

Autoreferat

PAULINA PIANKO-OPRYCH

Rozprawa habilitacyjna

**Zastosowanie metod numerycznych (CFD i FEM) w Inżynierii Chemicznej
ze szczególnym uwzględnieniem stało-tlenkowych ogniw paliwowych typu SOFC**

Dokumentacja do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

SPIS TREŚCI	Strona
1. Habilitant	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	5
4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 z 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)	
4a. Tytuł osiągnięcia naukowego	5
4b. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, tom, strony)	5
4c. omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	8
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	32

1. *Imię i nazwisko*

Paulina Pianko-Oprych

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

2012 **University of California BERKELEY, USA, Haas School of Business**

Dziedzina Nauki ekonomiczne i techniczne
Top 500 Innovators Program

2012 **Project Management Associate IPMA Level D, certyfikat Nr 402/2012**
ważny do 13/07/2017

Dziedzina Nauki ekonomiczne
Biuro Certyfikacji IPMA Polska

2012 **Studia podyplomowe, świadectwo Nr 3127**

Dziedzina Nauki ekonomiczne
Uniwersytet Szczeciński, Wydział Zarządzania i Ekonomiki Usług
Tytuł Zarządzanie Projektem Badawczym i Komercjalizacja Wyników Badań

2009 **Audytor wewnętrzny Systemu Zarządzania Jakością wg ISO 9001:2008**
Certyfikat Nr AZJ-2009-XI-C577

TUV Akademia Polska Sp. z o.o.

2007 **Kurs doskonalenia pedagogicznego dla nauczycieli akademickich**
Dyplom Nr 769

Politechnika Szczecińska, Instytut Ekonomii i Zarządzania
Tytuł Zarządzanie Projektem Badawczym i Komercjalizacja Wyników Badań

2006 Doktor nauk technicznych z wyróżnieniem

Dziedzina Nauki techniczne

Specjalność Inżynieria chemiczna i procesowa
Politechnika Szczecińska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

Promotor prof. dr hab. inż. Zdzisław Jaworski

Tytuł pracy Modelowanie przepływu dwufazowego cieczy i procesu dyspergowania w mieszalnikach statycznych

2003 Magister inżynier

Kierunek Ochrona środowiska

Specjalność Procesy i aparaty w ochronie środowiska
Politechnika Szczecińska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

Promotor prof. dr hab. inż. Zdzisław Jaworski

Tytuł pracy Model dna i powierzchni jeziora Miedwie

2000 Magister inżynier

Kierunek Inżynieria chemiczna i procesowa

Specjalność Informatyka procesowa
Politechnika Szczecińska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

Promotor prof. dr hab. inż. Zdzisław Jaworski

Tytuł pracy Symulacje procesów przenoszenia (masy, pędu i energii) w mieszalnikach statycznych przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania Fluent

3. *Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych*

1.02.2008-31.01.2017	<i>adiunkt naukowo-dydaktyczny</i>	Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
1.10.2007-31.01.2008	<i>asystent naukowo-dydaktyczny</i>	Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Szczecińska
15.12.2005-31.09.2007	<i>asystent naukowo-dydaktyczny (urlup bezpłatny)</i>	Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Szczecińska
17.10.2005-16.09.2007	<i>pracownik naukowo-badawczy</i>	Chemical Engineering Department University of Birmingham, UK
1.10.2000-30.09.2005	<i>doktorantka</i>	Studia doktoranckie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Szczecińska

4. *Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 z 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):*

a) *tytuł osiągnięcia naukowego:*

Cykl publikacji po uzyskaniu stopnia doktora na temat:

Zastosowanie metod numerycznych (CFD i FEM) w Inżynierii Chemicznej ze szczególnym uwzględnieniem stałotlenkowych ogniw paliwowych typu SOFC

b) *Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, tom, strony):*

[H-1] **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, CFD modelling of two-phase liquid-liquid flow in a SMX static mixer, 11, 3 (2009) 41-49, **Polish Journal of Chemical Technology**. DOI: 10.2478/v10026-009-0034-x.

- [H-2] **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, Prediction of liquid-liquid flow in an SMX static mixer using large eddy simulations, 64, 2 (2010) 203-212, **Chemical Papers**. DOI: 10.2478/s11696-009-0112-9.
- [H-3] **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, Modelowanie numeryczne LES burzliwego przepływu dwufazowego ciecz-ciecz w mieszalniku statycznym SMX, 49, 1 (2010) 85-86, **Inżynieria i Aparatura Chemiczna**. ISSN: 0368-0827.
- [H-4] **P. Pianko-Oprych**, Zastosowanie pozytonowej tomografii emisyjnej i numerycznej mechaniki płynów do badania warunków wytwarzania zawiesin w mieszalniku mechanicznym, 90, 8 (2011) 1561-1566, **Przemysł Chemiczny**. ISSN 0033-2496.
- [H-5] **P. Pianko-Oprych**, Analiza CFD transportu cząstek ciała stałego w płynie rozrzedzanym ścinaniem podczas laminarnego przepływu w rurze, 90, 9 (2011) 1000-1003, **Przemysł Chemiczny**.
- [H-6] **P. Pianko-Oprych**, Modelling of heat transfer in a packed bed column, 13, 4 (2011) 34-41, **Polish Journal of Chemical Technology**. DOI: 10.2478/v10026-011-0046-1.
- [H-7] **P. Pianko-Oprych**, Kryteria modelowania numerycznego niskotemperaturowej plazmy nietermicznej, 52, 5 (2013) 459-461, **Inżynieria i Aparatura Chemiczna**.
- [H-8] **P. Pianko-Oprych**, Modelowanie numeryczne reaktora z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi, 53, 1 (2014) 27-28, **Inżynieria i Aparatura Chemiczna**.
- [H-9] **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, Przegląd metod modelowania numerycznego mikrorurowych stałotlenkowych stosów ogniw paliwowych, 91, 9 (2012) 1813 – 1815, **Przemysł Chemiczny**.
- [H-10] **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, Modelowanie mikrorurowych stałotlenkowych ogniw paliwowych. Wprowadzenie do projektu SUAV, 92, 1 (2013) 51-54, **Przemysł Chemiczny**.

- [H-11] **P. Pianko-Oprych**, E. Kasilova, Z. Jaworski, Modelling of processes in a microtubular Solid Oxide Fuel Cell, 52, 5 (2013) 462-464, **Inżynieria i Aparatura Chemiczna**.
- [H-12] **P. Pianko-Oprych**, T. Zinko, Z. Jaworski, Simulation of the steady-state behaviour of a new design of a single planar Solid Oxide Fuel Cell, 18, 1, (2016) X-XX, **Polish Journal of Chemical Technology**. DOI. 10.1515/pjct-2016-0011.
- [H-13] **P. Pianko-Oprych**, E. Kasilova, Z. Jaworski, Quantification of the radiative and convective heat transfer processes and their effect on mSOFC by CFD modelling, 16, 2 (2014) 51-55, **Polish Journal of Chemical Technology**. DOI: 10.2478/pjct-2014-0029.
- [H-14] **P. Pianko-Oprych**, E. Kasilova, Z. Jaworski, CFD analysis of heat transfer in a microtubular Solid Oxide Fuel Cell stack, 35, 3 (2014) 293-304, **Chemical and Process Engineering**. DOI: 10.2478/cpe-2014-0022.
- [H-15] **P. Pianko-Oprych**, T. Zinko, Z. Jaworski, Modeling of thermal stresses in a microtubular Solid Oxide Fuel Cell stack, 300 (2015) 10-23, **Journal of Power Sources**. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.047.
- [H-16] **P. Pianko-Oprych**, T. Zinko, Z. Jaworski, Numerical analysis of thermal stresses in a new design of microtubular stack, 13, 1 (2015) 1045-1062, **Central European Journal of Chemistry**. DOI: 10.1515/chem-2015-0116.
- [H-17] **P. Pianko-Oprych**, T. Zinko, Z. Jaworski, Simulation of thermal stresses for new designs of microtubular Solid Oxide Fuel Cell stack, 40, 42 (2015) 14584-14595, **International Journal of Hydrogen Energy**. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.164.
- [H-18] **P. Pianko-Oprych**, Cell, Stack and System Modelling, Solid Oxide Fuel Cell, (2014) 1-69, Saarbrücken, **Lambert Academic Publishing**. ISBN: 978-659-62295-3.

[H-19] B. Zakrzewska, **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, Multiscale Modeling of Solid Oxide Fuel Cell Systems, 86, 7 (2014) 1029-1043, **Chemie Ingenieur Technik**, DOI: 10.1002/cite.201400022.

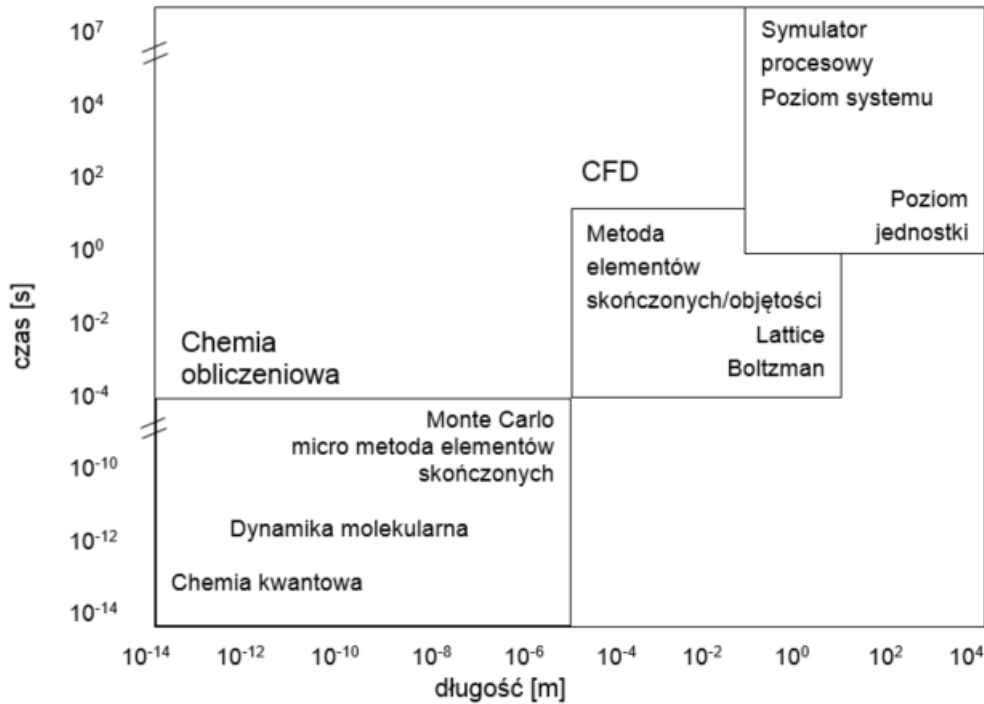
[H-20] **P. Pianko-Oprych**, Z. Jaworski, K. Kendall, rozdział 13: Cell, stack and system modelling, dostępny w książce: K. Kendall, M. Kendall, High-temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century, Fundamentals, Design and Applications, 2016 **Elsevier**, ISBN: 978-0-12-410453-2. Dostępny online od 17/11/2015 r.:
<http://store.elsevier.com/product.jsp?isbn=9780124104532&pagename=search>

Pianko

c) *omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania*

Wprowadzenie

Techniki projektowania numerycznego i rozwiązywania problemów w Inżynierii Chemicznej są dobrze znane i wiążą się z trzema paradygmatami [1]. Pierwszy paradygmat Inżynierii Chemicznej zakłada podział procesu lub technologii na operacje jednostkowe. Na przestrzeni lat opracowane zostały różne jego interpretacje [2]. Drugi paradygmat bazuje na stopniowym wprowadzaniu podstawowych praw fizyki i chemii do opisu procesów i przewidywaniu ich przebiegu za pomocą modelowania numerycznego [3]. W roku 2000 zdefiniowano trzeci paradygmat Inżynierii Chemicznej. Równolegle dokonali tego Hill [4], który zaproponował Inżynierię Produktu Chemicznego oraz zespoły kierowane przez Grew i wsp. [5] oraz Andersson i wsp. [6], którzy rozwinęli podejście wieloskalowe. W podejściu wieloskalowym, analiza procesu prowadzona jest w różnych skalach długości i czasu, zaczynając od poziomu atomów i cząstek poprzez poziom jednostkowych aparatów takich, jak mieszalnik/wymiennik ciepła/reaktor, a skończywszy na poziomie całych linii technologicznych systemów (Rys.1).



Rys. 1. Podejście wieloskalowe w kontekście skali długości i czasu [7]

Jedną z najważniejszych podstawowych metod w analizie procesów w mikroskali jest Dynamika Molekularna (MD, ang. *Molecular Dynamics*). Podejście numeryczne MD pozwala na badanie ewolucji układu oddziałujących atomów zgodnie z prawami fizyki i chemii. Śledzenie pozycji i prędkości oddziałujących ze sobą atomów jest jednak bardzo kosztowne obliczeniowo i nieefektywne w przypadku symulacji zachowania układu cechującego się skalą znacznie większą od skali molekularnej. Z drugiej strony, budowa prototypu systemu w celu oceny wydajności instalacji nie jest opłacalnym rozwiązaniem. Stosując alternatywne podejście do metod Dynamiki Molekularnej w postaci Symulatora Procesowego (PS, ang. *Process Simulator*), znajdującego się na drugim końcu skali Rys. 1, możliwe jest opracowanie nowego systemu lub poprawę wydajności istniejącego zakładu chemicznego. Przykładem symulatorów procesowych są programy takie, jak Aspen Plus, Aspen HYSYS, ChemCAD, PRO/II, które umożliwiają wykonanie szczegółowej analizy procesów chemicznych włączając w to analizę ekonomiczną [9]. Jednakże symulatory procesowe również nie są narzędziami obliczeniowymi pozbawionymi wad. Problematyczne jest zwiększenie lub zmniejszenie skali aparatów i systemów lub rozwiązywanie problemów związanych z tzw. aparatami będącymi „wąskim gardłem”.

