

AUTOREFERAT

wraz z opisem osiągnięcia naukowego

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI STACJONARNYCH I DYNAMIKI AUTOTERMICZNYCH STRUKTUR FLUIDYZACYJNYCH

dr inż. Katarzyna Bizon
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej

1. Imię i nazwisko: Katarzyna BIZON

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

- **Magister inżynier** matematyk o specjalności matematyka stosowana i modelowanie matematyczne, Politechnika Śląska, Wydział Matematyczno-Fizyczny, 2005 r.

Temat pracy magisterskiej: *Profile iteracyjne stabilnych punktów stałych i orbit stałych rozwiązań układu dwóch równań różniczkowych cząstkowych modelujących rurowy reaktor chemiczny.*

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Berezowski

- **Doktor nauk technicznych** w dyscyplinie inżynieria chemiczna, Politechnika Śląska, Wydział Chemiczny, 2010 r.

Temat pracy doktorskiej: *Spectral reduction of numerical models of combustion processes.*

Promotorzy: prof. dr hab. inż. Marek Berezowski i prof. dr ing. Gaetano Continillo.

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Ryszard Białycki (Politechnika Śląska), prof. dr hab. inż. Bolesław Tabiś (Politechnika Krakowska) i dr hab. inż. Jan Thullie, prof. nzw. Pol. Śl. (Politechnika Śląska).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- październik 2005 – maj 2006: współpracownik naukowy, Dipartimento di Ingegneria (Wydział Inżynierii), Università degli Studi del Sannio, Benevento, Włochy.
- lipiec 2006 – grudzień 2008: stażysta (*early stage researcher*¹) w ramach programu Marie Curie, projekt INECSE, Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR (Instytut Badań nad Spalaniem), Neapol, Włochy.
- wrzesień 2007 – grudzień 2007: staż zagraniczny w ramach projektu INECSE, Process & Energy Department, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft, Holandia.
- luty 2009 – luty 2010: współpracownik naukowy, Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR, Neapol, Włochy.

¹ Odpowiednik stażu doktorskiego.

- lipiec 2010 – luty 2011: asystent naukowy (*assegnista di ricerca*²), Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR, Neapol, Włochy.
 - marzec 2011 – luty 2015: asystent naukowy (*assegnista di ricerca*), Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio, Benevento, Włochy.
 - od marca 2015 – obecnie: adiunkt naukowo–dydaktyczny, Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. 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 naukowego

***ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI STACJONARNYCH I DYNAMIKI
AUTOTERMICZNYCH STRUKTUR FLUIDYZACYJNYCH***

b) Publikacje i inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Monografia:

I.B.1. K. Bizon, 2017, *Nonlinear analysis of the dynamics of fluidized-bed autothermal structures*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISSN 978-83-7242-951-3.

Cykl powiązanych tematycznie publikacji³:

I.B.2. K. Bizon, 2016, *Autothermicity, multiplicity, yield and selectivity of catalytic processes in a polytropic fluidized bed reactor*, Chemical Engineering Journal 288:834–844.

I.B.3. D. Boroń, K. Bizon, B. Tabiś, 2016, *Practical issues on modelling of chemical processes in porous catalyst pellets (Praktyczne zagadnienia modelowania procesów*

² Odpowiednik stażu podoktorskiego.

³ Spis publikacji w porządku chronologicznym, numeracja zgodna z numeracją w Wykazie dorobku habilitacyjnego (załącznik 3 do wniosku).

- chemicznych w porowatych ziarnach katalizatora*), *Przemysł Chemiczny* 95:1036–1041.
- I.B.4. K. Bizon, B. Tabiś, 2016, *Dynamics of an isothermal catalyst pellet with simultaneous chemical reaction and adsorption*, *Chemical Engineering Research and Design* 115:221–229.
- I.B.5. K. Bizon, 2016, *Autothermal fluidized bed structures (Fluidalne struktury autotermiczne)*, *Przemysł Chemiczny* 95:1975–1979.
- I.B.6. K. Bizon, B. Tabiś, 2016, *Adsorption with chemical reaction in porous catalyst pellets under alternate concentration fields. Uniform temperature case*, *Chemical and Process Engineering* 37:473–484.
- I.B.7. K. Bizon, 2017, *Assessment of a POD method for the dynamical analysis of a catalyst pellet with simultaneous chemical reaction, adsorption and diffusion: Uniform temperature case*, *Computers & Chemical Engineering* 97:259–270.
- I.B.8. K. Bizon, 2017, *Multiple isolas in steady-state characteristics of fluidized bed catalytic reactors*, *AIChE Journal* 63:2107–2116.
- I.B.9. K. Bizon, 2017, *Steady state characteristics of autothermal structures with fluidized bed catalytic reactors*, *Chemical Engineering Journal* 321:286–300.
- I.B.10. K. Bizon, 2017, *Technological issues related to startup of autothermal fluidized-bed catalytic reactors (Technologiczne problemy rozruchu autotermicznych fluidyzacyjnych reaktorów kontaktowych)*, *Przemysł Chemiczny* 96:1744–1749.
- I.B.11. K. Bizon, 2017, *Dynamical and technological consequences of the occurrence of multiple isolas of steady states in a catalytic fluidized bed reactor*, *Chemical and Process Engineering* 38:411–422.

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

Wprowadzanie

W 2005 r. obroniłam na Wydziale Matematyczno-Fizycznym Politechniki Śląskiej pracę magisterską zatytułowaną *Profile iteracyjne stabilnych punktów stałych i orbit stałych rozwiązań układu dwóch równań różniczkowych cząstkowych modelujących rurowy reaktor chemiczny*. W ramach pracy wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marka Berezowskiego zajmowałam się określaniem czasu ustalania się stanów stabilnych w rurowym homogenicznym reaktorze chemicznym o przepływie tłokowym. Praca ta

zaowocowała moją pierwszą publikacją w czasopiśmie z listy JCR (II.A.1⁴). Następnie podczas realizacji pracy doktorskiej zajmowałam się początkowo modelowaniem i badaniem właściwości reaktorów chemicznych ze złożem nieruchomym (II.A.2), a następnie reaktorów fluidyzacyjnych z cyrkulacyjną warstwą fluidalną (II.E.1, II.A.5) stosowanych do spalania paliw stałych. Badania te realizowane w Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio w Benevento oraz w Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR w Neapolu stanowiły podstawę mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej *Spectral reduction of numerical models of combustion processes*, wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marka Berezowskiego z Politechniki Śląskiej i prof. dr ing. Gaetano Continillo z Università degli Studi del Sannio w Benevento, Włochy.

