in a model municipal wastewater treatment plant, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 57, Iss. 59, s. 28551-28559 (Zał. 5.3).
IF (2016): **1,272**; MNiSW (2016): **20 pkt.**; cytowania w Web of Science: **0**

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie

Zjawiska zachodzące w procesie wielofazowego osadu czynnego charakteryzują się dużym stopniem złożoności wynikającym z interakcji pomiędzy procesami utleniania związków organicznych, biologicznej nitrifikacji i denitrifikacji oraz biologicznego nadmiarowego usuwania fosforu zachodzącymi w systemie jednoosadowym. Reaktor wielofazowy pracuje w warunkach silnie dynamicznych ze względu na zmienność ilości i składu ścieków dopływających do reaktora biologicznego oraz parametrów eksploatacyjnych¹. Opis matematyczny zjawisk zachodzących w tak złożonym systemie wymaga znajomości teoretycznych podstaw procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych, wiarygodnego modelu matematycznego oraz spójnego zestawu danych wejściowych. Modele takie są od wielu lat stosowane w praktyce eksploatacyjnej oczyszczalni ścieków.

¹ Ekama, G. A., Marais, G. v. R. (1979) Dynamic Behavior of the Activated Sludge Process. *J Water Pollut Control Fed*, 51, 3, 534-556.

W ostatnich latach coraz większą uwagę poświęca się emisji gazów cieplarnianych z procesów oczyszczania ścieków i podejmowane są próby włączeniu opisu tego zjawiska do modeli osadu czynnego². Dotyczy to emisji takich gazów jak tlenek węgla(IV) (CO₂) i metan (CH₄), a przed wszystkim tlenek azotu(I) (N₂O), jako gazu o największym potencjale efektu cieplarnianego (296). W wielu sytuacjach modelowanie matematyczne jest jedynym sposobem określenia wielkości emisji gazów cieplarnianych z dużych kubaturowo obiektów w oczyszczalniach ścieków. Uwzględnienie N₂O i CO₂ jako dodatkowych składników w modelach osadu czynnego prowadzi do konieczności wprowadzenia bardzo szczegółowego opisu zachodzących tam przemian, a tym samym do coraz większej złożoności tych modeli, co skutkuje większym zapotrzebowaniem na dane wejściowe. To z kolei oznacza wydłużenie badań symulacyjnych i zwiększenie ich kosztów, co jest jedną z najważniejszych barier w praktycznym stosowaniu symulacji komputerowej w oczyszczalniach ścieków miejskich³.

4.3.2. Omówienie celu naukowego wykonanych prac

Symulacja komputerowa wysokoefektywnych procesów oczyszczania ścieków wymaga **opracowania nowych zasad stosowania matematycznych modeli wielofazowego osadu czynnego uwzględniających emisję N₂O**. Rozwiązanie powyższego problemu stanowi główny cel naukowy wykonanych przez mnie prac. Jego osiągnięcie wymagało realizacji następujących celów pomocniczych, odpowiadających kolejnym etapom badań:

- 1) przeprowadzenia studiów teoretycznych podstaw procesów jednostkowych zachodzących w wielofazowym osadzie czynnym uwzględniających emisję CO₂, CH₄ i N₂O oraz sposobu matematycznego opisu tych zjawisk w postaci modeli cząstkowych;
- 2) określenia racjonalnego zakresu zastosowania modeli cząstkowych w kompleksowym modelu wielofazowego osadu czynnego z uwzględnieniem emisji N₂O w kontekście prowadzenia badań symulacyjnych w mechaniczno-biologicznych oczyszczalniach ścieków;
- 3) weryfikacji uzyskanych wyników poprzez przeprowadzenie badań symulacyjnych zgodnie z opracowaną metodą w trzech oczyszczalniach ścieków miejskich.

Mój autorski wkład w rozwój dyscypliny naukowej polega na określeniu zasad racjonalnej aplikacji modeli cząstkowych, w tym modeli opisujących emisję N₂O, w kompleksowym modelu oczyszczalni ścieków miejskich podczas badań symulacyjnych. Zrealizowane badania własne mają charakter nowatorski, a sformułowane wnioski stanowią podstawę do racjonalnego planowania badań symulacyjnych w oczyszczalniach ścieków miejskich. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie zasad doboru modeli cząstkowych, zakresu ich uwzględnienia w modelu kompleksowym oczyszczalni oraz sposobu realizacji poszczególnych etapów badań symulacyjnych w zależności od wyznaczonego celu badań. Chociaż takie próby były podejmowane w przeszłości i na ich podstawie formułowano pewne rekomendacje⁴, to jednak brak jest kompleksowych zaleceń odnośnie zasad modyfikowania poszczególnych etapów badań w celu ich uproszczenia lub nawet rezygnacji z nich, gdy jest to uzasadnione celem badań i specyficznymi uwarunkowaniami. Ponadto, w tych pracach nie uwzględniano zagadnienia emisji N₂O z procesu wielofazowego osadu czynnego. Modyfikacje, które pod pewnymi warunkami mogą być zastosowane podczas badań symulacyjnych, zmniejszają ich czasochłonność i związane z nimi wysiłki organizacyjny.

² Kampschreur, M. J., Temmink, H. i in. (2009) Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43, 4093–4103.

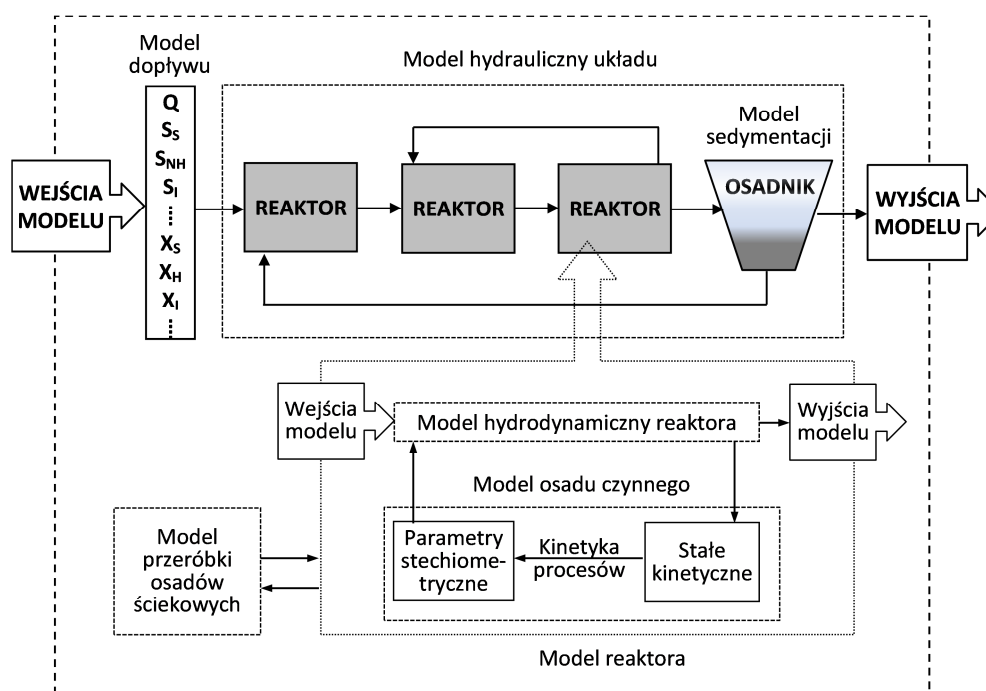
³ Hauduc, H., Gillot, S. i in. (2009) Activated sludge modelling in practice: An international survey. *Water Sci Technol*, 60, 8, 1943-1951.

⁴ Langergraber, G., Rieger, L. i in. (2004) A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants. *Water Sci Technol*, 50, 7, 131-138.

4.3.3. Omówienie osiągniętych wyników

A. W odniesieniu do aspektów teoretycznych

Model współczesnej mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków stanowi bardzo złożony system integrujący wiele procesów zachodzących w różnych urządzeniach i połączonych skomplikowanym układem współzależności. Z tego powodu podczas modelowania przedstawiany jest on jako **suma modeli cząstkowych**, które opisują funkcje i zachowania poszczególnych podsystemów. W zależności od celu modelowania różne podsystemy oraz interakcje zachodzące pomiędzy nimi będą wyróżniane i opisywane z różną dokładnością za pomocą modeli cząstkowych. Najczęściej uwzględniane modele cząstkowe to: model hydrauliczny układu, model dopływu, model reaktora biologicznego, model sedymentacji oraz model przeróbki osadów. Opis ten może być uszczegółowiany i rozszerzany na kolejne poziomy w zależności od szczegółowego celu badań symulacyjnych. W ramach modelu reaktora biologicznego można wyróżnić m.in. model przemian biochemicznych, model temperaturowy, opisujący bilans ciepła dla reaktora, model hydrodynamiczny, model transferu tlenu, modele sterowania i szereg innych⁵ (rys. 1). Każdy z wymienionych modeli cząstkowych ma obszerne podstawy teoretyczne, których dogłębne poznanie i zrozumienie jest niezbędne do jego efektywnej aplikacji w kompleksowym modelu oczyszczalni.



Rys. 1 Schemat opisujący model oczyszczalni ścieków jako sumę modeli cząstkowych (opracowanie własne na podstawie Meijer 2004⁶)

W ramach wykonanych przeze mnie studiów teoretycznych aspektów modelowania wielofazowego osadu czynnego poddałem analizie podstawy teoretyczne najważniejszych modeli cząstkowych uwzględnianych w kompleksowych modelach układu: „reaktor wielofazowy-osadnik wtórny”, takich jak: model hydrodynamiczny reaktora biologicznego,

⁵ Gernaey, K.V., van Loosdrecht, M.C.M. i in. (2004) Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art. *Environ Model Softw*, 19, 763-783.

⁶ Meijer S. C. F. *Theoretical and practical aspects of modelling activated sludge processes*. Delft University of Delft, Delft, 2004.

model temperaturowy, model sedymentacji w osadniku wtórnym oraz model transferu tlenu do osadu czynnego. W odniesieniu do opisu procesów biochemicznych zachodzących w osadzie czynnym analiza dotyczyła przyrostu i rozkładu różnych grup mikroorganizmów, procesu hydrolizy związków organicznych i związków azotu, gromadzenia produktów wewnątrzkomórkowych oraz produkcji N_2O .

Wyniki przeprowadzonych przez mnie studiów tematu wykazały, że prawidłowe odwzorowanie charakterystyki **hydrodynamicznej** wielofazowego reaktora biologicznego ma podstawowe znaczenie dla uzyskiwanych wyników symulacji. W tym celu przeprowadza się badania znacznikowe w obiekcie rzeczywistym, na podstawie których określa się hydrauliczny typ reaktora. Zwykle nie odpowiada on modelowi reaktora idealnego o pełnym wymieszaniu lub o przepływie tłokowym. Dlatego na podstawie wyników badań hydraulicznych należy ustalić przybliżony sposób jego opisu w modelu. Na przykład, reaktor o przepływie tłokowym często opisuje się w modelu matematycznym jako układ kilku mniejszych reaktorów o pełnym wymieszaniu połączonych szeregowo. Przeprowadzone studia tego tematu pokazują, że badań hydraulicznych powinny być wykonane na początku badań symulacyjnych ponieważ ich wyniki determinują planowanie dalszych etapów badań.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdziłem, że sposób opisu matematycznego procesu **sedymentacji** osadu czynnego zachodzącego w osadniku powinien być warunkowany celem do jakiego modelu ma być zastosowany. Opis ten może obejmować tylko proces sedymentacji, rozumiany jako zjawisko fizyczne i przedstawiany bardziej lub mniej szczegółowo, albo uwzględniać także szczegóły konstrukcyjne osadnika, czynniki zewnętrzne (temperatura, ciśnienie), a nawet procesy biochemiczne zachodzące w osadniku (tzw. osadniki reaktywne). Powszechnie przyjęty sposób opisu procesu sedymentacji opiera się na teorii strumieni masy zapoczątkowanej przez Kynch'a i rozwijanej w kolejnych latach⁷. Zgodnie z tą teorią osadnik jest dzielony na szereg warstw (najczęściej 10) i dla każdej warstwy oddzielnie sporządzany jest bilans masy w oparciu o teorię strumieni masy. W większości przypadków opisu taki jednowymiarowy opis procesu sedymentacji w osadniku wtórnym jest wystarczający i, poza szczególnymi przypadkami, nie ma konieczności stosowania modeli osadników reaktywnych.

