Załącznik nr 3

Autoreferat

dr inż. Małgorzata Szlachta
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Wrocławska

Wrocław 2022

SPIS TREŚCI

1. IMIĘ I NAZWISKO. 4

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE LUB ARTYSTYCZNE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ 4

3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH 4

4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ.U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŹN. ZM.) 5

4.1. Wprowadzenie i geneza podjęcia tematu 5

4.2. Cel naukowy i omówienie osiągniętych wyników badań 7

4.3. Podsumowanie osiągnięcia naukowego 15

5. INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ. 21

5.1. Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska – studia doktoranckie, 2003–2007 (projekty nr 1 i 2, pkt 2.9.3, zał. 4) 21

5.2. Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska – aktywność naukowa w ramach krajowych projektów badawczych własnych, 2007–2013 (projekty nr 4, 8,9, 10, pkt 2.9.2, zał. 4) 22

5.3. Utrecht University, Faculty of Geosciences, Department of Earth Sciences, Utrecht, Holandia - aktywność naukowa w ramach stażu podoktorskiego, 2010–2012 (pobyt nr 2, pkt 2.11, zał. 4) 24

5.4. Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska – aktywność naukowa w ramach międzynarodowego projektu i zrealizowanych pobytów badawczych, 2014–2016 (pobyty badawcze nr 6, 7, 11, 12 i 13, pkt 2.11, zał. 4) 25

5.5. University of Malaya, Department of Chemical Engineering, Centre for Separation Science and Technology, Kuala Lumpur, Malezja – aktywność naukowa w ramach pobytu jako visiting scientist, 2015 (pobyt nr 4, pkt 2.11, zał. 4) 27

5.6. Geological Survey of Finland, Industrial Environments and Recycling Unit, Kuopio, Finlandia – aktywność naukowa w ramach pobytu jako senior scientist, 2018–2019 (pobyt nr 3, pkt 2.11, zał. 4)28

5.7. Geological Survey of Finland, Circular Economy Solutions Unit, Kuopio, Finlandia – aktywność naukowa w ramach pobytu jako senior scientist, 2019–obecnie (pobyt nr 1, pkt 2.11, zał. 4) 29

6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ 32

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne 32

6.2. Osiągnięcia organizacyjne 34

6.3. Osiągnięcia w zakresie popularyzacji nauki 35

7. INNE INFORMACJE DOTYCZĄCE KARIERY ZAWODOWEJ 36
7.1. Nagrody i stypendia.....36
7.2. Kursy i szkolenia 37

1. IMIĘ I NAZWISKO

Małgorzata Szlachta

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE LUB ARTYSTYCZNE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

2007 Doktor nauk technicznych

Jednostka: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska
Tytuł rozprawy: *Analiza zjawisk w koagulacji objętościowej wspomaganej pylistym węglem aktywnym*

2002 Magister inżynier

Jednostka: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska
Kierunek: Ochrona Środowiska; Specjalność: Systemy Ochrony Wód i Gleby
Tytuł pracy: *Koncepcja grupowego systemu zaopatrzenia w wodę rejonu miasta Ogrodzieniec w okresie perspektywicznym*

2004 Studium pedagogiczne

Jednostka: Uniwersytet Zielonogórski, Centrum Kształcenia Pedagogicznego
Kwalifikacje pedagogiczne uprawniające do pracy w szkołach i placówkach oświatowych

3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH

10.2009–obecnie Adiunkt naukowo-dydaktyczny
Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska

03.2019–obecnie Senior scientist
Geological Survey of Finland, Circular Economy Solutions Unit, Kuopio, Finlandia

10.2018–02.2019 Senior scientist
Geological Survey of Finland, Industrial Environments and Recycling Unit, Kuopio, Finlandia

03.2010–01.2012 Post-doctoral researcher
Utrecht University, Faculty of Geosciences, Department of Earth Sciences, Utrecht, Holandia

10.2007–09.2009 Asystent naukowo-dydaktyczny
Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ.U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŹN. ZM.)

Przedłożone osiągnięcie naukowe stanowi monografia naukowa ***Nanomateriały węglowe w usuwaniu syntetycznych barwników organicznych z wód***. Prace Naukowe Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Monografie, 8. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2022. ISBN: 978-83-7493-206-6.

Omówienie osiągnięcia przedmiotowego prezentuję poniżej.

4.1. Wprowadzenie i geneza podjęcia tematu

W ostatnich latach zużycie barwników rosło, przede wszystkim za sprawą branży tekstylnej, szybko rozwijającego się przemysłu opakowaniowego oraz drukarni i stosowanej techniki druku cyfrowego (*Global synthetic*…, 2021). Obecnie ogólnie w sektorach przemysłowych wykorzystywanych jest ok. 10 tys. różnego rodzaju barwników (*Industrial dyes* …, 2002). Konsekwencją dynamicznego rozwoju rynku barwników syntetycznych jest wzrost zagrożenia środowiskowego, jakie stwarzają te gałęzie przemysłu, w których są wykorzystywane. W tym kontekście warto wspomnieć o przemyśle włókienniczym zaliczanym do jednego z najbardziej wodochłonnych sektorów, który za sprawą generowanych barwnych ścieków poprodukcyjnych stanowi poważne obciążenie dla środowiska wodnego.

Nawet niewielka ilość barwnika, rzędu 1 mg/dm^3, może powodować widoczne zabarwienie wody w naturalnych zbiornikach wodnych, co ma negatywny wpływ na ich estetykę. Ponadto barwniki, które dostają się do odbiornika w dużych ilościach wraz ze ściekami, mogą znacznie ograniczać przenikanie światła do wody i tym samym hamować procesy fotosyntezy. Największym problemem dla środowiska wodnego wydaje się to, że ze względu na złożoną budowę cząsteczki i możliwość wielu podstawień barwniki należą do związków trudno biodegradowalnych (Al-Tohamy i in., 2022). Ich szkodliwe działanie nie ogranicza się jednak do fauny i flory wodnej, mogą powodować również problemy zdrowotne ludzi. Barwiniki oraz produkty ich rozkładu mogą bowiem wykazywać właściwości mutagenne i kancerogenne (Szozda, 2010).

Tematyka oczyszczania barwnych ścieków przemysłowych oraz wód zanieczyszczonych barwnikami organicznymi jest wciąż aktualna ze względu na swoją złożoność i wymaga indywidualnego podejścia. Dostępnych jest wprawdzie wiele rozwiązań technologicznych umożliwiających usuwanie barwników, każde z nich ma jednak swoje wady i zalety. Ze względu na tak duże zróżnicowanie medium, jakim są barwne ścieki przemysłowe, z reguły konieczne jest więc łączenie różnych znanych metod (Katheresan i in., 2018; Roy i Saha, 2021; Bal i Thakur, 2022).

Adsorpcyjne metody eliminacji barwników organicznych ze ścieków poprodukcyjnych i zanieczyszczonych wód cieszą się bardzo dużym zainteresowaniem zarówno praktyków, jak i badaczy. Popularność ta wynika z wysokiej efektywności procesu, prostoty i łatwości jego realizacji w ciągu technologicznym oraz stosunkowo niskich kosztów oczyszczania (Adamski, 1985; Wilmański, 2016). Na skuteczność procesu adsorpcji na porowatych materiałach wpływa wiele czynników, m.in.: właściwości użytego w procesie adsorbentu (powierzchnia

właściwa, objętość porów, charakter chemiczny powierzchni, obecność grup funkcyjnych), właściwości adsorbatu (rozpuszczalność, polarność, masa cząsteczkowa, kształt geometryczny cząsteczki) oraz parametry procesowe, takie jak pH, temperatura, dawka stosowanego adsorbentu czy czas kontaktu (Choma i in., 2015). Nie bez znaczenia pozostaje skład oczyszczanych roztworów, w tym stężenie adsorbatu i obecność innych rozpuszczonych związków, które mogą konkurować o miejsca aktywne na powierzchni adsorbentu.