Po uzyskaniu w 2010 roku na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna pozostałam przy tematyce związanej z modelowaniem reaktorów heterogenicznych. Początkowo rozszerzyłam obszar moich badań na reaktory z tlenową pętlą spalania (ang. *chemical looping combustion*) ze złożem stacjonarnym (III.B.8) oraz zagadnienia optymalizacyjne kotłów fluidyzacyjnych z pęcherzykową warstwą fluidalną współpracujących z wewnętrznym wymiennikiem ciepła w postaci silnika Stirlinga (II.A.8, II.E.3).

Omówienie motywacji, celu i zakresu badań obejmujących osiągnięcie naukowe

Wiodącym tematem moich badań pod doktoracie stały się kontaktowe reaktory fluidyzacyjne z pęcherzykową warstwą katalizatora, a w szczególności tzw. autotermiczne struktury fluidyzacyjne. Autotermiczną strukturą fluidyzacyjną nazywa się obiekt samowystarczalny pod względem cieplnym, w którym dany egzotermiczny proces chemiczny przebiega w złożu fluidalnym. W przypadku katalitycznych reaktorów fluidyzacyjnych już sama hydrodynamika złoża tworząca tzw. wewnętrzny kanał dodatniego cieplnego sprzężenia zwrotnego może zapewnić warunki do autotermicznej pracy aparatu. Zimny surowiec podgrzewa się wówczas na skutek kontaktu z gorącym złożem katalizatora. Mechanizm ten słabnie jednak w miarę zmniejszania efektu cieplnego procesu. Wówczas, w celu zapewnienia autotermicznej pracy aparatu konieczne jest wprowadzenie dodatkowego zewnętrznego kanału sprzężenia cieplnego. Zewnętrzne sprzężenie cieplne może być realizowane poprzez zastosowanie częściowej recyrkulacji gorących reagentów lub zainstalowanie zewnętrznego wymiennika autotermicznego służącego do wstępnego ogrzania surowców. Innymi

⁴ Pełne dane bibliograficzne w załączniku 3 do wniosku.

przykładami struktur autotermicznych są konfiguracje z cyrkulacją ziaren ciała stałego, np. dwa sprzężone aparaty fluidyzacyjne.

Mimo wielu lat badań prowadzonych w różnych ośrodkach na świecie, dynamika takich obiektów nie była dotychczas analizowana w literaturze, a właściwości stacjonarne takich obiektów również były poznane tylko szczerunkowo. Wyjątek stanowią prace dotyczące wybranych procesów technologicznych takich kraking katalityczny⁵ czy polimeryzacja etylenu⁶, jednak w żadnej publikacji nie uwzględniono wpływu zewnętrznego sprzężenia autotermicznego na stacjonarne i dynamiczne właściwości całej struktury autotermicznej. Ponadto zagadnienie dotyczące doboru właściwego modelu, tj. modelu pseudohomogenicznego lub heterogenicznego, do opisu zjawisk zachodzących na granicy faz ciało stałe-gaz oraz we wnętrzu ziarna katalizatora w odniesieniu do dynamicznej pracy aparatu również nie zostało dotychczas dokładnie zbadane. Kolejnym elementem, nie brany dotychczas pod uwagę w modelowaniu katalitycznych reaktorów fluidyzacyjnych jest zjawisko adsorpcji fizycznej na inertym nośniku katalizatora. Opublikowane prace dotyczące modelowania katalitycznych reaktorów ze złożem stacjonarnym⁷ wskazywały natomiast, że w przypadku zaburzeń stężenia lub temperatury w strumieniu zasilającym reaktor sorpcja substratu może mieć znaczny wpływ na dynamikę reaktora i może prowadzić do tzw. *wrong-way behavior*, czyli odpowiedzi dynamicznej sprzecznej ze spodziewaną.

Kierując się stanem wiedzy dotyczącym właściwości stacjonarnych i dynamicznych autotermicznych struktur fluidyzacyjnych, podjęłam badania naukowe mające na celu znaczne poszerzenie wiedzy dotyczącej podejścia do modelowania i symulacji takich obiektów oraz kompleksową analizę właściwości stacjonarnych i dynamicznych różnych konfiguracji reaktorowych z kanałem dodatniego sprzężenia autotermicznego.

Opracowany i zrealizowany przeze mnie program badawczy obejmował kilka wątków tematycznych, a mianowicie:

- Rewizję stosowalności modelu pseudohomogenicznego tzw. strefy emulsji (zwanej też strefą gęstą) złoża fluidalnego do symulacji dynamiki katalitycznych reaktorów fluidyzacyjnych.

⁵ Abasaheed A.E., Elnashaie S.E.E.H., *On chaotic behaviour of externally forced industrial fluid catalytic cracking units*, Chaos Soliton. Fract. 9 (1998) 455-470

⁶ Fernandes F.A.N., Lona L.M.F., *Heterogeneous modelling for fluidized-bed polymerization reactor*, Chem. Eng. Sci. 56 (2001) 963-969

⁷ Il'in A., Luss D., *Wrong-way behavior of packed bed reactors: influence of reactant adsorption on support*, AIChE J., 38 (1992) 1609-1617.

- Ocenę dokładności wybranych metod aproksymacyjnych do symulacji dynamiki modeli heterogenicznych, tj. modeli uwzględniających obecność rozkładów stężenia reagentów lub temperatury w ziarnie katalizatora.
- Analizę właściwości stacjonarnych i dynamicznych autotermicznych struktur fluidyzacyjnych z pojedynczym reaktorem fluidyzacyjnym dla procesów egzotermicznych o dwóch ogólnych modelach kinetycznych w szerokim zakresie parametrów procesowych i konstrukcyjnych wpływających na autotermię, wydajność i selektywność procesu.
- Ocenę wpływu adsorpcji fizycznej na dynamikę pojedynczego reaktora fluidyzacyjnego oraz na stany stacjonarne i dynamikę dwóch sprzężonych aparatów fluidyzacyjnych, tj. reaktora kontaktowego i fluidyzacyjnego wymiennika ciepła.
- Propozycję alternatywnych strategii rozruchu reaktorów fluidyzacyjnych połączoną z oceną wpływu wybranych parametrów procesowych i konstrukcyjnych na możliwość jej zastosowania.
- Zastosowanie opracowanej metodologii do analizy wybranego procesu technologicznego, tj. utleniania naftalenu do bezwodnika ftalowego.