Cząstkowy **model biochemiczny** opisuje szereg procesów, które mają wpływ na ilość mikroorganizmów (przyrost, rozkład) obecnych w modelowanym układzie oraz dostępność różnych substratów (fermentacja, hydroliza). W opisie tych procesów szczególną rolę odgrywa charakterystyka kinetyczna i stechiometryczna poszczególnych grup mikroorganizmów, przemian związków organicznych, które stanowią źródło substancji odżywczych oraz gromadzenie produktów wewnątrzkomórkowych. Ograniczona dostępność składników odżywczych oraz czynników wzrostu, takich jak np. aminokwasy i witaminy, może limitować wzrost mikroorganizmów, nawet przy wystarczającej dostępności związków węgla i źródeł energii. Mikroorganizmy mogą pozyskiwać związki węgla z materiału organicznego dostępnego w ściekach (heterotrofy) lub z tlenku węgla(IV) (autotrofy). Źródłem energii dla większości mikroorganizmów w osadzie czynnym są przemiany chemiczne o charakterze utleniająco-redukcyjnym, w których donorem i akceptorem elektronów mogą być zarówno związki organiczne, jak i nieorganiczne. Przeprowadzone studia tematu wykazały, że bardzo złożone jest zjawisko gromadzenia produktów wewnątrz komórek bakteryjnych, a mechanizmy tym sterujące są trudne do precyzyjnego określenia ze względu na m.in. na różnorodność związków organicznych mogących stanowić pożywkę dla bakterii heterotroficznych. Powszechnie uważa się, że gromadzenie związków organicznych w postaci

⁷ Vitasovic, Z. (1986) *An integrated control strategy for the activated sludge process*. Houston, TX.

polimerów jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za usuwanie ze ścieków łatwo przyswajalnych związków węgla. Uzyskane przez mnie wyniki pokazały, że istniejące liczne modele osadu czynnego opisują procesy usuwania związków węgla, azotu i fosforu w sposób bardzo zróżnicowany. Pozwala to na wybór takiego modelu biochemicznego, który jest najlepiej dopasowany do celu badań, przy uwzględnieniu ogólnej zasady, że stosuje się najprostszy z modeli matematycznych umożliwiający osiągnięcie zakładanych celów.

Szczególną uwagę poświęciłem analizie teoretycznych podstaw **produkcji N₂O** w procesie wielofazowego osadu czynnego, jako zjawisku jeszcze nie w pełni rozpoznanemu. Wielkość tej emisji szacuje się na około 2,8–3% ogólnej emisji N₂O ze wszystkich źródeł antropogenicznych⁸, a w wartościach bezwzględnych jako 0,06–0,253 kg N₂O-N każdy kg N poddanego denitryfikacji, z czego ponad 95% jest uwalniane do atmosfery⁹. Przeprowadzone przez mnie studia tematu pozwoliły określić następujące drogi wytwarzania N₂O w procesie przemian związków azotu w reaktorze wielofazowym:

- W procesie niecałkowitej biologicznej denitryfikacji heterotroficznej, którą można ją opisać jako czterostopniowy proces redukcji azotanów, gdzie N₂O jest jednym z powstających produktów pośrednich, na drodze redukcji kolejno NO₃⁻, NO₂⁻, NO i N₂O do azotu gazowego (N₂) przy równoczesnym utlenianiu związków pożywkowych;
- W procesie dwustopniowej autotroficznej nityfikacji prowadzonym zarówno przez bakterie, jak i archeany. Najpierw amoniak (NH₄⁺) jest utleniany do hydroksyloaminy (NH₂OH), która jest utleniana do azotynów (NO₂⁻) w obecności oksydoreduktazy hydroksyloaminy, a następnie azotyny są utleniane do azotanów (NO₃⁻). W procesie tym N₂O może powstać na skutek niecałkowitego utlenienia NH₂OH, chociaż niektórzy autorzy podają, że zachodzi to tylko przy bardzo dużych stężeniach NO₃⁻, które zwykle nie występują w osadzie czynnym¹⁰.
- W procesie autotroficznej redukcji azotynów (NO₂⁻) do N₂O (lub do N₂) prowadzonym przez bakterie autotroficzne utleniające amoniak (AOB), które wykorzystują wówczas amoniak lub wodór jako donor elektronów. Zjawisko to może wystąpić w warunkach deficytu tlenu lub przy podwyższonym stężeniu azotynów w osadzie czynnym.

Udział wyżej wymienionych procesów w całkowitej produkcji N₂O w procesie wielofazowego osadu czynnego nie jest dobrze rozpoznany. Wielu autorów skłania się ku stwierdzeniu, że znacznie więcej N₂O jest produkowane w procesie autotroficznej nityfikacji, a także denitryfikacji prowadzonej przez bakterie utleniające amoniak, niż w procesie zwykłej heterotroficznej denitryfikacji¹¹. Procesy te zostały w różnym zakresie uwzględnione w modelach matematycznych opracowanych w ostatnich latach m. in. przez *Hiatt'a i Grady'ego*, *Ni i in.*, *Mampaey'a i in.* oraz *Law i in.*¹² Jednak dopiero model przedstawiony przez *Ni i in.* w 2014 uwzględnia w sposób kompleksowy obie ścieżki wytwarzania N₂O w procesie autotroficznym: poprzez częściowe utlenianie hydroksyloaminy oraz w wyniku autotroficznej denitryfikacji prowadzonej przez bakterie autotroficzne

⁸ Law, Y., Ye, L. i in. (2012) Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 367, 1265-1277.

⁹ Foley, J., de Haas, D. i in. (2010) Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *Water Research*, 44, 831-844.

¹⁰ Tallec, G., Garnier, J. i in. (2006) Nitrous oxide emissions from secondary activated sludge in nitrifying conditions of urban wastewater treatment plants: Effect of oxygenation level. *Water Res*, 40, 2972-2980.

¹¹ Wunderlin, P., Mohn, J. i in. (2012) Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. *Water Res*, 46, 4, 1027-1037

¹² Ni, B. J., Yuan, Z. i in. (2013) Evaluating Four Mathematical Models for Nitrous Oxide Production by Autotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria. *Biotechnol Bioeng*, 110, 1, 153-163.

utleniające amoniak¹³. Przeprowadzone przez mnie studia tego tematu wskazują jednak, że model ten wymaga dalszych badań w celu jego weryfikacji, a wyniki z niego uzyskane nie mogą być traktowane jako w pełni reprezentatywne.

B. W odniesieniu do aspektów praktycznych

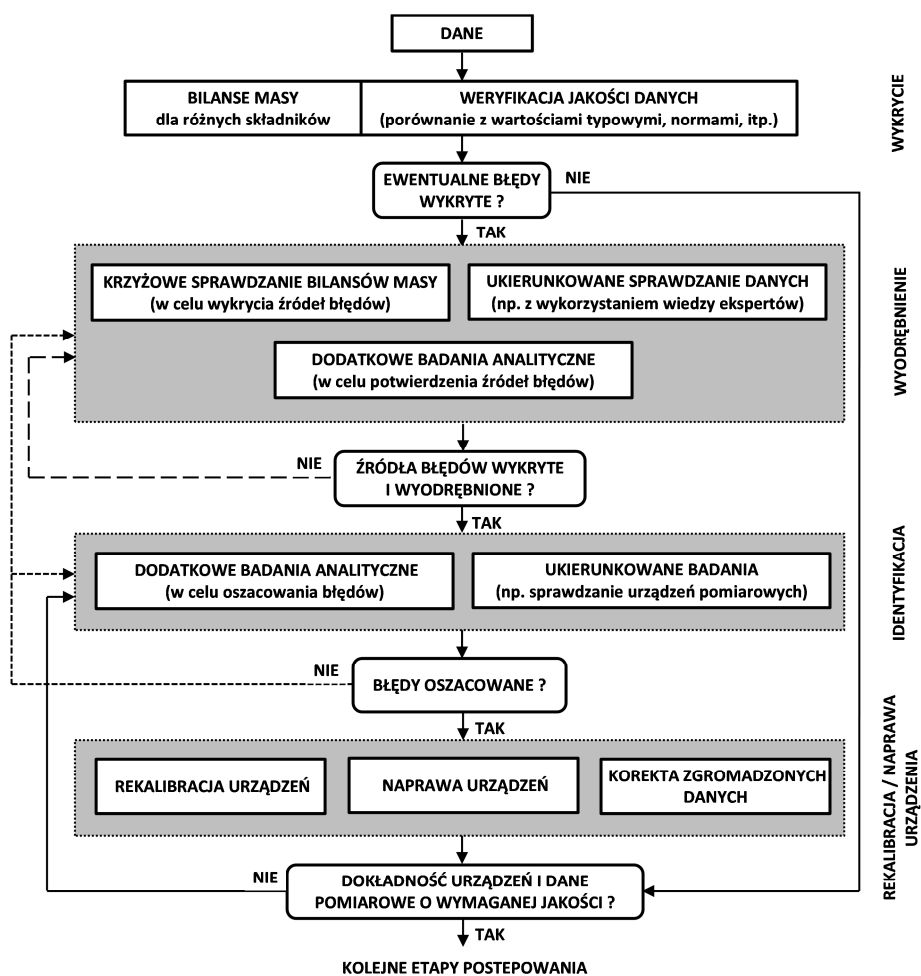
Sposób aplikacji modeli cząstkowych w modelu kompleksowym oraz sposób prowadzenia badań symulacyjnych, oprócz rozbudowanych podstaw teoretycznych, musi uwzględniać także bezpośrednie odniesienie do praktycznych aspektów badań. Doświadczenia zgromadzone przez mnie w ciągu wielu lat prowadzenia badań symulacyjnych w miejskich oczyszczalniach ścieków oraz wnioski formułowane przez różnych autorów w literaturze tematu wskazują, że założony cel badań powinien determinować granice badanego systemu, wymaganą dokładność modelu oraz planowany zakres badań symulacyjnych. Pewne modyfikacje programu badań symulacyjnych są możliwe bez pogorszenia wyników symulacji, jednak muszą one być przewidziane już na etapie planowania. Podejmowanie takich decyzji na etapie realizacji badań powinno być dobrze przemyślane i merytorycznie uzasadnione, i nigdy nie powinno być wynikiem presji czasu, nadmiernie rosnących kosztów badań lub chwilowych trudności organizacyjnych spowodowanych złym planowaniem badań¹⁴. Modyfikacje takie można określić jako „optymalizację zakresu badań symulacyjnych dla osiągnięcia zamierzonego celu i przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z możliwości finansowych i organizacyjnych” i nie należy tego rozumieć jako dowolną rezygnację z wykonywania wymaganych czynności pod wpływem trudności pojawiających się podczas prowadzenia badań. Obserwacje z moich badań prowadzonych w oczyszczalniach ścieków wykazały, że możliwości modyfikacji typowego toku prowadzenia badań symulacyjnych zwykle idą w dwóch kierunkach: ograniczenia ilości potrzebnych danych i uproszczenia procedury kalibracji i walidacji modelu.

