

ZAŁĄCZNIK 3

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria chemiczna

Autoreferat

wraz z opisem osiągnięcia i wykazem prac stanowiących jednotematyczny cykl
publikacji, pod wspólnym tytułem:

***„Analiza teoretyczno-doświadczalna ogrzewania mikrofalowego
w wybranych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych”***

dr inż. Konrad Witkiewicz

SPIS TREŚCI	strona
1. Dane osobowe.....	4
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	4
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
4. Praca zawodowa i działalność naukowo-badawcza	5
4.1. Praca zawodowa i działalność naukowo-badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych	5
4.2. Praca zawodowa i działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych.....	6
4.2.1. Suszenie sublimacyjne przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym	6
4.2.2. Regeneracja złoża adsorbentu przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym	7
4.2.3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze.....	8
4.2.4. Podsumowanie całości dorobku publikacyjnego	9
5. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.).....	10
5.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	10
5.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	11
5.3. Opis osiągnięcia naukowego.....	12
5.3.1. Wprowadzenie.....	12
5.3.2. Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach ogrzewanych mikrofalami.....	14
A. Analiza propagacji i dyssypacji energii fali elektromagnetycznej w materiałach w aplikatorze rezonansowym.....	14
B. Analiza propagacji i dyssypacji energii fali elektromagnetycznej w materiałach w aplikatorze nierezonansowym.....	15
C. Modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach w warunkach rezonansowej i nierezonansowej propagacji fali elektromagnetycznej.....	16
5.3.3. Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym	17
A. Analiza i modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie w aplikatorze rezonansowym.....	17
B. Badania doświadczalne suszenia sublimacyjnego materiałów w aplikatorze rezonansowym własnej konstrukcji.....	18
C. Modelowanie suszenia sublimacyjnego materiałów przy ogrzewaniu mikrofalowym	19
5.3.4. Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w złożu adsorbentu w procesie jego regeneracji przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym	21

A. Analiza i modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w złożu adsorbentu w procesie jego regeneracji przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym	22
B. Badania doświadczalne regeneracji adsorbentów przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym	23
C. Modelowanie regeneracji adsorbentów przy ogrzewaniu mikrofalowym	24
6. Charakterystyka działalności dydaktycznej	27
7. Charakterystyka działalności organizacyjnej	28
8. Charakterystyka działalności popularyzatorskiej	28

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: Konrad Robert Witkiewicz

Miejsce pracy: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej
Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska
Zakład Inżynierii Procesowej, Informatyki Procesowej i Ochrony Atmosfery
al. Piastów 42, 71-065 Szczecin

Stanowisko: adiunkt

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

30.06.2006 Kurs Doskonalenia Pedagogicznego dla Nauczycieli Akademickich

Studium Doskonalenia Pedagogicznego Politechniki Szczecińskiej,
Instytut Ekonomii i Zarządzania

02.10.2006 Doktor nauk technicznych

Dziedzina Nauki techniczne

Specjalność Inżynieria chemiczna i procesowa

Uczelnia Politechnika Szczecińska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

Promotor prof. dr hab. inż. Józef Nastaj

Tytuł pracy Modelowanie numeryczne suszenia sublimacyjnego materiałów ziarnistych przy ogrzewaniu mikrofalowym

28.06.2001 Magister inżynier

Specjalność Inżynieria chemiczna i procesowa

Uczelnia Politechnika Szczecińska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej

Promotor prof. dr hab. inż. Józef Nastaj

Tytuł pracy Model numeryczny suszenia sublimacyjnego materiałów porowatych o strukturze nieuporządkowanej przy ogrzewaniu dwu-obszarowym kontaktowo-radiacyjnym

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01.07.2008 – obecnie	<i>adiunkt naukowo-dydaktyczny</i>	Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska
---------------------------------	--	--

01.10.2006 –	<i>asystent</i>	Politechnika Szczecińska,
30.06.2008	<i>naukowo-dydaktyczny</i>	Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska

4. Praca zawodowa i działalność naukowo-badawcza

4.1. Praca zawodowa i działalność naukowo-badawcza przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

W 2001 roku ukończyłem studia magisterskie na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Szczecińskiej na specjalności Inżynieria chemiczna i procesowa. Praca dyplomowa, realizowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Józefa Nastaja, dotyczyła modelowania matematycznego procesu suszenia sublimacyjnego materiałów ziarnistych przy ogrzewaniu mikrofalowym. W ramach podjętych studiów doktoranckich kontynuowałem tematykę badawczą pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Józefa Nastaja. Zakres pracy doktorskiej dotyczył następujących zagadnień:

- Badania eksperymentalne etapu podstawowego suszenia sublimacyjnego wybranych modelowych materiałów ziarnistych: adsorbentów węglowych (węgiel aktywny) i niewęglowych (silikażel, sita molekularne), piasek morski oraz szkło rozdrobnione ([B1], [C4]-[C5]). Proces prowadzono w komorze próżniowej w warunkach poniżej punktu potrójnego wody. Badany materiał umieszczano w aplikatorze będącym odcinkiem falowodu prostokątnego. Fala elektromagnetyczna o częstotliwości ok. 2,45 GHz propagowała się wewnątrz aplikatora w warunkach rezonansowych. Falę stojącą uzyskiwano dostrajając aplikator, tj. przesuwając pozycję jednej ze ścianek falowodu podczas procesu. Rejestrowano temperaturę i masę materiału, ciśnienie w komorze próżniowej, temperaturę wymrażacza, napięcie detektora mikrofalowego mierzącego moc fali odbitej oraz moc fali w aplikatorze. Zmierzono wydajność wewnętrznego źródła ciepła w materiałach, wykorzystując do kalibracji układu substancję wzorcową o znanych właściwościach dielektrycznych, taką jak woda destylowana.
- Sformułowano jednowymiarowy model matematyczny pierwszego okresu suszenia sublimacyjnego materiału w geometrii kartezjańskiej ([A1]-[A2], [C1]-[C3]) i kulistej [A3]. Zakładano, między innymi, że sublimacja wilgoci zachodzi na ruchomej granicy przemiany fazowej, która jest równomiernie przemieszczającą się płaszczyzną (model URIF – ang. *Uniformly Retreating Ice Front*). Generowane wewnętrzne źródło ciepła w materiale, na skutek ogrzewania mikrofalowego, obliczano dla efektywnych wartości parametrów dielektrycznych warstwy suchej i zamrożonej. Zaniedbywano rozkład natężenia pola elektrycznego w próbce wywołany tłumieniem fali, przyjmując jego uśrednioną wartość. Bilans masy i energii na ruchomej granicy umożliwił określenie szybkości sublimacji i zmianę położenia ruchomej granicy. Wyniki badań eksperymentalnych posłużyły do weryfikacji modelu matematycznego. Uzyskano dość dobrą zgodność doświadczalnych krzywych suszenia z wynikami symulacji.

4.2. Praca zawodowa i działalność naukowo-badawcza po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych zostałem zatrudniony w 2006 roku na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego, a od 2008 roku na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej w Zakładzie Inżynierii Procesowej, Informatyki Procesowej i Ochrony Atmosfery. Tematyka badawcza, którą się zajmuję, obejmowała zastosowanie ogrzewania mikrofalowego w procesach suszarniczych i adsorpcyjnych.

4.2.1. Suszenie sublimacyjne przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym

Po uzyskaniu stopnia doktora, rozszerzyłem zakres badań dotyczących mikrofalowego suszenia sublimacyjnego o produkt spożywczy (wołowina) oraz adsorbent węglowy (Sorbonorit 4). Pierwszy materiał jest przedstawicielem słabych dielektryków, drugi – typowym doskonałym dielektrykiem. Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych i modelowania opublikowałem w pracach [H1]-[H7], [H10], [C6]. Analizowałem również etap podstawowego mikrofalowego suszenia sublimacyjnego mannitolu [H2] oraz etap wtórnego procesu suszenia dla zeolitu DAY-20F [H2].

W modelowaniu etapu podstawowego ([H1]-[H2]) i wtórnego procesu ([H1]-[H2], [H5]), w jednowymiarowej geometrii kartezjańskiej, stosowałem dwa podejścia:

- przyjmowałem jednorodny rozkład natężenia pola elektrycznego w materiale,
- obliczałem rozkład natężenia pola elektrycznego w materiale na podstawie modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła z uwzględnieniem dyssypacji energii mikrofal i efektów częściowego lub całkowitego odbicia fal na granicy ośrodków i superpozycję tych fal.

W metodologii rozwiązywania modelu matematycznego etapu podstawowego suszenia sublimacyjnego z ogrzewaniem mikrofalowym zastosowałem dwa alternatywne podejścia:

- transformację Landau'a – w której zmienna bezwymiarowa położenia jest zdefiniowana w taki sposób, aby matematycznie przekształcić zagadnienie ruchomej granicy w zagadnienie nieruchomej granicy,
- metodę zmiennego kroku czasowego (VTS – ang. *Variable Time Step*) - zaliczaną do grupy metod stałociątkowych.

Rezultaty symulacji procesu, dla obu podejść, były porównywalne i zostały przedstawione w pracach: [H1]-[H2], [H10], [C10].