Pomiędzy tymi dwiema technikami obliczeniowymi: Dynamiką Molekularną i Symulatorami Procesowymi, opracowano narzędzia obliczeniowe w postaci Numerycznej Mechaniki Płynów (CFD, ang. *Computational Fluid Dynamics*), które umożliwiają analizę zjawisk transportu masy, pędu i energii oraz ocenę wydajności urządzeń procesowych w skali długości od 10^{-5} do 10 m (Rys.1). Technika obliczeniowa CFD oparta jest na hipotezie ciągłości, która zakłada, że równania mechaniki ośrodków ciągłych mogą być zastosowane dla układów o strukturze cząsteczkowej. Zjawiska transportu masy, pędu i energii są opisane nieliniowymi, różniczkowymi równaniami uzupełnionymi o warunki jednoznaczności, w tym warunki brzegowe, mające zapewnić jednoznaczność rozwiązania [10]. Rozwiązanie numeryczne polega na dyskretyzacji zagadnienia różniczkowego, co prowadzi do uzyskania układu nieliniowych równań algebraicznych, który stał się ważnym przedmiotem badań przez wiele lat w Mechanice Płynów. Powszechną metodą stosowaną w Mechanice Płynów jest Metoda Elementów Skończonych (FEM, ang. *Finite Element Method*). Obok metody FEM stosuje się jeszcze Metodę Różnic Skończonych (FDM ang. *Finite Difference Method*) oraz Metodę Objętości Skończonych (FVM, ang. *Finite Volume Method*). Podstawą tych metod jest dyskretyzacja numeryczna pozwalająca na przekształcenie równań różniczkowych dla zdefiniowanych warunków początkowych i brzegowych do układu równań algebraicznych. Rozwiązanie iteracyjne układu równań algebraicznych, do momentu uzyskania zbieżności, prowadzi do wyznaczenia rozkładu prędkości, ciśnienia, temperatury i innych parametrów w przepływie. Dodatkowo, z Rys. 1 wynika, że na tym poziomie opracowana została jeszcze jedna popularna technika obliczeniowa w Inżynierii Chemicznej – metoda sieci boltzmannowskich (LBM, ang. *Lattice Boltzmann Method*) [11]. Podobnie, jak obie metody FEM i FVM, główną ideą podejścia numerycznego Lattice Boltzmana jest wypełnienie „luki” pomiędzy skalą mikro- i makro. W przypadku metody LBM zachowanie pojedynczych cząstek płynu nie jest rozpatrywane indywidualnie, tylko jako działanie grupy cząstek. Właściwości poszczególnych grup cząstek opisane są funkcją rozkładu, która jest kluczowym elementem w podejściu LBM. Można je sklasyfikować jako Lagrange’owska aproksymacja hiperboliczna równania Naviera-Stokesa. Głównym ograniczeniem stosowania metody sieci boltzmannowskich w symulacji dużych systemów w Inżynierii Chemicznej jest potrzeba ogromnej pamięci obliczeniowej stacji roboczej, na której prowadzone są obliczenia. Dlatego uznano, że dla celów ogólnych, oba problemy zarówno akademickie, jak i przemysłowe, korzystniej jest analizować przy użyciu kodów CFD, które stały się podstawą analiz w projektowaniu inżynierskim. Większość obliczeń CFD umożliwiło poprawę wydajności

analizowanych systemów, zwiększenie ich niezawodności, pewność zmiany skali, a także lepszą jakość produktu i wyższą zdolność produkcyjną instalacji [12].

Od 1960 roku międzynarodowa społeczność Inżynierii Chemicznej poświęciła wiele uwagi technice obliczeniowej CFD ze względu na ogromny wpływ analiz CFD na praktykę przemysłową [13-15]. Po raz pierwszy, wyniki CFD dostarczyły bardzo szczegółowe informacje o warunkach przepływu płynów w mieszalniku mechanicznym i w związku z tym projektowanie rozwiązania konstrukcyjnego było zgodne z żądaniami projektowymi i spełniało je bez żadnych dodatkowych założeń o makroskopowym modelu przepływu. Uzyskany z symulacji rozkład płynu był zgodny z wynikami pomiarowymi i umożliwił lepsze oraz dokładniejsze poznanie i zrozumienie zjawisk transportu masy i energii w aparacie. Pozwoliło to na ocenę wpływu zmiany parametrów geometrycznych aparatu na efektywność procesu mieszania w znacznie krótszym czasie i bez wysokich kosztów, które normalnie wynikały z kosztownych badań laboratoryjnych. Ponadto, kody CFD okazały się szczególnie użyteczne w przypadku układów, w których przeprowadzenie pomiarów z uwagi na wysoką temperaturę procesu lub w warunkach niebezpiecznych nie było możliwe. Lee i wsp. [16] dokonali przeglądu obszarów przemysłu chemicznego i zastosowań rolno-środowiskowych, w których do oceny warunków zastosowano technikę obliczeniową w postaci Numerycznej Mechaniki Płynów. W przypadku Inżynierii Chemicznej kody CFD zastosowano do modelowania mieszalników statycznych [17], mieszalników mechanicznych [18], reaktorów chemicznych [19, 20] oraz przepływów układów wielofazowych [21].

W wielu praktycznych zastosowaniach, inżynier ma do czynienia z przepływami płynów w urządzeniach o skomplikowanej geometrii, charakteryzującej się często licznymi zakrzywionymi kanałami lub układami w wielofazowymi. W tych przypadkach mogą być z powodzeniem zastosowane kody Numerycznej Mechaniki Płynów. Uniwersalność technik CFD skłoniło Zespół Modelowania Procesowego - pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Zdzisława Jaworskiego, którego jestem członkiem od 2000 roku - do zastosowania tego narzędzia badawczego w analizach wydajności urządzeń przemysłowych i projektowaniu nowych konstrukcji aparatów procesowych. Szerokie spektrum możliwości oprogramowania CFD i FEM umożliwiło współpracę członków Zespołu Modelowania Procesowego z polskimi partnerami przemysłowymi: SODA Polska, Ciech SA, Polchar Sp. z o.o., Weber Polska, jak również przemysłowymi partnerami międzynarodowymi: Adelan Ltd, (UK); ALMUS (Szwajcaria); CNR (Włochy); efceco (Niemcy); HyGear (Holandia), sunfire (Niemcy), Unilever Port Sunlight (UK), czy też Syngenta (UK).

Przedstawienie najważniejszych osiągnięć własnych zawartych w pracach stanowiących cykl publikacji na temat:

**Zastosowanie metod numerycznych (CFD i FEM) w Inżynierii Chemicznej
ze szczególnym uwzględnieniem stało-tlenkowych ogniw paliwowych typu SOFC**

Badania numeryczne początkowo objęły modelowanie laminarnego i burzliwego przepływu dwufazowego cieczy w mieszalniku statycznym, symulacje stężonych zawiesin ciała stałego w cieczy w mieszalniku mechanicznym i rurze, a następnie ewoluowały w kierunku bardziej złożonych procesów i aparatów, takich jak reaktor z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi czy wysokotemperaturowe stałotlenkowe ogniwa paliwowe. Obliczenia numeryczne przeprowadzono z użyciem komercyjnych pakietów obliczeniowych CFD firmy ANSYS – Fluent i COMSOL Multiphysics oraz FEM ANSYS – Mechanical wraz z dodatkowymi modułami obliczeniowymi i własnymi funkcjami zdefiniowanymi przez użytkownika kodu.

W początkowej fazie badań zajęto się modelowaniem przepływu dwufazowego płynów w mieszalniku statycznym w oparciu o dwa podejścia numeryczne [**H-1**]. Podstawowym celem badań była ocena możliwości **predykcji dynamiki dyspersji w układzie typu ciecz-ciecz w mieszalniku statycznym typu SMX** w warunkach przepływu burzliwego, przy użyciu symulacji. Podczas pierwszego etapu badań przeprowadzono obliczenia CFD za pomocą dwóch podejść numerycznych: RANS (ang. *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) i LES (ang. *Large Eddy Simulations*) dla trzech przypadków układów o różnej relacji gęstości fazy ciągłej i rozproszonej. Analizie poddano wpływ oddziaływania siły odśrodkowej związanej z różnicą gęstości cieczy na rozkład modelowanych cieczy w przestrzeni mieszalnika SMX. Wyniki symulacji numerycznych **RANS i LES** porównano z danymi pomiarowymi i uzyskano zgodność na poziomie 89%. Przewidywane wartości spadku ciśnienia w mieszalniku SMX z symulacji LES i RANS zgadzały się z wartościami doświadczalnymi w zakresie odchylenia standardowego 77-93%. Stopień homogenizacji uzyskany z symulacji RANS był wyższy od wartości uzyskanych z symulacji LES, co stanowiło potwierdzenie o mniejszym stopniu lokalnej segregacji mieszanych cieczy przy występowaniu różnicy gęstości w przypadku symulacji LES w stanie nieustalonym i tym samym o mniejszym wpływie siły odśrodkowej. W oparciu o przeprowadzone badania stwierdzono, że wyniki LES były bliższe wartościom doświadczalnym niż te z RANS. W pracy [**H-1**] przedstawiono także **modelowanie**

numeryczne procesu rozbijania kropeł cieczy w układzie dwufazowym przy zastosowaniu **Kwadraturowej Metody Momentowej** (QMOM ang. *Quadrature Methode of Moments*) w połączeniu z wcześniej wspomnianymi podejściami numerycznymi RANS i LES. Rozwiązane w kodzie CFD równania bilansu populacji za pomocą kwadraturowej metody momentowej, QMOM, pozwoliły na oszacowanie liczby i średniej średnicy kropli powstałych wskutek procesów rozbijania cieczy w dowolnym miejscu mieszalnika statycznego SMX podczas dwufazowego przepływu płynów i porównanie z danymi eksperymentalnymi. Zaletą opracowanej procedury modelowania numerycznego QMOM była nie tylko zdolność do ujęcia w modelu oddziaływań pomiędzy kroplami a fazą ciągłą, ale także uwzględnienie wzajemnych relacji pomiędzy kroplami poprzez ujęcie mechanizmów **rozbijania i łączenia kropeł**. Z punktu widzenia inżyniera wydaje się, że możliwość **predykcji dynamiki dyspersji w układzie typu ciecz-ciecz**, jaką zapewnia opracowana procedura modelowania jest szczególnie przydatna w zagadnieniach związanych z przemianami chemicznymi, podczas których znajomość wielkości elementów fazy rozproszonej jest istotna, co zostało szerzej omówione w pracy [H-1].

Wysoka zgodność wyników uzyskanych podczas wstępnych symulacji LES dla przepływu dwufazowego w mieszalniku statycznym typu SMX [H-1], zachęciła do rozszerzenia badań numerycznych nad oddziaływaniem siły odśrodkowej, wynikającej z występowania różnic gęstości mieszanych cieczy, czego efektem były prace [H-2, H-3]. W metodzie LES zastosowano model lepkości podsiatkowej Smagorinsky'ego-Lilly dla liczb Reynoldsa, $Re = 5000$ i $10\ 000$ [H-2] oraz $18\ 000$ [H-3]. Postanowiono dokładniej prześledzić **zmiany wirowości płynów** wewnątrz wkładki mieszalnika, przyjmując, że wirowość jest swoistym miernikiem tendencji płynów o różnej gęstości do segregacji wskutek sił odśrodkowych. W oparciu o uzyskane z symulacji LES i RANS rozkłady konturów wielkości wirowości stwierdzono, że wahania lokalnych wartości wirowości i skrętności płynu uzyskane z symulacji LES były o rząd wielkości wyższe od odpowiadającym im średnim wartościom uzyskanym z symulacji RANS w stanie ustalonym. Spostrzeżenie to prowadziło do wniosku, że występowanie silnych fluktuacji przepływu płynów w mieszalniku SMX powoduje powstanie lokalnych oddziaływań siły odśrodkowej, co sprzyja lokalnej segregacji mieszanych cieczy przy występowaniu różnicy gęstości. Analiza rozkładu udziału objętościowego fazy rozproszonej pokazała, że po czwartej wkładce SMX **stopień zmieszania mieszanin** dla faz ciekłych o tej samej wartości gęstości był na zadowalającym poziomie ($COV \approx 10^{-3}$, ang. *Coefficient of Variation*), podczas gdy dla dwóch pozostałych analizowanych przypadków

przy występowaniu różnicy gęstości cieczy ulegał on pogorszeniu. Jednakże poziom stopnia zmieszania uzyskany z symulacji LES był wyższy, o czym świadczyły niższe wartości współczynnika efektywności mieszania, COV, w porównaniu do analogicznych z symulacji RANS. Stanowiło to potwierdzenie, że wyniki symulacji LES w stanie nieustalonym wykazały mniejszą tendencję płynów do segregacji wskutek lepszej predykcji rozkładu stężeń mieszanych faz w przestrzeni mieszalnika SMX. Udowodniono tym samym, że podejście to stanowi cenne narzędzie do **prognozowania stopnia zmieszania układów dwufazowych w mieszalnikach statycznych**, będące często jednym z wyzwań stawianym Inżynierii Chemicznej [H-2, H-3].