Z moich badań wynika, że ilość danych potrzebnych do prowadzenia symulacji można w znacznym stopniu ograniczyć już na etapie planowania badań. Podstawowe znaczenie ma w takim przypadku zakres prowadzonych badań symulacyjnych, czyli granice modelowanego systemu. Przedmiotem badań powinny być tylko te obiekty i procesy, które są niezbędne z punktu widzenia wyznaczonego celu. Uwzględnianie w modelu zbyt wielu składników i modeli cząstkowych zwiększa koszty pozyskania danych potrzebnych dla kalibracji i walidacji modelu i zmniejsza relatywne znaczenie każdego uwzględnianego czynnika. Prowadzi to także do zwiększenia kosztów badań symulacyjnych i zmniejsza użyteczność samego modelu¹⁵. Podobnie, wymagana dokładność modelu nie jest pojęciem bezwzględnym i jest uzależniona od jego zastosowania. Zdarza się, że do rozwiązania stosunkowo prostego problemu eksploatacyjnego w oczyszczalni wykorzystuje się nadmiernie skomplikowany model symulacyjny, który wymaga dużej ilości szczegółowych danych wejściowych. Powoduje to, że relacja nakładu czasu i środków poniesionych na prowadzenie badań symulacyjnych do uzyskiwanych efektów jest wyraźnie niekorzystna, a potencjalne możliwości efektywnego wykorzystania wyników symulacji są ograniczone. Mniejsza dokładność modelu nie oznacza rezygnacji z konieczności identyfikacji i eliminacji ewentualnych błędów systemowych zgodnie z procedurą przedstawioną na rys. 2.

¹³ Ni B.-J., Peng L. i in. (2014) Modeling of Nitrous Oxide Production by Autotrophic Ammonia-Oxidizing Bacteria with Multiple Production Pathways. *Environ Sci Technol*, 48, 3916–3924

¹⁴ Mikosz J. (2013) Symulacja komputerowa w oczyszczaniu ścieków - czy naprawdę jej potrzebujemy? *Technologia Wody*, 31, 11, s. 12-17.

¹⁵ Mikosz J. (2007) Badania analityczne jako podstawa symulacji komputerowej w oczyszczaniu ścieków. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 9, s. 25-28.



Rys. 2 Tok postępowania prowadzący do identyfikacji błędów systemowych i ich źródeł w badaniach symulacyjnych (opracowanie własne na podstawie Rieger i in. 2010¹⁶)

Praktyka prowadzenia badań symulacyjnych pokazuje, że kalibracja i walidacja modelu wymagają największej ilości danych i ten etap badań symulacyjnych ma największy potencjał do wprowadzania racjonalnych i uzasadnionych modyfikacji zmierzających do ich uproszczenia. Pomimo, że te etapy badań są sformalizowane w ramach tzw. „protokołów kalibracyjnych”, to szczegółowy zakres i przebieg kalibracji modelu zawsze jest uzależniony od konkretnego celu badań symulacyjnych oraz specyficznych uwarunkowań. Na przykład, kalibracja może zostać znacząco uproszczona w przypadku stosowania symulacji do tylko celów porównawczych, do określenia „kierunkowych” skutków wprowadzanych zmian, do szkolenia obsługi, do opracowania procedur postępowania w sytuacjach awaryjnych lub przy weryfikacji rozwiązań projektowych na etapie koncepcji. Uzyskane przez mnie wyniki pokazują, że modyfikacje wprowadzane na poszczególnych etapach badań symulacyjnych mogą przyjąć postać:

- ograniczenia zakresu uwzględnionych procesów (modeli cząstkowych),
- zastosowania najprostszego modelu biochemicznego, który zapewnia osiągnięcie założonego celu badań,
- wybór modelu dopływu odpowiadający zakresowi posiadanych danych o składzie ścieków i minimalizującego potrzebę badań dodatkowych,

¹⁶ Rieger L., Takács I. in. (2010) Data reconciliation for wastewater treatment plant simulation studies-planning for high-quality data and typical sources of errors. *Water Environ Res*, 82, 5, s. 426-433.

- wykorzystania danych historycznych rutynowo gromadzonych w oczyszczalni ścieków przy równoczesnej intensyfikacji kontroli analitycznej procesów zachodzących w oczyszczalni z odpowiednim wyprzedzeniem przed rozpoczęciem badań symulacyjnych,
- ograniczenie zakresu badań składu biomasy i parametrów biomasy w reaktorze wykonywanych przed przeprowadzeniem wstępnych symulacji,
- zastosowanie takiej procedury kalibracji modelu, która pozwoli wykorzystać jak najwięcej już posiadanych danych,
- rezygnacja z kalibracji dynamicznej, jeżeli jest to uzasadnione celem badań,
- rezygnacja z kalibracji hydrodynamicznej układu lub przeprowadzenie tylko weryfikacji jego właściwości hydraulicznych, jeżeli badany obiekt ma prosty schemat hydrauliczny,
- wyznaczenie prędkości sedymentacji osadu w oparciu o wartość indeksu osadu, zamiast przeprowadzania testów kolumnowych.

Modyfikacje mające na celu uproszczenie poszczególnych etapów badań, które w pewnych okolicznościach mogą być dopuszczalne w procesie prowadzenia badań symulacyjnych wraz z wynikającymi z nich korzyściami i możliwymi zagrożeniami przedstawiłem w załączonej monografii (Zał. 5.1, tab. 10)¹⁷. Ich stosowanie musi mieć racjonalne podstawy tak, żeby nie miały one negatywnego wpływu na rzetelność przeprowadzonych badań oraz nadmiernie nie zwiększały niepewności uzyskanych wyników. Wyniki moich badań pokazały, że przypadku zauważenia takiego wpływu, należy powrócić do typowej procedury prowadzenia badań zgodnej z zastosowanym protokołem kalibracyjnym.

C. Praktyczna weryfikacja wyników badań

Sformułowane przez mnie zasady aplikacji modeli cząstkowych w modelu kompleksowym oczyszczalni mające na celu uproszczenie badań symulacyjnych, umożliwiają wykorzystanie symulacji komputerowej jako efektywnego narzędzia w praktyce eksploatacyjnej i projektowej. Zasady te zostały przez mnie praktycznie zweryfikowane podczas badań symulacyjnych prowadzonych w 3 oczyszczalniach ścieków: jednej oczyszczalni wzorcowej (hipotetycznej) i dwóch obiektach rzeczywistych (miejskich oczyszczalniach ścieków w Pruszkowie i w Jaśle). Wszystkie badania zakończyły się osiągnięciem wyznaczonych celów, jednak w każdym z opisanych przypadków plan badań symulacyjnych był odpowiednio modyfikowany pod kątem wyznaczonego celu badań, zgodnie z opracowanymi przez mnie zasadami aplikacji modeli cząstkowych. Różnice w planach badań opracowanych dla poszczególnych oczyszczalni przedstawiały się następująco:

- W przypadku badań prowadzonych na **modelu oczyszczalni wzorcowej (badania weryfikacyjne I)** pominięto etap kalibracji i walidacji modelu, ponieważ przedmiotem badań symulacyjnych był szczegółowo opisany obiekt hipotetyczny, który jednak nie istniał w rzeczywistości i tym samym nie było punktu odniesienia dla kalibracji modelu.
- Do badań symulacyjnych w **oczyszczalni ścieków w Jaśle (badania weryfikacyjne II)** wykorzystano model, który już był używany w przeszłości. Pozwoliło to na znaczące uproszczenie kalibracji modelu, ograniczając ten etap badań symulacyjnych do sprawdzenia poprawności działania modelu kompleksowego i przeprowadzenia jedynie ponownej kalibracji cząstkowego modelu biochemicznego reaktora biologicznego. Ponadto podczas badań nie uwzględniano produkcji N_2O w reaktorze.

¹⁷ Mikosz J. (2017) Teoretyczne i praktyczne aspekty matematycznego modelowania procesu wielofazowego osadu czynnego z uwzględnieniem emisji N_2O . Monografia 543, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

- Badania wykonane w **oczyszczalni ścieków w Pruszkowie (badania weryfikacyjne III)** były najbardziej kompleksowe i uwzględniały wszystkie istotne etapy badań symulacyjnych określone w uniwersalnym protokole kalibracyjnym GMP. W modelu uwzględniono opis produkcji N_2O w procesie wielofazowego osadu czynnego.

Szczegóły przeprowadzonych przez mnie badań zawierają załączone publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (odpowiednio: zał. 5.3, 5.2 i 5.1 rozdział 7), a syntetyczny opis uzyskanych wyników przedstawiono poniżej.

Badania weryfikacyjne I

Celem moich badań symulacyjnych przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu wzorcowej oczyszczalni ścieków było pokazanie potencjalnych możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (CO_2 , CH_4 i N_2O) w miejskich oczyszczalniach ścieków przy równoczesnej poprawie bilansu energetycznego oczyszczalni. Badaną oczyszczalnię ścieków skonfigurowałem zgodnie ze wzorcowym modelem Benchmark Simulation Model nr 2 (BSM2)¹⁸, uwzględniając kilka drobnych modyfikacji z powodów praktycznych. Jako czynniki wpływające na wielkość emisji gazów cieplarnianych i bilans energetyczny oczyszczalni wybrałem: stężenie tlenu rozpuszczonego w strefie tlenowej reaktora, temperaturę procesu, wiek osadu, dostępność substratu organicznego w dopływie wyrażoną jako stosunek $ChZT:N_{og}$. Bilans energetyczny uwzględniał zapotrzebowanie energii na pompowanie, napowietrzanie i mieszanie osadu czynnego, przeróbkę osadu wraz z jego podgrzewanie, a także odzysk energii z biogazu wytwarzanego podczas beztlenowej fermentacji osadu. Opracowany przeze mnie model bazował na modelu „Mantis2” wchodzącym w skład programu GPS-X v.6.1 uzupełnionych o moduł emisji gazów cieplarnianych oparty na modelach *Hiatt’a i Grady’ego* oraz *Ni* i in. Szczegółowy opis oczyszczalni, przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników przedstawiłem w załączonej publikacji (Zał. 5.3)¹⁹.

Wyniki badań pokazały, że spośród badanych czynników stężenie tlenu rozpuszczonego w strefie tlenowej reaktora ma decydujący wpływ na wielkość emisji N_2O . Przy stężeniu tlenu na poziomie co najmniej $0,8 \text{ gO}_2/\text{m}^3$, emisja N_2O utrzymywała się na niezmiennym poziomie około $24 \text{ tCO}_2\text{eq}/\text{d}$. Zmniejszenie stężenia tlenu poniżej tej wartości powodowało gwałtowny wzrost produkcji N_2O i CH_4 w reaktorze. Z drugiej strony zwiększone stężenie tlenu zwiększało zapotrzebowanie energii na napowietrzanie osadu czynnego, przy niemal niezmiennej produkcji biogazu z osadu, co pogarszało bilans energetyczny oczyszczalni. Efekt ten był obserwowany zarówno dla niższej (10°C), jak i wyższej (20°C) temperatury procesu, chociaż przy niższej temperaturze nadwyżka energii w bilansie oczyszczalni była o ok. 30 kW większa. Badania pokazały, że istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość emisji N_2O jest dostępność substratu organicznego dla procesu heterotroficznej denitryfikacji. Niedobór tych związków wyrażający się wartością stosunku $ChZT:N_{og} < 10$ skutkuje zwiększoną produkcją N_2O , ale nie ma istotnego wpływu na ogólny bilans energetyczny oczyszczalni. Wiek osadu, który jest wyznacznikiem biologicznej aktywności biomasy osadu czynnego, ma wpływ głównie na bilans energetyczny oczyszczalni. Wpływ tego parametru na produkcję N_2O jest pomijalny. Zwiększanie jego wartości ponad typowy poziom 16-20 d zwiększa mineralizację osadu czynnego i wpływa wyraźnie negatywnie na wielkość produkcji biogazu w procesie fermentacji metanowej osadów.