Konwencjonalne adsorbenty w postaci węgli aktywnych doskonale sprawdzają się w praktyce w układach technologicznych oczyszczania wód o różnym poziomie zanieczyszczenia. I o ile węgiel aktywny jest dobrze rozpoznanym, powszechnie stosowanym adsorbentem, o tyle z przeglądu dostępnej światowej literatury wynika, że grupa materiałów nowej generacji w postaci nanomateriałów węglowych, do której zaliczane są grafen, nanorurki węglowe i fulereny, nie jest jeszcze dostatecznie zbadana. Ogromne zainteresowanie środowiska naukowego, jakie wzbudza, wynika natomiast z faktu, że wymienione nanomateriały wykazują wiele wyjątkowych właściwości: chemicznych, mechanicznych, elektrycznych, magnetycznych i optycznych, stwarzających niemal nieograniczone możliwości ich stosowania w różnych dziedzinach nauki i techniki, włączając inżynierię środowiska (Nasrollahzadeh i in., 2021).

Za najbardziej obiecujące i interesujące ze względu na szerokie spektrum aplikacyjne uważa się nanorurki węglowe. Jest to stosunkowo młody nanomateriał węglowy, po raz pierwszy uzyskany i scharakteryzowany przez Sumio Iijima na początku lat 90. XX w. (Iijima, 1991). Nanorurki są zwiniętymi, cylindrycznymi powierzchniami grafenu, zakończonych kopułami zbudowanymi z pierścieni węglowych, sześcio- i pięcioczłonowych. Nanorurka może być zbudowana z jednej warstwy grafenowej lub z wielu. Sposób ułożenia warstw grafenowych, obecność zamkniętych lub otwartych końców oraz długość determinują właściwości fizykochemiczne nanorurek (Huczko i in., 2014).

Niewątpliwą zaletą nanorurek jest duża powierzchnia właściwa, która w zależności od ich rodzaju mieści się w granicach dziesiątek-setek m^2/g. Dzięki tej cesze nanorurki są doskonałymi adsorbentami (Mathur i in., 2016; Gupta i in., 2013). Fakt ten zachęca naukowców do badania ich potencjału, m.in. w zakresie usuwania organicznych i nieorganicznych zanieczyszczeń zarówno z powietrza, jak i roztworów wodnych. Perspektywy stosowania innowacyjnych nanomateriałów w oczyszczaniu wód i ścieków są niezmiernie interesujące. Jednak nie do końca rozpoznane zdolności adsorpcyjne i brak pełnego obrazu wpływu warunków procesowych na ich skuteczność w usuwaniu uciążliwych zanieczyszczeń z roztworów wodnych sprawia, że konieczne są dalsze, systematyczne badania w tym kierunku. Mając na uwadze, że obecny stan wiedzy nie pozwala na powszechne wykorzystanie nanorurek węglowych, za celowe uważam podjęcie badań naukowych nad możliwością ich zastosowania jako materiałów nowej generacji do usuwania syntetycznych barwników organicznych z roztworów wodnych oraz oceną perspektyw rozwoju metody.

4.2. Cel naukowy i omówienie osiągniętych wyników badań

Głównym celem moich prac badawczych, które doprowadziły do opracowania prezentowanego osiągnięcia naukowego, było określenie możliwości wykorzystania wielościennych nanorurek węglowych (MWCNT) do usuwania wybranych syntetycznych barwników organicznych z roztworów wodnych w procesie adsorpcji realizowanym samodzielnie oraz w reaktorze wielofunkcyjnym łączącym adsorpcję i niskociśnieniową filtracją membranową, przy zastosowaniu zmiennych warunków procesowych. Zdolności adsorpcyjne nanorurek wobec barwników skontrastowałam z wydajnością pylistego węgla aktywnego (PWA), reprezentującego grupę adsorbentów węglowych powszechnie wykorzystywanych w technologii oczyszczania wód i ścieków. Osiągnięcie założonego celu pracy było możliwe dzięki realizacji celów cząstkowych i przeprowadzaniu szeroko zakrojonych badań naukowych, obejmujących kilka etapów omówionych poniżej.

Przedmiotem badań były wodne roztwory modelowe, jedno- i wieloskładnikowe, których skład modyfikowałam w zależności od realizowanych cząstkowych celów badawczych. Do badań wytypowałam dwa rodzaje syntetycznych barwników organicznych, cechujących się odmiennymi właściwościami, a mianowicie błękit metylenowy będący barwnikiem zasadowym (kationowym) z grupy tiazynowych, o masie molowej równej 319,85 g/mol oraz czerwień Kongo zaliczaną do barwników o charakterze kwasowym (anionowym) z grupy azowych, o masie cząsteczkowej równej 696,66 g/mol. W celu sporządzenia wieloskładnikowych roztworów wykorzystałam materiał referencyjny naturalnej materii organicznej (NOM), wyizolowany z wody powierzchniowej metodą odwróconej osmozy. Testy adsorpcyjne przeprowadziłam w skali laboratoryjnej w układzie porcjowym.

Charakterystyka właściwości adsorbentów

Pierwszym etapem był cykl prac badawczych stanowiących część mojego osiągnięcia naukowego. Poświęcony był pełniejszemu rozpoznaniu właściwości fizykochemicznych i strukturalnych wielościennych nanorurek węglowych i pylistego węgla aktywnego, odgrywających kluczową rolę w procesie adsorpcji zanieczyszczań z roztworów wodnych. Wyznaczyłam parametry struktury porowatej w postaci powierzchni właściwej, objętości i średniego rozmiaru porów, a w dalszej kolejności uziarnienie i morfologię powierzchni. Określiłam też zawartość powierzchniowych grup funkcyjnych, ładunek powierzchniowy i punkt izoelektryczny adsorbentów (IEP).

Analiza parametrów fizykochemicznych i strukturalnych wskazywała na odmienne właściwości badanych materiałów. Nanorurki węglowe miały bardzo dobrze rozwiniętą mezoporowatość (99,3%) oraz mniejszą o połowę powierzchnię właściwą (S_{BET} = 358 m^2/g) w porównaniu do węgla pylistego (S_{BET} = 835 m^2/g), charakteryzującego się większym udziałem struktur mikroporowatych (54,4%). Na tej podstawie wnioskowałam, że adsorpcja zanieczyszczeń organicznych o większych cząsteczkach, w tym czerwieni Kongo i wielkocząsteczkowych NOM, będzie przebiegała sprawniej na nanorurkach węglowych niż małocząsteczkowych związków. Uznałam, że zastosowanie heterogenicznego pylistego węgla aktywnego do adsorpcji substancji o mniejszych wymiarach przestrzennych cząsteczki, tj. błękitu metylenowego, będzie lepszym wyborem. Poczynione założenia, oparte na charakterystyce materiału, znalazły potwierdzenie na etapie dalszych badań

eksperymentalnych. Do ilościowego określenia zawartości tlenowych grup funkcyjnych na powierzchni nanorurek i węgla aktywnego zastosowałam metodę Boehma (Boehm, 1994). Identyfikacja grup funkcyjnych dowiodła, że w porównaniu do węgla aktywnego nanorurki miały bardziej hydrofobowy charakter, wynikający z ponad dwukrotnie mniejszej zawartości powierzchniowych tlenowych grup funkcyjnych, co w praktyce sprzyja adsorpcji hydrofobowych zanieczyszczeń. Wyznaczenie punktu izoelektrycznego adsorbentów przez pomiar potencjału elektrokinetycznego umożliwiło rozpoznanie ich ładunku powierzchniowego. Nanorurki charakteryzowały się większym ujemnym ładunkiem powierzchniowym i niższą wartością pH_{IEP} (pH_{IEP} = 4,2) niż węgiel aktywny (pH_{IEP} = 5,1).