Wyznaczyłem charakterystyki regulacyjne podstawowego etapu suszenia sublimacyjnego z ogrzewaniem mikrofalowym ([H1]-[H2], [H6]-[H7], [C9]). Zdefiniowałem funkcję celu wiążącą wartość natężenia pola elektrycznego z bezwymiarowym położeniem ruchomej granicy ([H7], [C9]). Zastosowanie zmiennego natężenia pola elektrycznego podczas procesu, zgodnie z zaproponowanym algorytmem optymalizacyjnym, spowodowało zredukowanie całkowitego czasu suszenia o ponad 50%. Zaproponowałem metodę doboru optymalnej wartości natężenia pola elektrycznego na podstawie, między innymi, analizy zależności pomiędzy obliczoną maksymalną temperaturą osiągniętą w warstwie zamrożonej, a grubości próbki, dla różnych nastaw wartości natężenia pola elektrycznego.

4.2.2. Regeneracja złoża adsorbentu przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym

Zakres badań nad generowaniem wewnętrznych źródeł ciepła w polu elektromagnetycznym rozszerzyłem o wybrane układy adsorpcyjne, stanowiące kombinację adsorbentu węglowego lub niewęglowego oraz polarnego lub niepolarnego związku zaadsorbowanego. Równowagi adsorpcyjne analizowanych układów opisałem równaniami izoterm, których współczynniki wyznaczyłem metodą analizy regresji danych doświadczalnych ([H9], [A4], [C7]).

Sformułem model matematyczny mikrofalowej regeneracji złoża adsorbentu ziarnistego w geometrii jednowymiarowej ([H8], [H11], [C11]) oraz dwuwymiarowej [H1]. Przyjąłem, że przemywający gaz inertny (azot) doprowadzany jest przez górny wlot kolumny – w kierunku przeciwnym do strumienia mieszaniny gazu nośnego i lotnego związku organicznego ([H1], [H11]) lub pary wodnej ([H8], [C11]) w etapie adsorpcji. W modelu jednowymiarowym zakładałem jednorodny rozkład natężenia pola elektrycznego w materiale oraz propagowanie się mikrofal padających przez pobocznice złoża adsorbentu. W wyniku symulacji, otrzymywano stężeniowe i temperaturowe krzywe wyjścia dla danej wartości natężenia pola elektrycznego oraz gęstości strumienia masy gazu przemywającego.

W przypadku modelu dwuwymiarowego fala emitowana była w osi złoża, a rozkład natężenia pola elektrycznego w materiale obliczałem na podstawie modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła dla aplikatora nierezonansowego ([H1], [G7]). Zakładałem podwójne odbicie fali propagującej się promieniowo od granicy złoża-powierzchnia metaliczna (ścianki kolumny i emitera). Uwzględniłem efekt rozpraszania i skupiania się fal w geometrii cylindrycznej. Poprawność założeń przyjętych w modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła zweryfikowałem w serii pomiarów prowadzonych bez desorpcji składnika. W tym celu ogrzewałem mikrofalami próbki czystego węgla aktywnego Norit RB4 i czystego zeolitu HiSiv 1000 [C12] oraz wody destylowanej [H1] w aplikatorze nierezonansowym. Uzyskałem dobrą zgodność obliczonych i zmierzonych temperatur w miejscu pomiaru w próbce, za pomocą czujnika sondy termometru fluoro-optycznego.

Wyniki symulacji procesu regeneracji mikrofalowej złoża adsorbentu ziarnistego w geometrii dwuwymiarowej cylindrycznej porównałem z rezultatami pomiarów doświadczalnych. Badania prowadziłem w kolumnie własnej konstrukcji z osiowo umieszczoną anteną z nierezonansową propagacją fal. Analizowałem układy adsorpcyjne stanowiące kombinację adsorbentu węglowego (węgiel aktywny BPL) lub niewęglowego (zeolit HiSiv 1000) oraz polarnego (propan-2-ol) lub niepolarnego (toluen) związku zaadsorbowanego [H1]. Obliczone krzywe wyjścia stężenia składnika w fazie gazowej dość dobrze korelowały z wynikami pomiarów.

Na podstawie opracowanego modelu regeneracji mikrofalowej adsorbentu ziarnistego w geometrii jednowymiarowej ([H8], [H11], [C11]) przeanalizowałem cztery kombinacje układów adsorpcyjnych:

- związek polarny–adsorbent węglowy (np. woda–Sorbonorit 4 [H8], [C11], propan-2-ol–Sorbonorit 3 [H11]) - proces przebiegał najintensywniej,

- związek niepolarny–adsorbent węglowy (np. toluen–Sorbonorit 4 [H8]) - proces desorpcji był możliwy do zrealizowania, lecz mniej efektywny, niż w układzie ze związkiem polarnym,
- związek polarny–adsorbent niewęglowy (np. propan-2-ol–HiSiv 1000 [H11]) - związek ogrzewał się selektywnie, desorpcja składnika była niepełna,
- związek niepolarny–adsorbent niewęglowy (toluen–HiSiv 1000 [H11]) - desorpcja składnika była nieefektywna.

Dla układu związek polarny-adsorbent węglowy (propan-2-ol–Sorbonorit 3 [H11]) zaproponowałem kontrolowanie temperatury złoża za pomocą regulacji natężenia pola elektrycznego, aby zapobiec przegrzaniu się złoża powyżej założonej temperatury maksymalnej. Na podstawie analizy parametrycznej regeneracji mikrofalowej adsorbentu określiłem wpływ trzech kluczowych parametrów procesu: natężenia pola elektrycznego, gęstości strumienia masy gazu przemywającego oraz średnicy złoża na intensywność procesu [H1]. Stwierdziłem, że w układzie z węglem aktywnym, gdzie tłumienie fal jest intensywne, średnica złoża jest kluczowym parametrem decydującym o możliwości skutecznej regeneracji złoża adsorbentu w polu elektromagnetycznym.

4.2.3. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Uczestniczyłem w badaniach procesów adsorpcyjnych, przeprowadzając modelowanie równowagi adsorpcyjnej w fazie gazowej i ciekłej dla wybranych układów. Wyniki badań w tym zakresie zaprezentowano w pracach: [A4]-[A5], [C7]-[C8]. Analizowałem następujące układy adsorpcyjne w fazie gazowej:

- propan-2-ol–Norit RB4; propan-2-ol–Sorbonorit 3; propan-2-ol–Sorbonorit 4; toluen–Norit RB4; toluen–Sorbonorit 3; toluen–Sorbonorit 4; tetrachlorometan–Norit RB4; tetrachlorometan–Sorbonorit 3; tetrachlorometan–Sorbonorit 4 [A4],
- propan-2-ol–HiSiv 1000; propan-2-ol–HiSiv 3000; toluen–HiSiv 1000; toluen–HiSiv 3000 [C7],

oraz w fazie ciekłej:

- Cu(II)–chitozan; Zn(II)–chitozan; Cu(II)–Zn(II)–chitozan [A5],
- fenol–XAD-4; fenol–XAD-6 [C8].

Zajmowałem się również modelowaniem wybranych procesów adsorpcyjnych w fazie ciekłej i gazowej:

- etapu adsorpcji fenolu w ciekłej fazie fluidalnej na adsorbencie polimerowym Amberlite XAD-4 [B2],
- etapu desorpcji propan-2-olu lub toluenu ze złoża zeolitu HiSiv 1000 i HiSiv 3000 w procesie cyklicznej adsorpcji zmiennie-temperaturowej TSA [C13],
- procesu biosorpcji z fazy ciekłej jonów Fe(III) na biosorbentach będących modyfikowaną fizycznie (TvAH i TvOH) lub chemicznie (TvANa i TvONa) biomasą grzyba pleśniowego *Trichoderma viride* [C14],

- etapu desorpcji propan-2-olu z nieruchomego złoża węgla aktywnego Sorbonorit 4 w cyklicznym procesie adsorpcji zmiennie-temperaturowej próżniowej VTSA (ang. *Vacuum Temperature Swing Adsorption*) [C15],
- niekonwencjonalnej desorpcji n-butanolu z nieruchomego złoża będącego mieszaniną adsorbentu węglowego Sorbonorit 3 i ziaren żelaza w procesie wspomaganym ogrzewaniem indukcyjnym ([A6]-[A7]).

4.2.4. Podsumowanie całości dorobku publikacyjnego

Mój dotychczasowy dorobek naukowy obejmuje **21** publikacji, w tym rozprawę doktorską, **4** publikacje przed doktoratem (**3** prace uwzględnione w bazie *JCR*, **1** pracę z listy ministerialnej spoza bazy *JCR*) oraz **16** publikacji po uzyskaniu stopnia doktora (**11** prac uwzględnionych w bazie *JCR*, **1** monografię habilitacyjną, **1** rozdział w monografii, **3** prace z listy ministerialnej spoza bazy *JCR*). W skład mojego dotychczasowego całkowitego dorobku naukowego wchodzi:

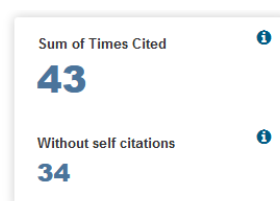
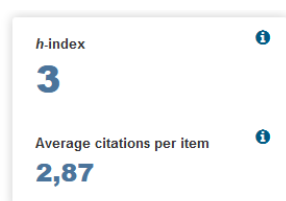
- rozprawa doktorska pt. „Modelowanie numeryczne suszenia sublimacyjnego materiałów ziarnistych przy ogrzewaniu mikrofalowym”,
- monografia habilitacyjna pt. „Analiza teoretyczno-doświadczalna ogrzewania mikrofalowego w wybranych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych”,
- **1** rozdział w monografii,
- **14** publikacji w czasopismach uwzględnionych w bazie *Journal Citation Reports* (sumaryczny współczynnik *Impact Factor*, liczony zgodnie z rokiem publikowania, wynosi **IF=18,29**),
- **4** publikacje w recenzowanych czasopismach punktowanych według listy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz spoza listy,
- **15** prezentacji na konferencjach krajowych i międzynarodowych.