¹⁸ Jeppsson U., Pons M.-N. i in. (2007) Benchmark simulation model no. 2—General protocol and exploratory case studies, *Water Sci. Technol.* 56, s.67–78.

¹⁹ Mikosz J. (2016) Analysis of greenhouse gas emissions and the energy balance in a model municipal wastewater treatment plant, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 57, Iss. 59, s. 28551-28559.

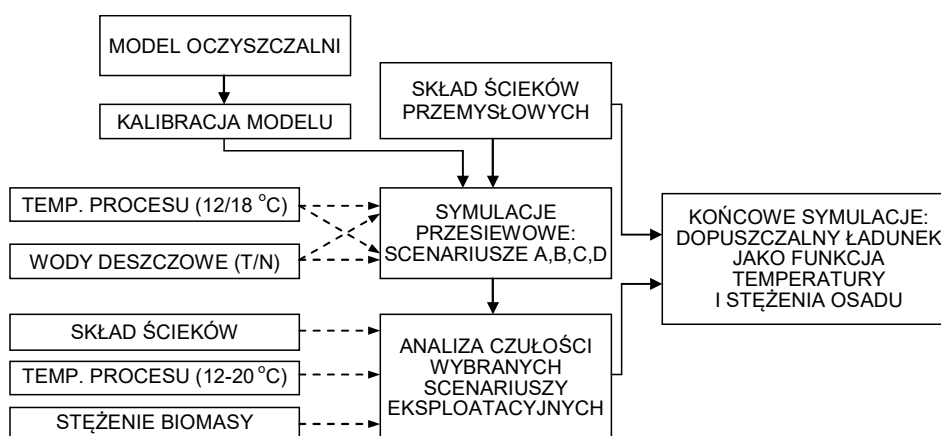
Wyniki symulacji komputerowej przeprowadzonej przy zastosowaniu określonych powyżej wartości wyżej wymienionych czynników ($O_2=1,0 \text{ gO}_2/\text{m}^3$, $\text{ChZT:N}_{\text{og.}}=10$, $\text{WO}=17 \text{ d}$) pokazały, że możliwe jest równoczesne znaczne zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych i poprawienie bilansu energetycznego oczyszczalni w porównaniu z warunkami początkowymi. Całkowita produkcja gazów cieplarnianych została zmniejszona o 1446 kg $\text{CO}_2\text{eq/d}$, przy emisji N_2O zmniejszonej o 1103 kg $\text{CO}_2\text{eq/d}$, emisji CH_4 o 87 kg $\text{CO}_2\text{eq/d}$ i emisji CO_2 o 256 kg CO_2/d . Towarzyszyło temu zwiększenie nadwyżki energii w oczyszczalni o ok. 34 kW. Uwzględnienie w tym bilansie „zaoszczędzonej” emisji gazów cieplarnianych, spowodowanej zmniejszonym zapotrzebowaniem na zakup energii z zewnętrznych źródeł nieodnawialnych, pozwala zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych o dodatkowe 816 kg $\text{CO}_2\text{eq/d}$. Uzyskane wyniki wskazują na znaczny potencjał do poprawy bilansu energetycznego oraz zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych występujący w miejskich oczyszczalniach ścieków wykorzystujących technologie wielofazowego osadu czynnego.

Badania weryfikacyjne II

Badania prowadzone przeze mnie w miejskiej oczyszczalni ścieków w Jaśle miały na celu określenie maksymalnego dopuszczalnego ładunku zanieczyszczeń z zakładu przemysłowego, jaki może być doprowadzany do oczyszczalni ścieków podłączonej do ogólnospławnej sieci kanalizacyjnej przy utrzymaniu jej założonych efektów technologicznych. Do tego celu wykorzystałem wcześniej opracowany model symulacyjny oczyszczalni, co pozwoliło mi na znaczne skrócenie badań, głównie poprzez ograniczenie etapu kalibracji modeli cząstkowych i modelu kompleksowego. Wprowadzone przeze mnie modyfikacje w standardowym toku prowadzenia badań symulacyjnych dotyczyły:

- uproszczenia kalibracji modelu biochemicznego reaktora poprzez rekalkibrację wcześniej opracowanego modelu z wykorzystaniem mniejszej ilości danych wejściowych,
- zastąpienia modelu układu przeróbki osadów modelem dopływu wód osadowych,
- modelowania sedymentacji jako niereaktywnego procesu 1-wymiarowego,
- nieuwzględnienia modelu cząstkowego produkcji N_2O w reaktorze wielofazowym.

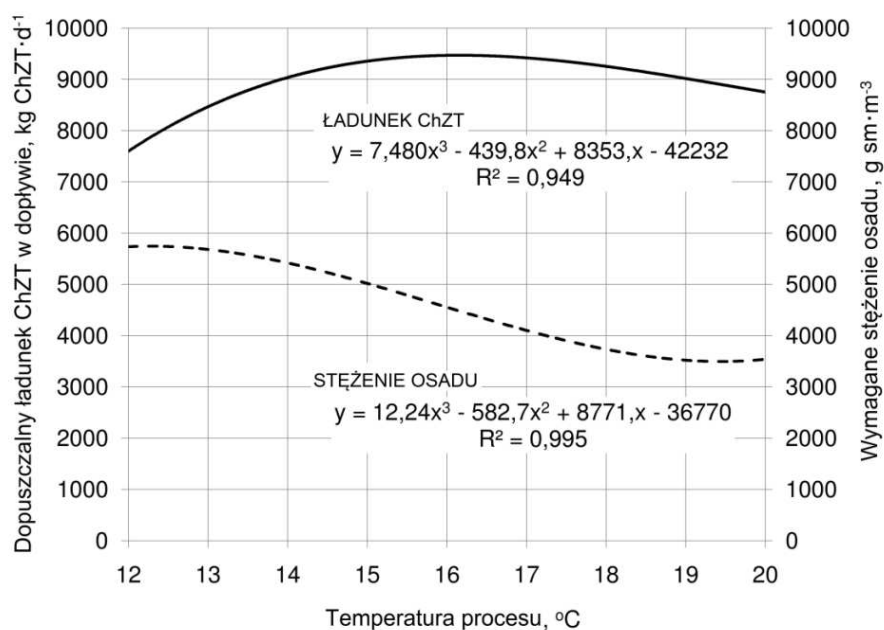
Badania przeprowadziłem według specjalnie opracowanej metodyki, zakładającej ich wieloetapowość i przyjęcie cząstkowych celów badań. Schemat organizacyjny badań przedstawiłem na rys. 3, a szczegółowy opis przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników jest zawarty w załączonej publikacji (Zał. 5.2)²⁰.



Rys. 3 Schemat organizacyjny badań w oczyszczalni ścieków w Jaśle.

²⁰ Mikosz J. (2015) Determination of permissible industrial pollution load at a municipal wastewater treatment plant, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 12, Iss. 3, s. 827-836.

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych określiłem zależność pomiędzy dopuszczalnym ładunkiem zanieczyszczeń wyrażonych jako ChZT a stężeniem osadu czynnego w reaktorze wielofazowym w funkcji temperatury procesu. Zależność tą przedstawiłem w formie graficznej w postaci wykresu (rys. 4), na którym pokazano wymaganą wartość stężenia osadu czynnego (linia przerywana) dla różnych wartości dopuszczalnego ładunku ChZT w dopływie do oczyszczalni (linia ciągła) przy zmieniającej się temperaturze procesu. Wyniki symulacji pokazały, że przyjęcie zwiększonego ładunku związków organicznych na poziomie nieco ponad 9000 kg ChZT/d jest możliwe, gdy temperatura procesu (osadu czynnego) jest w przedziale 14–19 °C, a stężenie osadu czynnego jest utrzymywane w zakresie 3600–5400 g sm/m³, zgodnie z krzywymi na rys. 4. Przy zmianie temperatury procesu poza wyżej wskazany zakres, dopuszczalny ładunek związków organicznych w dopływie stopniowo zmniejsza się aż do wartości 7500 kg ChZT/d.



Rys. 4 Dopuszczalny ładunek w dopływie w zależności od stężenia biomasy i temperatury.

Badania weryfikacyjne III

Celem moich badań przeprowadzonych w oczyszczalni ścieków w Pruszkowie było opracowanie i wdrożenie modelu matematycznego pracującej oczyszczalni, co w dalszej perspektywie pozwoliłoby na wykorzystanie symulacji komputerowej do optymalizacji eksploatacyjnej oraz weryfikacji planów dotyczących ewentualnej rozbudowy obiektu. Zadanie to wiązało się z opracowaniem szeregu modelu cząstkowych oraz modelu kompleksowego, a następnie ich kalibracją i walidacją. Wymagało to zgromadzenia dużej ilości danych wejściowych, a tym samym przeprowadzenia obszernych programów badań hydraulicznych i analitycznych w warunkach normalnej eksploatacji obiektu. Badania w oczyszczalni były prowadzone w latach 2010-2011 zgodnie z planem opracowanym przez mnie i pod moim ciągłym merytorycznym nadzorem. Badania te wraz z uzyskanymi wynikami szczegółowo opisałem w załączonej monografii (zał. 5.1, rozdział 7)²¹. Jako platformę programową wybrano do tego celu program GPS-X[®] v. 5.02 opracowany przez firmę Hydromantis™, Inc. Zakres wykonanych badań symulacyjnych obejmował opracowanie

²¹ Mikosz J. (2017) *Teoretyczne i praktyczne aspekty matematycznego modelowania procesu wielofazowego osadu czynnego z uwzględnieniem emisji N₂O*. Monografia 543, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

kompleksowego modelu układu „reaktor biologiczny-osadnik wtórny” wraz z jego pełną kalibracją i walidacją. Wymagało to zaprojektowania i przeprowadzenia programów szczegółowych badań analitycznych składu ścieków i właściwości osadu czynnego, opracowania i kalibracji modeli cząstkowych oraz opracowania, kalibracji i walidacji kompleksowego modelu badanego układu. W kolejnym etapie badań opracowany model rozwinąłem o opis emisji N_2O z procesu wielofazowego osadu czynnego i model ten zaimplementowałem na nowej platformie programowej GPS-X® v. 6.1. Plan badań symulacyjnych opracowałem na podstawie protokołu uniwersalnego GMP (zał. 5.1, tab. 13), do którego wprowadziłem szereg modyfikacji przedstawionych w Tab. 1.