Badania kinetyki adsorpcji barwników

Drugi etap obejmował badania doświadczalne kinetyki adsorpcji błękitu metylenowego i czerwieni Kongo na nanorurkach węglowych i węglu aktywnym. Badania kinetyki adsorpcji mają głębszy sens jedynie w przypadku skonfrontowania przebiegu wyznaczonych krzywych kinetycznych z właściwościami strukturalnymi stosowanego materiału adsorpcyjnego, co uczyniłam w przedmiotowych badaniach.

Znajomość szybkości usuwania adsorbatu z oczyszczanych roztworów i czynników limitujących szybkość procesu ma istotne znaczenie, gdy adsorbent jest wykorzystany w układach technologicznych oczyszczania wód i ścieków. Generalnie o kinetyce decydują procesy zachodzące najwolniej. W przypadku adsorpcji z roztworów wodnych większość zaadsorbowanej substancji przechodzi do warstwy granicznej adsorbentu w stosunkowo krótkim czasie, szczególnie przy intensywnym mieszaniu. Podobnie adsorpcja właściwa zachodzi bardzo szybko, więc zasadne jest założenie, że nie limituje ona kinetyki adsorpcji. W związku w rzeczywistych układach adsorpcyjnych to dyfuzja zewnętrzna lub procesy dyfuzyjne zachodzące w obrębie cząstki adsorbentu, ewentualnie oba te mechanizmy wspólnie, będą determinować przebieg procesu (Ościk, 1979; Adamski, 1985).

Aby określić zmiany szybkości adsorpcji badanych zanieczyszczeń w czasie w zależności od przyjętych warunków procesowych, zrealizowałam serie testów przy zmiennym początkowym stężeniu barwników w roztworze, wykorzystując świeże adsorbenty i częściowo wysycone. Wysycanie adsorbentów polegało na ich kontakcie z roztworem modelowym, zawierającym materiał referencyjny naturalnej materii organicznej w ilości odpowiadającej rozpuszczonemu węglowi organicznemu (RWO) na poziomie 10 mg C/dm^3. Wynikiem kontaktu adsorbentów z roztworem NOM oprócz zmniejszenia dostępnej powierzchni dla adsorpcji była zmiana wartości ich ładunku powierzchniowego.

Wykonałam pomiary potencjału elektrokinetycznego i określiłam wartość ładunku powierzchniowego adsorbentów. W warunkach realizacji procesu kinetyki adsorpcji (pH 7,0) ładunek na powierzchni świeżego MWCNT i PWA był ujemny i wynosił odpowiednio -19,5 mV i -21,9 mV. W wyniku kontaktu adsorbentów z roztworem NOM znak ładunku elektrycznego pozostał ten sam, jednak jego wartość bezwzględna wzrosła, odpowiednio do -40,8 mV i -53,5 mV. Zaobserwowałam, że ujemny ładunek powierzchni porównywanych adsorbentów, pochodzący od zaadsorbowanych cząsteczek naturalnych substancji organicznych, w dwojaki sposób, pozytywny lub negatywny, wpływał na stopień adsorpcji kationowego barwnika MB i anionowej CK.

Po przeanalizowaniu związku między szybkością adsorpcji a stężeniem barwników w roztworze stwierdziłam, że niezależnie od rodzaju zastosowanego adsorbentu wraz ze wzrostem początkowego stężenia adsorbatu równowagowa zdolność adsorpcji rosła na skutek większego gradientu stężeń we wszystkich badanych układach kinetycznych. Uzyskane rezultaty badań własnych posłużyły mi do określenia optymalnego czasu pracy adsorbentów i wyznaczenia parametrów kinetycznych adsorpcji w badanych układach przy wykorzystaniu modeli kinetycznych pseudo-II rzędu i Elovicha. Z literatury przedmiotu oraz moich poprzednich współautorskich badań (Mook i in., 2016) wynika, że równanie pseudo-II rzędu bardzo dobrze opisuje szybkość adsorpcji barwników organicznych na porowatych adsorbentach w układach, w których chemisorpcja kontroluje proces. Również model Elovicha sprawdza się w porównywalnych układach adsorpcyjnych, co potwierdzała jakość dopasowania danych kinetycznych podana w innych pracach (Yang i Al-Duri, 2005; Sarici-Ozdemir, 2012; Sun i in., 2015; Benjelloun i in., 2021). W pracy wykorzystałam również model dyfuzji wewnątrzcząstkowej Webera i Morrisa w celu rozpoznania mechanizmu kontrolującego kinetykę adsorpcji barwników na rozpatrywanych adsorbentach.

Zaobserwowałam, że niezależnie od użycia świeżych czy częściowo wysyconych materiałów w pierwszych minutach procesu stopień adsorpcji błękitu metylenowego był duży, a jej przebieg gwałtowny, po czym następowało spowolnienie procesu i stopniowe dojście do stanu równowagi adsorpcji. Stosunkowo krótki czas osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej tego barwnika (< 120 min) przemawia za możliwością praktycznego wykorzystania nanorurek węglowych do usuwania błękitu metylenowego lub innych barwników organicznych o zbliżonej chemicznej naturze. W odniesieniu do czerwieni Kongo odnotowałam, że adsorpcja nie była tak intensywna w początkowej fazie procesu, a czas kontaktu, wynoszący 480 min, był niewystarczający do osiągnięcia stanu równowagi adsorpcji zarówno na nanorurkach węglowych, jak i pylistym węglu aktywnym. Niemniej jednak pojemność adsorpcyjna nanorurek wobec czerwieni Kongo była znacznie większa niż węgla pylistego, co predysponuje ten materiał do usuwania z wód i ścieków podobnych średnio- i wielkocząsteczkowych zanieczyszczeń.

Jeśli chodzi o ocenę kinetyki adsorpcji błękitu metylenowego i czerwieni Kongo na adsorbentach świeżych i o zmniejszonej powierzchni dostępnej dla adsorpcji, to w całym zakresie początkowych stężeń barwników (50–200 mg/dm^3) model Elovicha lepiej opisywał proces. Natomiast przeprowadzone analizy, zgodnie z modelem dyfuzji wewnątrzcząstkowej Webera i Morrisa, wskazywały na złożoność procesu, w którym więcej niż jeden mechanizm kontroluje szybkość adsorpcji barwników na rozpatrywanych adsorbentach.