Wyniki badań dotyczących modelowania matematycznego oraz analizy stanów stacjonarnych i dynamiki autotermicznych struktur fluidyzacyjnych zostały podsumowane w monografii (I.B.1) oraz przedstawione w cyklu powiązanych tematycznie publikacji w czasopiśmie z listy JCR (I.B.2–I.B.11), które przedkładałam jako podstawę wniosku do wszczęcia i przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego.

Omówienie zastosowanej metodologii i wyników badań własnych

W ramach badań własnych sformułowałam cztery modele fluidalnej warstwy katalizatora uwzględniające różne warunki dyfuzyjno-cieplne na granicy ziarno-gaz oraz w samym ziarnie. We wszystkich przypadkach do ilościowego opisu hydrodynamiki warstwy katalizatora przyjąłam pęcherzykowy model złoża fluidalnego Kuniiego i Levenspiela⁸ zmodyfikowany przez Tabisia⁹ do modelu dwustrefowego, czyli modelu, zgodnie z którym w złożu fluidalnym wyróżniamy strefę pęcherzy i strefę emulsji. Poza powszechnie stosowanym przez większość badaczy modelem reaktora fluidalnego opartym na pseudohomogenicznym

⁸ Kunii D., Levenspiel O., *Bubbling bed model – model for flow of gas through a fluidized bed*, Ind. Eng. Chem. Fund. 7 (1968) 446-452

⁹ Tabiś B., *Metanol synthesis in a fluidized-bed reactor coupled with an external heat exchanger. The effect of feedback deformation*, Chem. Eng. J. 28 (2001) 199-210

modelu strefy emulsji utworzyłam rodzinę modeli heterogenicznych, według których gaz i ziarno katalizatora w strefie emulsji są rozpatrywane jako odrębne fazy. Sformułowałam tzw. pełny model heterogeniczny, w którym uwzględniłam zarówno międzyfazową wymianę masy i ciepła pomiędzy ziarnem katalizatora, a gazem w strefie emulsji, jak również wewnętrzne opory ruchu masy i ciepła w porowatym ziarnie katalizatora. Ponadto utworzyłam dwa modele uproszczone. W pierwszym z nich pominęłam wewnętrzne opory ruchu ciepła. Drugi model uproszczony został natomiast oparty na założeniu pomijalnych oporów ruchu masy i ciepła w ziarnie. W efekcie pojedyncze ziarno katalizatora potraktowane jest jako obiekt o zmiennych skupionych. Formułując modele dynamiki złoża fluidalnego założyłam, że zachodzącej reakcji chemicznej może towarzyszyć proces adsorpcji fizycznej reagentów na intertnym nośniku katalizatora.

Modele fluidalnej warstwy katalizatora opisujące pojedynczy aparat bez zewnętrznego sprzężenia autotermicznego zostały następnie użyte do sformułowania modeli wybranych struktur autotermicznych, a mianowicie: katalitycznego reaktora fluidyzacyjnego z częściową recyrkulacją gazowych produktów, katalitycznego reaktora fluidyzacyjnego z zewnętrznym autotermicznym wymiennikiem ciepła oraz układu dwóch sprzężonych aparatów fluidyzacyjnych z cyrkulacją ziaren katalizatora, tj. reaktora fluidyzacyjnego i fluidyzacyjnego wymiennika ciepła.

Dla utworzonych modeli matematycznych proponowałam i zaimplementowałam algorytmy wyznaczania stanów stacjonarnych, kontynuacji parametrycznej tych stanów oraz wyznaczania charakterystyki dynamicznej. Na tej podstawie utworzono kody numeryczne. W przypadku modeli heterogenicznych uwzględniających rozkłady stężenia lub temperatury w ziarnie katalizatora uzyskałam tzw. modele dwuskalowe, na które składają się równania różniczkowe cząstkowe opisujące dynamikę ziarna katalizatora oraz równania różniczkowe zwyczajne opisujące fazę gazową otaczającą ziarno. Efektywnym sposobem całkowania takich zbiorów równań, prowadzącym do znacznego zmniejszenia nakładów obliczeniowych jest zastosowanie metod aproksymacyjnych względem równań opisujących ziarno. Do symulacji numerycznej tego typu modeli dwuskalowych proponowałam zastosowanie metody projekcyjnej Galerkina z empiryczną bazą funkcyjną wyznaczoną przy użyciu metody dekompozycji ortogonalnej (ang. *proper orthogonal decomposition*¹⁰).

¹⁰ Karhunen K., *Über Lineare Methoden in der Wahrscheinlichkeits-rechnung*, Ann. Acad. Sci. Fennicae 37 (1947) 3-79.

Pełna postać sformułowanych modeli złoża fluidalnego i modeli rozważanych struktur autotermicznych oraz zastosowana w badaniach metodologia obliczeniowa została przedstawiona w monografii (I.B.1).

Powszechnie stosowane założenie o pseudohomogenicznym charakterze strefy emulsji zweryfikowałam dla pojedynczej egzotermicznej reakcji chemicznej zachodzącej w kontaktowym reaktorze fluidyzacyjnym bez zewnętrznego sprzężenia autotermicznego. Ze względu na obecność wewnętrznych kanałów sprzężenia cieplnego wynikających z hydrodynamiki złoża fluidalnego, aparat taki spełnia definicję struktury autotermicznej. Analiza porównawcza charakterystyk stacjonarnych i dynamicznych reaktora otrzymanych według modelu pseudohomogenicznego oraz rodziny modeli heterogenicznych miała na celu określenie warunków, dla których możliwe jest przyjęcie założenia o pseudojednorodnym charakterze strefy emulsji. Wyniki badań symulacyjnych zostały dodatkowo skonfrontowane z kryteriami określającymi istotność zewnętrznych oporów transportu masy i ciepła na powierzchni ziarna katalizatora¹¹ oraz wewnętrznych oporów dyfuzji masy¹² i ciepła¹³ w ziarnie katalizatora. Należy jednak pamiętać, że kryteria te nie mają charakteru uniwersalnego, co wykazano w pracy (I.B.3). W świetle uzyskanych wyników i analizy porównawczej przedstawionej w monografii (I.B.1) niewłaściwe jest przyjęcie *a priori* założenia o pseudohomogeniczności strefy emulsji. Szczególnie w przypadku procesów o dużym efekcie cieplnym przyjęcie takiego założenia powinno być poprzedzone analizą istotności oporów ruchu masy i ciepła na granicy faz oraz w samym ziarnie katalizatora przy użyciu pełnego modelu heterogenicznego. Ze względu na małe wymiary ziaren katalizatora można jednak zawsze założyć jednorodność pola temperatury w ziarnie przy jednoczesnym uwzględnieniu gradientów stężenia w ziarnie i w jego otoczeniu.