Tabela 1 Modele cząstkowe uwzględnione w modelu końcowym badanej oczyszczalni ścieków wraz z zakresem zastosowanych modyfikacji

Lp	Model cząstkowy	Zakres wprowadzonych modyfikacji
1	Model dopływu	Na podstawie wyników przeprowadzonych badań. Uwzględniony efekt oczyszczania mechanicznego ścieków.
2	Model fermentera osadu wstępnego	Przyjęto model zastępczy opisujący dopływ wód osadowych z fermentera do reaktora.
3	Model hydrauliczny układu „reaktor biologiczny-osadnik”	Kalibracja na podstawie wyników przeprowadzonych badań hydraulicznych ze znacznikiem.
4	Model temperaturowy reaktora	Brak kalibracji (przyjęte domyślne wartości parametrów)
5	Model biochemiczny osadu czynnego	Kalibracja statyczna i dynamiczna na podstawie wyników przeprowadzonych testów i badań analitycznych.
6	Model chemicznego strącania P	Uproszczona kalibracja na podstawie danych eksploatacyjnych.
7	Model emisji N_2O	Kalibracji uproszczona (na podstawie wartości wskaźnikowych).
8	Model sterowania układem napowietrzania osadu	Kalibracja uproszczona.
9	Model sterowania układami recyrkulacji i usuwania osadu nadmiernego	Brak kalibracji (wartości parametrów przyjęte na podstawie danych projektowych i wyników pomiarów).
10	Model sedimentacji w osadniku wtórnym	Kalibracja uproszczona (tylko statyczna) na podstawie wyników przeprowadzonych badań.
11	Model przeróbki osadów ściekowych	Uwzględniony tylko w zakresie wpływu wód osadowych na pracę reaktora (kalibracja na podstawie danych eksploatacyjnych).
12	Model przemian biochemicznych w osadniku wtórnym	Nieuwzględniony. Przyjęto model osadnika niereaktywnego.

Opracowany model poddałem analizie czułości ze względu na szereg zmiennych wejściowych, a także analizie niepewności. Przeprowadzona analiza czułości skalibrowanego modelu pokazała, że model wykazuje wrażliwość na zmiany wartości wszystkich parametrów, które były zmieniane podczas kalibracji (zał. 5.1, tab. 25). Wyraźnie widoczny jest wpływ parametrów charakteryzujących biomasę autotrofów oraz heterotrofów-P (szybkości przyrostu i obumierania), odpowiednio na nityfikację i biologiczne usuwanie fosforu, a także $BZT_{5filtr}/ChZT_{filtr}$ w dopływie do reaktora na procesy prowadzone przez bakterie heterotroficzne oraz na produkcję N_2O w reaktorze biologicznym (Tab. 2).

Analizę niepewności modelu przeprowadziłem dla szeregu wskaźników w ściekach oczyszczonych przeprowadzono za pomocą metody Monte Carlo, przyjmując rozkład normalny wartości badanego parametru x w zakresie $x \pm 50\%$ wartości zastosowanej w

modelu, a liczbę obliczeń ustalono na $n=1000$. Wyniki analizy pokazały, że tylko dla parametru $BZT_{5filtr}/ChZT_{filtr}$ niepewność, co do rzeczywistej wartości badanego parametru w założonych granicach ma istotne znaczenie dla uzyskiwanych wyników w przypadku takich zmiennych wyjściowych, jak stężenie biomasy, wartość ChZT i stężenie azotu Kjeldahla. Natomiast w przypadku stężenia $N-NH_4$, $P-PO_4$ i $N-NO_3$, a także produkcji N_2O , niepewność szacowania wartości badanego wskaźnika ma niewielki wpływ na uzyskiwane wyniki (zał. 5.1, rys. 25).

Tabela 2 Wartości współczynnika czułości $S_{ij} \geq 0,25$ dla różnych zmiennych wyjściowych modelu badanej oczyszczalni ścieków.

Parametr	Wartość S_{ij} dla zmiennej wyjściowej							
	ChZT	ChZT _f	TKN	N-NH ₄	N-NO _x	P-PO ₄	SM	N ₂ O
Maks. jednostkowa szybkość przyrostu bakterii autotroficznych, μ_A			-1,798	-5,008				2,578
Stała półnasylenia dla amoniaku w procesie przyrostu autotrofów, K_{NH_4}			0,575	1,621				-0,496
Stała szybkości obumierania i rozkładu bakterii heterotroficznych, b_H	-0,366		-0,512			1,343		
Stała półnasylenia dla substratu rozpuszczonego S_s , K_s								-0,492
Stała półnasylenia dla tlenu (dla różnych procesów), K_{O_2}					-0,252	-0,686		
Stała półnasylenia dla N_2O dla heterotroficznej denitryfikacji, K_{N_2O}								0,433
Maks. jednostkowa szybkość przyrostu heterotrofów-P, μ_{PAO}	-0,598		-0,779			6,862		
Stała szybkości rozkładu heterotrofów-P, b_{PAO}	-0,344		-0,500	-0,262		2,681		
Temperatura ścieków			-0,300	-0,399				-0,359
Stos. $BZT_{5filtr}/ChZT_{filtr}$ w dopływie do reaktora	-2,431	-5,008	-1,738				0,340	-2,038

Przeprowadzone prze mnie badania pokazały od strony praktycznej tok postępowania prowadzący do opracowania funkcjonalnego modelu symulacyjnego części biologicznej dużej miejskiej oczyszczalni ścieków. Dla opracowanego modelu określiłem kierunki jego potencjalnego wykorzystania w praktyce eksploatacyjnej oczyszczalni, które obejmowały:

- sprawdzenie zachowania części biologicznej oczyszczalni w warunkach zwiększonego dopływu wód deszczowych,
- optymalizację stopnia recyrkulacji wewnętrznej w reaktorze biologicznym w celu zwiększenia efektywności denitryfikacji,
- sprawdzenie możliwości zwiększenia efektywności biologicznego usuwania fosforu poprzez dawkowanie wód osadowych z fermentera do dopływu do reaktora,
- sprawdzenie możliwości zwiększenia efektywności denitryfikacji i biologicznego usuwania fosforu poprzez dawkowanie zewnętrznego źródła węgla do reaktora,
- wykorzystanie modelu do oceny stanu dyfuzorów w reaktorze
- ocenę możliwości ograniczenia wielkość emisji N_2O z oczyszczalni.

Na podstawie wykonanych badań sformułowałem szereg wniosków odnośnie planowania badań symulacyjnych, które w formie syntetycznej można przedstawić następująco:

- Cel badań musi być precyzyjnie określony i granice modelowanego systemu muszą być wyraźnie wyznaczone.

- Podczas planowania badań symulacyjnych należy korzystać z dostępnych protokołów kalibracyjnych, które zapewniają prawidłową procedurę prowadzenia badań.
- Podczas badań symulacyjnych możliwe jest wprowadzanie racjonalnych modyfikacji, które nie pogarszając znacząco jakości opracowanego modelu pozwalają na uproszczenie badań poprzez zmniejszenie wysiłku organizacyjnego, oszczędność czasu i ograniczenie ich kosztów.
- Zawsze należy określić właściwości hydrodynamiczne badanego układu. Osiągnąć to można poprzez wykonanie badań hydraulicznych w wykorzystaniem znaczników lub, w przypadku prostych układów hydraulicznych, poprzez analizę dostępnych danych. Badania takie powinny zostać przeprowadzone na samym początku badań symulacyjnych, a ich wyniki powinny być podstawą planowania dalszych etapów badań (np. miejsca, częstotliwości i czasu poboru próbek).
- Analityczna poprawność wyników badań jakości ścieków, ich reprezentatywność i spójność ma zasadniczy wpływ na jakość opracowywanego modelu. Oznaczenia i pomiary wykonywane podczas badań symulacyjnych muszą charakteryzować się poprawnością analityczną, reprezentatywnością, powtarzalnością i spójnością, a ich jakość musi być zweryfikowana za pomocą bilansów masy.
- Jako ogólną zasadę należy przyjąć, że kalibracja modelu powinna być prowadzona, jako proces iteracyjny, poprzez powtarzanie kalibracji statycznej i dynamicznej aż do uzyskania założonego poziomu zgodności wyników z pomiarów i symulacji.
- Analiza czułości i niepewności modelu powinna być integralną częścią każdego programu badań symulacyjnych, ponieważ dostarcza ważnych informacji na temat jego jakości i obszaru stosowalności.

4.3.4. Możliwości zastosowania osiągniętych wyników

Przedstawione przez mnie wyniki prac badawczych mogą być bezpośrednio zastosowane w praktyce eksploatacyjnej miejskich oczyszczalni ścieków oraz jako podstawa do dalszych badań w tym obszarze. W swoich aspektach teoretycznych wskazują one na konieczność prowadzenia dalszych badań na aplikacją modelu cząstkowego produkcji N_2O w modelach wielofazowego osadu czynnego. Uzyskane wyniki powinny być wykorzystane, jako punkt wyjścia do opracowania łatwego do stosowania, kompleksowego modelu wielofazowego osadu czynnego bazującego na istniejących standardowych modelach osadu czynnego i opisującego produkcję N_2O z uwzględnieniem wszystkich ścieżek jego wytwarzania. W kolejnym etapie model ten powinien podlegać wszechstronnej praktycznej weryfikacji. Z drugiej strony, konieczne jest także opracowanie nowej metodyki pozwalającej na szybsze i tańsze określanie składu ścieków i parametrów osadu czynnego pod kątem wymagań badań symulacyjnych prowadzonych w miejskich oczyszczalniach ścieków.

W swoich praktycznych aspektach moje badania wskazują nowy kierunek w pracach nad wykorzystaniem modeli wielofazowego osadu czynnego, który polega na bardziej elastycznym i praktycznym podejściu do ich stosowania. Do tej pory jedną z głównych barier w praktycznym stosowaniu symulacji komputerowej w oczyszczalniach ścieków była czasochłonność i kosztochłonność badań symulacyjnych, w tym szczególnie gromadzenia i analizy danych wejściowych oraz kalibracji i walidacji modelu. Określenie przez mnie spójnych zasad, według których badania symulacyjne mogą zostać uproszczone przy zapewnieniu osiągnięcie wyznaczonego celu badań, powinno przyczynić się do upowszechnienia stosowania symulacji komputerowej w miejskich oczyszczalniach ścieków.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

5.1. Przed uzyskaniem doktoratu

Od chwili rozpoczęcia pracy w Zakładzie Oczyszczania Wody i Ścieków Politechniki Krakowskiej w roku 1988 moje zainteresowania zawodowe były związane z **problematyką wysokoefektywnego usuwania związków biogennych ze ścieków**, co wówczas było w Polsce tematem nowym i wymagającym szerszych badań. Moją pierwszą pracą badawczą był udział w projekcie NCB 0120 88 86 „*Technologia odnowy wody ze ścieków miejskich dla potrzeb przemysłowych*” (zał. 3, B.10.26). Po rocznej przerwie na odbycie obowiązkowego przeszkolenia wojskowego, od roku 1989 aktywnie uczestniczyłem w badaniach na modelowej stacji odnowy wody ze ścieków miejskich działającej w oczyszczalni ścieków w Krakowie-Płaszowie w ramach CPBR nr 13.1 temat 4.1 „*Określenie współdziałania procesów usuwania substancji biogennych w reaktorach wielofazowych oraz właściwości osadów dla potrzeb oczyszczania ścieków*” (zał. 3, B.10.25). Celem badań było określenie wartości najważniejszych parametrów technologicznych oraz opracowanie wytycznych projektowych dla reaktora wielofazowego do zintegrowanego usuwania związków biogennych ze ścieków miejskich. Badania były prowadzone na fizycznym modelu reaktora biologicznego zainstalowanym w oczyszczalni ścieków w Krakowie-Płaszowie, a ich efektem był m.in. mój pierwszy samodzielny referat konferencyjny (zał. 3, B.12.15). Podobną tematykę badawczą kontynuowałem w latach 1991-92 podczas realizacji projektu badawczego finansowanego przez KBN „*Optymalizacja procesu biologicznego usuwania związków azotu i fosforu w warunkach eksploatacyjnych dla ścieków miejskich z niedoborem substancji organicznych*” (zał. 3, B.10.24). Uczestnicząc w tych badaniach koncentrowałem się na zagadnieniach optymalizacji parametrów eksploatacyjnych, koniecznych do efektywnego usuwania związków węgla, azotu i fosforu ze ścieków w jednoosadowym reaktorze wielofazowym, a wyniki tych prac zostały zaprezentowane w referacie konferencyjnym (zał. 3, B.12.14).