Szczegółowe dane dotyczące punktacji IF oraz ministerialnej moich prac naukowych zestawilem w Tabeli 1. Sumaryczna liczba punktów MNiSW prac przed i po doktoracie wynosi **339** (przypadająca na autora **157**), sumaryczny IF=**18,29** (przypadający na autora **8,11**). Sumaryczna liczba punktów MNiSW prac po doktoracie wynosi **288** (przypadająca na autora **131,45**), sumaryczny IF=**17,17** (przypadający na autora **7,55**). Liczba punktów MNiSW prac stanowiących podstawę wniosku wynosi **177** (przypadająca na autora **89**), sumaryczny IF=**9,41** (przypadający na autora **4,6**).

Według danych bibliograficznych zawartych w bazie Web of Science (z 25.01.2018 r.) liczba cytowań wszystkich artykułów wynosi **43** (**34** bez autocytowań), a **Indeks Hirscha** wynosi **3**. Szczegółowy wykaz wszystkich wymienionych publikacji zamieściłem w **Załączniku 4**.

Tabela 1. Zestawienie punktacji prac naukowych

Prace naukowe		Liczba prac			Liczba pkt. IF sumaryczna / habilitanta	Liczba pkt. MNiSW sumaryczna / habilitanta
		ogółem	z bazy JCR	spoza bazy JCR		
przed doktoratem		4	3	1	1,12 / 0,56	51 / 25,5
po doktoracie	podstawa wniosku	11	7	4	9,41 / 4,60	177 / 89,0
	pozostałe	5	4	1	7,76 / 2,95	111 / 42,45
	suma	16	11	5	17,17 / 7,55	288 / 131,45
suma		20	14	6	18,29 / 8,11	339 / 157



Report osiągnięć publikacyjnych w bazie Web of Science, ID: I-8249-2016 (25.01.2018 r.)

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

5.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Podstawą do wszczęcia i przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna jest jednotematyczny cykl publikacji pod wspólnym tytułem:

„Analiza teoretyczno-doświadczalna ogrzewania mikrofalowego w wybranych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych”

w skład którego wchodzi:

- monografia habilitacyjna pt.: „Analiza teoretyczno-doświadczalna ogrzewania mikrofalowego w wybranych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych”,
- 1 rozdział w monografii pt. “Experimental and simulation studies of the primary and secondary vacuum freeze drying at microwave heating”,
- 7 publikacji w czasopismach naukowych uwzględnionych w bazie *Journal Citation Reports*,
- 2 publikacje w czasopismach naukowych z listy MNiSW.

Szczegółowy wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe przedstawiono w **punkcie 5.2.** wraz z informacją o współczynniku *Impact Factor* z roku publikacji, liczbie punktów ministerialnych oraz procentowym udziale własnym. Oświadczenia współautorów o ich udziale w poszczególnych publikacjach przedstawiono w **Załączniku 5.** Oświadczenia

habilitanta, określające jego indywidualny wkład, przedstawiono w **Załączniku 4**. Kopie publikacji składających się na jednotematyczny cykl publikacji zebrano w **Załączniku 6 i 7**.

5.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Symbol	Dane bibliometryczne publikacji	Punktacja IF (rok)	Punktacja MNiSW (rok)	Udział własny
Monografia habilitacyjna				
H1	Witkiewicz K., Analiza teoretyczno-doświadczalna ogrzewania mikrofalowego w wybranych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych. BEL Studio, Warszawa 2018, ISBN 978-83-7798-624-0.		25	100 %
Rozdziały w recenzowanych monografiach				
H2	Nastaj J., Witkiewicz K. , Experimental and simulation studies of the primary and secondary vacuum freeze drying at microwave heating. Grundas S. (Ed.), Advances in induction and microwave heating of mineral and organic materials, 615-640, InTech 2011.		5 (2011)	50 %
Publikacje w czasopismach naukowych uwzględnionych w bazie <i>Journal Citation Reports</i>				
H3	Nastaj J., Witkiewicz K. , Kamińska A., Experimental identification of internal heat source capacity in vacuum freeze drying of random solids at microwave heating, Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 2007, 28 (4), 1033-1044.	0,115 (2007)	10 (2007)	45 %
H4	Nastaj J., Witkiewicz K. , Wilczyńska B., Experimental and simulation studies of primary vacuum freeze-drying process of random solids at microwave heating. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35 (4), 430-438.	1,332 (2008)	15 (2008)	45 %
H5	Nastaj J., Witkiewicz K. , Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52 (21-2), 4796-4806.	1,947 (2009)	24 (2009)	50 %
H6	Witkiewicz K. , Nastaj J., Simulation strategies in mathematical modeling of microwave heating in freeze-drying process. Drying Technology, 2010, 28 (8), 1001-1012.	1,662 (2010)	32 (2010)	50 %
H7	Witkiewicz K. , Nastaj J., Optimal control policy of the microwave primary freeze drying of random solids. Drying Technology, 2011, 29 (2), 217-229.	2,084 (2011)	35 (2011)	50 %
H8	Witkiewicz K. , Nastaj J., Modeling of microwave-assisted regeneration of selected adsorbents loaded with water or toluene. Drying Technology, 2014, 32 (11), 1369-1385.	1,518 (2014)	30 (2014)	50 %
H9	Nastaj J., Witkiewicz K. , Chybowska M., Modeling of multicomponent and multitemperature adsorption equilibria of water vapor and organic compounds on activated carbons. Adsorption Science & Technology, 2016, 34 (2-3), 144-175.	0,754 (2016)	15 (2016)	45 %

Symbol	Dane bibliometryczne publikacji	Punktacja IF (rok)	Punktacja MNiSW (rok)	Udział własny
Publikacje w czasopiśmie naukowych z listy MNiSW (część B wykazu)				
H10	Witkiewicz K. , Nastaj J., Modeling of the primary microwave freeze-drying of granular solids using a fixed grid approach, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2010, 49 (2), 127-128.		6 (2010)	50 %
H11	Witkiewicz K. , Modelowanie matematyczne mikrofalowej regeneracji wybranych adsorbentów węglowych i zeolitowych, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2014, 53 (4), 320-321.		5 (2014)	100 %

Konrad Witkiewicz

5.3. Opis osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl publikacji pod wspólnym tytułem:

„Analiza teoretyczno-doświadczalna ogrzewania mikrofalowego w wybranych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych”

5.3.1. Wprowadzenie

Przedstawiony dorobek naukowy jest wynikiem prac doświadczalnych i teoretycznych dotyczących badania możliwości zastosowania ogrzewania mikrofalowego w wybranych procesach inżynierii chemicznej, zwłaszcza w energochłonnych procesach suszarniczych i adsorpcyjnych. Zakres badań obejmował następujące kluczowe zagadnienia naukowe:

- Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach ogrzewanych mikrofalami:
 - propagacja i dyssypacja energii fali elektromagnetycznej w materiałach w aplikatorze rezonansowym i nierezonansowym,
 - modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach o różnej geometrii ogrzewanych mikrofalami.
- Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym:
 - propagacja i dyssypacja energii fali elektromagnetycznej w materiałach suszonych sublimacyjnie w aplikatorze rezonansowym,
 - modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie przy ogrzewaniu mikrofalowym,
 - analiza parametryczna procesu z określeniem granicznych warunków suszenia sublimacyjnego wspomaganego ogrzewaniem mikrofalowym.
- Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w nieruchomym złożu adsorbentu w procesie jego regeneracji przy ogrzewaniu mikrofalowym:
 - propagacja i dyssypacja energii fali elektromagnetycznej w układzie złożu adsorbentu-związek zaadsorbowany,

- modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w nieruchomym złożu adsorbentu w aplikatorze nierezonansowym,
- analiza parametryczna procesu z określeniem granicznych warunków regeneracji nieruchomego złoża adsorbentu w aplikatorze nierezonansowym.

Zasadniczym celem prowadzonych przez mnie badań było zaproponowanie jakościowego oraz ilościowego opisu propagacji fali elektromagnetycznej oraz mechanizmów dyssypacji energii tej fali w ciepło w ogrzewanych materiałach o różnej geometrii, w wybranych procesach inżynierii chemicznej, w aplikatorach rezonansowych i nierezonansowych. W tym celu sformułowałem model wydajności wewnętrznego źródła ciepła z uwzględnieniem efektów towarzyszących propagacji fali: częściowego lub całkowitego odbicia fali na granicy materiałów różniących się właściwościami dielektrycznymi oraz superpozycji fal. Model ten zastosowałem w analizie teoretyczno-doświadczalnej wybranych procesów wspomaganym ogrzewaniem mikrofalowym, w których zachodzi jednoczesny ruch ciepła i masy. Podstawowym przedmiotem mojego zainteresowania w tym zakresie była technika ogrzewania mikrofalowego, jako alternatywna metoda ogrzewania w energochłonnych procesach suszenia sublimacyjnego oraz regeneracji adsorbentów.