W kolejnym etapie badań przeanalizowałam możliwość zastosowania metody projekcyjnej Galerkina z empiryczną bazą funkcyjną wyznaczoną przy użyciu dekompozycji ortogonalnej do symulacji dynamiki obiektu dwuskalowego jakim jest heterogeniczny reaktor fluidyzacyjny. W pierwszym kroku metodę tę zastosowałam do symulacji dynamiki pojedynczego ziarna katalizatora o jednorodnej temperaturze, w którym zachodzi jednocześnie zjawisko dyfuzji, adsorpcji i reakcji chemicznej. Wyniki badań dotyczących analizy dynamiki pojedynczego ziarna zamieściłam w publikacji (I.B.7). Metodę tę

¹¹ Mears D.E., *Test for transport limitations in experimental catalytic reactors*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. 10 (1971) 541-547.

¹² Weisz P.B., Prater C.D., *Interpretation of measurements in experimental catalysis*, Adv. Catal. 6 (1954) 144-196.

¹³ Anderson J.B., *A criterion for isothermal behaviour of a catalyst pellet*, Chem. Eng. Sci. 18 (1963) 147-148.

stosowałam już we wcześniejszych badaniach, m.in. zastosowałam ją w mojej rozprawie doktorskiej, jednak w wyżej wymienionej publikacji poza klasyczną techniką redukcji wymiaru modelu o parametrach rozłożonych, zastosowałam dodatkowo metodę dyskretnej interpolacji empirycznej (ang. *discrete empirical interpolation method*¹⁴). Metoda ta umożliwia efektywne rozwiązywanie problemów silnie nieliniowych, z którymi mamy do czynienia w przypadku modelowania ziaren katalizatora. W szczególności, w pracy (I.B.7) metodę dyskretnej interpolacji empirycznej zastosowałam do symulacji dynamiki ziarna katalizatora, dla którego reakcja chemiczna jest opisana nieliniowym równaniem kinetycznym Langmuira-Hinshelwooda. Wykazałam, że dokładność aproksymacji wzrasta ze wzrostem liczby Biota, tzn. w miarę spadku zewnętrznych oporów wnikania masy i wzrostu krzywizny profili stężenia substratu w ziarnie. Jest to korzystna cecha zaproponowanej metody, bowiem inne metody aproksymacyjne, np. metoda kolokacji ortogonalnej, wymagają zwiększenia liczby punktów kolokacyjnych w miarę jak rośnie „ostrość” profili stężenia. Mając na uwadze planowane zastosowanie metody do symulacji dynamiki całego reaktora kontaktowego przeanalizowałam również wpływ zmiennego stężenia substratu w fazie gazowej otaczającej ziarno na dokładność aproksymacji.

Wykonane badania numeryczne skupiające się na analizie dynamiki pojedynczego ziarna z wykorzystaniem metody Galerkina i metod dekompozycji potwierdziły dużą dokładność tej aproksymacji. W efekcie, technikę tę zastosowałam następnie do utworzenia tzw. modelu zredukowanego dla analizowanych katalitycznych reaktorów fluidyzacyjnych. W świetle wcześniejszych wyników utworzyłam model zredukowany reaktora z heterogenicznością strefy emulsji, w którym uwzględniłam występowanie rozkładów stężenia w ziarnie katalizatora oraz gradientów stężenia i temperatury na granicy ziarno-gaz. Badania numeryczne wykonane przy użyciu tego modelu ograniczały się do zakresu parametrów, dla których stosowanie modelu heterogenicznego jest uzasadnione, tj. do wysokich wartości entalpii reakcji chemicznej. W wyniku przeprowadzonej analizy stacjonarnych i dynamicznych właściwości reaktora stwierdziłam, że metoda Galerkina połączona z techniką dekompozycji ortogonalnej może być z powodzeniem stosowana do symulacji dynamiki nieliniowych obiektów dwuskalowych. Pozwala ona na co najmniej kilkudziesięciokrotne zmniejszenie liczby równań symulujących dynamikę reaktora, w porównaniu z klasyczną metodą linii, którą przyjął jako wzorcową (I.B.1).

¹⁴ Chaturantabut S., Sorensen D.C., *Nonlinear model reduction via discrete empirical interpolation*, SIAM J Sci. Comput. 32 (2010) 2737-2764.

Wykorzystując sformułowane modele matematyczne autotermicznych struktur fluidyzacyjnych przeprowadziłam następnie kompleksową analizę właściwości stacjonarnych i dynamicznych takich konfiguracji reaktorowych. Badania te przeprowadziłam dla dwóch kinetyk ogólnych, tj. dla pojedynczej nieodwracalnej pierwszorzędowej reakcji chemicznej i układu dwóch reakcji szeregowych, oraz dla procesu produkcji bezwodnika ftalowego przez utlenianie naftalenu w złożu fluidalnym. Ze względu na umiarkowane wartości entalpii reakcji zastosowane w ilościowej i jakościowej analizie porównawczej do symulacji stanów stacjonarnych i dynamiki struktur autotermicznych, zastosowałam model reaktora fluidyzacyjnego z pseudohomogenicznością strefy emulsji.

Jak wspomniałam, pojedynczy reaktor fluidyzacyjny bez zewnętrznego sprzężenia cieplnego również spełnia definicję struktury autotermicznej, dlatego w pierwszej kolejności wykonałam kompleksową analizę właściwości takiego aparatu. Dokonałam oceny wpływu wybranych parametrów procesowych i konstrukcyjnych takich jak temperatura surowca, liczba fluidyzacji, intensywność odbioru ciepła ze złoża czy stała równowagi adsorpcji fizycznej na właściwości stacjonarne i dynamiczne reaktora. Wyniki badań dotyczących analizy stanów stacjonarnych reaktora kontaktowego bez zewnętrznego sprzężenia autotermicznego zamieściłam w monografii (I.B.1) oraz w publikacjach (I.B.2, I.B.8). Do wyznaczenia gałęzi stanów stacjonarnych zastosowałam metodę kontynuacji parametrycznej¹⁵. W pracach tych wykazałam, że nawet w przypadku reaktora bez zewnętrznego sprzężenia autotermicznego struktura stanów stacjonarnych może być bardzo złożona. Poza możliwością występowania wielokrotnych stanów stacjonarnych, zarówno dla pojedynczej reakcji chemicznej, jak i dla układu dwóch reakcji szeregowych zaobserwowałam możliwość występowania na wykresach bifurkacyjnych tzw. wielokrotnych izoli, czyli wielokrotnych zamkniętych gałęzi stanów stacjonarnych. W zależności od przyjętej kinetyki izole te mogą występować w różnych zakresach parametru bifurkacyjnego (w badanym przypadku parametrem tym była liczba fluidyzacji), tj. obok siebie lub też mogą być generowane w tym samym zakresie parametru tj. jedna nad drugą. W dotychczasowych doniesieniach literaturowych brak było wzmianek o współlistnieniu dwóch izoli w jednym zakresie danego parametru procesowego.