W latach 1992-94 odbyłem studia magisterskie w Lyndon B. Johnson School of Public Affairs, The University of Texas at Austin (USA), a następnie roczny staż naukowy w tej uczelni. Okres ten wykorzystałem do przeprowadzenia szczegółowych studiów nad problematyką związaną z zapobieganiem zanieczyszczeniu środowiska w kontekście pracy oczyszczalni ścieków oraz zrównoważonemu zarządzaniu zasobami wodnymi. Uczestniczyłem w dwóch projektach badawczych: „*Managing Environmental Risks in Texas*” oraz „*Implementing Watershed Management in Texas*” (zał. 3, B.10.23-24), a ponadto byłem inicjatorem i głównym wykonawcą dwóch projektów o charakterze edukacyjnym i popularyzatorskim kierowanych przez prof. Davida Eatona, a finansowanych przez rząd USA (zał. 3, B.6.22-23; zał. 4, I.14-16). Efektem naukowym prac wykonanych podczas pobytu w USA jest m.in. mój samodzielny artykuł na temat reformy systemu gospodarki wodnej w Polsce (zał. 3, B.5.19) oraz współautorstwo dwóch prac zbiorowych (zał. 3, B.5.20-21) na temat oceny stanu i zagrożeń środowiska w Teksasie.

Po powrocie do Polski w 1995 roku nadal rozwijałem moje zainteresowania naukowe związane biologicznymi metodami usuwania związków biogennych ze ścieków, ale z czasem **moja uwaga coraz bardziej koncentrowała się na wykorzystaniu metod komputerowych w oczyszczaniu ścieków**. Do celów symulacji komputerowej wykorzystywałem proste programy takie, jak ASIM® i EFOR®, następnie SimWorks®. W 1996 roku mój opiekun naukowy, Prof. dr hab. inż. Jerzy Kurbiel uzyskał grant promotorski z KBN na realizację przez mnie projektu pt.: „*Zastosowanie dynamicznej symulacji komputerowej do optymalizacji procesu biologicznego usuwania związków biogennych ze ścieków miejskich*”. Efektem prowadzonych

wówczas badań nad w/wym. tematem, oprócz pracy doktorskiej²² obronionej w 1999 roku, były wygłoszone przez mnie referaty konferencyjne (zał. 3, B.12.12-13). Jednak prace wykonane przez mnie w ramach pracy doktorskiej dotyczyły bardzo wąskiego obszaru związanego z wykorzystaniem symulacji komputerowej w oczyszczaniu ścieków, i zdawałem sobie sprawę z konieczności ich dalszego pogłębiania i rozwijania.

W okresie przed doktoratem aktywnie uczestniczyłem we współpracy międzynarodowej. W roku 1996 odbyłem krótkoterminowy staż zagraniczny w Anglia Polytechnic University w Cambridge (UK) ramach programu TEMPUS-PHARE JEP. W latach 1996-1999 odbyłem szereg jednomiesięcznych staży w Royal Institute of Technology w Sztokholmie, gdzie pod kierunkiem dr inż. Elżbiety Płazy wraz z jej zespołem badawczym pracowałem nad komputerową symulacją procesów usuwania związków węgla i azotu w reaktorach z osadem czynnym. Efektem tej współpracy był szereg raportów badawczych i niepublikowanych materiałów dydaktycznych, a także wspólny referat wygłoszony na konferencji w Mediolanie w roku 1998 (zał. 3, B.12.11). W ramach pogłębiania mojej wiedzy i rozwijania umiejętności związanych z matematycznym modelowaniem procesów oczyszczania ścieków, w roku 1998 uczestniczyłem w intensywnym kursie szkoleniowym „*Modelling of Environmental Bioprocesses*” organizowanym przez Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich w Szwajcarii, podczas którego pogłębiłem swoją wiedzę na temat matematycznego modelowania procesu wielofazowego osadu czynnego i zdobyłem nowe umiejętności w zakresie stosowania metod numerycznych.

Moją wiedzę na temat usuwania związków biogennych ze ścieków oraz stosowania symulacji komputerowej do optymalizacji procesów oczyszczania ścieków starałem się wykorzystywać do rozwiązywania konkretnych problemów w pojawiających się w polskich oczyszczalniach ścieków. Efektem tego był udział w licznych projektach wykonanych na zlecenie organów administracyjnych lub przedsiębiorstw (zał. 4, M.14-22), z których część zawierała istotne elementy badawcze (np. zał. 4, M.14, 19, 21). Szczególnie dotyczy to projektu zleconego przez Zakłady Azotowe S.A. w Mościcach, który wymagał poszerzonych badań mikrobiologicznych osadu czynnego, analizy składu ścieków z różnych procesów przemysłowych oraz badań interakcji pomiędzy związkami organicznymi obecnymi w tych ściekach (zał. 4, M.19).

5.2. Po doktoracie

5.2.1. Aktywność krajowa

Po uzyskaniu stopnia doktora moje zainteresowania badawcze pozostały w szerokim obszarze zastosowania metod komputerowych w wysokoefektywnym oczyszczaniu ścieków, ale z upływem czasu podlegały one stopniowej ewolucji i ukierunkowaniu na bardziej szczegółowe zagadnienia specjalistyczne: od prostego wykorzystania symulacji komputerowej, poprzez dogłębne studia teoretycznych podstaw matematycznego modelowania procesu osadu czynnego, aż do zagadnień związanych z praktycznymi aspektami stosowania badań symulacyjnych w oczyszczalniach ścieków. Kolejne odkrywane przez mnie obszary zainteresowań naukowych były zawsze inspirowane wynikami moich wcześniejszych prac badawczych i obserwacjami kierunków rozwoju tej dziedziny nauki w kraju i na świecie.

²² Mikosz J. (1999) *Zastosowanie dynamicznej symulacji komputerowej do wyboru strategii biologicznego usuwania związków biogennych ze ścieków miejskich*. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Kraków.

W początkowym okresie badania, które prowadziłem dotyczyły sposobów **wykorzystania symulacji komputerowej do efektywnego rozwiązywania konkretnych problemów eksploatacyjnych i projektowych**. Badania te były ukierunkowane na:

- weryfikację technologiczną procesu wielofazowego osadu czynnego na etapie projektowania, modernizacji (zał. 3, B.6.20) oraz eksploatacji (zał. 3, B.6.19) oczyszczalni;
- ocenę korzyści technologicznych wynikających z praktycznego zastosowania programów symulacyjnych w średniej wielkości oczyszczalni ścieków miejskich (zał. 3, B.6.18);
- ocenę technologicznych i ekonomicznych skutków dopływu wód deszczowych do miejskiej oczyszczalni ścieków miejskich (zał. 3, B.6.16-17).

Uzyskane przez mnie wyniki badań pozwoliły potwierdzić, że odpowiednio zastosowana symulacja komputerowa może być cennym narzędziem do rozwiązywania różnorodnych problemów projektowych i eksploatacyjnych w miejskich oczyszczalniach ścieków. Pozwala ona uzyskać takie informacje na temat badanego systemu, które byłyby trudne lub wręcz niemożliwe do zdobycia innymi metodami. Szczególnie dotyczy to badań prowadzonych w celu określenia zachowania danego systemu w warunkach dynamicznych (np. dopływu wód deszczowych, zrzutów dużych ładunków zanieczyszczeń do sieci kanalizacyjnej, itp.). Wyniki badań pokazały także, że stosowanie symulacji komputerowej w praktyce napotyka na różne bariery, z których najpoważniejsze to brak doświadczenia w prowadzeniu badań oraz czasochłonność i kosztochłonność tych etapów badań, które są związane z gromadzeniem, analizą i weryfikacją danych wejściowych. Praktyka eksploatacyjna pokazuje, że bez pokonania tych barier nie można liczyć na upowszechnienie stosowania symulacji komputerowej w oczyszczalniach ścieków. Wyniki przeprowadzonych badań oraz sformułowane na ich podstawie wnioski zostały zaprezentowane w postaci 1 artykułu w czasopiśmie z listy JCR (zał. 3, B.1.4), 2 referatów wygłoszonych na konferencjach krajowych (zał. 3, B.12.8; B.12.10), 3 referatów na konferencjach międzynarodowych (zał. 3, B.12.3; B.12.7; B.12.9), a także jako 2 rozdziały w monografiach zagranicznych (zał. 3, B.5.16-17)²³.

Wnioski z wyżej przedstawionych badań oraz zdobyte przez mnie doświadczenia w prowadzeniu badań symulacyjnych ukierunkowały moją dalszą działalność naukowo-badawczą na tematykę **zwiększenia efektywności badań symulacyjnych prowadzonych w oczyszczalniach ścieków miejskich poprzez ich racjonalizację**. Doszedłem do wniosku, że działania te powinny iść zarówno w kierunku redukcji złożoności stosowanych modeli matematycznych procesów (w tym szczególnie modeli osadu czynnego) poprzez właściwą aplikację modeli cząstkowych w kontekście założonego celu badań, jak i racjonalizacji planowania badań symulacyjnych. Zadania te realizowałem w formie badań nad następującymi zagadnieniami szczegółowymi:

- ocena istniejących protokołów kalibracyjnych dla modeli osadu czynnego pod kątem możliwości ich uproszczenia (zał. 3, B.6.8-9);
- analiza praktycznych aspektów stosowania symulacji komputerowej w miejskich oczyszczalniach ścieków (zał. 3, B.6.2; B.6.5);
- weryfikacja możliwości racjonalizacji badań symulacyjnych w miejskich oczyszczalniach ścieków w celu upowszechniania ich stosowania (zał. 3, B.6.3-4).

Moje badania wykazały, że istniejące protokoły kalibracyjne mogą być pomocnym narzędziem pozwalającym „unormować” metodykę prowadzenia badań symulacyjnych, a tym samym zmniejszyć niepewność wyników opracowanego modelu. Jednak poszczególne protokoły znacznie różnią się między sobą i decyzja o zastosowaniu któregoś z nich musi być

²³ Bez uwzględnienia publikacji wchodzących w skład przedstawionego osiągnięcia naukowego.

poprzedzona analizą jego specyfiki pod kątem określonego wcześniej celu badań. Ponadto, niezależnie od rodzaju stosowanego protokołu kalibracyjnego, często istnieją możliwości racjonalnego uproszczenia lub wręcz rezygnacji z pewnych etapów badań, jeżeli uzasadnia to planowany cel badań i zapewniona jest ich rzetelność. Dotyczyć to może szczególnie etapu gromadzenia, analizy i weryfikacji danych wykorzystywanych do kalibracji modelu, a także danych do jego walidacji, a w pewnym stopniu także przebiegu kalibracji i walidacji modelu. Stwierdzono, że spójność i reprezentatywność danych wejściowych wykorzystywanych w badaniach symulacyjnych jest ich najważniejszą cechą, dominującą nawet nad ich dokładnością. Potwierdzono także znaczenie analizy czułości oraz analizy niepewności wykonanych dla podstawowych parametrów modelu dla określenia obszaru jego ważności. Wyniki przeprowadzonych badań upowszechniono w formie publikacji obejmujących 1 artykuł w czasopiśmie z listy JCR (zał. 3, B.1.2), 6 artykułów w czasopismach z listy MNiSW (zał. 3, B.5.1; B.5.4-6; B.5.10; B.5.15), 2 rozdziały w monografiach zagranicznych (zał. 3, B.5.8; B.5.12) i 3 referaty opublikowane w materiałach konferencyjnych (zał. 3, B.12.1-2; B.12.6)²⁴.