Badania równowagi adsorpcji barwników

Adsorpcja jest zjawiskiem występującym na granicy zetknięcia dwóch faz. W układzie ciało stałe-ciecz proces adsorpcji trwa aż do ustalenia się równowagi dynamicznej między stężeniem substancji rozpuszczonej, pozostającej w roztworze – w omawianym przypadku MB i CK – a jej stężeniem na wewnętrznej powierzchni adsorbentu, tj. badanego węgla aktywnego i nanorurek. W stanie równowagi istnieje określony rozdział adsorbatu między fazę ciekłą a fazę stałą. Powszechnie stosowaną formą opisu tego rozdziału są izotermy adsorpcji, przedstawiające zależność ilości substancji zaadsorbowanej na jednostkę wagi adsorbentu w funkcji stężenia substancji pozostającej w roztworze w stanie równowagi w stałej temperaturze

(Adamski, 2002). Znajomość przebiegu izoterm adsorpcji jest przydatna w projektowaniu procesu adsorpcji w układach technologicznych oczyszczania wód i ścieków oraz kontroli jego przebiegu na etapie eksploatacji. Istnieje wiele teorii adsorpcji stosowanych do opisu takich układów, w tym m.in. teorie monowarstwowej adsorpcji Langmuira, wielowarstwowej adsorpcji BET, objętościowego zapełniania mikroporów Dubinina-Raduszkiewicza, a także teoria Freundlicha (Ościk, 1979; Sarbak, 2000).

Kierując się sposobnością określenia istotnych parametrów procesowych układów adsorpcyjnych spotykanych w rzeczywistości, przeprowadziłam serie badań eksperymentalnych adsorpcji barwników w stanie równowagi. W badaniach dążyłam do rozpoznania wpływu pH i siły jonowej roztworu, gdyż pH jest istotnym czynnikiem kontrolującym przebieg procesu adsorpcji i w bezpośredni sposób wpływa na właściwości powierzchniowe adsorbentu, podobnie jak siła jonowa, która może zmieniać jego ładunek powierzchniowy, jak również wpływać na charakter jonowy, hydrofobowość czy rozpuszczalność adsorbatu (Al-Degs i in., 2008; Xie i in., 2019). Badania zrealizowałam przy wartości pH równej 5, 7 i 8,5 oraz sile jonowej roztworu wynoszącej 0,001 M, 0,01 M i 0,1 M. Zdolności adsorpcyjne nanomateriału i węgla aktywnego w zmiennych warunkach procesowych określiłam, wykorzystując modele izoterm Langmuira i Freundlicha.

Uzyskane wyniki badań własnych wskazywały na lepsze zdolności adsorpcyjne nanorurek węglowych względem czerwieni Kongo, węgiel aktywny okazał się skuteczniejszy w usuwaniu błękitu metylenowego. Ilość zaadsorbowanego barwnika CK przez nanorurki była od ok. 2,5 do 6,5-krotnie większa od ilości usuniętego błękitu metylenowego z roztworu. W całym badanym zakresie pH adsorpcja MB zarówno na MWCNT, jak i PWA zachodziła zgodnie z modelem monowarstwowej adsorpcji Langmuira. Model ten równie dobrze opisywał adsorpcję czerwieni Kongo na węglu aktywnym. Natomiast wysokie wartości współczynników determinacji R^2 (> 0,96) wskazywały na zdecydowanie lepsze dopasowanie izotermy Freundlicha do danych doświadczalnych, gdy do układu dawkowałam nanorurki węglowe.

Analizując wpływ siły jonowej na adsorpcję równowagową barwników, zaobserwowałam, że była ona w dużej mierze uwarunkowana siłą jonową oczyszczanych roztworów modelowych ze względu na występujące odziaływania elektrostatyczne w badanych układach adsorpcyjnych. Wraz ze wzrostem siły jonowej, na skutek dodania soli NaCl, pojemności adsorpcyjne obu badanych adsorbentów wobec błękitu metylenowego malały, co można tłumaczyć zwiększoną siłą jonową kompresującą podwójną warstwę elektryczną i prowadzącą do elektrostatycznego odpychania barwnika kationowego od powierzchni adsorbentu (Farias Silva i in., 2020). Oszacowana na podstawie równania Langmuira teoretyczna maksymalna pojemność adsorpcyjna q_m węgla aktywnego w stosunku do MB wynosiła 341,7 mg/g (0,001 M roztwór), natomiast dodanie soli skutkowało 24,6-procentowym spadkiem adsorpcji tego barwnika. Natomiast na skutek wzrostu siły jonowej roztworu z 0,001 M do 0,1 M adsorpcja błękitu metylenowego na nanorurkach, oszacowana na podstawie parametru równania Freundlicha K_F, zmalała o 21,6%.

Inną prawidłowość polegającą na wzroście adsorpcji przy większych stężeniach elektrolitu w roztworze odnotowałam w przypadku anionowego barwnika CK, co mogło być uwarunkowane ekranowaniem sił odpychania między zaadsorbowanymi a pozostającymi w roztworze cząsteczkami tego adsorbatu. W warunkach, w jakich realizowano proces, obliczona

pojemność adsorpcyjna PWA wzrosła wraz z dodatkiem soli NaCl i osiągnęła największą wartość 257,9 mg/g w przypadku 0,1 M roztworu, natomiast w przypadku dawkowania do układu nanorurek, odnotowano 14,7-procentowy wzrost wartości adsorpcji czerwieni Kongo, oszacowanej na podstawie równania Freundlicha.

Badania parametrów procesowych wpływających na adsorpcję barwników

W literaturze przedmiotu analiza wpływu parametrów procesowych na efektywność usuwania zanieczyszczeń z roztworów wodnych stanowi nieodłączny element badań procesu adsorpcji, a dostępne prace przeglądowe są tego dowodem (Yagub i in., 2014; Bushra i in., 2021; Lan i in., 2022; Sultana i in., 2022). Z aplikacyjnego punktu widzenia rozpoznanie wpływu kluczowych parametrów pozwala nie tylko na wyznaczenie optymalnych warunków do realizacji procesu, ale również na dobór adsorbentu o odpowiednich właściwościach w celu uzyskania założonych efektów oczyszczania. Korelacja między pH, temperaturą, obecnością konkurencyjnych jonów w roztworze, dawką adsorbentu a stopniem usunięcia zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych na drodze adsorpcji była przedmiotem również moich poprzednich prac zespołowych (Szlachta i in., 2012; Mook i in., 2016, 2017; Hussin i in., 2019; Szlachta i in., 2020).

Optymalizacja procesu adsorpcji jest złożonym zagadnieniem i wymaga systematycznego podejścia. W badaniach składających się na prezentowane osiągnięcie naukowe skupiłam się na ocenie przydatności nanorurek węglowych do usuwania syntetycznych barwników organicznych przy zmiennych warunkach procesowych. W szczególności uściśliłam zależność między ilością dawkowanego nanomateriału z zakresu 25–1000 mg/dm^3 a stopniem usunięcia z roztworów błękitu metylenowego i czerwieni Kongo. Przeanalizowałam też zmiany sprawności adsorpcji w zależności od temperatury i pH roztworu opierając się na testach zrealizowanych odpowiednio w zakresie 5–35 °C i przy pH 3–11. Na podstawie pomiarów potencjału elektrokinetycznego określiłam rolę ładunku powierzchniowego adsorbentów i oddziaływań elektrostatycznych w badanych układach adsorpcyjnych. Dodatkowo przeanalizowałam jak współwystępowanie w roztworze jonów fosforanowych, siarczanowych, węglanowych, azotanowych, wapniowych, magnezowych w zakresie stężeń 1–10 mM determinuje wydajność adsorpcją nanomateriału. Uzyskane wyniki badań w tym etapie porównałam z rezultatami otrzymanymi w testach z tradycyjnym adsorbentem węglowym.