Warunki wytwarzania zawiesin w mieszalniku mechanicznym wyposażonym w pionowe przegrody i płaskie dno także zostały przebadane przy użyciu kodów CFD [H-4]. Mieszanie jest jedną z najbardziej typowych operacji jednostkowych stosowanych w przemyśle chemicznym, ale również jest jedną z najbardziej skomplikowanych. W celu prawidłowego określenia warunków hydrodynamicznych w układzie ciecz-ciało stałe w mieszalniku mechanicznym przeprowadzono symulacje numeryczne obejmujące mieszanie układu jednofazowego (woda) oraz układu dwufazowego złożonego z cząstek ciała stałego o średnicy w zakresie od 2,85 do 3,3 mm o wysokim stężeniu masowym 10% w wodzie z dodatkiem soli. Zastosowano mieszadło z pochylonymi łopatkami PBT, które pracowało w dwóch systemach, jako mieszadło pompujące ciecz w kierunku dna mieszalnika, PBTD, oraz w kierunku powierzchni swobodnej, PBTU. Symulacje numeryczne przeprowadzono przy użyciu metody Reynoldsa uśredniania równań Naviera-Stokesa (RANS) z **podejściem wielofazowym typu Euler-Euler (EE)**, w którym obie fazy traktowane są łącznie i uwzględniane są ich cechy uśrednione w komórce obliczeniowej. W celu uwzględnienia oddziaływania pomiędzy przegrodami, a poruszającymi się łopatkami mieszadła PBT wygenerowano siatkę numeryczną przy użyciu metody wielokrotnego układu odniesienia **MRF (ang. Multiple References Frames)**. Przy zastosowaniu podejścia MRF obszar obliczeniowy został podzielony na dwa podobszary: pierwszy obejmował wszystkie elementy obracające się, do których zaliczono wał mieszadła i mieszadło oraz drugi podobszar nieruchomych elementów, do których należały przegrody, ściany i dno mieszalnika. Obszary te zostały oddzielone od siebie za pośrednictwem pionowej cylindrycznej powierzchni znacznie oddalonej od bezpośredniego obszaru mieszadła, aby zminimalizować jej wpływ na wyniki modelowania. Uzyskane z symulacji **profile średnich wartości składowych prędkości** fazy ciągłej pozbawionej cząstek ciała stałego (przepływ jednofazowy) oraz profile fazy ciągłej

w obecności fazy rozproszonej i profile cząstek ciała stałego reprezentowane przez szklane kulki (przepływ dwufazowy) porównano z profilami uzyskanymi z pomiarów **PEPT** (ang. *Positron Emission Particle Tracking*) i **PIV** (ang. *Particle Image Velocimetry*) omówionymi szczegółowo w ramach prac [A-1, A-2]. Dobrą zgodność określoną za pomocą kryterium dokładności przewidywań CFD, Ψ , na poziomie 1,1 – 2,7 wyników numerycznych z danymi doświadczalnymi PEPT otrzymano dla składowych osiowej i promieniowej prędkości w przypadku obu typów mieszadła PBTD i PBTU. Należy przy tym podkreślić, że wartość parametru, Ψ , mniejsza od 2 świadczy o wysokiej jakości przyjętej procedury modelowania numerycznego. Dla obu mieszadeł zanotowano mniejszy stopień zgodności wyników numerycznych składowej stycznej prędkości w porównaniu do wartości PEPT na poziomie $\Psi \approx 3,5 - 3,8$ [H-4]. Ponadto zanotowano, że cząstki ciała stałego szybciej poruszały się niż faza ciekła w kierunku dna zbiornika i wolniej w kierunku powierzchni swobodnej w wyniku oddziaływania sił grawitacji. Obecność cząstek ciała stałego w układzie znacząco wpłynęła na rozkład pola prędkości fazy ciągłej, a ocena wielkości tego wpływu dla różnych stężeń fazy rozproszonej jest jednym z istotnych zagadnień w analizie procesu mieszania. Praktyczny aspekt wykorzystania tych wyników CFD znaleźć można w przypadku procesu sterylizacji, który standardowo przeprowadza się poprzez intensywne ogrzewanie układu, a wiedza związana z profilami prędkości płynu i temperatury ma zasadnicze znaczenie, gdyż umożliwia określenie obszarów najwolniej ogrzewanych przy uzyskaniu bezpiecznego produktu. Głównym celem zatem jest przeprowadzenie procesu sterylizacji najszybszych cząstek bez przygotowania wolniejszych cząstek. Skuteczne monitorowanie w czasie rzeczywistym procesu sterylizacji i mieszania jest zadaniem skomplikowanym i wymaga dostępu do wyspecjalizowanego sprzętu, takiego jak technika pomiarowa PEPT, która jest wprawdzie nieinwazyjną techniką śledzenia ruchu elementów, ale wykorzystuje radionuklidy emitujące pozytony powstałe wskutek rozpadu substancji promieniotwórczej. Metoda PEPT jest bardzo kosztowna i wymaga wyszkolonego personelu oraz doświadczenia w pracy z materiałami promieniotwórczymi, podczas gdy metoda CFD umożliwia wykonanie symulacji procesu ogrzewania płynów przez konwekcję podczas sterylizacji lub analizę procesu **mieszania stężonych zawiesin ciała stałego** [H-4]. W publikacji [H-4] uwzględniono **oddziaływania międzyfazowe** za pomocą siły oporu opływu fazy ciągłej wokół cząstek fazy rozproszonej, siły bezwładności związane z przyspieszeniem, siły nośnej wywołanej przez odkształcenia elementów płynu wskutek ich obrotu. Stwierdzono, że tylko siła oporu wywierała znaczny wpływ na pole przepływu płynu w mieszalniku mechanicznym w zadanych warunkach

operacyjnych. Ponadto, opracowane podejście numeryczne pozwoliło również na dokładną **predykcję minimalnego nakładu energii potrzebnej do wytworzenia zawiesin cząstek** ciała stałego w warunkach operacyjnych. Należy podkreślić dobrą zgodność wartości liczby przepływu uzyskanej z symulacji CFD dla przepływu jednofazowego z danymi literaturowymi dla obu mieszadeł PBDT i PBTU (błąd względny, σ , na poziomie 1,6 - 5,4%) [H-4].

Zastosowanie kodu CFD pozwoliło na analizę procesu **transportu cząstek w płynie rozrzedzanym ścinaniem podczas laminarnego przepływu w rurze**. Celem było określenie intensywności procesu mieszania cząstek ciała stałego (alginian sodu) w płynie nienewtonowskim – wodny roztwór CMC (karboksymetyloceluloza) i skrócenie czasu przy użyciu podejścia Euler - Euler [H-5]. **Zachowanie cieczy rozrzedzanej ścinaniem**, która spełnia prawo potęgowe Ostwalda de Waele opisano modelem lepkości pozornej cieczy uzależnionej od szybkości ścinania. Symulacje burzliwego przepływu typu ciecz-ciało stałe wykonano przy **stężeniu fazy rozproszonej równej 25%** i średnicach cząstek 2, 4 i 9 mm. Opracowane podejście numeryczne zastosowano do zbadania wpływu średnicy cząstek ciała stałego i stężenia fazy rozproszonej, prędkości mieszaniny i reologii płynu na profile prędkości obu faz oraz spadek ciśnienia podczas przepływu płynu w rurze. W celu weryfikacji poprawności obliczeń numerycznych dokonano porównania profili prędkości ciała stałego i fazy ciągłej przy poziomym przepływie w rurze z wartościami pomiarowymi PEPT. Bezwymiarowy **spadek ciśnienia** z CFD porównano z wartościami współczynników oporu przepływu obliczonymi z korelacji literaturowej. Zastosowane podejście numeryczne pozwoliło na otrzymanie **profilu prędkości ciała stałego** zbliżonych do rozkładów doświadczalnych przy założeniu przepływu w płynie nienewtonowskim i wysokim stężeniu fazy rozproszonej do 25%. Dokładność przewidywań numerycznych np. spadku ciśnienia w układzie stężonej zawiesiny ulegała pogorszeniu od 4,7 do 11% w przypadku wzrostu średnicy cząstek, a wzrastała gdy zwiększano stopień gęstości siatki numerycznej do rozmiaru 796 tysięcy komórek obliczeniowych [H-5]. Wyniki te mają istotne znaczenie dla przemysłowych przepływów wielofazowych typu ciecz-ciało stałe, kiedy czas transportu cząstek ciała stałego w obszarze ogrzewanym musi być znany, ze względu na długość obróbki termicznej, mającej często decydujące znaczenie dla całego procesu technologicznego.

Technika CFD z powodzeniem została również zastosowana w modelowaniu procesu przenoszenia ciepła w kolumnie wypełnionej. Analiza procesu wymiany ciepła w kolumnach z wypełnieniem jest często spotykana w praktyce inżynierskiej ze względu na szerokie zastosowanie kolumn w przemyśle chemicznym, w procesach produkcji energii i przemyśle

petrochemicznym. Niejednorodny rozkład wypełnienia w kolumnie i różna porowatość złoża wpływają na pole przepływu fazy gazowej i wydajność kolumny. Znajomość charakterystyki wymiany ciepła w kolumnie wpływa na wydajność przebiegających wewnątrz złoża procesów, dlatego też jest tak bardzo istotna dla celów praktycznych. Stąd podjęto próbę **integracji wielofazowego przepływu płynów i wymiany ciepła w kolumnie z wypełnieniem** podczas symulacji numerycznych przeprowadzonych w warunkach laminarnego i burzliwego przepływu w stanie ustalonym dla zakresu liczb Reynoldsa od 8 do 556 [H-6]. Opracowane podejście numeryczne bazowało na metodzie uśredniania Reynoldsa równań Naviera-Stokesa w połączeniu z modelem medium porowatego. Model ten umożliwił symulację przepływu płynu przez porowatą strukturę złoża. Warunki przepływu burzliwego zdefiniowano za pośrednictwem standardowego modelu burzliwości $k-\varepsilon$ z przyścienną funkcją logarytmiczną. Uzyskane z symulacji osiowe i promieniowe profile temperatur porównano z danymi eksperymentalnymi i wartościami wyznaczonymi z literaturowego modelu 2DADPF [H-6]. Stwierdzono, że temperatura fazy gazowej wewnątrz kolumny w określonym położeniu była stała i równa temperaturze ściany. Podobne spostrzeżenia zostały odnotowane podczas pomiarów. Weryfikacji eksperymentu numerycznego dokonano w oparciu o porównanie wartości spadku ciśnienia z modelowania CFD z wartościami wyznaczonymi z równania Erguna i błąd względny wyniósł 1,2%. Profile temperaturowe w warunkach przepływu laminarnego były jednolite, natomiast wzrost liczby Reynoldsa i przejście w obszar **przepływu burzliwego doprowadziły do niejednorodnych profili temperatur** w zakresie 293 do 373 K na wybranej wysokości kolumny. Niejednorodność rozkładu temperatury na danej wysokości kolumny tłumaczy się różnym czasem przebywania przepływającego gazu wewnątrz złoża. Różnica pomiędzy współczynnikiem przenikania ciepła wyznaczonym z symulacji a obliczonym w warunkach przepływu płynu laminarnego wyniosła 26,2%. Natomiast w warunkach przepływu burzliwego uzyskano lepszy poziom zgodności pomiędzy obliczonym a z symulacji współczynnikiem przenikania ciepła w wysokości 2,9% dla liczby Reynoldsa równej 378 [H-6]. Rozbieżności pomiędzy wartościami współczynnika przenikania ciepła uzyskanymi z symulacji CFD a obliczonymi na podstawie wartości równań literaturowych mogłyby być niższe, gdyby właściwości płynów zdefiniowane w symulacji były zależne od lokalnych wartości temperatur. Należy podkreślić, że opracowane podejście numeryczne pozwoliło z dobrą dokładnością na predykcję profili temperatur wewnątrz porowatego złoża kolumny.

Możliwości techniki CFD zostały dostrzeżone także w innych dziedzinach Inżynierii Chemicznej i nie ograniczały się tylko do zagadnień związanych z mieszaniem układów jedno- i wielofazowych czy wymiany ciepła, ale również objęły modelowanie numeryczne reaktora z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi (DBD, ang. *Dielectric Barrier Discharge reactor*). Reaktory plazmowe z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi typu DBD są najczęściej wykorzystywanymi w przemyśle urządzeniami, będącymi źródłem nietermicznej plazmy niskotemperaturowej stosowanej w technologiach związanych z ochroną środowiska. Ozon wygenerowany w wyładowaniach barierowych stosowany jest do oczyszczania Lotnych Związków Organicznych LZO (VOC, ang. *Volatile Organic Compounds*), które powstają między innymi w procesach chemicznych, lakierniczych, przy spalaniu odpadów poszpitalnych czy produkcji opakowań z tworzyw sztucznych. Zjawiska towarzyszące produkcji ozonu w obszarze wyładowania reaktora typu DBD, rozpad LZO z zanieczyszczonych gazów, a także wybór geometrii i warunków pracy reaktora z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi wraz ze zdefiniowaniem charakterystyk układu zasilającego jest zadaniem niezwykle trudnym. Ważny jest dobór odpowiednich parametrów operacyjnych układu z uwagi na nieliniowy charakter zjawisk, przebiegających podczas wyładowań elektrycznych, które w skuteczny sposób determinują właściwości ozonu i parametry wytwarzanej plazmy odgrywają kluczową rolę. Laboratoryjne badania eksperymentalne nad generowaniem plazmy są bardzo kosztowne, alternatywą jest zatem modelowanie numeryczne zjawisk przebiegających w reaktorach plazmowych z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi [H-7, H-8], mające na celu ocenę wpływu temperatury, szybkości przepływu powietrza i gęstości prądu na rozkład ozonu.