Prowadzone przeze mnie prace nad sposobami aplikacji modeli cząstkowych podczas badań symulacyjnych zainspirowały moje zainteresowanie zagadnieniem **modelowania matematycznego produkcji gazów cieplarnianych w procesie wielofazowego osadu czynnego**. Wynikało to zarówno z moich obserwacji dokonywanych podczas badań prowadzonych w różnych oczyszczalniach ścieków, jak i analizy kierunków rozwoju modeli matematycznych osadu czynnego na świecie. Rozwój ten w ostatnich latach był stymulowany rosnącym zainteresowaniem tematyką emisji gazów cieplarnianych ze źródeł antropogenicznych. Od roku 2006, gdy pojawił się pierwszy model opisujący produkcję N₂O w procesie osadu czynnego²⁵, opisy matematyczne różnych mechanizmów wytwarzania N₂O były stopniowo włączane do modeli wielofazowego osadu czynnego. Uznałem, że jest to nowy i bardzo rozwojowy kierunek ewolucji modeli osadu czynnego, który znacznie poszerzy możliwości praktycznego wykorzystania badań symulacyjnych w oczyszczalniach ścieków. Zagadnienie to jest ściśle powiązane, z moim wcześniej opisanym obszarem badawczym, zarówno w jego aspektach teoretycznych, jak i praktycznych. Pracując nad tym tematem koncentrowałem się na następujących tematach szczegółowych:

- Opracowanie zintegrowanego modelu zrównoważonego funkcjonowania miejskiej oczyszczalni ścieków w środowisku (zał. 3, B.6.11-15);
- Wykorzystanie badań symulacyjnych do poprawy bilansu energetycznego mechaniczno-biologicznych oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem emisji gazów cieplarnianych (zał. 3, B.6.6; B.6.10);
- Ocena możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych z miejskich oczyszczalni ścieków (zał. 3, B.6.1).

Wyniki moich badań pokazały, że trudności związane z modelowaniem matematycznym emisji N₂O z procesów biologicznego oczyszczania ścieków mają dwie istotne przyczyny. Pierwszą jest wciąż niepełna wiedza na temat procesów prowadzących do wytworzenia N₂O, w tym szczególnie w procesach prowadzonych przez bakterie autotroficzne. Drugą przyczyną jest ograniczona możliwość praktycznej weryfikacji wyników uzyskanych z opracowanych modeli, wynikająca z trudności pomiarowych rzeczywistej emisji N₂O w skali technicznej w warunkach eksploatacyjnych oczyszczalni ścieków. Pomimo tego istniejące modele matematyczne produkcji N₂O mogą być bardziej lub mniej efektywnie integrowane z

²⁴ Ibid.

²⁵ Hiatt, W. C., Grady, C. P. L. Jr. An updated process model for carbon oxidation, nitrification, and denitrification. *Water Environ Res*, 80 (2008), 2145–2156.

powszechnie stosowanymi modelami procesów biologicznego oczyszczania ścieków. Tym samym N_2O może, a w niektórych przypadkach nawet powinien być uwzględniany jako istotny składnik modelu oczyszczalni ścieków podczas badań symulacyjnych. Pozwoli to na pełniejszą ocenę skutków funkcjonowania oczyszczalni ścieków w odniesieniu zarówno do środowiska wodnego, jak i emisji zanieczyszczeń gazowych do atmosfery. Tym samym przybliży możliwość opracowania kompleksowego modelu oddziaływania oczyszczalni ścieków miejskich na środowisko, co było jednym z tematów moich wcześniejszych badań. Wyniki badań przedstawiłem w formie 1 artykułu w czasopiśmie z listy JCR (zał. 3, B.1.1), 2 artykułów w czasopismach krajowych (zał. 3, B.5.2-3), 2 rozdziałów w monografiach zagranicznych (zał. 3, B.5.7; B.5.13), 2 referatów wygłoszonych przeze mnie na konferencjach krajowych (zał. 4, B.1-2) i 1 referatu w materiałach konferencji zagranicznej (zał. 3, B.12.5)²⁶.

Oprócz trzech przedstawionych powyżej obszarów badawczych, moje zainteresowania obejmowały także inne tematy, które nie wpisywały się bezpośrednio w główny nurt mojej działalności naukowo-badawczej. Dotyczyły one między innymi następujących tematów:

- wykorzystanie technik membranowych w oczyszczaniu ścieków (zał. 3, B.6.7);
- dobór technologii oczyszczania ścieków w małych oczyszczalniach
- zrównoważone zarządzanie zasobami wodnymi, szczególnie w kontekście ochrony jakości wody (zał. 3, B.10.4).

Wyniki z tych badań były przeze mnie prezentowane w szeregu artykułów w czasopismach z listy JCR (zał. 3, B.1.3), z listy MNiSW (zał. 3, B.5.9; B.5.14), w rozdziałach monografii zagranicznych (zał. 3, B.5.11; B.5.18) i wystąpieniach konferencyjnych (zał. 4, B.5-10; B.15).

Współpraca z przemysłem

Przedstawione powyżej zagadnienia badawcze są również tematami moich prac wykonywanych w ramach współpracy z przemysłem. Badania takie prowadziłem m.in. w miejskich oczyszczalniach ścieków w Łodzi, Warszawie, Jaśle i Zamościu. Badania wykonywane przez mnie w Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi (zał. 4, M.11-13) pokazały ważną rolę, jaką może pełnić symulacja komputerowa w procesie projektowania nowych układów technologicznych lub modernizacji układów istniejących. Przedmiotem moich badań było określenie możliwości oraz warunków zwiększenia obciążenia pojedynczego ciągu technologicznego w części oczyszczania biologicznego oczyszczalni do $100\ 000\ m^3/d$ przy zastosowaniu systemu MUCT, zamiast wcześniej stosowanych systemów UCT i Phoredox. Badania symulacyjne umożliwiły dokonanie weryfikacji założeń projektowych zarówno w warunkach uśrednionych (statycznych), jak i w warunkach zmiennych (dynamicznych). Badania o podobnym charakterze prowadziłem również dla oczyszczalni ścieków w Warszawie (Czajka) (zał. 4, M.14) i oczyszczalni w Zamościu (zał. 4, M.1). Symulację komputerową wielokrotnie wykorzystywałem do rozwiązywania problemów eksploatacyjnych w oczyszczalni ścieków w Jaśle. Problemy te dotyczyły m.in. określenia maksymalnego obciążenia reaktora biologicznego (zał. 4, M.9), wpływu wód deszczowych w systemie kanalizacji ogólnospławnej na koszty eksploatacji oczyszczalni (zał. 4, M.10), oceny efektywności układu napowietrzania osadu czynnego (zał. 4, M.7) oraz określenia dopuszczalnych ładunków i stężeń zanieczyszczeń, które mogą być doprowadzane do oczyszczalni w warunkach dynamicznych (zał. 4, M.2; M.6). Moje najnowsze badania w wykorzystaniem symulacji komputerowej dotyczyły oceny możliwości zwiększenia efektywności technologicznej oczyszczalni ścieków z Zamościu w kontekście podczyszczania wód osadowych.

²⁶ Bez uwzględnienia publikacji wchodzących w skład przedstawionego osiągnięcia naukowego.

5.2.2. Aktywność międzynarodowa

Od samego początku mojej działalności naukowo-badawczej przywiązuję duże znaczenie do aktywnej współpracy z ośrodkami zagranicznymi i instytucjami międzynarodowymi. Od roku 2003 jestem niezależnym **ekspertem przy Komisji Europejskiej**. W tym okresie na zaproszenie Executive Research Agency (wcześniej: Directorate I Environment) w Brukseli aktywnie uczestniczyłem w 11 tygodniowych sesjach, podczas których uczestniczyłem w merytorycznej ocenie wniosków o finansowanie projektów badawczych składanych w ramach 6. i 7. Programu Ramowego UE oraz programu „Horizon 2020” przez zespoły badawcze z różnych krajów. Do chwili obecnej **osobiście recenzowałem 134 projekty** o charakterze innowacyjnym, badawczym, demonstracyjnym, a także wspierające mobilność naukowców w ramach UE (Marie Skłodowska-Curie Action) (zał. 4, O.1-8; O.10-12). Ponadto w roku 2010 recenzowałem 1 projekt na zlecenie Research Promotion Foundation (Cypr) w ramach programu UE *“Technological Development and Innovation (DESMI)”* (zał. 4, O.9). **Ilościowy opis mojej aktywności jako recenzenta projektów UE przedstawia zał. 4, pkt. O.**

W ramach współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi rozwijam intensywne kontakty z zespołem technologii ścieków w Royal Institute of Technology w Sztokholmie kierowanym w przeszłości przez doc. Bengta Hultmana, a obecnie przez prof. Elżbietę Płazę. W wyniku tej współpracy powstał jeden wspólny artykuł z listy JCR (zał. 3., B.1.4), 8 rozdziałów w monografiach zagranicznych (zał. 3, B.5.7-8; B.5.11-13, B.5.16-18) oraz liczne wystąpienia konferencyjne (zał. 4, M.6-7; M.11; M.13; M.15-16; M.18-19). Od roku 2007 współpracuję z zespołem prof. Alessandry Carucci z Università degli Studi di Cagliari (Włochy), a w ramach programu VISBY także z Narodowym Uniwersytetem „Politechnika Lwowska” (Ukraina). Poprzez uczestnictwo w programie SCOPES *„Network for environmental assessment and remediation in aquatic systems: towards excellence in teaching and research (NEAR4)”* nawiązałem współpracę z Instytutem F.-A. Forel na Uniwersytecie w Genewie (Szwajcaria). Efektem tej współpracy są 3 referaty zaprezentowane na międzynarodowych sympozjach w Tbilisi (Gruzja), Mangalii (Rumunia) i Charkowie (Ukraina) organizowanych w ramach programu NEAR4 (zał. 4, M.5; M.8; M.10). W ramach wyżej wymienionej współpracy wielokrotnie sprawowałem opiekę naukową nad studentami zagranicznymi z różnych ośrodków prowadzącymi badania w Politechnice Krakowskiej (zał. 4, J.1-9).

Aktywnie wspieram wymianę doświadczeń i wyników badań poprzez udział w dużych międzynarodowych konferencjach i seminariach. W roku 2001 podczas 2. Międzynarodowego Sympozjum IWA *“Sequencing Batch Reactor Technology”* w Narbonne (Francja) prezentowałem swój referat pt. *„Use of computer simulation for cycle length adjustment in sequencing batch reactor”* (zał. 4, B.20). W 2005 roku byłem **współprzewodniczącym sesji** podczas Międzynarodowej Konferencji IWA *“Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams”* odbywającej się w Krakowie. Uczestnicząc w 10. Międzynarodowej Konferencji IWA *“Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants”* w Wiedniu (Austria) w 2007 roku przedstawiłem wyniki swoich badań nad zastosowaniem symulacji komputerowej w oczyszczaniu ścieków (zał. 4, B.14). W roku 2008 aktywnie uczestniczyłem w Światowym Kongresie IWA (IWA World Water Congress and Exhibition) w Wiedniu (Austria) prezentując wyniki moich badań w wygłoszonym referacie (zał. 4, B.12). W 2011 roku zostałem zaproszony do wygłoszenia **referatu plenarnego** pt. *„Wastewater management in small communities in Poland”* na sesji inauguracyjnej III. Międzynarodowego Kongresu SmallWat11 *“Wastewater in Small Communities: Towards the Millennium Development Goals and the Water Framework Directive”* odbywającego się w Sewilli (Hiszpania) (zał. 4, B.9).