Specyfika ogrzewania mikrofalowego wynika z jego trzech unikalnych właściwości: ogrzewania materiału w całej jego objętości, z dużą intensywnością oraz w sposób selektywny. Zakres zastosowań techniki ogrzewania mikrofalowego jest ograniczony, między innymi z powodu względnie małej głębokości wnikania fal w materiałach, wynikającej z tego niejednorodności ogrzewania oraz występowania zjawisk lokalnego przegrzewania się materiału. Projektując aplikatory mikrofalowe, w których prowadzone są procesy inżynierii chemicznej wspomagane ogrzewaniem mikrofalowym, należy liczyć się z koniecznością analizy propagacji mikrofal oraz wydajności wewnętrznego źródła ciepła w ogrzewanych materiałach, indywidualnie dla danej konstrukcji aparatu. Wyniki tych badań umożliwiają lepsze zrozumienie mechanizmu analizowanych zjawisk oraz, w kolejnym etapie, mogą być zastosowane do projektowania efektywnie pracujących aparatów oraz optymalizacji procesu.

Badane przez mnie układy suszarnicze i adsorpcyjne są niezwykle złożone z punktu widzenia propagacji fali. Zastosowanie ogrzewania mikrofalowego w suszeniu sublimacyjnym całkowicie zmienia warunki prowadzenia procesu, w porównaniu z klasycznymi metodami ogrzewania kontaktowego. Objętościowy charakter generacji ciepła w wyniku absorpcji i dyssypacji energii fali elektromagnetycznej w ciepło, bezpośrednio w materiale, eliminuje problem doprowadzania strumienia energii do warstwy zamrożonej materiału. Specyfiką suszenia sublimacyjnego jest zagadnienie ruchomej granicy sublimacji lodu, dzielącej suszony materiał na obszar zamrożony i wysuszony. W modelowaniu procesu należy uwzględnić wydajność wewnętrznego źródła ciepła w tych dwóch, różnych pod względem właściwości dielektrycznych, obszarach materiału, których objętość ulega ciągłej zmianie podczas suszenia. Dodatkowo należy określić graniczne warunki prowadzenia

procesu, aby uniknąć topnienia warstwy zamrożonej materiału oraz zapłonu plazmy, powodującej mechaniczną i termiczną degradację struktury materiału.

Zastosowanie ogrzewania mikrofalowego w procesie regeneracji nieruchomego złoża adsorbentu wymaga przeprowadzenia analizy propagacji fali i generacji ciepła w układach adsorbent–związek adsorbowany o zbliżonych lub odmiennych właściwościach dielektrycznych. Usuwanie z układu składnika w wyniku jego desorpcji podczas procesu wpływa na efektywność i selektywność ogrzewania mikrofalowego. Szczególne wyzwania stanowią układy z adsorbentem węglowym, dla których podejmowane są próby powiększania skali kolumn adsorpcyjnych, ograniczone właściwie tylko do zastosowania adsorbentów tkaninowych ACF (ang. *Activated Carbon Fiber*). W ramach prowadzonych przeze mnie badań opracowałem własną konstrukcję aplikatora nierezonansowego, który w swoim założeniu umożliwi regenerację nieruchomego złoża adsorbentu ziarnistego w typowej cylindrycznej kolumnie adsorpcyjnej, w skali powszechnie stosowanych filtrów adsorpcyjnych. Niestandardowy charakter propagacji fali w takim aparacie wymagał sformułowania modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła z uwzględnieniem doświadczalnie wyznaczonej charakterystyki regulatora prądu magnetronu.

5.3.2. Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach ogrzewanych mikrofalami

W analizie teoretyczno-doświadczalnej procesów inżynierii chemicznej wspomaganych ogrzewaniem mikrofalowym, niezbędne jest uwzględnienie zjawisk związanych z interakcją materii z polem elektromagnetycznym. W ujęciu badań w skali podstawowej efekt ogrzewania mikrofalowego można opisać jakościowo oraz ilościowo, określając wydajność wewnętrznego źródła ciepła. Zagadnienie to dodatkowo komplikują zjawiska częściowego lub całkowitego odbicia fal oraz ich superpozycji w aplikatorach mikrofalowych.

A. Analiza propagacji i dyssypacji energii fali elektromagnetycznej w materiałach w aplikatorze rezonansowym

Przeprowadziłem analizę rozkładu natężenia pola elektrycznego i jego interakcji z materiałem znajdującym się w polu elektromagnetycznym fali o standardowej częstotliwości 2,45 GHz. Realizując badania na poziomie podstawowym, dążyłem do uzyskania przewidywalnych warunków propagacji fali w aplikatorze mikrofalowym rezonansowym, które można opisać znanymi zależnościami matematycznymi. Aplikator był fragmentem falowodu prostokątnego o wymiarach wewnętrznych 50x100x200 mm. Fala elektromagnetyczna doprowadzana była do anteny emitującej mikrofałe wewnątrz aplikatora. Pozycja jednej z jego ścianek była regulowana tak, że możliwe było skracanie bądź wydłużanie odcinka aplikatora, w którym propagują mikrofałe. Tak skonstruowany układ umożliwiał precyzyjne dostrojenie aplikatora, czyli uzyskiwanie propagacji fali stojącej o modzie TE_{10n} (ang. *Transverse Electric*), gdzie n jest liczbą połowicznych długości fali,

zależną od położenia ruchomej ścianki. Moment dostrojenia aplikatora określano na podstawie wskazań napięcia detektora mikrofalowego. Temperaturę materiału mierzono z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$ za pomocą czujnika sondy fluoro-optycznej (Luxtron, USA), który nie zakłócał istotnie rozkładu pola elektromagnetycznego w badanej próbce.

Badano wybrane modelowe materiały ziarniste: węgiel aktywny Norit RB4 (Norit, Holandia) ([H1], [C12]), zeolit HiSiv 1000 (UOP, USA) ([H1], [C12]) i rozdrobnione szkło ([H3], [C6]). Wyznaczono długość fali odcięcia w aplikatorze dla danego materiału i mieszanin materiałów w funkcji temperatury ([H1], [C12]). Zmierzono wydajność wewnętrznego źródła ciepła w materiałach, wykorzystując do kalibracji układu substancji wzorcowej o znanych właściwościach dielektrycznych, takiej jak woda destylowana. Wyniki pomiarów posłużyły do walidacji modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła w warunkach rezonansowych propagacji fali (punkt C).

B. Analiza propagacji i dyssypacji energii fali elektromagnetycznej w materiałach w aplikatorze nierezonansowym

Przeprowadziłem analizę rozkładu natężenia pola elektrycznego w aplikatorze nierezonansowym własnej konstrukcji, który w swym zamierzeniu pełnił rolę kolumny adsorpcyjnej w badaniach regeneracji mikrofalowej. Aplikator miał kształt cylindrycznej rury o średnicy wewnętrznej 48 mm i długości 220 mm z umieszczoną osiowo anteną o średnicy 4 mm. Aplikator pracował w warunkach nierezonansowych, a mikrofałe emitowane były przez antenę w kierunku promieniowym i osiowym na całej jej długości.

Charakterystykę regulacyjną nastaw regulatora prądu magnetronu wyznaczyłem dla aplikatora nierezonansowego metodą kalorymetryczną, mierząc efekt cieplny ogrzewania mikrofalowego próbek materiału przy antenie. Oszacowane na tej podstawie wartości natężenia pola elektrycznego zależały nie tylko od nastawy regulatora N , lecz również od osiowej zmiennej położenia w aplikatorze [H1]:

$$E_0(N, z) = -83,1775 \sin(89,4768z + 167,581) + 1039,59 + 15,3588(N - 30) \quad (1)$$

gdzie $z=0$ m określono arbitralnie, jako położenie fali padającej w kolumnie. Zależność powyższa została uzyskana na podstawie analizy regresji danych doświadczalnych w zakresie $N=30\div 70$.

W aplikatorze nierezonansowym badałem efekt ogrzewania mikrofalowego próbek wody destylowanej - jako substancji wzorcowej oraz węgla aktywnego BPL 4x6 (Calgon Carbon Corporation, USA). Zmierzyłem wydajność wewnętrznego źródła ciepła w próbkach materiałów umieszczonych na różnych wysokościach w kolumnie. Wyniki pomiarów posłużyły do walidacji modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła w warunkach osiowej i promieniowej emisji fali (punkt C).

C. Modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach w warunkach rezonansowej i nierezonansowej propagacji fali elektromagnetycznej

Formułując model wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach ogrzewanych mikrofalami, oprócz samego mechanizmu dyssypacji energii, należy uwzględnić zjawisko tłumienia fali w materiale oraz efekty częściowego odbicia fal na granicy międzyfazowej i superpozycji fal. Efekt cieplny ogrzewania, wyrażony w watach na jednostkę objętości, zależy od kwadratu natężenia pola elektrycznego E i właściwości dielektrycznych materiału. Precyzyjne wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego w materiale decyduje o dokładności identyfikacji wydajności wewnętrznego źródła ciepła. Wykazałem, że dla materiałów o małych wartościach stałej dielektrycznej (piasek morski, rozdrobnione szkło, zeolit HiSiv 1000), natężenie pola elektrycznego można uśrednić w całej objętości badanej próbki. Natomiast dla typowych dielektryków (np. węgla aktywnego) takie uproszczenie jest niedopuszczalne.