Jedną z konsekwencji procesowych tak złożonej struktury stanów stacjonarnych jest m.in. konieczność doboru właściwej strategii rozruchu reaktora. W pracy (I.B.11) wykazałam, że dla pojedynczej reakcji chemicznej, w sytuacji dynamicznej zmiany liczby fluidyzacji, z

¹⁵ Seydel R., *Practical bifurcation and stability analysis*, Springer, New York 2010.

którą możemy mieć do czynienia podczas rozruchu reaktora, obecność wielokrotnych izoli stanów stacjonarnych może prowadzić do ryzyka wygaszenia reaktora. Wprowadzenie reaktora w pożądany stan stacjonarny, tj. stan stacjonarny charakteryzujący się korzystną technologicznie wydajnością, wiąże się wówczas z koniecznością doboru odpowiedniego czasu przełączania, czyli czasu w którym następuje zmiana liczby fluidyzacji od wartości początkowej do wartości docelowej. Ponadto wykazałam, że dla procesów złożonych współistnienie dwóch izoli stanów stacjonarnych w jednym zakresie danego parametru procesowego połączone z występowaniem niewielkich zewnętrznych zaburzeń temperatury surowca lub temperatury czynnika chłodzącego może prowadzić do gwałtownego wzrostu temperatury w reaktorze, a w efekcie spadku wydajności (I.B.11).

W kolejnym etapie badań dokonałam oceny wpływu adsorpcji substratu na dynamikę reaktora. Badania te poprzedzone zostały oceną wpływu adsorpcji fizycznej i zaburzeń zewnętrznych na dynamikę pojedynczego ziarna katalizatora (I.B.4, I.B.6). Potwierdziły one, że uwzględnienie w modelu ziarna zjawiska sorpcji na inertym nośniku ziarna katalizatora ma istotny wpływ na czas odpowiedzi ziarna na wymuszenia zewnętrzne w postaci skokowych lub okresowych zmian stężenia substratu. Ponadto, wykazano, że częstotliwość zaburzeń zewnętrznych ma istotny wpływ na amplitudę chwilowego współczynnika efektywności ziarna. Amplitudy oscylacji tego współczynnika maleją ze wzrostem częstotliwości zaburzenia.

Analiza wyników obliczeń symulacyjnych reaktora potwierdziła również silny wpływ zjawiska adsorpcji substratu na dynamikę całego aparatu (I.B.1). Wykazałam, że zjawisko sorpcji ma znaczenie przede wszystkim przy niższych temperaturach emulsji, przy których może dochodzić do adsorpcji substratu na inertym nośniku ziarna katalizatora. Wówczas nawet niewielki wzrost temperatury złoża może wywołać nagłe uwolnienie zaadsorbowanego substratu i w efekcie doprowadzić do nagłego wzrostu stopnia przemiany i temperatury w reaktorze. Innym ważnym wynikiem badań numerycznych jest wykrycie punktów bifurkacji Hopfa na gałęziach stanów stacjonarnych reaktora. Punkty te będące źródłem występowania w reaktorze niestabilnych oscylacji zaobserwowałam na wykresach gałęzi stanów stacjonarnych wyznaczonych w zależności od temperatury surowca lub liczby fluidyzacji dla stosunkowo wysokich wartości parametru energetycznego charakteryzującego stałą równowagi adsorpcji. Wykazałam, że technologiczną konsekwencją takiej charakterystyki dynamicznej są trudności w rozruchu reaktora w obszarze parametrów, dla których obserwuje się występowanie niestabilnych cykli granicznych.

Wyniki badań teoretycznych otrzymane dla aparatu bez zewnętrznego sprzężenia porównałam następnie z wynikami symulacji wykonanymi dla reaktora z częściową recyrkulacją gorących produktów oraz reaktora z zewnętrznym wymiennikiem autotermicznym służącym do wstępnego ogrzania surowców. Kompleksową analizę porównawczą stacjonarnych właściwości tych konfiguracji zamieściłam w monografii (I.B.1) oraz w publikacjach (I.B.5, I.B.9). Wykazałam, że obie konfiguracje z zewnętrznym kanałem sprzężenia autotermicznego pozwalają znacznie rozszerzyć obszar autotermicznej pracy reaktora. Przy identycznych wartościach liczby fluidyzacji reaktor z zewnętrznym autotermicznym wymiennikiem ciepła pozwala jednak na osiągnięcie wyższych wartości wydajności procesu, niż reaktor z recyrkulacją. Wykazałam ponadto, że zaletą tej drugiej konfiguracji są znacznie niższe temperatury złoża. Oznacza to, że reaktor z częściową recyrkulacją gorących produktów może stanowić korzystniejsze rozwiązanie w przypadku prowadzenia procesów silnie egzotermicznych lub korzystania z katalizatorów charakteryzujących się stosunkowo niskimi temperaturami dezaktywacji. Dla struktury fluidyzacyjnej z recyrkulacją zaobserwowałam możliwość występowania wielokrotnych izoli stanów stacjonarnych. Ich obecność jest uwarunkowana intensywnością odbioru ciepła ze złoża. Na gałęziach stanów stacjonarnych wyznaczonych dla tej konfiguracji wykryłam również istnienie punktów bifurkacji Hopfa (I.B.1). Analogicznie jak w przypadku aparatu bez zewnętrznego sprzężenia autotermicznego, punkty te są źródłem niestabilnych oscylacji, które powodują znaczne trudności w rozruchu reaktora.

W kolejnym etapie programu badawczego porównałam wybrane właściwości dynamiczne autotermicznych struktur fluidyzacyjnych. W szczególności zbadałam dwie strategie rozruchu reaktora w obszarach stanów wielokrotnych, tj. strategię opartą na podgrzaniu złoża do temperatury początkowej powyżej wartości odpowiadającej niestabilnemu stanowi pośredniemu oraz strategię opartą na programowej zmianie liczby fluidyzacji. W monografii (I.B.1) oraz w publikacji (I.B.10) wykazałam, że poza charakterystyką stacjonarną, istotny wpływ na uzyskany ostatecznie stan stacjonarny ma techniczny sposób realizacji sprzężenia cieplnego. Zastosowanie konfiguracji z częściową recyrkulacją produktów stwarza łagodniejsze wymagania co do wstępnego podgrzania złoża, niż reaktor z zewnętrznym wymiennikiem autotermicznym.