Kompleksowa analiza parametrów procesowych adsorpcji potwierdziła, że dawka materiału, pH i temperatura roztworu, a także obecność obcych jonów w roztworze odgrywały istotną rolę w usuwaniu MB i CK. Rozpatrując wydajność adsorpcji oraz jej aspekt ekonomiczny, stwierdziłam, że w zastosowanych warunkach procesowych dawką optymalną do usuwania MB z roztworu wodnego było 250 mg PWA na 1 dm^3 roztworu. Dalszy wzrost ilości tego adsorbentu nie powodował znaczących zmian w efektywności adsorpcji. W odniesieniu do nanorurek osiągnięcie porównywalnego stopnia usunięcia tego barwnika wymagało czterokrotnie większej dawki, co w rzeczywistych układach nie znajduje ekonomicznego uzasadnienia. Analizując wpływ ilości dawkowanych adsorbentów na skuteczność adsorpcji czerwieni Kongo w badanych układach, za optymalną masę MWCNT i PWA, przy której zostało usunięte 80% barwnika, uznano 500 mg/dm^3.

Znajomość zależności pomiędzy zdolnością adsorpcyjną materiału a temperaturą oczyszczanego roztworu jest kluczowa i ma wymiar praktyczny, gdyż układy o endotermicznej naturze nie powinny być wykorzystywane w warunkach niskich temperatur, w których przeprowadzany jest proces, i odwrotnie. W badanym zakresie temperatur adsorpcja błękitu metylenowego i czerwieni Kongo na węglowych adsorbentach miała taki charakter, gdyż wzrost temperatury spowodował nieznaczny przyrost adsorpcji barwników. Odnotowany przyrost adsorpcji mógł być następstwem aktywowania kolejnych miejsc na powierzchni adsorbentów pod wpływem temperatury. Ponadto jej wzrost mógł prowadzić do zwiększenia energii kinetycznej cząsteczek barwników, a co za tym idzie ich ruchliwości w badanych roztworach wodnych, co mogło zwiększyć prawdopodobieństwo połączenia się cząsteczek z centrami aktywnymi na powierzchni adsorbentów (Dawood i Sen, 2012; Aragaw i Alene, 2022; Gohr i in., 2022).

W badanych układach odnotowałam ścisłą korelację pomiędzy wartością pH roztworu a chemicznym charakterem powierzchni użytego w procesie materiału oraz rodzajem usuwanego barwnika. W przypadku obu porównywanych adsorbentów adsorpcja CK przybiegała korzystniej w środowisku kwaśnym, a odczyn alkaliczny sprzyjał usuwaniu MB. Nanorurki węglowe wykazywały umiarkowaną zdolność eliminacji błękitu metylenowego z roztworu, natomiast w zakresie niskich wartości pH doprowadziły do całkowitego usunięcia czerwieni Kongo z roztworów. Porównywalną wydajność adsorpcji czerwieni Kongo z kwaśnych roztworów stwierdziłam, gdy do układu dawkowałam pylisty węgiel aktywny. Wykonane pomiary potencjału elektrokinetycznego dały pełniejszy obraz na temat oddziaływań elektrostatycznych między adsorbentami a barwnikami pozostającymi w oczyszczanym roztworze. Analiza danych doświadczalnych pozwala stwierdzić, że na skutek adsorpcji błękitu metylenowego powierzchnia obu adsorbentów zyskała dodatni ładunek powierzchniowy w całym badanym zakresie pH. Rezultatem adsorpcji cząsteczek MB z roztworu było również przesunięcie punktu izoelektrycznego badanych adsorbentów w obszar alkaliczny. W odniesieniu do nanorurek węglowych wartość pH_{IEP} po procesie wynosiła 9,4 oraz 9,6 w przypadku węgla aktywnego. Z kolei w układzie adsorpcyjnym z czerwienią Kongo oba badane adsorbenty węglowe zyskały ujemny ładunek powierzchniowy.

Skład ścieków barwnych jest bardzo złożony m.in. z uwagi na różnorodność stosowanych barwników oraz ogromną ilość wykorzystywanych w procesach barwienia chemikaliów i środków pomocniczych. Przykładowo, w składzie ścieków włókienniczych pochodzących z procesów barwienia, najczęściej występują jony: Na^{+}, NH_4^{+}, Cr^{+3}, K^{+}, Sb^{+3}, Al^{+3}, Cu^{+2}, Fe^{+3}, SO_4^{-2}, Cl^{-}, SO_3^{-2}, CO_3^{-2}, $S_2O_4^{-2}$, NO_3^{-}, SiO_3^{-2}, S^{-2}, $Fe(CN)_6^{-4}$, NO_2^{-}, $S_4O_6^{-2}$, ClO^{-} (Solecka i Ledakowicz 2005; Wawrzkiewicz 2012). Ich obecność prowadzi do wysokiej siły jonowej, która może znacząco wpływać na wydajność procesu, co wykazałam w badaniach równowagi adsorpcji. Barwniki, które trafiają do środowiska wodnego wraz ze ściekami poprodukcyjnymi mogą tworzyć kompleksy z cząsteczkami innych związków chemicznych mającymi większe lub mniejsze powinowactwo do adsorbentu niż wolne cząsteczki barwnika. Ponadto współistniejące kationy lub/i aniony w roztworach mogą współzawodniczyć z cząsteczkami barwnika o miejsca aktywne na powierzchni adsorbentu. W takich warunkach wiązanie barwników zazwyczaj jest osłabione, a poziom ich adsorpcji uwarunkowany siłą wiążącą innych jonów (Anirudhan i Ramachandran, 2015; Murray i Örmeci, 2018).

Wobec powyższego określenie zdolności adsorpcyjnych nanorurek węglowych względem barwników z roztworów zawierających konkurencyjne jony jest zagadnieniem wymagającym rozpoznania, szczególnie w aspekcie szacowania wydajności nanomateriału pod kątem potencjalnej aplikacji w rzeczywistych układach. W omawianym osiągnięciu naukowym zawarłam wyniki badań własnych, w których oczyszczane roztwory oprócz barwników zawierały w składzie również jony: fosforanowe, siarczanowe, węglanowe, azotanowe, wapniowe, magnezowe w ilości 1–10 mM. Zaobserwowałam, że obecność wymienionych jonów w roztworze w odmienny sposób wpływała na zdolności adsorpcyjne nanorurek i węgla aktywnego wobec barwników. O ile ilość i rodzaj współistniejących anionów nie miały większego wpływu na pojemność adsorpcyjną obu adsorbentów wobec kationowego błękitu metylenowego (różnice < 11%), o tyle adsorpcja czerwieni Kongo wahała się w szerokim zakresie. Wyniki prac doświadczalnych zrealizowanych z wykorzystaniem roztworów zawierających w swoim składzie dwuwartościowe jony wapnia i magnezu wskazywały na diametralne różnice i odmienny ich wpływ na adsorpcję obu barwników: przyczyniły się do istotnego wzrostu pojemności adsorpcyjnej zarówno nanorurek, jak i węgla pylistego, prowadząc do całkowitego odbarwienia roztworów przy największej zawartości tych jonów w oczyszczanym roztworze.