6. Podsumowanie osiągnięć i dorobku

6.1. Działalność naukowo-badawcza (łącznie z pozycjami ujętymi w pkt. 4)

Rodzaj osiągnięcia	Przed doktoratem	Po doktoracie	RAZEM
Aktywność krajowa			
Monografie w języku polskim	-	1	1
Artykuły w krajowych czasopismach z listy JCR	-	1	1
Artykuły w czasopismach innych niż z listy JCR	1 (1)*	10 (6)*	11 (7)*
Publikacje w materiałach konferencji krajowych	4 (3)*	4 (3)*	8 (6)*
Referaty wygłoszone na konferencjach krajowych	3	5	8
Referaty plenarne wygłoszone na konferencjach krajowych	-	1	1
Udział w projektach badawczych krajowych **	4	1	5
Kierowanie projektami badawczymi	-	1	1
Recenzowanie artykułów i referatów konferencyjnych	-	24	24
Opieka naukowa nad doktorantem	-	1	1
Nagrody za działalność naukową	-	1	1
Udział w pracach zleconych przez przemysł i samorządy (w tym jako kierownik projektu)	8 (0)	14 (9)	22 (9)
Aktywność międzynarodowa			
Rozdziały w monografiach zagranicznych w języku angielskim	-	8 (6)*	8 (6)*
Artykuły w zagranicznych czasopismach z listy JCR	-	5	5
Publikacje w materiałach konferencji zagranicznych	1 (0)*	6 (4)*	7 (4)*
Referaty wygłoszone na konferencjach zagranicznych	-	16	16
Referaty plenarne wygłoszone na konferencjach	-	1	1
Udział w projektach badawczych zagranicznych	2	1	3
Recenzowanie artykułów w czasopismach zagranicznych	-	3	3
Recenzowanie projektów międzynarodowych			
Recenzowanie projektów Unii Europejskiej , w tym:	-	134	134
- 6. Program Ramowy	-	23	23
- 7. Program Ramowy	-	42	42
- Program „Horizon 2020”	-	69	69
Recenzowanie innych projektów międzynarodowych	-	1	1
Podstawowe wskaźniki bibliograficzne			
Sumaryczny IF wg Web of Science (zgodnie z rokiem)	-	7,361	7,361
Liczba cytowań (w tym bez autocytowań) (stan na dzień 11.04.2017)	Web of Science	-	29 (24)
	SCOPUS	-	30
	Publish or Parish	9	88
Indeks Hirscha (stan na dzień 11.04.2017)	Web of Science	-	4
	SCOPUS	-	4
	Publish or Parish	2	6
Suma punktów MNiSW (zgodnie z rokiem publikacji)	6	258	264

*) w tym jako jedyny lub pierwszy autor

**) bez uwzględnienia działalności statutowej i badań własnych

6.2. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska

W języku polskim

Moja działalność dydaktyczna jest ściśle związana z działalnością naukowo-badawczą. Od początku mojej pracy zawodowej prowadziłem zajęcia dydaktyczne, które tematycznie były związane z wysokoefektywnymi metodami oczyszczania ścieków i odnową wody, a następnie także modelowaniem matematycznym procesów, zastosowaniem metod komputerowych w oczyszczaniu ścieków oraz zagadnieniem zrównoważonego rozwoju. Pozwala mi to wykorzystywać moją wiedzę naukową i doświadczenie badawcze w bezpośrednich kontaktach ze studentami i przekazywać im w ramach nauczanego przedmiotu najbardziej wiedzę. Jestem kierownikiem specjalistycznych modułów „*Wysokoefektywne metody oczyszczania ścieków*” i „*Metody komputerowe w oczyszczaniu wody i ścieków*” na II. stopniu studiów na kierunku Inżynieria środowiska oraz 2 innych modułów, w tym jednego wykładanego w języku angielskim. Ponadto prowadzę wykłady i zajęcia projektowe w ramach kilku innych modułów na Wydziale Inżynierii Środowiska. Najważniejsze z nich przedstawiłem w zestawieniu tabelarycznym poniżej. Duże znaczenie przywiązuję do kształcenia podyplomowego. W latach 2006-2011 w ramach studiów podyplomowych prowadzonych na Wydziale prowadziłem zajęcia „*Stosowanie metod komputerowych w projektowaniu i monitoringu systemów zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków*”. W roku 2008 prowadziłem 5-dniowe szkolenie z zakresu stosowania programu symulacyjnego GPS-X® dla grupy pracowników MPWiK w Warszawie S.A.

W języku angielskim

Oprócz zajęć w języku polskim, prowadzę szereg zajęć w języku angielskim zarówno dla studentów polskich, jak i zagranicznych. Spośród najważniejszych należy wymienić moduły realizowane na Politechnice Krakowskiej: „*Sustainable wastewater treatment*” (30h), oferowany jako moduł wybieralny studentom polskim i zagranicznym oraz semestralny moduł „*Environmental science and technology in Poland*” (90h) oferowany studentom zagranicznym ze Swarthmore College (USA) w ramach umowy o współpracy obu uczelni (zał. 4, I.1). Corocznie, w ramach programu Erasmus prowadzę zajęcia w Royal Institute of Technology w Sztokholmie z zakresu wysokoefektywnych metod oczyszczania ścieków i symulacji komputerowej (zał. 4, I.2). W latach 2007-2009 byłem inicjatorem i kierownikiem 3 projektów międzynarodowych pod wspólnym tytułem „*Reduction of wastewater treatment contribution to global warming*” finansowanych w ramach programu Erasmus Intensive Programmes. W zorganizowanych wspólnie kursach intensywnych wzięło udział ok. 80 studentów i 10 nauczycieli z Politechniki Krakowskiej, Royal Institute of Technology w Sztokholmie i Università degli Studi di Cagliari (Włochy) (zał. 4, I.9).

W roku 1995 w ramach stażu naukowego w University of Texas at Austin prowadziłem szkolenia pracowników administracji stanu Texas z zakresu zapobiegania powstawaniu zanieczyszczeń w ramach 3 kursów szkoleniowych, których program opracowałem na zlecenie US EPA Region 6 (zał. 4, I.14-16). W latach 1995-1998 byłem głównym wykonawcą projektu szkoleniowego „*US-Poland transfer of management skills in local government*” finansowanego przez US Information Agency, a realizowanego przy współpracy University of Texas at Austin, Politechniki Krakowskiej i Krajowej Szkoły Administracji Publicznej (kierownik projektu: prof. David Eaton). Projekt ten pozwolił 20 pracownikom samorządów z Polski odbyć szkolenia i praktyki zawodowe w urzędach administracyjnych stanu Teksas.

Od roku 2008 jestem członkiem Rady Naukowej Międzynarodowego Centrum Kształcenia Politechniki Krakowskiej, a w latach 2007-2012 pełniłem funkcję Wydziałowego Koordynatora Programu ERASMUS.

Podsumowanie prowadzonych zajęć dydaktycznych (wg miejsca prowadzenia zajęć)

Nazwa przedmiotu/modułu	Rodzaj zajęć	Uwagi
Politechnika Krakowska		
Wysokoefektywne metody oczyszczania ścieków (60h, studia stacjonarne II st.)	Wykłady, Projekty	aktualnie (kierownik modułu)
Metody komputerowe w oczyszczaniu wody i ścieków (30h, studia stacjonarne II st.)	Wykłady, Lab. komp.	aktualnie (kierownik modułu)
Zasady zrównoważonego rozwoju w technologiach środowiskowych (30h, studia stacjonarne I st.)	Wykłady, Sem., Ćwicz.	aktualnie (kierownik modułu)
Sustainable wastewater treatment (30h, studia stacjonarne II st.)	Wykłady, Sem.	aktualnie (kierownik modułu)
Technologia ścieków (30h, studia stacjonarne I st.)	Wykłady	aktualnie (kierownik modułu)
Wysokoefektywne metody uzdatniania wody (30h, studia stacjonarne II st.)	Projekty	aktualnie
Odzysk surowców ze ścieków i osadów ściekowych (2h, studia stacjonarne II st.)	Wykłady	aktualnie
Environmental science and technology in Poland (90h) (kurs semestralny dla studentów ze Swarthmore College, USA)	Wykłady, Ćwiczenia	corocznie od 2001 (kierownik modułu)
Reduction of wastewater treatment contribution to global warming (60h, kurs intensywny w ramach program ERASMUS)	Wykłady, Projekty	jednorazowo, 2007 (kierownik modułu)
Basics of wastewater treatment technology (10h, cykl zajęć dla studentów magisterskich z Afganistanu)	Wykłady	jednorazowo
Modelowanie matematyczne w oczyszczaniu ścieków (30h, studia magisterskie jednolite)	Wykłady, Lab. komp.	zakończony (kierownik modułu)
Modelowanie matematyczne w ochronie wód i oczyszczaniu ścieków (30h, studia magisterskie jednolite)	Wykłady, Lab. komp.	zakończony (kierownik modułu)
Komputerowe wspomaganie projektowania w budownictwie sanitarnym (8h, studia stacjonarne II st.)	Lab. komp.	zakończony
Odnowa wody (15h, studia magisterskie jednolite)	Projekty	zakończony
Royal Institute of Technology w Sztokholmie (Szwecja)		
Advanced wastewater treatment (2h, studia stacjonarne II st.)	wykłady	corocznie od 2004
Computer simulation in wastewater treatment (8h, studia stacjonarne II st.)	Wykłady, Lab. komp.	corocznie od 2004
Reduction of wastewater treatment contribution to global warming (60h, kurs intensywny w ramach program ERASMUS)	Wykłady, Projekty	jednorazowo, 2009 (kierownik modułu)
Universita degli Studi di Cagliari (Włochy)		
Reduction of wastewater treatment contribution to global warming (60h, kurs intensywny w ramach program ERASMUS)	Wykłady, Projekty	jednorazowo, 2008 (kierownik modułu)
University of Texas At Austin (USA)		
Pollution prevention in public agencies (16h)	kurs szkoleniowy	jednorazowo, 1995
Pollution prevention in urbanized areas (16h)	kurs szkoleniowy	jednorazowo, 1995
Pollution prevention as an element of Total Cost Assessment (16h)	kurs szkoleniowy	jednorazowo, 1995

6.3. Działalność organizacyjna

1. Prodziekan Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej (2 kadencje: 2002 - 2005 i 2006 - 2008).
2. Członek Rady Wydziału Inżynierii Środowiska - 4 kolejne kadencje: 2002 - 2005, 2005 - 2008, 2008 - 2012 (z wyboru), 2012 - 2016 (z wyboru).
3. Zastępca Dyrektora ds. Nauki w Instytucie Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej (2009 - 2013).
4. Kierownik Zespołu Technologii Wody i Ścieków w Katedrze Technologii Środowiskowych Politechniki Krakowskiej (2013 - obecnie).
5. Członek Rady Naukowej Międzynarodowego Centrum Kształcenia Politechniki Krakowskiej (2008 - obecnie).
6. Pełnomocnik Dziekana WIŚ ds. studenckich programów międzynarodowych - Wydziałowy Koordynator Programu ERASMUS (2007 - 2012).
7. Przedstawiciel JM Rektora Politechniki Krakowskiej ds. współpracy z University of Texas at Austin (1995 - 2005).
8. Przedstawiciel JM Rektora Politechniki Krakowskiej ds. współpracy z Università Politecnica delle Marche (od 2012)
9. Zastępca Przewodniczącego Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej WIŚ (2003, 2004).
10. Pełnomocnik Dyrektora Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej ds. współpracy z zagranicą (1997 - 2002).
11. Członek Wydziałowej Komisji ds. Działalności Statutowej, Wydziałowej Komisji ds. Działalności Statutowej Młodych Pracowników Nauki oraz Wydziałowej Komisji ds. Nagród na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej (2009 - 2013).

Jerzy Mikosz