Zjawisko tłumienia fali w absorbującym ośrodku opisano za pomocą prawa Lamberta-Beera z uwzględnieniem efektów częściowego odbicia fali na granicach materiał – powietrze na powierzchni próbki. Fala elektromagnetyczna padając przez powierzchnię boczną próbki ulega częściowemu odbiciu, a pozostała jej część propaguje się wewnątrz materiału. Jeśli jej energia nie zostanie całkowicie rozproszona, wówczas na przeciwległej powierzchni próbki zachodzi ponownie zjawisko częściowego odbicia. Z kolei odbita fala wracająca z kierunku przeciwnego jest również tłumiona w warstwie materiału. Zazwyczaj trzy przebiegi fali wystarczą do całkowitej dyssypacji jej energii w próbce. Jeśli próbka ma kształt cylindra lub kuli zachodzi wówczas dodatkowo efekt skupiania energii fali propagującej się przez coraz mniejszą powierzchnię, w miarę zbliżania się do osi próbki.

Model wydajności wewnętrznego źródła ciepła sformułowałem dla różnych geometrii i założeń, spośród których dwa przypadki zweryfikowałem doświadczalnie [H1]:

- model dwuwymiarowy w geometrii cylindrycznej dla fali padającej przez powierzchnię boczną próbki oraz przez jej powierzchnie górną i dolną,
- model dwuwymiarowy w geometrii cylindrycznej dla fali emitowanej w osi próbki oraz propagującej przez jej powierzchnie górną i dolną.

W pierwszym przypadku założenia modelu były zgodne z warunkami propagacji fali w aplikatorze rezonansowym (punkt *A*). W drugim przypadku uwzględniłem warunki propagacji fali w aplikatorze nierezonansowym własnej konstrukcji (punkt *B*). Dla obu typów aplikatora rozwiązywałem równanie Fouriera w geometrii cylindrycznej 2D stosując metodę numeryczną różnic skończonych Eulera [H1]. Uwzględniłem podwójne odbicie fal na granicy materiał–powietrze. Poprawność przyjętych założeń zweryfikowałem doświadczalnie ogrzewając w aplikatorze rezonansowym próbki węgla aktywnego Norit RB4 i zeolitu HiSiv 1000 oraz w aplikatorze nierezonansowym – próbki wody destylowanej i węgla aktywnego BPL [H1]. Uzyskane w wyniku obliczeń rozkłady temperatury korespondowały z rozkładem

natężenia pola elektrycznego w materiale. Zmierzona w czasie procesu temperatura materiału była bliska wartościom obliczonym. Potwierdzono tym samym trafność przyjętych założeń w modelowaniu oraz poprawność wyznaczonej charakterystyki regulacji prądu magnetronu dla zastosowanych aplikatorów.

5.3.3. Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym

Zastosowanie mikrofal w suszeniu sublimacyjnym jest realną alternatywną metodą ogrzewania materiału. Woda zamrożona, w przeciwieństwie do fazy ciekłej, jest bardzo słabym dielektrykiem. Umożliwia to проникnięcie fali na wielokrotnie większą głębokość niż w materiale niezamrożonym. Przy ogrzewaniu mikrofalowym ciepło generuje się objętościowo i selektywnie głównie w obszarze zamrożonym. Zastosowanie mikrofalowego suszenia sublimacyjnego na skalę przemysłową ma wciąż ograniczony zakres. Istotną kwestią jest właściwe i optymalne sterowanie parametrami procesu (ciśnienie, natężenie pola elektrycznego) w celu uzyskania produktu finalnego o wysokiej jakości. Parametry procesu muszą być tak dobrane, aby uniknąć wyładowań plazmowych, nierównomiernego ogrzewania materiału, topnienia lodu czy przegrzania warstwy wysuszonej.

A. Analiza i modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie w aplikatorze rezonansowym

Analizę propagacji fali elektromagnetycznej w suszonym sublimacyjnie materiale ogrzewanym mikrofalami przeprowadziłem dla dwóch przypadków [H1]:

- w geometrii kartezjańskiej jednowymiarowej,
- w geometrii cylindrycznej dwuwymiarowej.

W pierwszym przypadku sformułowałem model jednowymiarowy wydajności wewnętrznego źródła ciepła w suszeniu sublimacyjnym materiałów będących słabymi dielektrykami. Do tej grupy zalicza się typowe biomateriały i produkty spożywcze w postaci zamrożonej oraz wysuszonej, które charakteryzują się dużymi głębokościami penetracji mikrofal rzędu nawet kilku metrów. Uwzględniłem trzy przebiegi fal w warstwie zamrożonej i wysuszonej padających z dwóch przeciwległych kierunków – przez dolną i górną powierzchnię. Częściowe odbicie fal następowało na granicach międzyfazowych: otoczenie–warstwa zamrożona, otoczenie–warstwa wysuszona oraz warstwa zamrożona–warstwa wysuszona (ruchoma granica). Zaobserwowałem intensyfikację natężenia pola elektrycznego na skutek superpozycji fal w warstwie suchej słabego dielektryka (wołowina). Odwrotna zależność występowała w przypadku dobrych dielektryków (węgiel aktywny Sorbonorit 4).

W modelu dwuwymiarowym w geometrii cylindrycznej wypadkowa wydajność wewnętrznego objętościowego źródła ciepła w suszonym materiale była efektem propagacji

fali elektromagnetycznej padającej przez powierzchnię boczną próbki w warstwie zamrożonej i wysuszonej materiału (propagacja promieniowa) oraz powierzchnie górną i dolną (propagacja osiowa). Stwierdziłem, że udział fal padających przez powierzchnię górną i dolną próbki jest znaczący w przypadku dobrych dielektryków (węgiel aktywny). W warstwie suchej Sorbonoritu 4 wartość natężenia pola elektrycznego była większa o ok. 50%, a w warstwie zamrożonej – o ok. 20%, w porównaniu z procesem prowadzonym przy propagacji promieniowej fali. Dla wołowiny, wartości te wyniosły odpowiednio ok. 25% i 30% [H1].

B. Badania doświadczalne suszenia sublimacyjnego materiałów w aplikatorze rezonansowym własnej konstrukcji

Proces suszenia sublimacyjnego przy ogrzewaniu mikrofalowym badałem eksperymentalnie w falowodowym aplikatorze prostokątnym w warunkach rezonansowych ([H1]-[H2], [H4]-[H6]). Był to ten sam aplikator, jakiego użyłem w analizie ogrzewania mikrofalowego materiałów przedstawionej w pkt. 5.3.2.-A. Układ mikrofalowy wyposażony był dodatkowo w sprzęgacz kierunkowy. Jego zadaniem była ochrona magnetronu przed odbitą mikrofalą powracającą z aplikatora i kierowanie jej do tak zwanego „obciążenia dopasowanego”, absorbującego energię fali.

Suszony materiał umieszczany był w aplikatorze w termostатовanej komorze próżniowej. Proces suszenia sublimacyjnego podstawowego prowadziłem w warunkach temperatury poniżej punktu potrójnego wody (<273,16 K) oraz w zakresie ciśnień, w którym ryzyko wyładowań plazmowych było najmniejsze, czyli około 100 Pa. Podczas suszenia zawartość wilgoci w warstwie zamrożonej jest stała, zmienia się jedynie proporcja grubości warstwy zamrożonej i wysuszonej materiału. Wymagało to okresowego „dostrajania” aplikatora podczas procesu i skracania długości falowodu w miarę ubytku wilgoci w materiale. Badania eksperymentalne prowadzono w dwóch seriach: jedną z pomiarem ubytku masy, drugą – z pomiarem temperatury próbki. W drugim przypadku materiał zamrażano razem z umieszczonym w nim czujnikiem sondy fluoro-optycznej. Podczas procesu mierzono i rejestrowano:

- temperaturę materiału,
- masę materiału,
- ciśnienie w komorze próżniowej,
- temperaturę powierzchni wymrażacza,
- napięcie detektora mikrofalowego.

W związku z tym, że typowe materiały suszone sublimacyjnie są słabymi dielektrykami (wołowina [H1]-[H2], [H6]; mannitol [H2]), poszerzyłem zakres badań o przedstawiciela grupy dobrych dielektryków - adsorbent węgiel aktywny Sorbonorit 4 ([H1], [H4], [H6]). Pozwoliło to na przeanalizowanie przypadku, gdy źródło ciepła jest intensywnie generowane zarówno

w warstwie suchej jak i zamrożonej materiału. Stwierdziłem konieczność kontrolowania mocy mikrofal ze względu na zwiększone ryzyko zapalania się plazmy w próbce adsorbentu węglowego.

Podstawowe cele badań eksperymentalnych były następujące:

- uzyskanie eksperymentalnych krzywych suszenia i temperaturowych krzywych suszenia materiałów o różnych właściwościach dielektrycznych,
- weryfikacja modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła w materiałach suszonych sublimacyjnie przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym,
- weryfikacja modelu matematycznego etapu podstawowego mikrofalowego suszenia sublimacyjnego.

Potwierdziłem możliwość zastosowania ogrzewania mikrofalowego w suszeniu sublimacyjnym produktów będących zarówno dobrymi jak i słabymi dielektrykami.