Badania wpływu naturalnych substancji organicznych na adsorpcję barwników

Naturalne substancje organiczne są obecne w niemalże wszystkich wodach naturalnych i są głównym składnikiem ogólnego węgla organicznego. Ze względu na swoją wysoką reaktywność NOM kontrolują biodostępność i biogeochemiczny obieg pierwiastków śladowych w środowisku. W przeciwieństwie do barwników NOM nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla zdrowia człowieka, mogą jednak tworzyć kompleksy ze związkami organicznymi i nieorganicznymi obecnymi w środowisku wodnym oraz powodować zmianę właściwości chemicznych innych szkodliwych zanieczyszczeń na skutek wchodzenia z nimi w interakcje (Adusei-Gyamfi i in., 2019). Z uwagi na duże zróżnicowanie składu wód i ścieków, w szczególności w odniesieniu do związków organicznych, dokonałam oceny wpływu tych powszechnie występujących w wodach substancji na zdolności adsorpcyjne nanorurek węglowych względem barwników i porównałam je z efektywnością węgla aktywnego.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystałam mieszaninę hydrofilowych i hydrofobowych naturalnych substancji organicznych o masie cząsteczkowej (MC) z zakresu 150–8000 Da, wśród których 80% stanowiły substancje o MC ok. 1000–2000 Da. Testy przeprowadziłam stosując adsorbenty zarówno świeże, jak i częściowo wysycone za pomocą NOM. Przebieg wysycania adsorbentów naturalnymi substancjami organicznymi po zadanym czasie kontaktu określiłam na podstawie pomiarów rozkładu ich mas cząsteczkowych z wykorzystaniem chromatografii wykluczenia.

Uzyskałam ciekawe rezultaty: nanorurki wykazywały lepsze zdolności adsorpcyjne względem substancji o MC z zakresu 1000–2000 Da, podczas gdy na węglu aktywnym zaadsorbowało się o ok. 8% więcej substancji o MC < 1000 Da niż na nanorurkach. Ponadto węgiel aktywny w pierwszej kolejności adsorbował NOM o mniejszych MC (< 1000 Da), natomiast po 24 godzinach kontaktu z MWCNT zdecydowana większość tej frakcji wciąż pozostawała w roztworze.

Po wstępnym przygotowaniu materiałów węglowych do pracy zrealizowałam szeroko zakrojone badania, w których naturalne substancje organiczne były składnikiem oczyszczanych roztworów. Zgodnie z oczekiwaniami zmiany zdolności adsorpcyjnych nanorurek wobec barwników związane były nie tylko z częściowym ich wysyceniem, ale także z obecnością NOM w składzie oczyszczanych roztworów. W literaturze przedmiotu sugeruje się dwa przeciwstawne efekty ogólnego wpływu NOM na pojemność adsorpcyjną nanorurek węglowych: wzrost liczby miejsc adsorpcyjnych, spowodowany lepszą dyspersją nanorurek w obecności NOM, prowadzący do większej adsorpcji, oraz spadek liczby miejsc dostępnych dla adsorpcji, spowodowany konkurencją i/lub ich blokowaniem przez naturalne substancje organiczne (Hyung i in., 2006; Zhang i in., 2011). Obserwacje te znalazły potwierdzenie w przedmiotowych badaniach.

Za oryginalność prezentowanych badań można uznać uzyskane zależności wskazujące, że wysycenie nanorurek prowadziło do wzrostu adsorpcji błękitu metylenowego z roztworu, natomiast częściowe wyczerpanie pojemności adsorpcyjnej węgla aktywnego powodowało mniejszą adsorpcję tego barwnika. W odniesieniu do czerwieni Kongo stwierdzono spadek wydajności procesu wraz ze wzrostem początkowej zawartości barwnika w roztworze oraz mniejszą sprawność adsorpcji, gdy stosowano adsorbenty o częściowo wyczerpanej powierzchni adsorpcyjnej. Nanorurki węglowe były bardziej wrażliwe na zmiany warunków realizacji procesu, co znalazło odzwierciedlenie w większym wpływie wyczerpania ich powierzchni na adsorpcję czerwieni Kongo, niż gdy proces realizowano z użyciem węgla aktywnego. Z kolei wzrost ilości naturalnych substancji organicznych w oczyszczanych roztworach (z RWO = 1 mg C/dm^3 do RWO = 30 mg C/dm^3) wpływał pozytywnie na zdolności adsorpcyjne obu porównywanych adsorbentów względem kationowego błękitu metylenowego, natomiast prowadził do spadku adsorpcji anionowej czerwieni Kongo.

Jak wcześniej wspomniałam, duże zróżnicowanie składu oczyszczanych wód i ścieków pod względem zanieczyszczeń zarówno organicznych, jak i nieorganicznych komplikuje realizację procesu adsorpcji. W świetle przeprowadzonych badań potwierdziła się skuteczność pylistego węgla aktywnego w usuwaniu syntetycznych barwników organicznych z roztworów zawierających naturalne substancje organiczne. Wprawdzie wielościenne nanorurki węglowe nie ustępowały pod względem wydajności węglowi aktywnemu, jednak nie mogą z nim w pełni konkurować w tym zakresie.

Badania skuteczności usuwania barwników w układzie hybrydowym

Adsorpcja może być realizowana jako samodzielny proces w wydzielonych reaktorach w układach technologicznych oczyszczania wód i ścieków, jednak potencjał, jaki ma integracja adsorpcji z innymi jednostkowymi procesami, sprawia, że rozwiązania w postaci tzw. układów wielofunkcyjnych, określanych często mianem hybrydowych, znajdują szerokie zastosowanie (Adamski i Majewska-Nowak, 2010). Rolę reaktora wielofunkcyjnego pełni np. układ z elektrokoagulacją realizowaną w jednym reaktorze z ziarnistym węglem aktywnym, będącym przedmiotem moich prac współautorskich (Hussin i in., 2019). Popularna klasyczna koagulacja objętościowa, wspomagana pylistym węglem aktywnym, będąca przedmiotem badań w mojej pracy doktorskiej, także jest zaliczana do układów wielofunkcyjnych (Szlachta i Adamski, 2009). Kolejnym przykładem takiego rozwiązania jest połączenie procesu koagulacji z filtracją membranową, które jest wykorzystywane do dekoloryzacji barwnych ścieków (Lee i in.,

2006), czy realizacja adsorpcji w układzie zintegrowanym z procesami membranowymi (Kim i in., 2022). Natomiast połączenie adsorpcji i niskociśnieniowej separacji membranowej w formie układu hybrydowego, w którym procesy prowadzone są w tym samym urządzeniu, należy do jednych z najczęściej stosowanych rozwiązań. Jego dodatkową zaletą jest równoczesna, wysoce efektywna separacja materiału adsorpcyjnego z układu oczyszczania (Bodzek, 2013).

Łączenie metod oczyszczania w różnych konfiguracjach układów wielofunkcyjnych pozwala na uzyskanie lepszych efektów w porównaniu do procesów jednostkowych. Z tego względu w ostatnim etapie prac dokonałam oceny możliwości wykorzystania nanorurek węglowych w reaktorze wielofunkcyjnym, w którym proces adsorpcji błękitu metylenowego z roztworów wieloskładniowych, zawierających w składzie naturalne substancje organiczne, zrealizowałam w połączeniu z ultrafiltracją.