Odrębny element badań własnych stanowiła ilościowa i jakościowa ocena właściwości dwóch sprzężonych aparatów fluidyzacyjnych, tj. reaktora kontaktowego współpracującego z fluidyzacyjnym wymiennikiem ciepła i z cyrkulacją ziaren ciała stałego między tymi aparatami. Wyniki tych badań przedstawiłam w monografii (I.B.1). Wykazałam, że zjawisko

sorpcji substratu wpływa nie tylko na dynamikę takich obiektów, ale również na położenie gałęzi stanów stacjonarnych. W wyniku swoich badań określiłam m.in. wpływ średniego czasu przebywania ziaren katalizatora w wymienniku fluidyzacyjnym na autotermiczność procesu. Ponadto przeprowadziłam analizę wpływu wymuszeń zewnętrznych na dynamikę tego typu konfiguracji w sytuacji występowania na gałęziach stanów stacjonarnych punktów bifurkacji Hopfa. Wykazałam, że dla zaburzeń okresowych wartość wzmocnienia amplitudowego zależy od odległości wartości danego parametru procesowego od punktu bifurkacji Hopfa.

Podsumowaniem badań z tego zakresu tematycznego było zastosowanie opracowanej metodologii do oceny właściwości stacjonarnych i dynamicznych procesu produkcji bezwodnika ftalowego przez utlenianie naftalenu w złożu fluidalnym (I.B.1). Porównałam ilościowe i jakościowe właściwości tego procesu przy założeniu, że jest on prowadzony w reaktorze fluidyzacyjnym bez zewnętrznego sprzężenia autotermicznego oraz w strukturze autotermicznej z wymiennikiem autotermicznym. Badania te potwierdziły, że ze względu na możliwość utleniania bezwodnika ftalowego do produktów spalania, osiągnięcie zadowalającej wydajności produktu i selektywności procesu w obu konfiguracjach możliwe jest tylko w bardzo wąskich zakresach temperatur surowca.

Podsumowanie osiągnięcia naukowego i elementy nowości

Omówiony powyżej cykl publikacji (I.B.1–I.B.11) stanowi spójny zbiór wyników badań teoretycznych. Uzyskane wyniki potwierdzają ogromne bogactwo i złożoność autotermicznych reaktorów fluidyzacyjnych. Zrealizowany w ramach badań własnych program badawczy, opracowana metodologia i zaobserwowane nowe zjawiska stanowią znaczny wkład do wiedzy na temat właściwości stacjonarnych i dynamicznych takich obiektów.

Do moich oryginalnych osiągnięć i elementów nowości mogę zaliczyć:

- Sformułowanie czterech modeli złoża fluidalnego, opracowanie i implementacja algorytmów obliczeniowych do ich symulacji oraz rewizja stosowalności modelu pseudohomogenicznego strefy emulsji, przede wszystkim do symulacji dynamiki reaktora.
- Sformułowanie modeli wybranych autotermicznych struktur fluidyzacyjnych z pojedynczym aparatem fluidyzacyjnym oraz modelu dwóch sprzężonych aparatów fluidyzacyjnych, tj. reaktora i fluidyzacyjnego wymiennika ciepła.

- Kompleksową analizę nieliniową stanów stacjonarnych i dynamiki autotermicznych struktur fluidyzacyjnych, w tym wykrycie nowych nie zaobserwowanych dotychczas zjawisk nieliniowych jakimi są wielokrotne izole stanów stacjonarnych występujące w tym samym zakresie parametru bifurkacyjnego.
- Kompleksową analizę wpływu zjawiska adsorpcji fizycznej substratu w ziarnie katalizatora na dynamikę autotermicznych struktur fluidyzacyjnych, a w przypadku dwóch sprzężonych aparatów również na charakterystykę stacjonarną.
- Zastosowanie metody Galerkina z ortogonalną bazą empiryczną wyznaczoną przy użyciu metody dekompozycji ortogonalnej do symulacji dynamiki obiektu dwuskalowego jakim jest reaktor fluidyzacyjny z heterogenicznym modelem strefy emulsji.

Ponadto, z przeprowadzonych badań mogę wysunąć następujące wnioski o charakterze poznawczym oraz praktycznym:

- Wyniki symulacji dynamicznych potwierdzają, że znajomość charakterystyki stacjonarnej autotermicznych struktur fluidyzacyjnych jest niezbędna m.in. do prawidłowego rozruchu reaktora oraz prowadzenia procesów przy występowaniu zaburzeń zewnętrznych, np. zmian temperatury surowca.
- Wprowadzenie kanału zewnętrznego dodatniego sprzężenia cieplnego pozwala znacznie rozszerzyć obszar autotermicznej pracy reaktora w kierunku niższych temperatur surowca i wyższych wartości liczb fluidyzacji. Złagodzenie wymagań dotyczących temperatury surowca pozwala zmniejszyć koszty operacyjne wstępnego podgrzania surowca, natomiast możliwość prowadzenia procesu w zakresie wyższych liczb fluidyzacji poprawia zdolność produkcyjną reaktora.
- Ogólny charakter przeprowadzonej analizy powoduje, że metody i otrzymane nowe wyniki mogą być w prosty sposób zaadaptowane do szczegółowej analizy ilościowej i jakościowej przemysłowych procesów kontaktowych prowadzonych w autotermicznych strukturach fluidyzacyjnych. Opracowana metodologia może ponadto stanowić narzędzie do optymalnego i bezpiecznego doboru podstawowych parametrów procesowych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Poza omówionym powyżej głównym obszarem badań, w mojej dotychczasowej działalności naukowo-badawczej można wyróżnić kilka innych wątków tematycznych.