Zaproponowane podejście numeryczne łączy procesy fizyczne przebiegające w reaktorze typu DBD ze zjawiskami chemicznymi tworzenia ozonu i destrukcji lotnych związków organicznych w gazie przemysłowym. Kompletny model numeryczny reaktora typu DBD składa się z trzech składowych: w pierwszej części symulacje obejmują hydrodynamikę i dyfuzję zanieczyszczeń w obszarze wyładowania, w drugiej części uwzględniany jest model kinetyczny procesu generowania ozonu i aktywnych składników (e, O, O₂, O₃), a następnie w trzeciej części aktywne związki reagują z lotnymi związkami organicznymi, w tym toksyczny octan n-butyłu zostaje przekształcony w CO, CO₂ i parę wodną [H-8]. Proces modelowania został pomyślnie wykonany przy użyciu komercyjnego kodu CFD COMSOL Multiphysics z dodatkowym modułem Plazma. W obliczeniach zastosowano metodę Reynoldsa uśredniania równań Naviera-Stokesa (RANS). Układ równań składał się z równania ciągłości, bilansu pędu

i masy w stanie ustalonym dla gazu wraz z uwzględnieniem równań definiujących dynamikę plazmy w reaktorze plazmowym z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi w postaci równań ciągłości gęstości elektronowej i rozkładu energii kinetycznej, połączonych z równaniem Poissona, definiującym pole elektrostatyczne wytworzone wewnątrz reaktora plazmowego. Model kinetyczny generowania aktywnych składników (e, O, O₂, O₃) w tlenie w obszarze wyładowania reaktora obejmował 12 składników i 14 reakcji oddziaływania pomiędzy elektronami a składnikami gazu. Model został zaimplementowany z bazy danych PHELPS. **Kompletny model kinetyczny** został szczegółowo opisany w [H-7]. Z symulacji CFD uzyskano całkowity stopień destrukcji octanu n-butyłu, podczas gdy z pomiarów wartość tą oszacowano jako 95%. Rozbieżność między pomiarową wartością sprawności destrukcji a wartością modelową wynika z uproszczeń przyjętych w zaproponowanym podejściu numerycznym. Niemniej jednak należy podkreślić, że **stężenia składników wykazały dobrą zgodność z danymi pomiarowymi** (błąd względny 5%). Rozkład zanieczyszczeń zależy od grubości szczeliny wyładowczej, początkowego stężenia składników i stężenia aktywnych związków, a także właściwości elektrycznych wyładowania. Zmiana tych parametrów w opracowanym podejściu numerycznym [H-8] nie jest bardzo trudna, a pozwala na ocenę warunków roboczych podczas procesu rozkładu LZO w reaktorze typu DBD. **Kryteria modelowania numerycznego niskotemperaturowej plazmy nietermicznej** pomocne w procesie projektowania reaktorów typu DBD zostały zdefiniowane w [H-7].

Doświadczenie zdobyte podczas zastosowania z powodzeniem kodów CFD w analizach zjawisk transportu w warunkach przepływów jednofazowych, układach dyspersyjnych typu ciecz-ciecz i układach wielofazowych typu ciecz-ciało stałe w warunkach burzliwych i układach z towarzyszącą reakcją chemiczną, zachęciły do użycia narzędzi numerycznych także do analiz ogniw paliwowych w ramach czterech kolejnych grantów 7 Programu Ramowego. Pierwszym przykładem **wieloskalowego podejścia**, obejmującego złożone zależności pomiędzy parametrami w makro- i mikroskali, wielofazowość i elektrochemiczne reakcje zachodzące w stało-tlenkowych wysokotemperaturowych ogniwach paliwowych typu SOFC (ang. *Solid Oxide Fuel Cell*) na poziomie pojedynczego ogniwa, stosu i systemu zasilania wyposażonego w ogniwa jest praca [H-9]. **Praktyczne zastosowanie technik numerycznych CFD** w analizach **mikro-rurowego ogniwa paliwowego typu SOFC** zostało przedstawione w ramach Europejskiego projektu 7 Programu Ramowego o akronimie SUAV [H-10]. Nadrzędnym celem przedstawionego podejścia numerycznego SOFC było formułowanie modeli o różnym stopniu dokładności w celu wsparcia fazy projektowania i **optymalizacji**

systemu zasilania wyposażonego w **mikro-rurowe ogniwa paliwowe typu SOFC (mSOFC)** opracowane w ramach projektu SUAV na potrzeby bezzałogowego pojazdu powietrznego mini-UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*). Wyniki symulacji CFD pozwoliły na bardziej dokładną predykcję warunków operacyjnych pracy ogniw paliwowych typu mSOFC i konfiguracji składowych systemu zasilania. Przykładem może być uproszczony **model 2D pojedynczego ogniwa mikrorurowego typu SOFC** przedstawiony w pracy [H-11]. Model uwzględniał zjawiska termiczne i elektrochemiczne zachodzące w ogniwie mSOFC w połączeniu z procesem dyfuzji i hydrodynamiką. Do modelowania strat aktywacji dla anody zastosowano równanie Butlera-Volmera dla pojedynczej reakcji elektronu, podczas gdy straty stężeniowe zostały pominięte w tym uproszczonym podejściu. Ponadto założono przypadek izotermiczny, co oznaczało, że gęstość prądu wymiany nie zmienia się więcej niż 20% wzdłuż długości ogniwa paliwowego mSOFC. Mimo wielu uproszczeń, **charakterystyki napięcia i mocy** generowanej w ogniwie zostały **odwzorowane prawidłowo** i były ilościowo zbliżone do charakterystyk eksperymentalnych. Kolejne obliczenia przeprowadzono dla **modelu numerycznego 3D pojedynczego płaskiego ogniwa paliwowego SOFC (pSOFC – ang. planar SOFC)**, który obejmował kanały paliwa i powietrza, porowate elektrody: anodę i katodę oraz elektrolit i miał na celu **oszacowanie wydajności elektrycznej i termicznej ogniwa** [H-12]. Znajomość rozkładu temperatury w ogniwach paliwowych SOFC uzyskana z symulacji numerycznych jest bardzo przydatna, gdyż to temperatura wywiera istotny wpływ na mechanizm reakcji spalania i tym samym wpływa na gęstość prądu. Dlatego też, podstawowe równania bilansu ogniwa paliwowego zostały zbudowane w oparciu o równania transportu masy i energii oraz równania ewolucji potencjału elektrycznego, a także odpowiednich równań domknięcia, równań konstytutywnych, ujmujących odpowiednio przejście jonów tlenu od katody do anody, powstawanie lub zanikanie składników wskutek przebiegu reakcji elektrochemicznej na powierzchni pomiędzy elektrolitem a elektrodami. W przypadku płaskiego ogniwa paliwowego typu SOFC udział masowy wodoru znacznie zmieniał się po przekątnej płytce ogniwa od wlotu do powierzchni wylotowej paliwa w wyniku reakcji elektrochemicznej. Stopień zużycia wodoru i tlenu, jak również szybkość powstawiania produktu reakcji utleniania (wody) definiowała rozkład gęstości prądu w ogniwie. Obszary o najwyższej wartości gęstości prądu występowały w tych samych rejonach, gdzie zanotowano najwyższe wartości współczynnika utylizacji paliwa. Charakterystyka prądowo-napięciowa całego ogniwa uzyskana z symulacji CFD zgadzała się z krzywymi uzyskanymi z danych eksperymentalnych dla napięcia roboczego wynoszącego 0,7, 0,9 i 1,1 V, natomiast przy

niższych wartościach napięcia równych 0,3 i 0,5 V zauważono znaczny spadek wartości **gęstości prądu, co jest efektem lokalnego niedoboru strumienia masowego paliwa**. Ponadto zauważono, że **rozkład temperatur** charakteryzował się **wysokim stopniem niejednorodności**, które może prowadzić do miejscowych naprężeń mechaniczno-termicznych i może skutkować uszkodzeniem ogniwa paliwowego.

Zbyt wysoka temperatura wewnątrz ogniwa paliwowego oznacza też szybsze zużycie paliwa i pogarsza żywotność materiałów, z których wykonane jest ogniwo. Z drugiej strony zbyt niskie temperatury powodują spadek mocy. W celu uniknięcia uszkodzenia ogniw paliwowych w stosach SOFC i zminimalizowania ryzyka wystąpienia gradientów termicznych konieczne jest zapewnienie jednolitego rozkładu temperatur. **Znajomość mechanizmów transportu ciepła** jest ważnym zagadnieniem w **rozwoju stosów wysokotemperaturowych ogniwa paliwowych** ze względu na zależność temperaturową właściwości SOFC. Aby lepiej poznać zasady lokalnej wymiany ciepła w stosie ogniw paliwowych typu SOFC wykonano szereg symulacji numerycznych omówionych szczegółowo w pracach [H-13, H-14]. Ocenę wydajności stosu ogniw paliwowych wykonano w oparciu o symulacje CFD dla podstosu złożonego z 16 mikro-rurowych ogniw paliwowych typu SOFC. Podstos mSOFC stanowił element pełnego stosu zawierającego 64 ogniwa paliwowe. Opracowany model stosu ogniw mSOFC miał na celu określenie wymiany ciepła pomiędzy ogniwami paliwowymi i strumieniem powietrza przepływającym przez stos oraz oszacowanie rozkładu temperatur wewnątrz stosu. W symulacjach przyjęto stałą wartość strumienia ciepła wzdłuż aktywnej części ogniw paliwowych oszacowaną w trakcie modelowania pojedynczego ogniwa z uwzględnieniem oddziaływań elektrochemicznych. W drugim przypadku przyjęto wielkość strumienia ciepła wyznaczoną analitycznie w oparciu o dane doświadczalne i krzywą charakterystyki prądowo-napięciowej V-I. W opracowanym podejściu numerycznym uwzględniono transfer energii zarówno na drodze promieniowania, jak i konwekcji ciepła. Przyjęte wielkości strumienia ciepła odnosiły się do wartości napięcia ogniwa równej 0,7 V. W oparciu o przeprowadzone obliczenia stwierdzono, że promieniowanie stanowiło około 20% całkowitego strumienia ciepła dla obszaru aktywnej powierzchni ogniw, co oznaczało, że **transfer ciepła odbywał się głównie na drodze konwekcji ciepła i był to mechanizm dominujący nad promieniowaniem** [H-13]. Dokonano także oceny wpływu strat ciepła na rozkłady temperatur w stosie ogniw paliwowych mSOFC. Analiza zjawisk transportu energii w tym przypadku także bazowała na różnej metodzie definiowania strumienia ciepła na aktywnej powierzchni rur ogniw paliwowych i **ocenie wpływu strat ciepła przez ściany**

stosu. Analiza procesów nieustalonych w stosie przy przyjęciu skrajnych wartości strumienia ciepła miała na celu zasymulowanie pracy ogniw pod różnym obciążeniem i przy różnych trybach lotu bezzałogowego pojazdu lotniczego zasilanego ogniwami paliwowymi. Rozpatrzono trzy przypadki różnych wartości strat ciepła wynoszących odpowiednio 5, 10 i 50% wartości sumarycznego strumienia ciepła i dokonano porównania z idealnym przypadkiem stosu ogniw mSOFC bez żadnych strat ciepła przez ściany stosu [H-14]. Wyniki symulacji pokazały, że w przypadku strat ciepła do wartości 10% strumienia ciepła reakcji, straty stosu mSOFC miały niski wpływ na warunki termiczne stosu. Jednakże zauważono znaczący wzrost strat ciepła stosu wraz ze zmniejszeniem prędkości przepływu chłodzącego powietrza szczególnie dla przypadku, gdy założono straty ciepła na poziomie 50%. Ponadto stwierdzono, że maksymalna różnica temperatur pomiędzy rurą ogniw paliwowych zlokalizowaną w narożniku stosu i tą położoną w środku stosu wynosiła około 50°C dla obu analizowanych przypadków przy prędkościach przepływającego powietrza wynoszących odpowiednio 2,0 i 8,5 m/s i wartościach strat ciepła: 0, 5 i 10%. Natomiast w przypadku strat ciepła na poziomie 50%, maksymalna różnica temperatur pomiędzy ogniwami paliwowymi położonymi w skrajnych lokalizacjach stosu była znacznie wyższa. W drugim podejściu numerycznym poddano ocenie wpływ oddziaływań elektrochemicznych na rozkład temperatur wewnątrz stosu. Stwierdzono, że dla wybranych natężeń przepływu powietrza wpływ zaimplementowanych skrajnych wartości strumienia ciepła tylko nieznacznie prowadził do wzrostu maksymalnej wartości temperatury wewnątrz stosu mSOFC, a rozkłady temperatur wzdłuż ogniw były tylko nieznacznie wyższe. Uzyskane z symulacji CFD wyniki dla stosu ogniw paliwowych pozwoliły na zwiększenie wiedzy w zakresie wymiany ciepła w stosie mSOFC i tym samym stanowiły przydatne wskazówki do optymalizacji konstrukcji stosu w celu zapewnienia właściwego chłodzenia ogniw w stosie, aby zapobiec ich ewentualnemu przegrzaniu i uszkodzeniu. W oparciu o wyniki CFD partnerzy projektu SUAV dokonali odpowiedniego doboru temperatury wlotowej i natężenia przepływu powietrza w stosie mSOFC. Możliwe było utrzymanie temperatury operacyjnej stosu poniżej dopuszczalnej skrajnej wartości maksymalnej, dzięki czemu uniknięto dużych gradientów temperatur i czas życia ogniw paliwowych uległ wydłużeniu.