Skuteczność usuwania barwnika w układzie hybrydowym określiłam na podstawie pomiarów względnej przepuszczalności membrany ultrafiltracyjnej, a także wyznaczonych wartości współczynników retencji barwnika. Oceny wydajności zespolonego procesu dokonałam w odniesieniu do bezpośredniej ultrafiltracji, która okazała się mało skuteczna w usuwaniu błękitu metylenowego z roztworu zawierającego NOM (< 22%). Prowadzenie procesu adsorpcji i ultrafiltracji w reaktorze wielofunkcyjnym wpływało korzystnie na końcowe efekty separacji barwnika. Oba materiały węglowe sprawdziły się w procesie hybrydowym, dając zadowalające rezultaty, które przełożyły się nie tylko na wysokie współczynniki retencji małocząsteczkowego barwnika (50–100%), ale także na poprawę wydajności stosowanej membrany, ponieważ uzyskane wartości przepuszczalności względnej były bliskie jedności.

Zrealizowane prace badawcze nie pozostawiają wątpliwości co do zasadności łączenia procesu adsorpcji z filtracją membranową i realizacji zespolonego procesu w reaktorze hybrydowym. Zastosowanie niskociśnieniowych procesów membranowych do oczyszczania wód i ścieków zanieczyszczonych barwnikami organicznymi może napotykać na ograniczenia w postaci niewystarczającej skuteczności separacji tych zanieczyszczeń oraz spadku wydajności hydraulicznej membran. Jak wykazałam, w analizowanym przypadku integracja procesu adsorpcji z ultrafiltracją była lepszym rozwiązaniem technologicznym. Co więcej, realizacja zespolonego procesu jednocześnie umożliwiła skuteczną separację nanorurek węglowych z oczyszczanej wody, co przemawia na korzyść takiego rozwiązania.

4.3. Podsumowanie osiągnięcia naukowego

Efektem realizacji badań własnych było rozpoznanie szeregu aspektów o charakterze poznawczym i utylitarnym, związanych z wykorzystaniem innowacyjnych nanorurek węglowych do usuwania syntetycznych barwników organicznych z roztworów wodnych w procesie adsorpcji realizowanym samodzielnie oraz w układzie hybrydowym, w odniesieniu do tradycyjnego węgla aktywnego.

Przeprowadzone prace badawcze i uzyskane oryginalne wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków, które jednocześnie stanowią najważniejsze osiągnięcia prezentowanej pracy:

1. Wykazałam, że właściwości fizykochemiczne i strukturalne nanorurek węglowych są głównymi czynnikami decydującymi o przebiegu procesu adsorpcji błękitu metylenowego i czerwieni Kongo w analizowanych układach oczyszczania.
2. Rozpoznałam parametry limitujące szybkość przebiegu procesu adsorpcji barwników i określiłam optymalny czas pracy wykorzystywanych adsorbentów w warunkach zmiennego początkowego stężenia barwników i w obecności naturalnych substancji organicznych w oczyszczanych roztworach. Stwierdziłam, że równanie Elovicha najlepiej opisuje kinetykę adsorpcji barwników na nanorurkach węglowych i węglu aktywnym i określiłam mechanizm kontrolujący kinetykę adsorpcji barwników.
3. Wykazałam, że w zależności od badanego układu adsorpcyjnego równowaga adsorpcyjna błękitu metylenowego i czerwieni Kongo na rozpatrywanych adsorbentach węglowych zachodzi zgodnie z modelem izotermy Langmuira lub Freundlicha.
4. Wyznaczyłam parametry równowagowe charakteryzujące zdolności adsorpcyjne badanych materiałów węglowych, które pozwoliły na porównanie ich w różnych warunkach procesowych. Wykazałam, że niezależnie od pH roztworu modelowego i jego siły jonowej nanorurki węglowe miały doskonałe właściwości adsorpcyjne w stosunku do czerwieni Kongo, podczas gdy pylisty węgiel aktywny okazał się skuteczniejszym adsorbentem w usuwaniu błękitu metylenowego.
5. Szczegółowa analiza parametrów procesowych adsorpcji umożliwiła ocenę wykorzystywanych w pracy adsorbentów pod kątem użytkowym. Potwierdziłam zasadniczy wpływ parametrów procesowych na zdolność adsorpcyjną nanorurek i węgla aktywnego wobec usuwanych barwników. W szczególności wykazałam, że wzrost zarówno ilości adsorbentu dawkowanego do układu, jak i temperatury roztworu skutkował polepszeniem wydajności usuwania barwników z roztworów. Wykazałam również, że istniała ścisła korelacja między wartością pH roztworu a chemicznym charakterem powierzchni użytego w procesie materiału oraz rodzajem usuwanego barwnika. Ostatecznie wykazałam, że występowanie w oczyszczanym roztworze obcych jonów w postaci anionów fosforanowych, siarczanowych, węglanowych i azotanowych oraz kationów soli wapnia i magnezu w dwojaki sposób wpływało na zdolności adsorpcyjne nanorurek i węgla aktywnego: prowadziło do większej lub mniejszej adsorpcji barwników.
6. Określiłam wydajność adsorbentów świeżych oraz o częściowo wyczerpanej pojemności adsorpcyjnej w usuwaniu barwników z wieloskładnikowych roztworów zawierających naturalne substancje organiczne oraz porównałam zdolności adsorpcyjne nanorurek z węglem aktywnym w kombinowanych układach. Stwierdziłam, że wzrost liczby miejsc adsorpcyjnych spowodowany lepszą dyspersją nanorurek w obecności NOM w roztworze mógł prowadzić do większej adsorpcji MB, natomiast konkurencja o miejsca dostępne dla adsorpcji lub ich blokowanie przez NOM mogła być powodem mniejszej adsorpcji CK.
7. Zbadałam możliwości wykorzystania nanorurek węglowych w reaktorze wielofunkcyjnym, łączącym proces adsorpcji z niskociśnieniową filtracją

membranową. Potwierdziłam wysoką skuteczność takiego rozwiązania w przypadku, gdy oczyszczane roztwory wodne zawierały w swoim składzie małocząsteczkowy barwnik oraz naturalne substancje organiczne.

8. Wykazałam, że perspektywy stosowania materiałów nowej generacji, takich jak nanorurki węglowe, w technologii oczyszczania wód i ścieków są obiecujące, a podjęte prace badawcze dowiodły, że w przyszłości nanomateriał ten może stanowić doskonałą alternatywę dla węgli pylistych i skutecznie eliminować syntetyczne barwniki organiczne z roztworów wodnych w procesie adsorpcji, realizowanej w wydzielonych reaktorach oraz w układach hybrydowych.

Bibliografia

Adamski W.: Zagadnienia adsorpcji w technologii wody. *Ochrona Środowiska*, 1985, 463(2–3), 15–18.

Adamski W.:*Modelowanie systemów oczyszczania wód*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002.

Adamski W., Majewska-Nowak K.: Zastosowanie reaktorów wielofunkcyjnych do oczyszczania wody. *Ochrona Środowiska*, 2010, 32(1), 3–8.