Pierwszy z nich dotyczył zagadnień z zakresu modelowania i analizy dynamiki reaktorów chemicznych różnych typów oraz redukcji modeli przy użyciu metod dekompozycji, jak to krótko ujęto poniżej. Przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych moja praca badawcza skupiała się na zastosowaniu metody dekompozycji ortogonalnej (ang. *proper orthogonal decomposition*) połączonej z projekcyjną metodą Galerkina do tworzenia tzw. modeli zredukowanych zarówno klasycznych reaktorów chemicznych dla procesów homogenicznych jak i bardziej złożonych aparatów, tj. reaktora fluidyzacyjnego z cyrkulacyjną warstwą fluidalną. Zastosowanie wspomnianej metody do redukcji modelu kotła fluidalnego z cyrkulacyjną warstwą fluidalną stanowiło przedmiot mojej rozprawy doktorskiej. Wyniki prowadzonych badań teoretycznych zostały zamieszczone w publikacjach w czasopismach z listy JCR (II.A.2, II.A.5, II.A.6, II.A.9) oraz w innych recenzowanych czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych (II.E.1, II.E.11, II.E.13, II.E.14). W pracach tych poza oceną efektywności metody do symulacji stanów stacjonarnych i dynamiki reaktorów chemicznych analizowałam zagadnienie tzw. bazy globalnej funkcyjnej (II.A.2, II.A.6, II.A.9). Baza taka umożliwia skonstruowanie dokładnego modelu aproksymacyjnego w oparciu o niewielką liczbę obserwacji. Ponadto w pracy (II.A.5) zaproponowałam zastosowanie metody funkcji kary do symulacji numerycznej dynamiki rurowego reaktora chemicznych z recyrkulacją masy oraz reaktora fluidyzacyjnego z cyrkulacyjną warstwą fluidalną.

Równolegle do badań teoretycznych nad modelowaniem i symulacją reaktorów fluidyzacyjnych prowadzonych w ramach projektu INECSE (III.A.1) i we współpracy z Università degli Studi del Sannio w Benevento, prowadziłam badania eksperymentalne w zakresie spalania paliw stałych. Pod kierunkiem dr ing. Riccardo Chirone z Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR w Neapolu zajmowałam się badaniami w skali laboratoryjnej skupiającymi się na określeniu krzywej ziarnowej pierwotnego popiołu (ang. *primary ash particle size distribution*) wybranych typów węgla kamiennego. W ramach stypendium Marie Curie odbyłam również staż zagraniczny w Delft University of Technology w Holandii, gdzie pod kierunkiem dr ir. Wiebren de Jong, zajmowałam się problemem aglomeracji zachodzącym w złożu fluidalnym podczas współspalania biomasy, tj. pelletów miskańta i drewna, w skali pilotażowej. Wyniki badań eksperymentalnych zreferowałam na konferencji 30th i 32nd Meeting of the Italian Section of the Combustion Institute (II.L.2, III.B.2) oraz na spotkaniach sprawozdawczych projektu, które odbyły się kolejno w Turku (czerwiec 2007 r.), Neapolu (styczeń 2008 r.), Delft (czerwiec 2008 r.) i Pizie (luty 2009 r.).

Kolejnym wątek tematyczny moich badań dotyczył zastosowania metod statystycznych i technik dekompozycji do analizy masowych danych eksperymentalnych diagnostyki optycznej w silnikach spalinowych. Badania nad zastosowaniem dekompozycji ortogonalnej (ang. *proper orthogonal decomposition*) oraz analizy składników niezależnych (ang. *independent component analysis*) do oceny jakości procesu spalania w silnikach spalinowych prowadziłam we współpracy z grupą badawczą kierowaną przez dr ing. Bianca Maria Vaglieco z Istituto Motori CNR (Instytut Silników) w Neapolu. Wyniki wieloletnich badań eksperymentalno-teoretycznych zamieszczone w publikacjach w czasopismach z listy JCR (II.A.3, II.A.4, II.A.7, II.A.10, II.A.11) oraz w innych czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych (II.E.2, II.E.4, II.E.5, II.E.9, II.E.10, II.E.12, II.E.17). Ze względu na nowatorski w skali światowej charakter badań, prace te w krótkim czasie zdobyły kilkadziesiąt cytowań. W ramach badań analizowałam możliwość zastosowania zaawansowanych narzędzi matematycznych do analizy struktury czasoprzestrzennej płomieni w silnikach Diesla oraz w silnikach o zapłonie iskrowym. Jednym z celów tych badań była ocena zmienności cyklicznej procesu spalania ukierunkowana na wyeliminowanie tej zmienności, a w efekcie poprawie procesu spalania i wydajności silnika.

We współpracy z Istituto Motori CNR oraz Bosch Centro Componenti per Veicoli S.p.A. w Modugno zajmowałam się również zagadnieniem stosowalności sztucznych sieci neuronowych jako tzw. wirtualnych sensorów. Wyniki badań nad zastosowaniem akcelerometru do pośredniego pomiaru ciśnienia w cylindrze silnika spalinowego zostały zamieszczone w publikacji (II.E.6) oraz w materiałach konferencyjnych (II.E.15, II.E.16, II.E.19).

Moje badania w zakresie sieci neuronowych dotyczyły również ich zastosowania jako elementów modeli hybrydowych, czyli modeli o charakterze mechanistyczno-empirycznych. Metodę tę zastosowałam do utworzenia opisu złoża fluidalnego współpracującego z silnikiem Stirlinga. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane na 23rd European Biomass Conference and Exhibition (II.L.31) i stanowiły element projektu MEGARIS (II.J.5), którego byłam wykonawcą. W ramach tego projektu uczestniczyłam w badaniach dotyczących wielokryterialnej optymalizacji kotła fluidalnego sprzężonego z silnikiem Stirlinga, których wyniki zamieszczono w publikacjach (II.A.8, II.E.3) oraz w materiałach konferencyjnych (II.E.20).

Kolejnym wątkiem tematycznym moich badań naukowych były zagadnienia związane z analizą wpływu błędów pomiarowych i błędów przetwarzania numerycznego na błędy estymacji parametrycznej. Badania te dotyczyły wyznaczania prędkości propagacji płomienia

laminarnego i były prowadzone we współpracy z dr Nabiha Chaumeix z Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement CNRS (Instytut Spalania Aerotermii Reaktywności i Środowiska) w Orleanie we Francji. Wyniki badań teoretyczno-eksperymentalnych zostały przedstawione na Joint Meeting of French and Italian Section IFRF and the Combustion Institute (III.B.12) oraz opublikowane w materiałach konferencyjnych (II.E.21).

W ramach promotorstwa pomocniczego (III.K.2, III.K.3) kieruję badaniami teoretyczno-eksperymentalnymi prowadzonymi w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej. Dotyczą one hydrodynamiki hybrydowych reaktorów fluidyzacyjnych. Efektem tych prac są trzy publikacje (II.A.13, II.E.7 i II.E.8).