Poprzednie prace numeryczne [H-13, H-14] dowiodły, że średnia temperatura ogniwa paliwowego może być skutecznie monitorowana i kontrolowana poprzez zmianę natężenia przepływu powietrza doprowadzanego do kanału katody. Niemniej jednak w dalszym ciągu temperatura pracy ogniw paliwowych typu SOFC jest dość wysoka, znacznie powyżej 650°C

i wpływa na termomechaniczne właściwości stosu. Dodatkowo, wysokie temperatury pracy prowadzą do powstania naprężeń termicznych w stosie, głównie w związku z różnymi wartościami współczynników rozszerzalności termicznej elementów ogniwa paliwowego. Naprężenia termiczne mogą z kolei prowadzić do pewnej niestabilności konstrukcji i pęknięcia mikrostruktur ogniw. Dlatego też, podjęto się **analizy naprężeń termicznych w mikrorurowym stosie ogniw SOFC** wraz ze wskazaniem potencjalnych miejsc stosu narażonych na uszkodzenia. Analizę tą przeprowadzono w oparciu o dwa narzędzia numeryczne: technikę **CFD i Obliczeniową Mechanikę Strukturalną (CSM** – ang. *Computational Structural Mechanics*) wykorzystującą **Metodę Elementów Skończonych (FEM** – ang. *Finite Element Method*) przedstawioną w pracy [H-15]. Pełne podejście numeryczne zakłada połączenie równań transportu masy, pędu i energii z reakcją elektrochemiczną oraz równaniem potencjału elektrochemicznego (model hydrodynamiczno-termiczny) wraz z całkowitymi wartościami deformacji i naprężeniami materiałów stosu (model termiczno-wytrzymałościowy). Pierwsze narzędzie umożliwia wykonanie obliczeń hydrodynamicznych i termicznych. W wyniku tych obliczeń uzyskano rozkład temperatur w stosie, który następnie zaimportowano do drugiego narzędzia służącego do obliczeń wytrzymałościowych, obejmujących **wyznaczenie rozkładu naprężeń szczątkowych i operacyjnych oraz naprężeń zastępczych (von Misesa) w materiale ceramicznym ogniwa**. Symulacje przeprowadzono dla stosu 48 ogniw paliwowych typu mSOFC rozmieszczonych cylindrycznie na obwodzie po 12 ogniw w czterech rzędach. Powietrze dostarczano do stosu za pośrednictwem podłużnych szczelin znajdujących się wzdłuż całego dystrybutora powietrza umieszczonego w osi stosu mSOFC. Chłodny strumień powietrza rozprowadzany był promieniowo pomiędzy ogniwa paliwowe w kierunku obudowy, zewnętrznej części stosu mSOFC. Przy użyciu symulacji FEM przeanalizowano kilka różnych przypadków. W pierwszym kroku oszacowano wartości naprężeń resztkowych powstałych podczas procesów produkcji ogniw paliwowych i spiekania ich warstw kolejno do siebie. Następnym celem modelowania było obliczenie naprężeń termicznych w anodzie, elektrolicie i katodzie, podczas gdy w trzecim przypadku w wyniku symulacji FEM zidentyfikowano całkowite naprężenia obejmujące naprężenia szczątkowe i operacyjne dla układu zawierającego mikrorurowe ogniwa paliwowe, masę uszczelniającą, kolektory i obudowę. Resztkowe naprężenia osiowe i całkowite naprężenia analizowano dla wybranych elementów stosu mSOFC, które uznano za szczególnie podatne na uszkodzenia. Stwierdzono, że nieliniowy charakter rozkładu temperatur pomiędzy ogniwami paliwowymi znajdującymi

się w pierwszym rzędzie w osi stosu i w niewielkiej odległości od dystrybutora chłodnego powietrza a ogniwami znajdującymi się w skrajnym położeniu, czyli tuż przy obudowie na obwodzie stosu, dla których temperatury mogły się różnić nawet o 95 K, może prowadzić do wzrostu lokalnych całkowitych naprężeń termicznych. Dystrybutor powietrza oraz obudowa stosu wraz z wykonanymi w nich licznymi otworami doprowadzającymi strumień chłodzącego powietrza zostały określone jako obszary o największym ryzyku uszkodzenia, gdyż charakteryzowały się one największymi wartościami naprężeń. **Znaczne różnice w wartościach naprężeń** zanotowano **między zewnętrznym rzędem ogniw paliwowych** cechującym się najgorszymi warunkami chłodzenia i **ogniwami znajdujących się w środkowej części stosu** tuż przy dystrybutorze chłodnego powietrza. Dodatkowo, w oparciu o przeprowadzone analizy całkowitego naprężenia osiowego i naprężenia resztkowego stwierdzono, że w przypadku anody i elektrolitu nie powinno nastąpić ich uszkodzenie, podczas gdy **istnieje ryzyko uszkodzenia warstwy katody** przy przyjętych parametrach pracy stosu i założonej konfiguracji mSOFC stosu. Wspomniane elementy stosu mSOFC zostały uznane za części najwyższego ryzyka uszkodzenia [H-15]. W celu ograniczenia ryzyka uszkodzenia katody i poprawy odporności całego stosu zaproponowano skuteczniejsze chłodzenie, które powinno zapewnić bardziej równomierny rozkład temperatur wzdłuż długości ogniw i w ich skrajnym położeniu po promieniu stosu w celu zwiększenia ich wydajności i wytrzymałości samych ogniw paliwowych [H-16]. **Pierwotne rozwiązanie konstrukcyjne stosu mSOFC** przedstawione w ramach pracy [H-15] **zostało zmodyfikowane** poprzez zmianę sposobu rozłożenia ogniw paliwowych **z cylindrycznego na heksagonalne** i przyjęciu **chłodzenia powietrza od strony zewnętrznej dwunastokątnej obudowy** stosu mSOFC w kierunku do osi stosu. W części centralnej stosu umieszczono kolektor wylotowy powietrza wyposażony w podłużne szczeliny, którymi ogrzane powietrze zbierano z całego stosu. Wyniki analizy numerycznej dla nowej konstrukcji stosu ogniw mSOFC pokazały, że **przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne stosu ogniw paliwowych odgrywa ważną rolę w określeniu rozkładu temperatur i naprężeń termicznych**. Zgodnie z oczekiwaniami, lokalne wartości temperatur w pobliżu osi stosu mSOFC były wyższe od wartości, które uzyskano dla obszarów znajdujących się w pobliżu drugiego i trzeciego rzędu ogniw paliwowych ze względu na słabsze chłodzenie. Uzyskany z symulacji rozkład temperatur wewnątrz stosu mSOFC pokazał, że **większość ogniw paliwowych charakteryzowała się dobrym stopniem chłodzenia** przy prędkości powietrza na wlocie równym 2,0 m/s. Przeprowadzono także porównanie wyników analiz mechanicznych naprężeń i rozkładów temperatur dla cylindrycznej

i dwunastokątnej obudowy stosu mSOFC. **Największe wartości całkowitych naprężeń stwierdzono w ceramicznym elektrolicie** i były to naprężenia ściskające. Obszary o najwyższych wartościach naprężeń określono jako te o największym ryzyku uszkodzenia, wymagające szczególnej uwagi. Uzyskane z symulacji FEM rozkłady naprężeń dostarczyły pomocnych wskazówek w zakresie optymalizacji nowej heksagonalnej konstrukcji stosu mSOFC z obudową dwunastokątną. Dalsze wysiłki w celu zwiększenia niezawodności konstrukcji stosu zostały wykonane poprzez analizę wpływu chłodzenia powietrza na wytrzymałość termo-mechaniczną heksagonalnego rozłożenia ogniw paliwowych w stosie mSOFC w obudowie dwunastokątnej [H-17]. Podobnie, jak w przypadku badań [H-16], zastosowane trójwymiarowe modele miały pomóc w ocenie wpływu rozłożenia ogniw i kierunku strumienia chłodzącego powietrza na wartość naprężeń termicznych w stosie mSOFC i jego wydajność. Uzyskane wyniki, obejmujące rozkłady temperatur i naprężeń termicznych, dla heksagonalnego rozmieszczenia ogniw paliwowych w stosie mSOFC z wewnętrznym kierunkiem przepływu powietrza, porównano z dwiema wcześniej analizowanymi konfiguracjami stosów mSOFC przedstawionymi w pracach [H-15] i [H-16]. W oparciu o przeprowadzone porównanie trzech konfiguracji **wskazano optymalne rozwiązanie konstrukcyjne stosu ogniw paliwowych typu mSOFC**, które umożliwiło zmniejszenie gradientów temperatur wewnątrz stosu ogniw paliwowych i w konsekwencji również spadek wartości naprężeń termicznych w stosie. Najniższe wartości całkowitego przemieszczenia (wydłużenia) w stosie ogniw otrzymano w konfiguracji heksagonalnej z zewnętrznym chłodzeniem powietrzem (przepływ do środka). Ponadto stwierdzono, że dla tej samej konfiguracji stosu mSOFC uzyskano najmniejsze wartości osiowych i całkowitych naprężeń ze względu na bardziej równomierny rozkład temperatury, który ograniczał naprężenia materiałów i zapobiegał rozwojowi nadmiernych naprężeń termicznych w elementach konstrukcyjnych stosu ogniw paliwowych [H-17]. Analiza mechaniczna stosu mSOFC w konfiguracji III bez konstrukcji wsporczej ujawniła także wpływ wysokiej temperatury i przestrzenie zmiennej temperatury operacyjnej, jak i różnicy współczynnika rozszerzalności cieplnej poszczególnych warstw ogniwa paliwowego na wielkość naprężeń. Analizom poddano także wpływ konstrukcji nośnej połączonej ze stosem mSOFC uszczelniaczem ceramicznym. Wyniki symulacji FEM ujawniły wysoki poziom zmienności osiowego naprężenia wzdłuż długości ogniw w stosie poddanym analizom wraz konstrukcją nośną. Uzyskane **wyniki FEM pomogły dokonać oceny wpływu geometrii kanałów przepływowych, połączeń, kolektorów wlotowych i wylotowych na wytrzymałość stosu**

mSOFC. Na podstawie przeprowadzonego porównania analizowanych konstrukcji stosów ogniw paliwowych stwierdzono, że konfiguracja o heksagonalnym rozłożeniu ogniw paliwowych wewnątrz stosu mSOFC, dwunastokątnej obudowie i zewnętrznym chłodzeniu powietrza (do środka) stanowi **najlepsze rozwiązanie konstrukcyjne z punktu widzenia naprężeń termicznych**. Jednakże w celu zmniejszenia koncentracji naprężeń w narożnikach i uzyskania wyższej niezawodności stosu mSOFC można zastosować cylindryczną obudowę zewnętrzną stosu. Precyzyjne modelowanie warunków termicznych i mechanicznych było jednym z głównych wyzwań, umożliwiającymi **poprawę warunków wymiany ciepła w stosie ogniw paliwowych mSOFC** i sprzyjającym **ograniczeniu degradacji ogniw paliwowych wskutek naprężeń termicznych** wywołanych niejednorodnym rozkładem temperatur wewnątrz stosu [H-17].

Kompleksowa wiedza na temat zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących w mikrorurowych ogniwach paliwowych typu SOFC na poziomie pojedynczych ogniw i stosu ogniw paliwowych osiągnięta przy użyciu technik CFD umożliwiła pełną kontrolę w dużej skali na poziomie całego systemu zasilania. Podstawowe kwestie związane z **modelowaniem pojedynczego ogniwa paliwowego, stosu i systemu zasilania** wyposażonego w **technologię SOFC** zostały szeroko omówione w pracach [H-18, H-20]. Szczególną uwagę zwrócono na rozwój systemu zasilania wyposażony w ogniwa SOFC, który wymagał odpowiedniego podejścia do modelowania i wykorzystania nowoczesnych symulatorów numerycznych. Symulatory procesowe umożliwiły wgląd w różne aspekty działania tego systemu. W pracy [H-18] przedstawiono charakterystyczne cechy modeli odnoszących się do różnych poziomów, jak również omówiono różne metody reformingu zarówno z recyrkulacją strumieni gazu z anody i katody, jak i systemy bez recyrkulacji. Przedstawione wyniki modelowania numerycznego udowodniły, że obecne symulatory procesowe pozwalają na przeprowadzenie szczegółowej analizy parametrycznej i termodynamicznej systemów SOFC. Narzędzia te umożliwiły także ocenę zmienności kilku parametrów operacyjnych na wydajność systemu. Wydaje się, że tylko połączenie zjawisk transportu masy i energii wraz z procesami elektrochemicznymi na poziomie mikro-skali razem z rozkładami lokalnych wartości prędkości i temperatur w kanałach paliwa oraz powietrza na poziomie makro-skali wraz z charakterystyką elementów systemu zapewnią pełne zrozumienie wydajności systemu zasilania wyposażonego w ogniwa paliwowe typu SOFC. Stąd zrodziła się **konceptja podejścia wieloskalowego do modelowania systemu zasilania z mikrorurowymi ogniwami paliwowymi SOFC** przedstawiona w pracy [H-19]. W pracy [H-19] zostały opisane dwa

podstawowe narzędzia badawcze reprezentowane przez symulator procesowy – Aspen Plus dedykowany do modelowania na poziomie systemu oraz kod CFD – ANSYS Fluent wraz z modułem ogniw paliwowych do symulacji na poziomie pojedynczego ogniwa i stosu ogniw paliwowych. Dodatkowo, w pracy [H-19] przedstawiono podstawowe wytyczne umożliwiające **integrację tych dwóch narzędzi obliczeniowych**. Główną zaletą stosowania modeli CFD zarówno na poziomie pojedynczego ogniwa paliwowego, jak i stosu ogniw na potrzeby symulacji całego systemu było **pełne zrozumienie warunków pracy i redukcja kosztów rozwoju** systemów oraz produkcji tych systemów. Szczegółowe informacje odnośnie przeprowadzonego z powodzeniem projektowania i optymalizacji systemu zasilania wyposażonego w ogniwa paliwowe typu SOF omówiono w pracy [H-19].