C. Modelowanie suszenia sublimacyjnego materiałów przy ogrzewaniu mikrofalowym

Sformułowałem jednowymiarowy model etapu podstawowego mikrofalowego suszenia sublimacyjnego materiałów w geometrii kartezjańskiej ([H1], [H2], [H4]-[H7], [C9]-[C10]). Model ten jest dedykowany dla typowej, stosowanej w przemyśle, konfiguracji suszenia sublimacyjnego cienkich warstw materiału rozmieszczonego równomiernie na względnie dużych powierzchniach półek w komorze suszenia. Założyłem, między innymi, że:

- sublimacja wilgoci zachodzi na ruchomej granicy, która jest równomiernie przemieszczającą się płaszczyzną międzyfazową,
- sublimujące pary wilgoci dyfundują przez warstwę wysuszoną ku powierzchni próbki, skąd dyfundują dalej do przestrzeni komory suszarniczej i resublimują się na ściankach wymrażacza,
- w obszarze zamrożonym zachodzi transport energii w wyniku przewodzenia ciepła, a w obszarze wysuszonym – w wyniku przewodzenia i konwekcji,
- ciśnienie całkowite w komorze suszenia jest stałe,
- na ruchomej granicy zakłada się istnienie równowagi termodynamicznej między fazą gazową (para wodna) i stałą (lód),
- w obu warstwach, suchej i zamrożonej, generowane są wewnętrzne źródła ciepła na skutek ogrzewania mikrofalowego w warunkach rezonansowych.

Oszacowując rozkład natężenia pola elektrycznego w cylindrycznej próbce materiału stosowałem dwa podejścia:

- uproszczone, przyjmując jednorodny rozkład natężenia pola elektrycznego w całej próbce,
- dokładne, obliczając rozkład natężenia pola elektrycznego w obszarze suchym i zamrożonym materiału na podstawie modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła. Uwzględniłem propagację mikrofal przez wszystkie powierzchnie próbki z podwójnym

odbiciem fali na granicy ośrodków i superpozycję fal. Aby dostosować dwuwymiarowy model propagacji fali do jednowymiarowego modelu procesu, uśredniałem rozkład promieniowy natężenia pola elektrycznego w materiale dla danej wartości osiowej współrzędnej położenia.

Zakładałem, że warstwa zamrożona jest mieszaniną lodu oraz matrycy materiału, natomiast warstwa wysuszona – to układ próżni (przestrzeń porów) i matrycy materiału. W obliczeniu wartości efektywnych parametrów dielektrycznych zastosowałem regułę mieszania Birchaka [H1]. Bilans masy i energii na ruchomej granicy umożliwił określenie szybkości sublimacji i zmianę położenia ruchomej granicy w czasie procesu.

Rozwiązanie tak sformułowanego modelu matematycznego znane jest w literaturze przedmiotu jako „*problem ruchomej granicy*” lub „*problem Stefana*”. Wymaga on odpowiedniego zdefiniowania warunku granicznego dla ruchomej granicy, na której zachodzi przemiana fazowa (sublimacja). Ze względu na zmieniające się w trakcie suszenia grubości warstw zamrożonej i wysuszonej niemożliwe jest użycie stałej siatki numerycznej. W rozwiązaniu modelu matematycznego zastosowałem więc dwa podejścia ([H1]-[H2], [H10], [C10]):

- Transformację Landau’a – która polega na takim zdefiniowaniu zmiennych bezwymiarowych położenia, aby matematycznie przekształcić zagadnienie ruchomej granicy w zagadnienie nieruchomej granicy. W praktyce oznacza to, że w każdym kroku czasowym obliczeń numerycznych bezwymiarowe położenie ruchomej granicy jest niezmiennie. Model matematyczny przekształcony zgodnie z podejściem Landau’a można rozwiązać stosując komercyjne symulatory procesowe,
- Metodę zmiennego kroku czasowego (VTS – ang. *Variable Time Step*) – w której, dla odpowiednio gęstej siatki numerycznej, należy tak dobierać krok czasowy, aby ruchoma granica przesuwała się dokładnie o odległość między dwoma węzłami. Wadą tej metody jest dłuższy czas obliczeń ze względu na większą, niż w poprzednim podejściu, liczbę węzłów w siatce numerycznej.

Weryfikacja eksperymentalna modelu matematycznego potwierdziła skuteczność zastosowania obu podejść w modelowaniu. Uzyskałem zadowalającą zbieżność obliczonych i doświadczalnych krzywych suszenia.

W pracach [H1]-[H2], [H6]-[H7], [C9] zaprezentowałem wyniki analizy parametrycznej etapu podstawowego mikrofalowego suszenia sublimacyjnego materiałów, której celem było:

- określenie granicznych warunków prowadzenia procesu w taki sposób, aby nie dopuścić do topnienia warstwy zamrożonej produktu lub degradacji termicznej warstwy wysuszonej,

- zaproponowanie metodologii doboru optymalnej, zmiennej podczas suszenia sublimacyjnego, wartości natężenia pola elektrycznego mikrofal w celu intensyfikacji procesu.

W drugim przypadku zdefiniowałem funkcję celu wiążącą wartość natężenia pola elektrycznego z bezwymiarowym położeniem ruchomej granicy ([H7], [C9]). Wyzaczyłem zależność między maksymalną temperaturą osiągniętą w warstwie zamrożonej, a grubością próbki dla różnych nastaw natężenia pola elektrycznego. Pozwoliło to na redukcję całkowitego czasu suszenia wynoszącą maksymalnie około 50%, w porównaniu z procesem prowadzonym przy stałej wartości natężenia pola elektrycznego fali.

5.3.4. Analiza wydajności wewnętrznego źródła ciepła w złożu adsorbentu w procesie jego regeneracji przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym

Badając wydajność wewnętrznego źródła ciepła w regenerowanym adsorbencie przy ogrzewaniu mikrofalowym należy wziąć pod uwagę rzeczywistą konfigurację układu ogrzewania mikrofalowego w kolumnie adsorpcyjnej. Najważniejszym problemem konstrukcyjnym jest takie doprowadzenie energii fali elektromagnetycznej do złoża adsorbentu, aby jednocześnie możliwy był przepływ gazu przemywającego w etapie desorpcji oraz przepływ gazu nośnego zanieczyszczonego lotnymi związkami organicznymi w etapie adsorpcji. W literaturze przedmiotu proponuje się rozwiązanie konstrukcyjne aplikatorów mikrofalowych z umieszczonym osiowo emitery fali elektromagnetycznej. Złoże adsorbentu ma zazwyczaj kształt cylindra wykonanego z tkaniny węglowej ACF (ang. *Activated Carbon Fiber*) otaczającej emitery. Wsad tkaniny węglowej nie dotyka ścianki wewnętrznej kolumny, a gaz przemywający doprowadzany jest w osi złoża adsorbentu.

Celem prowadzonych przez mnie badań w tym zakresie było [H1]:

- zaproponowanie rozwiązania konstrukcyjnego aplikatora mikrofalowego przeznaczonego do regeneracji nieruchomego złoża adsorbentu ziarnistego w typowej kolumnie adsorpcyjnej,
- przeprowadzenie analizy wydajności wewnętrznego źródła ciepła w złożu adsorbentu podczas desorpcji składnika.

Skonstruowałem kolumnę adsorpcyjną z osiowym emitery fal. Adsorbent ziarnisty wypełniał przestrzeń między emitery a ścianą kolumny, natomiast gaz przemywający przepływał w kierunku osiowym przez złoże.

A. Analiza i modelowanie wydajności wewnętrznego źródła ciepła w złożu adsorbentu w procesie jego regeneracji przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym

Analizę propagacji fali w regenerowanym złożu adsorbentu ogrzewanym mikrofalami przeprowadziłem w geometrii dwuwymiarowej cylindrycznej dla fali emitowanej przez antenę w osi aplikatora ([H1], [G7]). W takiej konfiguracji zachodzi propagacja fal zarówno w kierunku osiowym jak i promieniowym oraz odbicie fal od wewnętrznej powierzchni ścian kolumny. Dla dielektryka wypełniającego całą przestrzeń między anteną i ścianką kolumny, którego wysokość była wielokrotnie większa od promienia próbki, zaobserwowałem eksponencjalne tłumienie fali w kierunku osiowym. Tym samym wydajność wewnętrznego źródła ciepła dla kolumny wypełnionej złożem ziarnistego adsorbentu miała inną wartość niż dla kolumny z umieszczoną w niej niewielką cylindryczną próbką materiału (równanie (1)). Na podstawie pomiarów kalorymetrycznych dla złoża adsorbentu otrzymałem równanie aproksymacyjne zależności wydajności wewnętrznego źródła ciepła dla fali emitowanej przez antenę $Q_{V_{ant}}(z)$ w funkcji zmiennej osiowej położenia z , znormalizowane względem wartości $Q_V(r_0,0)$ [H1]:

$$Q_{V_{ant}}(z) = \frac{Q_V(r_0, z)}{Q_V(r_0, 0)} = 1,0043 \exp\left(-1,6128 \frac{z}{L}\right) - 0,0043 \quad (2)$$

gdzie L [m] - wysokość złoża, $Q_V(r_0, z)$ [W/m³] - wydajność źródła ciepła w położeniu z , $Q_V(r_0, 0)$ [W/m³] - wydajność źródła ciepła fali doprowadzanej do aplikatora. Zależność ta pozwala na oszacowanie osiowego rozkładu natężenia pola elektrycznego przy antenie [H1]:

$$E_0(z) = \sqrt{Q_{V_{ant}}(z) E_0^2(N, 0)} \quad (3)$$

gdzie natężenie pola elektrycznego fali ($E_0(N, 0)$) emitowanej przez antenę w położeniu $z=0$ oblicza się z zależności (1).