W najbliższej przyszłości zamierzam podjąć badania nad właściwościami dynamicznymi oraz optymalizacją wielofunkcyjnych ziaren katalizatorów porowatych integrujących funkcję katalizatora i adsorbentu lub też dwa rodzaje centrów aktywnych. Ponadto zamierzam pogłębić swoją wiedzę w zakresie zjawiska dyfuzji wieloskładnikowej z jednoczesną reakcją chemiczną w ciałach porowatych, w szczególności w zastosowaniu do fluidyzacyjnych reaktorów membranowych do produkcji wodoru. Zamierzam, w miarę możliwości finansowych, rozpocząć badania nad hydrodynamiką hybrydowych fluidyzacyjnych aparatów airlift z zastosowaniem optycznych technik pomiarowych.

6. Podsumowanie dorobku naukowego

Mój całkowity dorobek naukowy obejmuje:

- a) 1 monografię naukową (I.B.1).
- b) 23 artykułów naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie JCR, w tym 19 artykułów po doktoracie (I.B.2–I.B.11 oraz II.A.1– II.A.13).
- c) 8 artykułów naukowych w recenzowanych czasopismach spoza bazy JRC, w tym 6 artykułów po doktoracie (II.E.1– II.A.8).
- d) 13 publikacji w recenzowanych materiałach konferencyjnych¹⁶, w tym 7 publikacji po doktoracie (II.E.9– II.E.21).

Jestem autorką lub współautorką 40 referatów (w tym 20 wygłoszonych osobiście) i **18 posterów** (w tym 14 zaprezentowanych osobiście) zaprezentowanych na

¹⁶ Uwzględnione tylko materiały konferencyjne zarejestrowane pod numerem ISBN.

międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych, w tym 21 referatów i 14 posterów po doktoracie.

Pełne teksty 7¹⁷ referatów zostały zakwalifikowane do ponownej recenzji i opublikowane w czasopismach z listy JRC (4 publikacje) oraz w czasopismach spoza tej listy (3 publikacje), natomiast 13 pełnych tekstów zostało opublikowanych w materiałach konferencyjnych zarejestrowanych pod numerem ISBN (punkt (d) powyżej).

Wskaźniki bibliograficzne:

- a) Sumaryczny impact factor:** 55.74 (w tym po uzyskaniu stopnia doktora 45.94).
- b) Liczba cytowań publikacji** według bazy Web of Science (WoS): 114 (86 bez autocytowań)¹⁸.
- c) Indeks Hirscha** według bazy Web of Science (WoS): 6.
- d) Sumaryczna liczba punktów MNIŚZW:** 683 (w tym po uzyskaniu stopnia doktora 579).

7. Omówienie dorobku dydaktycznego

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora w 2010 r. w ramach dodatkowej działalności dydaktycznej prowadziłam w roku akademickim 2010/2011 zajęcia z przedmiotu *Sterowanie procesów chemicznych* na kierunku Automatyka w Dipartimento di Ingegneria Università degli Studi del Sannio w Benevento. Następnie w latach 2012 – 2015 na tej samej uczelni prowadziłam zajęcia z przedmiotu *Laboratorium metod numerycznych* na kierunku Energetyka (III.I.1). W latach 2007 – 2015 pełniłam tam również funkcję tzw. *cultore della materia* (asystent dydaktyczny). Prowadziłam wówczas część ćwiczeń i zajęć projektowych w ramach przedmiotów z zakresu inżynierii chemicznej i energetyki (pełna lista w punkcie III.I.2 załącznika 3).

Podczas mojej pracy we Włoszech byłam współpromotorem 13 prac inżynierskich i 4 prac magisterskich (III.J.1) na kierunkach Energetyka (łącznie 16 prac) i Automatyka (1 praca) oraz opiekunem naukowym jednego doktoranta (III.K.1). Tematyka tych prac jest dosyć różnorodna – od modelowania procesów adsorpcji i spalania do analizy danych eksperymentalnych z silników spalinowych.

Ponadto w ramach projektu finansowanego przez Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca (Ministerstwo Edukacji i Badań Naukowych) prowadziłam

¹⁷ Publikacje te zostały uwzględnione w sumarycznej liczbie podanej powyżej w punktach (a) i (b).

¹⁸ Na dzień 20.10.2017 r.

zajęcia dydaktyczne w Istituto Motori CNR w Neapolu oraz Bosch Centro Componenti per Veicoli S.p.A. w Modugno nt. *Zastosowania metod numerycznych do charakteryzacji procesów zachodzących w silnikach spalinowych* (III.Q.1). Adresatami tych zajęć byli uczestnicy programu szkoleniowego posiadający tytuł magistra inżyniera. W ramach innego projektu finansowanego przez MIUR prowadziłam również zajęcia dydaktyczne: *Mat.Lab – moduł dydaktycznych mający na celu zdobycie przez uczniów szkoły średniej umiejętności matematycznych na poziomie wstępnych egzaminów uniwersyteckich* w Istituto Superiore Bruno-Dorso, Ariano Irpino (III.Q.2).

W latach 2013 i 2014 w ramach programu Erasmus Teaching Staff Mobility odbyłam dwie tygodniowe wizyty dydaktyczne w Collegium Science & Techniques (Wydział Nauk i Techniki) Université d'Orléans, gdzie przeprowadziłam zajęcia dla studentów studiów drugiego stopnia na kierunku Energia i Materiały.

Obecnie w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej prowadzę szereg zajęć dydaktycznych w języku polskim i angielskim na kierunkach Inżynieria Chemiczna i Procesowa, Technologia Chemiczna oraz w ramach programu Erasmus+ (pełna lista prowadzonych zajęć w punkcie III.I.3 załącznika 3). Opracowałam programy 2 wykładów autorskich. Ponadto byłam promotorem 2 obronionych prac inżynierskich i 4 prac magisterskich na kierunku Inżynieria Chemiczna i Procesowa. Aktualnie sprawuję również opiekę naukową jako promotor pomocniczy w dwóch otwartych przewodach doktorskich (III.K.2, III.K.3) nad mgr inż. Dominiką Boroń i mgr inż. Mateuszem Prończukiem.

We wrześniu 2016 r. przyczyniłam się do podpisania umowy dwustronnej w ramach programu Erasmus+ pomiędzy Wydziałem Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej a Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio w Benevento. W ramach tej umowy we wrześniu 2016 r. zorganizowałam kurs dotyczący *Zastosowania pakietu Open Foam do symulacji obiektów reagujących chemicznie*, który poprowadził dr ing. Francesco Saverio Marra – pracownik naukowy Istituto di Ricerche sulla Combustione CNR i wykładowca na Università degli Studi del Sannio.