Prezentowane wyniki i wnioski wskazują na ogromny potencjał narzędzi numerycznych CFD i FEM stosowanych w symulacjach złożonych przepływów płynów i wskazują na możliwość stosowania ich z powodzeniem w szerokim zakresie procesów Inżynierii Chemicznej.

Większość z przykładów modelowania CFD i FEM dotyczy analizy praktycznych problemów w Inżynierii Chemicznej wykonanych przy użyciu komercyjnych kodów obliczeniowych: ANSYS – Fluent ([H-1-6]), ANSYS – Fluent z modułem Fuel Cell ([H-9-10], [H-12-17], [H-19]), COMSOL Multiphysics z modułem Batteries and Fuel Cell ([H-11]) oraz COMSOL Multiphysics z modułem Plasma ([H-7-8]) oraz ANSYS Mechanical ([H-15-17]). Konieczność wsparcia obliczeń przy użyciu kodów komercyjnych CFD i FEM wynika z tego, że budowa kodu od podstaw przez użytkownika wiązałaby się z ogromnym wysiłkiem i ryzykiem utraty elastyczności narzędzia niezbędnego przy specjalistycznych zastosowaniach. Z drugiej strony, kody komercyjne zastosowane w symulacjach wymagają także zaawansowanej wiedzy od użytkownika i umiejętnego posługiwania w przypadku wdrażania i budowy modelu.

[A-1] **P. Pianko-Oprych**, A. W. Nienow, M. Barigou, Positron Emission Particle Tracking (PEPT) compared to Particle Image Velocimetry (PIV) for studying the flow generated by a pitched-blade turbine in single phase and multi-phase systems, 64 (2009) 4955-4968, **Chemical Engineering Science**. DOI: 10.1016/j.ces.2009.08.003.

[A-2] M. Barigou, F. Chiti, **P. Pianko-Oprych**, A. Guida, L. Adams, X. Fan, D. J. Parker, A. W. Nienow, Using Positron Emission Particle Tracking (PEPT) to study mixing in stirred vessels: validation and tackling unsolved problems in opaque systems, 42, 11

(2009) 839-846, **Journal of Chemical Engineering of Japan**.
DOI: 10.1252/jcej.08we262.

Podsumowanie – elementy nowości naukowej:

Zastosowanie Numerycznej Mechaniki Płynów, CFD, i Metody Elementów Skończonych, FEM, w procesie wspierania i rozwoju urządzeń i aparatów w Inżynierii Chemicznej ze szczególnym uwzględnieniem rozwoju systemów wyposażonych w ogniwa paliwowe typu SOFC zostało skutecznie zrealizowane, a wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań pozwoliły wyciągnąć następujące główne wnioski odnośnie warunków pracy szeregu urządzeń procesowych:

- wyjaśniono mechanizmy powstawania dyspersji układów typu ciecz-ciecz i procesu rozbijania kropeł w mieszalniku statycznym typu SMX w warunkach burzliwego przepływu płynów z wykorzystaniem metod numerycznych RANS i LES w połączeniu z podejściem QMOM,
- z powodzeniem określono warunki mieszania stężonych zawiesin ciała stałego w mieszalniku mechanicznym z dwoma typami mieszadeł typu PBTD i PBTU przy użyciu techniki numerycznej CFD i porównano z danymi pomiarowymi uzyskanymi podczas pomiarów PEPT i PIV,
- na drodze modelowania numerycznego określono wpływ średnic cząstek ciała stałego i ich stężenia, prędkości mieszaniny dwufazowej i reologii płynu na profile prędkości fazy ciągłej i rozproszonej w warunkach laminarnego przepływu cząstek ciała stałego w nienewtonowskim płynie rozrzedzanym ścinaniem podczas transportu poziomego w rurze,
- przeanalizowano warunki wymiany ciepła w kolumnie z wypełnieniem przy użyciu specjalnie opracowanego modelu numerycznego, a uzyskane z symulacji wartości współczynnika przenikania ciepła były bliskie doświadczalnym wartościom w warunkach przepływu burzliwego,
- opracowany model reaktora z wyładowaniami dielektrycznymi barierowymi dostarczył ilościowych danych odnośnie dynamiki generowania ozonu i rozpadu lotnych związków organicznych w gazie w obszarze wyładowania,
- zdefiniowane modele pojedynczego mikrorurowego i płaskiego ogniwa paliwowego typu SOFC umożliwiły oszacowanie krzywych charakterystyk prądowo-napięciowych zgodnych z danymi pomiarowymi V-I,

- dokonano oceny ilościowej procesów wymiany ciepła na drodze konwekcji i promieniowania oraz ich wpływu na mikrorurowy stos ogniw paliwowych typu SOFC,
- przeprowadzona analiza naprężeń termicznych teoretycznie wykazała brak ryzyka pęknięć w anodzie i elektrolicie dla temperatur poniżej 750°C i napięciu 0,7 V w stosie ogniw paliwowych typu mSOFC przy założeniu ułożenia ogniw po okręgu i obudowie cylindrycznej,
- wyniki symulacji FEM wskazały na wysokie ryzyko powstania uszkodzenia w warstwie katody w temperaturze roboczej 750°C i przy napięciu 0,7 V dla cylindrycznej konstrukcji stosu ogniw mSOFC,
- implementacja uproszczonego modelu CFD na poziomie pojedynczego ogniwa paliwowego do symulatora procesowego została zakończona z powodzeniem i umożliwiła optymalizację konstrukcji systemu zasilania.

Mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora obejmuje **23** publikacje (łączny *IF* (2014/2015) = **22.605**, *IF* z roku publikacji = **18.014** według *JCR*) i obejmuje **17** publikacji z listy filadelfijskiej. Według *Web of Science* **liczba cytowań** wszystkich artykułów to **62** (bez autocytowań **58**), **indeks Hirscha** wynosi **5**. Wyniki swojej pracy naukowej prezentowałam również na **19** konferencjach międzynarodowych i **9** konferencjach krajowych.

Całkowity dorobek naukowy, włączając w to prace przed uzyskaniem stopnia doktora obejmuje **27** publikacji (łączny *IF* (2014/2015) = **26.845**, *IF* z roku publikacji = **19.347** według *JCR*), w tym **21** publikacji z listy filadelfijskiej.

Całkowita liczba punktów MNiSW za publikacje po uzyskaniu stopnia doktora wyniosła **400** (**297.95** pkt. przy uwzględnieniu procentowego udziału habilitanta), natomiast sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje przed i po uzyskaniu stopnia doktora wyniosła **475** (**347.45** pkt. przy uwzględnieniu procentowego udziału habilitanta).

Literatura:

- [1] O. Potier, J. Brun, P. Le Masson, B. Weil, How innovative design can contribute to Chemical and Process Engineering development? Opening new innovation paths by applying the C-K method, *Chemical Engineering Research and Design*, XX, 2015, X-XX.
- [2] P. R. Westmoreland, Opportunities and challenges for a golden age of Chemical Engineering, *Front. Chem. Sci. Eng.* 8, 1, 2014, 1-17.
- [3] E. Favre, L. Marchal-Heusler, M. Kind, Chemical Product Engineering: research and educational challenges, *Trans. IChemE*, 80, Part A, 2002, 65-74.
- [4] M. Hill, Chemical Product Engineering – the third paradigm, *Computers & Chemical Engineering*, 33, 5, 2009, 947-953.
- [5] K. N. Grew, K. S. Chiu, A review of modeling and simulation techniques across the length scales for the solid oxide fuel cell, *Journal of Power Sources*, 199, 2012, 1-13.
- [6] M. Andersson, J. Yuan, B. Sunden, Review on modeling development for multiscale chemical reactions coupled transport phenomena in solid oxide fuel cells, *Applied Energy*, 87, 2010, 1461-1476.
- [7] Z. Jaworski, B. Zakrzewska, Towards multiscale modelling in product engineering, *Computers & Chemical Engineering*, 35, 3, 2011, 434-445.
- [8] J. Xu, X. Li, Ch. Hou, L. Wang, G. Zhou, W. Ge, J. Li, Engineering molecular dynamics simulation in chemical engineering, *Chemical Engineering Science*, 121, 2015, 200-216.
- [9] J. A. Shaeiwitz, R. Turton, Process Simulators: what students forget when using them, their limitations and when not to use them, *Computer Aided Chemical Engineering*, 37, 2015, 149-154.
- [10] D. L. Davidson, The Role of Computational Fluid Dynamics in Process Industries, *The Bridge*, National Academy of Engineering, 32, 4, 2002, 9-14, Washington.
- [11] A. A. Mohamad, Lattice Boltzmann Method, Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes, Springer-Verlag, London, 2011, ISBN 978-0-85729-454-8.
- [12] A. Bakker, H. H. Ahmad, M. O. Lanre, Realize greater benefits from CFD. Fluid/solids handling, 2001, 45-53.

- [13] T. Norton, CFD in the Agri-food industry: a maturing engineering design tool, *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 2013, 149-150.
- [14] C. K. Harris, D. Roekaerts, F. J. J. Rosendal, F. G. J. Buitendijk, Ph. Daskopoulos, A. J. N. Vreenegeer, H. Wang, *Computational Fluid Dynamics for Chemical Reactor Engineering*, *Chemical Engineering Science*, 51, 10, 1996, 1569-1594.
- [15] B. Xia, D. W. Sun, Applications of computational fluid dynamics in the food industry: a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 2002, 5-24.
- [16] I. B. Lee, J. P. P. Bitog, S. W. Hong, I. H. Seo, K. S. Kwon, T. Bartzanas, M. Kacira, The past, present and future of CFD for agro-environmental applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 2013, 168-183.
- [17] F. Zidouni, E. Krepper, R. Rzehak, S. Rabha, M. Schubert, U. Hampel, Simulation of gas-liquid flow in a helical static mixer, *Chemical Engineering Science*, 137, 2015, 476-486.
- [18] H. S. Yoon, S. Balachandar, M. Y. Ha, Large eddy simulation of passive scalar transport in a stirred tank for different diffusivities, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, 2015, 885-897.
- [19] M. J. H. Khan, M. A. Hussain, Z. Mansourpour, N. Mostoufi, N. M. Ghasem, E. . Abdullah, CFD simulation of fluidized bed reactors for polyolefin production – a review, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 2014, 3919-3946.
- [20] Y. Zhang, Z. Wang, Y. Jin, Z. Li, W. Yi, CFD simulation and experiment of residence time distribution in short-contact cyclone reactors, *Advanced Powder Technology*, 26, 2015, 1134-1142.
- [21] P. G. Verdin, C. P. Thompson, L. D. Brown, CFD modelling of stratified/atomization gas-liquid flow in large diameter pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, 67, 2014, 135-143.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Działalność naukową rozpoczęłam w październiku 1999 na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Szczecińskiej prowadząc badania w ramach pracy dyplomowej realizowanej na studiach magisterskich pt.: „*Symulacje procesów przenoszenia (masy, pędu i energii) w mieszalnikach statycznych przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania Fluent*”. Praca została wykonana pod kierunkiem pana prof. dr hab. inż. Zdzisława Jaworskiego. Po obronie **pracy magisterskiej z wyróżnieniem** i wpisie do Złotej Księgi wyróżnionych absolwentów Politechniki Szczecińskiej w czerwcu 2000 r., z dniem 1 października 2000 r. rozpoczęłam naukę na studiach doktoranckich z Inżynierii Chemicznej i Procesowej na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Szczecińskiej, które ukończyłam pomyślnie obroną **pracy doktorskiej z wyróżnieniem** w 2006 r. Przedmiotem pracy doktorskiej była rozprawa pt.: „*Modelowanie przepływu dwufazowego cieczy i procesu dyspergowania w mieszalnikach statycznych*”. Równoległe do studiów doktoranckich, w maju 2003 r. obroniłam drugą pracę magisterską w dziedzinie Ochrona środowiska. Tematem pracy dyplomowej był: „*Model dna i powierzchni jeziora Miedwie*”. W roku 2012 ukończyłam roczne studia podyplomowe na Uniwersytecie Szczecińskim na Wydziale Zarządzania i Ekonomiki Usług. W tym samym roku zdałam także egzamin i otrzymałam certyfikat Project Management Associate poziom D IPMA. W 2012 r. odbyłam także trzymiesięczny staż na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley, w Haas School of Business, w Stanach Zjednoczonych, w ramach programu Top 500 Innovators. Kopie dyplomów zamieszczono na końcu Załącznika nr 2.