Rozkład promieniowy natężenia pola elektrycznego w złożu obliczałem uwzględniając wartość natężenia pola elektrycznego fali emitowanej (równanie (3)) oraz prawo Lamberta-Beera uzupełnione zależnościami ujmującymi zjawiska towarzyszące propagowaniu się fali (odbicie, skupienie, rozproszenie i superpozycja).

Analizowałem rozkłady natężenia pola elektrycznego w złożach adsorbentu węglowego (BPL) oraz niewęglowego (zeolit HiSiv 1000) [H1]. Uwzględniłem promieniową propagację fali emitowanej przez antenę oraz propagację przez dolną i górną powierzchnię złoża. W adsorbencie węglowym promieniowy efekt tłumienia natężenia pola elektrycznego fali, nakładający się na osiowy rozkład wzdłuż anteny (równanie (3)), powodował ponad 5-krotny spadek wartości natężenia pola elektrycznego przy ścianie kolumny. W złożu adsorbentu zeolitowego dominował efekt tłumienia fali w kierunku promieniowym. Na skutek zjawiska

soczewkowania fali natężenie pola elektrycznego w osi złoża adsorbentu zeolitowego było prawie dwukrotnie większe od wartości tego natężenia dla fali emitowanej przez antenę.

B. Badania doświadczalne regeneracji adsorbentów przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze nierezonansowym

Proces regeneracji adsorbentu prowadziłem w metalowej, cylindrycznej kolumnie adsorpcyjnej (aplikatorze mikrofalowym) o średnicy wewnętrznej 0,055 m i wysokości 0,25 m. W jej wnętrzu, na teflonowym ruszcie, usypane było złożo adsorbentu o wysokości maksymalnej 0,015 m. Osiowo przez kolumnę wprowadzona była antena mikrofalowa (emiter) połączona bezpośrednio z falowodem, w którym propagowała mikrofała o częstotliwości 2,45 GHz. Przejście anteny z falowodu do kolumny zaizolowano teflonową tuleją, uniemożliwiając wypływanie gazu z kolumny do układu mikrofalowego. Tak skonstruowany aplikator mikrofalowy pracował w warunkach nierezonansowych. Antena emitowała w kolumnie falę elektromagnetyczną zarówno w kierunku promieniowym, jak i osiowym. Przed przystąpieniem do właściwych badań adsorpcyjnych aplikator kalibrowałem określając, metodą kalorymetryczną, charakterystykę regulatora prądu magnetronu.

W procesie regeneracji ziarnistego adsorbentu nasyconego lotnym związkiem organicznym (etap desorpcji cyklicznego procesu TSA) niewielki strumień azotu (ok. 0,1 – 0,2 m³/h) kierowany był przez wlot od góry kolumny, w kierunku odwrotnym niż w etapie adsorpcji. Zdesorbowany składnik wymywany był z kolumny, wykraplany i zbierany w cylindrze miarowym. Podczas procesu mierzyłem temperaturę złoża na trzech wysokościach za pomocą czujników sond fluoro-optycznych oraz temperaturę na wlocie i wylocie kolumny za pomocą termopar typu J. Dodatkowo monitorowałem temperaturę zewnętrznej ścianki kolumny oraz otoczenia. Na podstawie bilansu masy składnika oszacowałem zmianę jego stężenia na powierzchni porów fazy stałej złoża adsorbentu podczas regeneracji.

Badania regeneracji mikrofalowej adsorbentów prowadziłem dla układów adsorpcyjnych stanowiących kombinację nieruchomego złoża adsorbentu węglowego (węgiel aktywny BPL) lub niewęglowego (zeolit HiSiv 1000) oraz polarnego (propan-2-ol) lub niepolarnego (toluen) składnika desorbowanego [H1].

Proces desorpcji przebiegał najwydajniej dla układu adsorbent węglowy–związek polarny, w którym oba składniki układu ogrzewały się intensywnie pod wpływem mikrofal. W tym przypadku uzyskiwano wysokie stężenia składnika w fazie gazowej na wylocie z kolumny oraz dużą wydajność usuwania składnika z fazy stałej przy wysokich wartościach temperatury złoża. Gdy zawartość składnika w złożu malała pod koniec procesu adsorbent węglowy był ośrodkiem, w którym nieprzerwanie generowane były źródła ciepła w układzie.

Desorpcja słabo polarnego toluenu z węgla aktywnego BPL była możliwa do zrealizowania, ponieważ ciepło było generowane w adsorbencie przez cały czas trwania

procesu. Nie był on tak intensywny, jak w przypadku układu propan-2-ol–BPL, lecz wystarczająco efektywny, by usunąć związek ze złoża adsorbentu.

Dla układu propan-2-ol–HiSiv 1000, przy nastawach mocy magnetronu typowych dla regeneracji adsorbentów węglowych, zachodziło zjawisko wyładowań plazmowych w złożu zeolitu. Następował raptowny, niekontrolowany wzrost temperatury złoża, zwłaszcza w pobliżu króćca wlotowego kolumny. Nadmiar mocy w układzie, nieabsorbowanej przez złożo adsorbentu, powodował wzrost wartości natężenia pola elektrycznego do poziomu granicznego, inicjując zapłon plazmy. Aby do tego nie dopuścić proces prowadziłem przy niewielkich, zmiennych nastawach mocy magnetronu. Wydajność wewnętrznego źródła ciepła w złożu zeolitu, po początkowym wzroście, malała utrzymując się na stałym niewielkim poziomie. Temperatura złoża, po osiągnięciu wartości maksymalnej w czasie procesu, spadała pod koniec regeneracji adsorbentu. Spowodowane to było zarówno mniejszą nastawą mocy magnetronu, jak i zanikiem wydajności wewnętrznego źródła ciepła w zregenerowanych obszarach adsorbentu.

Desorpcja słabo polarnego składnika (np. toluenu) z adsorbentu zeolitowego nie była możliwa do zrealizowania. Dla takiego układu proces prowadzony, nawet przy dużych natężeniach pola elektrycznego, przebiegał nieefektywnie. Mikrofałe, przenikając złożo zeolitu, nie generowały w adsorbencie, ani w toluenie ciepła z wystarczającą intensywnością.

C. Modelowanie regeneracji adsorbentów przy ogrzewaniu mikrofalowym

Model matematyczny procesu desorpcji mikrofalowej sformułowałem:

- w geometrii jednowymiarowej cylindrycznej ([H8], [H11], [C11]) – zakładając jednorodny rozkład natężenia pola elektrycznego w materiale oraz propagowanie się mikrofal padających przez pobocznice złoża adsorbentu,
- w geometrii dwuwymiarowej cylindrycznej [H1] – zakładając niejednorodny rozkład promieniowy i osiowy natężenia pola elektrycznego w materiale oraz promieniową i osiową propagację mikrofal emitowanych w osi kolumny.

W przypadku modelu dwuwymiarowego rozkład natężenia pola elektrycznego w materiale obliczałem na podstawie modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła dla aplikatora nierezonansowego ([H1], [G7]). Zakładałem, że trzykrotny przebieg fali, z podwójnym jej odbiciem od granicy złożo-powierzchnia metaliczna (ścianki kolumny lub emitera), jest wystarczający do całkowitej absorpcji energii fali w złożu adsorbentu. W opisie propagowania się fali uwzględniłem efekt jej rozpraszania i skupiania w geometrii cylindrycznej.

W modelu procesu w geometrii dwuwymiarowej cylindrycznej założyłem, między innymi, że [H1]:

- faza gazowa jest mieszaniną azotu i związku organicznego spełniającą prawo gazu doskonałego,
- faza stała i gazowa są w równowadze cieplnej,
- akumulacja ciepła w fazie gazowej jest pomijalnie mała,
- nie uwzględnia się spadku ciśnienia wzdłuż wysokości kolumny, ze względu na małe prędkości pozorne gazu przemywającego rzędu 0,01 m/s,
- zachodzi dyspersja osiowa i promieniowa masy.

Tak sformułowany model matematyczny desorpcji mikrofalowej rozwiązywałem zadając wartość początkowego stężenia składnika w fazie gazowej i stałej oraz początkowej temperatury złoża. Przyjmowałem, że na wlocie do kolumny składnik desorbowany nie występuje we wlotowym strumieniu gazu inertnego, a temperatura gazu jest zmienna w czasie. Równowagi adsorpcyjne analizowanych układów opisałem odpowiednimi równaniami izoterm, których współczynniki wyznaczyłem metodą analizy regresji danych doświadczalnych ([H9], [A4], [C7]). W wyniku rozwiązania numerycznego modelu otrzymałem stężeniowe i temperaturowe krzywe wyjścia dla danej wartości natężenia pola elektrycznego oraz gęstości strumienia gazu przemywającego.