W dniu 15 grudnia 2005 r. zostałam zatrudniona na stanowisku asystenta na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej na Politechnice Szczecińskiej z jednoczesnym urlopem bezpłatnym. Od 17 października 2005 r. do 16 września 2007 r. pracowałam jako pracownik naukowy na Uniwersytecie w Birmingham w Wielkiej Brytanii. Następnie w dniu 1 października 2007 r. zaczęłam pracę na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej, początkowo w Politechnice Szczecińskiej, a od 2009 r. w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie.

Od 1 grudnia 2011 r., oprócz pełnienia pełnoetatowych obowiązków nauczyciela akademickiego, jestem zaangażowana jako kierownik grupy badawczej w ZUT w ramach czteroletniego **europejskiego projektu 7 Programu Ramowego o akronimie SUAV i nr 278629** pt.: „*Rozwój systemu zasilania wyposażonego w stało-tlenkowe mikrorurkowe*”

ogniwa paliwowe i integracja z bezzałogowym samolotem (mini-UAV)”. Celem projektu było zaprojektowanie, optymalizacja i budowa 100-200 W mikrorurowego stałotlenkowego stosu ogniw paliwowych mSOFC (ang. *microtubular Solid Oxide Fuel Cell*) i jego integracja z hybrydowym systemem zasilania, obejmującym stos mSOFC i akumulator energii elektrycznej na pokładzie bezzałogowego pojazdu lotniczego UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*). Byłam odpowiedzialna za przeprowadzenie analiz numerycznych, obejmujących symulacje pojedynczego mikrorurowego ogniwa paliwowego typu SOFC i pod-stosu ogniw mSOFC w typowych warunkach operacyjnych pracy przy użyciu Numerycznej Mechaniki Płynów – CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) i Metody Elementów Skończonych – FEM (ang. *Finite Element Methods*) oraz za porównanie uzyskanych wyników z symulacji z danymi pomiarowymi partnerów projektu. Uzyskane wyniki symulacji numerycznych posłużyły do optymalizacji konstrukcji stosu mSOFC i jego dalszej modyfikacji. Wyniki tych badań zostały przedstawione w czasopismach naukowych [H-9-11, H-15-17]. Podobne badania przeprowadziłam w ramach współpracy z drugim konsorcjum badawczym trzyletniego **europejskiego projektu 7 Programu Ramowego o akronimie SAPIENS i nr 303414 pt.: „SAPIENS – pomocnicze zasilacze SOFC w rozwiązaniach hałasu i emisji”**, który rozpoczął się w dniu 1 listopada 2012 r. Również w tym projekcie byłam kierownikiem części badawczej w ZUT. Wyniki symulacji zostały zaprezentowane w czasopismach naukowych [H-13-14, H-18], jak i na konferencjach krajowych i zagranicznych [Załącznik nr 3, pkt. IIIB]. Udana współpraca w ramach projektu SAPIENS zaowocowała propozycją udziału w trzecim **europejskim projekcie 7 Programu Ramowego o akronimie SAFARI i nr 325323 pt.: „Stalotlenkowe ogniwa paliwowe jako pomocnicze źródła energii zasilającej ciężarówkę”**. Projekt SAFARI rozpoczął się dnia 1 stycznia 2014 r. W projekcie tym pełnię funkcję głównego kierownika w ZUT i biorę udział w projektowaniu, rozwoju i symulacjach mikrorurowego i płaskiego stosu ogniw paliwowych typu SOFC oraz instalacji w systemie dodatkowego zasilania ciężarówek. Brałam aktywny udział w opracowaniu konfiguracji składowych systemu i założeń projektowych. Do moich obowiązków należało przygotowanie raportów naukowych z realizacji zadań zespołu ZUT, sporządzenie dokumentacji technicznej, a także udział w konferencjach w celu rozpowszechniania wiedzy w zakresie ogniw paliwowych, jak również publikowanie wyników badań w czasopismach naukowych. Przykładem działań upowszechniania wiedzy na temat ogniw są następujące prace [H-12, H-19-20]. Moje aktywne uczestnictwo w Walnym Zgromadzeniu Udziałowców Wspólnych Inicjatyw Wodorowych i Technologii Ogniw Paliwowych organizowanym rokrocznie w listopadzie w Brukseli

zaowocowało zaproszeniem do czwartego konsorcjum naukowo-przemysłowego kierowanego przez instytut badawczy VTT z Finlandii i partnera przemysłowego – firmę sunfire z Niemiec. W wyniku tej współpracy, złożony został wniosek na konkurs FCH JU i z dniem 1 kwietnia 2014 r. rozpoczęłam realizację czwartego **europejskiego projektu z 7 Programu Ramowego o akronimie STAGE-SOFC i o nr 621213 pt.: „Innowacyjny układ systemu SOFC do stacjonarnej produkcji energii elektrycznej i ciepła”**. Obecnie pracuję w projekcie STAGE-SOFC jako główny menadżer tego projektu w ZUT i kierownik części badawczej w ZUT, a także jako lider pakietu pracy WP8. Pakiet WP8 związany jest z rozpowszechnianiem i praktycznym wykorzystaniem wyników badań, a także z zarządzaniem prawami własności intelektualnej. Umiejętności nabyte w 2012 r. w trakcie stażu szkoleniowego w Haas School of Business na Uniwersytecie Kalifornijskim, Berkeley, w Stanach Zjednoczonych są szczególnie pomocne w tym obszarze. Moim głównym zadaniem w projekcie STAGE-SOFC jest modelowanie elementów systemu takich, jak: wymienniki ciepła, dopalacze paliwa, płaskie ogniwa paliwowe typu SOFC. Ponadto, do moich obowiązków należy koordynowanie i prowadzenie badań oraz zarządzanie pracą badawczą dwóch pracowników badawczych zatrudnionych w granicy. Nieodłącznym elementem moich zadań jest także przygotowanie i składanie sprawozdań z postępów prac i wyników badań koordynatorowi technicznemu w projekcie STAGE-SOFC oraz organizacja krótkich kursów dla studentów i konferencji poświęconych tematyce ogniw paliwowych.

Prace w ramach europejskich projektów są bardzo czasochłonne i trudne. Do zakresu moich obowiązków należy między innymi przygotowanie kart czasu pracy, sprawozdań i raportów rocznych/końcowych zarówno merytorycznych, jak i finansowych, a także nadzór nad poprawnością wykonywania zadań w projektach przez zaangażowanych w nich pracowników badawczych.

Oprócz rozwijania własnych zainteresowań badawczych związanych między innymi z opracowaniem metodyki modelowania ogniw paliwowych w ramach europejskich projektów, w trakcie całej mojej pracy zawodowej brałam czynny udział w projektach realizowanych w macierzystym Instytucie. W okresie 1/11/2010 – 31/10/2014 aktywnie uczestniczyłam w pracach badawczo-rozwojowych w **projekcie rozwojowym o nr. R14 0116 10 pt.: „Oczyszczanie odlotowych gazów przemysłowych z lotnych związków organicznych (LZO) za pomocą plazmy niskotemperaturowej z zastosowaniem reaktorów koronowych i/lub reaktorów hybrydowych koronowo-katalitycznych”**, realizowanym w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Podstaw Ochrony Środowiska, WTiCh, ZUT w Szczecinie pod kierownictwem

pana dr inż. Wojciecha Paterkowskiego. Wyniki obliczeń przedstawiono podczas XXI Ogólnopolskiej Konferencji Inżynierii Chemicznej i Procesowej w Kołobrzegu w dniach 2-6/09/2013 r. w postaci publikacji [H-7, H-8].

W październiku 2013 r. podczas konferencji użytkowników oprogramowania COMSOL w Rotterdamie rozpoczęłam rozmowy w sprawie współpracy naukowo-badawczej pomiędzy dr Francesco Cipiti reprezentującym Instytut badawczy CNR, we Włoszech, a moją jednostką macierzystą ZUT w Szczecinie. W efekcie tych rozmów podjęta została decyzja o stworzeniu wzajemnie korzystnych relacji pomiędzy Instituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia „Nicola Giordano” (CNR) a Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym w Szczecinie. Pierwszym etapem tych działań była wizyta dr Francesco Cipiti zorganizowana przy moim znacznym udziale w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Podstaw Ochrony Środowiska. Następnie przygotowałam we współpracy ze stroną włoską propozycję **umowy o współpracy w dziedzinie badań i szkoleń**. Umowa ta została zatwierdzona przez Senat ZUT, a następnie podpisana przez władze obu stron. Moje zaangażowanie w realizację postanowień umowy obejmuje wymianę wiedzy w zakresie reformerów, ogniw paliwowych typu SOFC i PEMFC, projektowanie i prototypowanie oraz modelowanie numeryczne, a także wymianę naukowców i doktorantów pomiędzy naszymi instytucjami, jak również wspólne projekty badawcze, promocję działań i przygotowania wspólnych publikacji naukowych. Obecnie jestem w trakcie pracy nad wspólną publikacją dotyczącą modelowania płaskiego ogniwa paliwowego typu PEMFC. Przewiduję, że publikacja zostanie skierowana do redakcji na początku roku 2016.

Uczestniczę także we współpracy badawczej z gminą Ustronie Morskie w zakresie analizy wydajności farmy fotowoltaicznej. **Umowa o współpracy naukowo-badawczej** została podpisana w czerwcu 2015 r. Pierwszym konkretnym wynikiem tej współpracy była konferencja pt.: *„Czysta energia. Techniczne, ekonomiczne i społeczne aspekty funkcjonowania farm fotowoltaicznych”*, która odbyła się w dniach 13-14 października 2015 r. ZUT był współorganizatorem tej konferencji, a ja pełniłam rolę sekretarza naukowego.

Za pracę naukową zostałam dwukrotnie uhonorowana **nagrodami indywidualnymi III stopnia Rektora** Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za twórcze osiągnięcia naukowe. Otrzymałam także stypendium **MNiSW dla wybitnego młodego naukowca** na lata 2011-2014, a także stypendium w ramach programu MNiSW: **„Top 500 Innovators: Science – Management - Commercialization”** połączone ze **stażem szkoleniowym na Uniwersytecie Kalifornijskim, Berkeley**, w Stanach Zjednoczonych.

Moje doświadczenia naukowe znalazły również uznanie w międzynarodowym środowisku naukowym, o czym może świadczyć zaproszenie na wykład w instytucie badawczym CNR w dniu 18 lutego 2015 r., wyróżnienie plakatu na XXI Ogólnopolskiej Konferencji Inżynierii Chemicznej i Procesowej w Kołobrzegu w 2013 r. Zostałam także poproszona o sporządzenie **recenzji publikacji** w takich prestiżowych czasopismach, jak: Chemical Engineering Journal, Polish Journal of Chemical Technology, Chemical Engineering Communications i International Journal of Chemical Reactor Engineering.

Znaczną część swojego czasu poświęcam pracy dydaktycznej. Obecnie prowadzę wykłady z kluczowych przedmiotów na kierunku studiów „Inżynieria Chemiczna i Procesowa” takich, jak: „**Inżynieria materiałów ziarnistych**”, „**Komputerowe techniki projektowania**” i zajęcia projektowe z przedmiotu: „**Projektowanie systemów procesowych**”. W poprzednich latach akademickich prowadziłam także wykłady z następujących przedmiotów: „**Termodynamika techniczna**”, „**Hybrydowe źródła energii**”, „**Energia a środowisko**” oraz „**Odnawialne źródła energii**”, „**Inżynieria reaktorów chemicznych**”. W ramach prowadzonych przedmiotów w latach 2011-2015 organizowałam studentom jednodniowe wyjazdy szkoleniowe do Ośrodka Szkoleniowo-Badawczego ZUT w zakresie odnawialnych źródeł energii w Ostoi w celu zapewnienia studentom bezpośredniego kontaktu z systemami energetycznymi bazującymi na odnawialnych źródłach energii takich, jak ogniwa fotowoltaiczne PV, kolektory słoneczne, pompy ciepła. Drugim kierunkiem wizyt edukacyjnych ze studentami była firma przemysłowa Weber w Goleniowie.

Aby rozszerzyć swoje umiejętności zawodowe i praktyczną wiedzę z zakresu Inżynierii Chemicznej i Procesowej ukończyłam **dwa staże przemysłowe**: w firmie Polchar Sp. z o.o. w Policach (1/05/2013-31/10/2013) oraz w firmie Weber Poland Plastics w Goleniowie (1/12/2013-28/02/2014). Ponadto brałam także udział w **dwóch międzynarodowych stażach badawczych**: podoktorski na Uniwersytecie w Birmingham, na Wydziale Inżynierii Chemicznej w Wielkiej Brytanii (17/10/2005-16/09/2007) oraz szkoleniowy w Haas School of Business, na Uniwersytecie Kalifornijskim, Berkeley, w Stanach Zjednoczonych (15/10/2012-14/12/2012). Potwierdzeniem aktywnej współpracy z partnerami przemysłowymi i ośrodkami naukowymi są załączone podpisane listy polecające.

Podczas stażu podoktorskiego na Uniwersytecie w Birmingham w okresie 2005-2007 pełniłam rolę **opiekuna pomocniczego pięciu doktorantów**: Matthew Streeter, Luke Adams, Fabio Chiti, Muhammad Eesa oraz Antonio Guida. Od października 2014 r. pełnię w ZUT **funkcję promotora pomocniczego dwóch doktorantów**: Tomasza Zinko i Mateusza Palus.

Byłam promotorem 20 prac magisterskich i 5 prac inżynierskich, które były związane tematycznie z kierunkiem moich badań. Przygotowałam recenzję 8 prac dyplomowych. Pełniłam także funkcję **redaktora pomocniczego** w czasopiśmie **Journal of Nanoscience with Advanced Technology** w specjalnym wydaniu dotyczącym zastosowania nanomateriałów w technologii wodorowej i ogniw paliwowych wydawnictwa Verizon w 2014 r.

Od kilku lat jako nauczyciel akademicki prowadzę zajęcia ze studentami w ramach międzynarodowych programów wymiany studenckiej: ERASMUS i IAESTE. W ramach programu IAESTE w okresie 1/10/2014-28/02/2015 opiekowałam się studentem z Chin – Dong Huang'iem. Natomiast w ramach programu ERASMUS od 2009 r. prowadzę w **języku angielskim** następujące wykłady: „**Inżynieria reaktorów chemicznych**”, „**Energia a środowisko**”, „**Hybrydowe źródła energii**”, „**Termodynamika techniczna**” i „**Projektowanie systemów procesowych**”. Ponadto, w latach 2012-2013 pełniłam funkcję założyciela i **opiekuna studenckiego koła naukowego** pt.: „*Studencki Zespół Modelowania*”.

Mam również pewne osiągnięcia w zakresie działalności organizatorskiej na rzecz uczelni macierzystej. Brałam aktywny udział w organizacji XXI Ogólnopolskiej Konferencji Inżynierii Chemicznej i Procesowej w Kołobrzegu we wrześniu 2013 r. oraz XII Europejskiej Konferencji Mieszania w Międzyzdrojach w 2011 r. Na obu konferencjach pełniłam funkcję członka komitetu organizacyjnego. Byłam także głównym **organizatorem i prowadzącą Sympozjum** pt.: „**Ogniwa paliwowe – energia – transport – projektowanie, prototypowanie, wdrożenia**”, które odbyło się w dniu 22 kwietnia 2015 r. (szczegóły można znaleźć na stronie internetowej zaprojektowanej przeze mnie: <http://www.stage-sofc-project.eu/events>). Od kilku lat zachęcam młodych ludzi do studiowania na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej ZUT w Szczecinie poprzez promocję macierzystego Instytutu między innymi podczas Targów Edukacyjnych w Świdwinie dla szkół średnich w regionie zachodniopomorskim (12/02/2014 r.), podczas Festiwalu Nauki w Gimnazjum nr 2 w Szczecinie – Dąbiu (15/04/2011 r.), podczas którego prezentowałam zestawy edukacyjne wyposażone w ogniwa paliwowe typu PEMFC. Zestawy edukacyjne wykorzystałam także podczas prezentacji dla dwóch grup uczniów szkół średnich w czasie ich wizyty na WTiCh (19/12/2011 r.). Wzięłam także aktywny udział w działaniach promocyjnych ZUT w ramach akcji: „Dziewczyny na Politechniki” (23/04/2009 r.).





MINISTER
NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO

Gratuluję

Paulinie Pianko-Oprych

sukcesu w konkursie



potwierdzając jednocześnie decyzję o finansowaniu uczestnictwa
w programie stażowo-szkoleniowym w University of California, Berkeley w USA
w okresie 15 października – 14 grudnia 2012 roku.

Prof. Barbara Kudrycka
Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Warszawa, 9 października 2012 roku



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



CERTYFIKAT

Paulina Pianko – Oprych


uczestniczyła w szkoleniu:

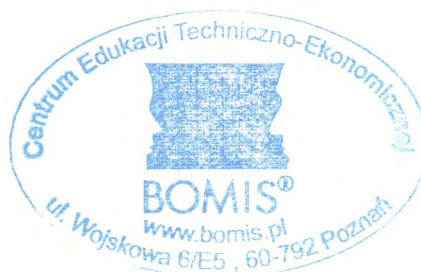
**Wycena technologii i innych aktywów niematerialnych
dla potrzeb komercjalizacji wiedzy**

BOMIS®

Prowadzący

Organizator


mgr inż. Andrzej Półkoszek



Z up. Aneta Bartkowiak

BOMIS



UNIVERSITY OF CALIFORNIA BERKELEY
Center for Executive Education

This is to confirm that

Paulina Pianko-Oprych

has successfully completed



Top 500 Innovators Program

October 15 – December 14, 2012

certificate of completion

Abby Scott
Director, Executive Education
Haas School of Business

Andrew M. Isaacs
Faculty Director
Haas School of Business

UNIVERSITY OF CALIFORNIA
BERKELEY

Center for Executive Education

This is to confirm that

Paulina Pianko-Oprych

*Has successfully completed more than 240 hours of coursework during the
Top 500 Innovators Program
October 15 – December 14, 2012*

90 Hours: Classroom Lectures covering the following topics:

- Corporate Entrepreneurship
- Academic Entrepreneurship
- Entrepreneurial Business Strategies
- Technology Strategy
- Best Practices in Funding Research and Commercialization
- Marketing Emerging Technologies
- Intellectual Property and Technology Transfer
- Long Term Planning
- Open Innovation
- Opportunity Recognition
- (Re) Framing
- Silicon Valley Model of Innovation
- Leadership, Power and Influence
- Leading High Performance Teams
- Innovation in Clean Tech

27 Hours: Group Project Work, Group Coaching and Group Presentations

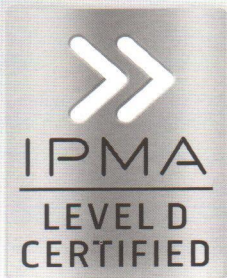
8 Hours: Participation in the Poland Silicon Valley Technology Symposium

72 Hours: Internship at 9 Companies

- Nasa
- AutoDesk
- PAX Water
- Internet2 and Net+
- Splunk
- Mozilla
- HP
- Synopsis
- VM Ware

56 Hours: Site Visits at 13 Companies

- Crosslink Capital
- oDesk
- Intel Corporation
- Plug and Play Tech Center
- Stanford Linear Accelerator
- McKesson Corporation
- Lawrence Livermore National Lab
- Cisco Systems
- IBM Almaden Research Center
- Frog Design
- Google
- YouTube
- Mondavi and Franciscan Wineries



Niniejszym zaświadcza się, iż

Pani Paulina Pianko-Oprych

osiągnął/ęła wymagany poziom kompetencji i ma prawo do tytułu

Certified Project Management Associate IPMA Level D[®]

Certyfikat został wydany przez
Biuro Certyfikacji IPMA Polska

w oparciu o wymagania Biura Certyfikacji IPMA Polska oraz Polskie Wytyczne Kompetencji uznane przez
International Project Management Association (IPMA).

Certyfikacja została przeprowadzona w języku polskim.

402/2012

Numer certyfikatu

Szczecin, 29 czerwca 2012

Data i miejsce certyfikacji

Biuro Certyfikacji

13 lipca 2017

Ważny do

Nie dotyczy

Data wydania recertyfikatu

Asesor

IPMA Polska stosuje System Zarządzania Jakością wg normy ISO 9001:2008



This is to certify that

Ms Paulina Pianko-Oprych

has attained the required level of competence to be granted

Certified Project Management Associate
IPMA Level D[®]

by
the Certification Body of IPMA Poland

using
the Regulations of Polish Certification Body and the National Competence Baseline as validated by
the International Project Management Association (IPMA).

This certification process was conducted in the Polish language.

402/2012

Certificate number

13th July 2017

Valid until

Szczecin, 29th June 2012

Initial certification

n/a

Latest recertification

For the Polish Certification Body

For the assessors

IPMA Poland is certified according to ISO 9001:2008 standard

Certificate translated from the Polish language

Odpis



Uniwersytet Szczeciński

(nazwa uczelni lub jednostki prowadzącej studia podyplomowe)

Wydział Zarządzania i Ekonomiki Usług

(nazwa podstawowej jednostki organizacyjnej uczelni)

ŚWIADECTWO UKOŃCZENIA STUDIÓW PODYPLOMOWYCH

Pan(i) **Paulina Magdalena Pianko - Oprych**

urodzon...^a w dniu **17.04.1976** r. w **Szczecinie**

ukończył...^a w roku **2012** **2** - semestralne studia podyplomowe w zakresie
(liczba semestrów)

Zarządzanie Projektem Badawczym i Komercjalizacja Wyników Badań

..... z wynikiem **bardzo dobrym**



KIEROWNIK
podstawowej jednostki organizacyjnej

DZIEKAN

.....
dr hab. Piotr Niewiadomski prof. US
(pieczęć i podpis)

REKTOR lub KIEROWNIK
jednostki organizacyjnej prowadzącej studia

REKTOR

.....
prof. dr hab. Waldemar Tarczuński
(pieczęć i podpis)

.....
Szczecin , dnia **15.06.2012** .. r.
(miejscowość)

3127
(Nr świadectwa)

Lp.	Nazwa przedmiotu	Liczba godzin zajęć teoretycznych	Liczba godzin zajęć praktycznych
1	Podstawy zarządzania projektami	8	8
2	Finansowanie badań i innowacji w UE i Polsce	12	0
3	Planowanie projektów	8	8
4	Przygotowanie wniosku projektowego do 7PR	2	6
5	Rachunkowość zarządcza w projektach	6	6
6	Zarządzanie finansami i aspekty prawne w 7PR	12	0
7	Wybrane obszary zarządzania projektem	8	8
8	Realizacja i zamykanie projektu	4	4
9	Zarządzanie zespołem projektowym	8	8
10	Zamówienia i kontrakty	8	0
11	Wsparcie instytucjonalne w zarządzaniu projektami badawczymi	6	0
12	Komercjalizacja badań. Marketing usług badawczych	16	0
13	Ochrona własności intelektualnej	8	0
14	Podsumowanie studium	8	8
15	Warsztaty z koordynatorami projektów	0	20
16	2-dniowa wizyta studyjna	0	10
	Razem:	114	86



CERTIFICATE

No AZJ - 2009 - XI - C577

Mrs

Paulina Pianko-Oprych

Born on 17.04.1976, Szczecin

finished the training course organized by TÜV Akademia Polska Sp. z o.o.

on 21-22.11.2009 in Szczecin

and passed an examination as

ISO 9001:2008 INTERNAL AUDITOR

The course took 16 hours

Anna Konawecka
Managing Director
TÜV Akademia Polska Sp. z o.o.



Marek Miller
Trainer

Szczecin, 22.11.2009

CERTYFIKAT

Nr AZJ - 2009 - XI - C577

Pani
Paulina Pianko-Oprych

Ur. 17.04.1976 r., Szczecin

ukończyła szkolenie organizowane przez TÜV Akademia Polska Sp. z o.o.

w dniach 21-22.11.2009 r. w Szczecinie

i zdała egzamin na:

AUDITORA WEWNĘTRZNEGO SYSTEMU ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ WG ISO 9001:2008

Czas trwania szkolenia – 16 godzin

Anna Konewicka
Dyrektor Zarządzający
TÜV Akademia Polska Sp. z o.o.



Marek Miller
Trener

Szczecin, 22.11.2009 r.



POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA

Instytut Ekonomii i Zarządzania

(jednostka prowadząca kurs)

ZAŚWIADCZENIE NR 769

UKOŃCZENIA KURSU PEDAGOGICZNEGO DLA ASYSTENTÓW UCZELNI

KURS DOSKONALENIA PEDAGOGICZNEGO DLA NAUCZYCIELI AKADEMICKICH

(nazwa kursu)

Pan(i) **Paulina Pianko-Oprych**

urodzony(a) w dniu 17 kwiecień 19 .. 76 r., w Szczecinie

uczęszczał(a) w okresie 15.02.2007 - 30.06.2007 na kurs w zakresie przygotowania
pedagogicznego wymaganego w § 69 ust. 3 Statutu Politechniki Szczecińskiej

i ukończył(a) go dnia 30 czerwca 2007

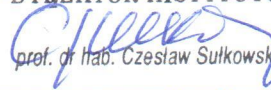
z wynikiem bardzo dobrym

Kierownik kursu
Podyplomowych Studiów Pedagogicznych


.....
dr Dariusz Zienkiewicz


(pieczęć i podpis)

Kierownik jednostki prowadzącej kurs


.....
prof. dr hab. Czesław Sulkowski

(pieczęć i podpis)

Rektor Politechniki Szczecińskiej


.....
prof. dr hab. inż. Włodzisław Kierwiński
(pieczęć i podpis)

Szczecin, dnia 24.10.2007 r

WYKAZ PRZEDMIOTÓW I LICZBA GODZIN ZAJĘĆ

nazwa kursu: KDPdNA Okres trwania od 15.02.2007 do 30.06.2007

jednostka prowadząca kurs Instytut Ekonomii i Zarządzania

Lp.	Nazwa przedmiotu	Liczba godzin	Rodzaj zajęć	Prowadzący
1.	Psychologiczne i aksjologiczne podstawy procesu nauczania w szkole wyższej	30	ćw	dr D. Zienkiewicz
2.	Pedagogika i dydaktyka szkoły wyższej	12	w	prof. dr hab. A. Pawłucki
3.	Dydaktyka szkoły wyższej	28	ćw	dr K. Matraszek
4.	Pedagogika szkoły wyższej	8	ćw	dr K. Matraszek
5.	Etyka w nauce i procesie dydaktycznym	12	w	prof. zw. dr hab. J. Such
6.	Konsultacje	15	ćw	dr K. Matraszek
Razem		105		

w – wykłady c – ćwiczenia s – seminarium l – lektoraty

KIEROWNIK
Podypisanych Studiów Pedagogicznych
Kierownik kursu
[Signature]
dr Dariusz Zienkiewicz