Wyniki badań doświadczalnych regeneracji mikrofalowej, dla układów adsorbentu węglowego (węgiel aktywny BPL) lub niewęglowego (zeolit HiSiv 1000) oraz polarnego (propan-2-ol) lub niepolarnego (toluen) związku, porównałem z rezultatami modelowania procesu [H1]. Stwierdziłem, że model matematyczny w dwuwymiarowej geometrii cylindrycznej z dość dobrą dokładnością odwzorowuje zmiany średniego stężenia składnika w całkowitej fazie stałej adsorbentu podczas regeneracji. Efekty obliczonego osiowego i promieniowego rozkładu natężenia pola elektrycznego były zgodne ze zmierzonym rozkładem temperatury w złożu adsorbentu. Wyniki obliczeń potwierdziły poprawność założeń przyjętych podczas analizy propagacji i superpozycji fal w aplikatorze nierezonansowym z osiowo umieszczoną anteną.

W pracach [H1], [H8], [H11], [C11] zaprezentowałem wyniki analizy parametrycznej regeneracji mikrofalowej adsorbentów, której celem było:

- określenie wpływu paramentów procesowych, takich jak: średnica kolumny, natężenie pola elektrycznego, strumień gazu przemywającego oraz temperatura regulacji na przebieg procesu,
- zaproponowanie sposobu kontrolowania temperatury złoża w układzie adsorbent węglowy–związek polarny za pomocą regulacji natężenia pola elektrycznego.

Na podstawie analizy parametrycznej regeneracji mikrofalowej adsorbentów oraz wyników modelowania wyodrębniłem cztery przypadki przebiegu procesu dla następujących kombinacji układów adsorpcyjnych:

- związek polarny-adsorbent węglowy (np. propan-2-ol–BPL [H1], woda–Sorbonorit 4 [H8], propan-2-ol–Sorbonorit 3 [H11]) - proces przebiega najintensywniej,
- związek niepolarny-adsorbent węglowy (np. toluen–BPL [H1], toluen–Sorbonorit 4 [H8]) - proces desorpcji jest możliwy do zrealizowania, lecz mniej efektywny, niż w układzie ze związkiem polarnym,
- związek polarny-adsorbent niewęglowy (np. propan-2-ol–HiSiv 1000 [H1], [H11]) – związek ogrzewa się selektywnie, proces desorpcji jest niepełny,
- związek niepolarny-adsorbent niewęglowy (toluen–HiSiv 1000 [H1], [H11]) – proces desorpcji jest nieefektywny.

Podsumowanie wyników badań

Ogrzewanie mikrofalowe jest niekonwencjonalnym sposobem doprowadzania energii, który można zastosować w inżynierii procesowej, jako metoda wspomagająca generowanie ciepła. Wymaga to jednak właściwego opisanie zjawisk towarzyszących interakcji pola elektromagnetycznego z ogrzewanym materiałem. Zagadnienie to analizowałem teoretycznie i doświadczalnie zarówno w ramach badań na poziomie podstawowym, jak i dla wybranych energochłonnych procesów, takich jak suszenie sublimacyjne czy regeneracja adsorbentu.

Zasadnicze osiągnięcia uzyskane w pracy habilitacyjnej

- Zaproponowanie metodyki analizowania rozkładu natężenia pola elektrycznego w ogrzewanym mikrofalowo materiale, z uwzględnieniem propagacji, odbicia i superpozycji fali elektromagnetycznej w warunkach rezonansowych i nierezonansowych. Analiza ta jest niezbędna do prawidłowego sformułowania modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła w procesach inżynierii chemicznej wspomaganych ogrzewaniem mikrofalowym.
- Zaproponowanie implementacji modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła w modelowaniu matematycznym etapu podstawowego suszenia sublimacyjnego przy ogrzewaniu mikrofalowym w aplikatorze rezonansowym. Umożliwiło to wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego w warstwie suchej i zamrożonej materiału.
- Przeprowadzenie analizy parametrycznej etapu podstawowego suszenia sublimacyjnego materiałów przy ogrzewaniu mikrofalowym i wyznaczenie granicznych wartości ciśnienia w komorze suszenia, natężenia pola elektrycznego mikrofalowego oraz grubości warstwy materiału, przy których nie zachodzi termiczna i mechaniczna degradacja produktu. Zaproponowano zmienne w czasie nastawy natężenia pola elektrycznego mikrofalowego podczas przebiegu procesu w celu jego intensyfikacji.
- Opracowanie własnego rozwiązania konstrukcyjnego aplikatora mikrofalowego oraz metodyki prowadzenia regeneracji mikrofalowej adsorbentów w kolumnie z osiową emisją fal w warunkach nierezonansowych. Zaprojektowana kolumna adsorpcyjna umożliwiła bezpieczną i efektywną regenerację złoża adsorbentu węglowego zarówno w przypadku desorpcji związku polarnego jak i niepolarnego.

- Zaproponowanie implementacji modelu wydajności wewnętrznego źródła ciepła w modelowaniu matematycznym regeneracji adsorbentu przy ogrzewaniu mikrofalowym. Umożliwiło to wyznaczenie promieniowego i osiowego rozkładu natężenia pola elektrycznego w nieruchomym złożu adsorbentu.
- Przeprowadzenie analizy parametrycznej regeneracji mikrofalowej adsorbentu w kolumnie z osiową emisją mikrofal w warunkach nierezonansowych. Określono wpływ: średnicy kolumny, natężenia pola elektrycznego, strumienia gazu przemywającego oraz temperatury regulacyjnej na przebieg procesu. Zaproponowano metodologię regulacji temperatury złoża, aby zapobiec termicznemu rozkładowi składnika adsorbowanego lub przegrzaniu adsorbentu podczas regeneracji.

Inne osiągnięcia

Na zaproszenie edytorów, zrecenzowałem 9 artykułów naukowych dla czasopism o zasięgu międzynarodowym, znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports*, takich jak: *Environmental Science & Technology*, *Desalination and Water Treatment*, *Polish Journal of Chemical Technology*, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, *Drying Technology* (**Załącznik 4**).

6. Charakterystyka działalności dydaktycznej

W trakcie mojej pracy zawodowej prowadziłem zajęcia w formie wykładów, ćwiczeń audytoryjnych, projektów oraz laboratoriów z 16 przedmiotów w języku polskim (np. *Termodynamika procesowa*, *Kinetyka procesowa*, *Teoria i technika suszenia*, *Informatyka i programowanie*, *Instalacje do pozyskiwania energii odnawialnej*, *Metody obliczeniowe w inżynierii chemicznej*, etc.) oraz 14 w języku angielskim (program ERASMUS, np. *Applied mathematics and modeling for chemical engineers*, *Bioenvironmental heat and mass transfer*, *Chemical and process thermodynamics*, *Hydrogen as a future energy carrier*, *Modern drying techniques – theory and practice*, *Simulation of chemical engineering processes using Mathcad and Matlab*, etc.) w łącznym wymiarze 2798 godzin. Opracowałem sylabusy KRK dla 10 przedmiotów. Brałem udział w kształceniu na studiach stacjonarnych oraz niestacjonarnych na czterech kierunkach: *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, *Technologia Chemiczna*, *Chemia* oraz *Ochrona Środowiska*. Pod moim kierunkiem zostało wykonanych 13 prac dyplomowych (magisterskie i inżynierskie). Szczegółowe informacje zamieszczone zostały w **Załączniku 4**.

7. Charakterystyka działalności organizacyjnej

- Członek zespołu przygotowującego raport samooceny do akredytacji kierunku studiów Towaroznawstwo na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Szczecińskiej, 2007 r.;
- Pełnomocnik Dziekana ds. Ankietyzacji na WTilCh, 2010-2016 r.;
- Członek Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia, 2009-2016 r.;
- Administrator systemu Sylabus KRK, 2009-2016 r.;
- Przewodniczący Komisji ds. Ankietyzacji Zajęć Dydaktycznych, 2009-2010 r.;
- Administrator systemu kart elektronicznych na WTilCh, 2009-2014 r.;
- Członek Komitetu Organizacyjnego XXI Ogólnopolskiej Konferencji Inżynierii Chemicznej i Procesowej, 2-6 września 2013 r., Kołobrzeg;
- Członek Komitetu Organizacyjnego XIII Polskiego Sympozjum Suszarnictwa, 5-6 września 2013 r., Kołobrzeg;
- Administrator strony internetowej Instytutu Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska: www.ichip.zut.edu.pl, 2010-2016 r.;
- Udział w komisjach egzaminacyjnych dyplomowych, jako przewodniczący (25 egzaminów), promotor (13) i recenzent (10).

8. Charakterystyka działalności popularyzatorskiej

- Wykłady popularno-naukowe dla uczniów szkół gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych:
 - „Fakty i mity o promieniowaniu mikrofalowym, czyli mikrofałe od kuchni”, Zachodniopomorski Festiwal Nauki, WTilCh, ZUT, wrzesień 2009 r.;
 - „Czy powinniśmy bać się mikrofał”, Zachodniopomorski Festiwal Nauki, WTilCh, ZUT, wrzesień 2011 r.;
 - „Tajemnice fal elektromagnetycznych”, Zachodniopomorski Festiwal Nauki, WTilCh, ZUT, wrzesień 2012 r.;
 - „Tajemnice fal elektromagnetycznych”, Zachodniopomorski Festiwal Nauki, Zespół Szkół nr 2 Centrum Kształcenia Ustawicznego im. Tadeusza Kościuszki w Pyrzycach, maj 2017 r.;
- Administrowanie stroną internetową www.ichip.zut.edu.pl, prezentującą ofertę kierunku studiów Inżynieria Chemiczna i Procesowa, 2010-2016 r.

Szczegółowe dane zostały zamieszczone w **Załączniku 4**.

Konrad Witkiewicz