Adusei-Gyamfi J., Ouddane B., Rietveld L., Cornard J.P., Criquet J.: Natural organic matter-cations complexation and its impact on water treatment: A critical review. *Water Research*, 2019, 160, 130–147. doi: 10.1016/j.watres.2019.05.064ff. ffhal-02316307

Al-Degs Y.S., El-Barghouthi M.I., El-Sheikh A.H., Walker G.M.: Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and Pigments*, 2008, 77(1), 16–23. doi: 10.1016/j.dyepig.2007.03.001

Al-Tohamy R., Ali S.S., Li F., Okasha K.M., Mahmoud Y.A.G., Elsamahy,T., Jiao H., Fu Y., Sun J.: A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231, 113160. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113160

Anirudhan T.S., Ramachandran M.: Adsorptive removal of basic dyes from aqueous solutions by surfactant modified bentonite clay (organoclay): Kinetic and competitive adsorption isotherm. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 95, 215–225. doi: 10.1016/j.psep.2015.03.003 0957-5820

Aragaw T.A., Alene A.N.: A comparative study of acidic, basic, and reactive dyes adsorption from aqueous solution onto kaolin adsorbent: Effect of operating parameters, isotherms, kinetics, and thermodynamics. *Emerging Contaminants*, 2022, 8, 59–74. doi: 10.1016/j.emcon.2022.01.002

Bal G., Thakur A.: Distinct approaches of removal of dyes from wastewater: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 50, 1575–1579. doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.119

Benjelloun M., Miyah Y., Akdemir Evrendilek G., Zerrouq F., Lairini S.: Recent advances in adsorption kinetic models: Their application to dye types. *Arabian Journal of Chemistry*, 2021, 14(4), 103031. doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103031

Bodzek M.: Przegląd możliwości wykorzystania technik membranowych w usuwaniu mikroorganizmów i zanieczyszczeń organicznych ze środowiska wodnego. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2013, 16(1), 5–37.

Boehm H.P.: Some aspects of the surface-chemistry of carbon-blacks and other carbons. *Carbon*, 1994, 32(5), 759–769.

Bushra R., Mohamad S., Alias Y., Jin Y., Ahmad M.: Current approaches and methodologies to explore the perceptive adsorption mechanism of dyes on low-cost agricultural waste: A review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, 319, 111040. doi: 0.1016/j.micromeso.2021.111040

Choma J., Czubaszek M., Jaroniec M.: Adsorpcja barwników z roztworów wodnych na węglach aktywnych. *Ochrona Środowiska*, 2015, 37(3), 3–14.

Dawood S., Sen T.K.: Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: Equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design. *Water Research*, 2012, 46(6), 1933–1946. doi: 10.1016/j.watres.2012.01.009

Global synthetic dye market data and industry growth analysis, 2021; https://www.globenewswire.com/Ne/news-release/2021 (dostęp: 15.06.2022).

Gohr M.S., Abd-Elhamid A.I., El-Shanshory A.A., Soliman H.M.A.: Adsorption of cationic dyes onto chemically modified activated carbon: Kinetics and thermodynamic study. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 346, 118227. doi: 10.1016/j.molliq.2021.118227

Gupta V.K., Kumar R., Nayak A., Saleh T.A., Barakat M.A.: Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2013, 193–194, 24–34. doi: 10.1016/j.cis.2013.03.003

Huczko A., Kurcz M., Popławska M.: *Nanorurki węglowe: otrzymywanie, charakterystyka, zastosowania.* Warszawa: Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 2014.

Industrial dyes: Chemistry, properties, applications, K. Hunger (red.). John Wiley & Sons, 2002.

Hussin F., Aroua M.K., Szlachta M.: Combined solar electrocoagulation and adsorption processes for Pb (II) removal from aqueous solution. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2019, 143, 107619; doi: 10.1016/j.cep.2019.107619

Hyung H., Fortner J.D., Hughes J.B., Kim J.H.: Natural Organic Matter Stabilizes Carbon Nanotubes in the Aqueous Phase. *Environmental Science and Technology*, 2006, 41(1), 179–184; doi: 10.1021/es061817g

Iijima S.: Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 1991, 354(6348), 56–58.

Katheresan V., Kansedo J., Lau S.Y.: Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(4), 4676–4697; doi: 10.1016/j.jece.2018.06.060

Kim S., Nam S.N., Jang A., Jang M., Park C.M., Son A., Her N., Heo J., Yoon Y.: Review of adsorption–membrane hybrid systems for water and wastewater treatment. *Chemosphere*, 2022, 286, 131916; doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131916

Lan D., Zhu H., Zhang J., Li S., Chen Q., Wang C., Wu T., Xu M.: Adsorptive removal of organic dyes via porous materials for wastewater treatment in recent decades: A review on species, mechanisms and perspectives. *Chemosphere*, 2022, 293, 133464; doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133464

Lee J.W., Choi S.P., Thiruvenkatachari R., Shim W.G., Moon H.: Submerged microfiltration membrane coupled with alum coagulation/powdered activated carbon adsorption for complete decolorization of reactive dyes. *Water Research*, 2006, 40(3), 435–444; doi: 10.1016/j.watres.2005.11.034

Mathur R.B., Singh B.P., Pande S.: *Carbon nanomaterials: synthesis, structure, properties and applications*. CRC Press, 2016.

Mook W.T., Aroua M.K., Szlachta M.: Palm shell-based activated carbon for removing reactive black 5 dye: Equilibrium and kinetics studies. *BioResources*, 2016, 11(1), 1432–1447; doi: 10.15376/biores.11.1.1432-1447

Murray A., Örmeci B.: Competitive effects of humic acid and wastewater on adsorption of Methylene Blue dye by activated carbon and non-imprinted polymers. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 66, 310–317; doi: 10.1016/j.jes.2017.04.029

Nasrollahzadeh M., Sajjadi M., Iravani S., Varma R.S.: Carbon-based sustainable nanomaterials for water treatment: State-of-art and future perspectives. *Chemosphere*, 2021, 263, 128005; doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128005

Ościk, J., 1979. *Adsorpcja*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

Roy M., Saha R.: Dyes and their removal technologies from wastewater: A critical review. *Intelligent Environmental Data Monitoring for Pollution Management*, 2021, 127–160; doi: 10.1016/B978-0-12-819671-7.00006-3

Sarbak Z.: *Adsorpcja i adsorbenty. Teoria i zastosowanie.* Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM, 2000.

Sarici-Ozdemir C.: Adsorption and desorption kinetics behaviour of methylene blue onto activated carbon. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2012, 48(2), 441–454; http://dx.doi.org/10.5277/ppmp120210

Farias Silva C.E. de, Villar da Gama B.M., Silva Gonçalves A.H. da, Medeiros J.A., Souza Abud A.K. de: Basic-dye adsorption in albedo residue: Effect of pH, contact time, temperature, dye concentration, biomass dosage, rotation and ionic strength. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2020, 32(6), 351–359; doi: 10.1016/j.jksues.2019.04.006

Solecka M., Ledakowicz S.: Biologiczne procesy oczyszczania barwnych ścieków włókienniczych. *Biotechnologia*, 2005, 2(69), 103–124.

Sultana M., Rownok M.H., Sabrin M., Rahaman M.H., Alam S.M.N.: A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, 6, 100382; doi: 10.1016/j.clet.2021.100382

Sun L., Chen D., Wan S., Yu Z.: Performance, kinetics, and equilibrium of methylene blue adsorption on biochar derived from eucalyptus saw dust modified with citric, tartaric, and acetic acids. *Bioresource Technology*, 2015, 198, 300–308; doi: 10.1016/j.biortech.2015.09.026

Szlachta M., Adamski W.: Effects of natural organic matter removal by integrated processes: alum coagulation and PAC-adsorption. *Water Science and Technology*, 2009, 59(10), 1951–1957; doi: 10.2166/wst.2009.217

Szlachta M., Gerda V., Chubar N.: Adsorption of arsenite and selenite using an inorganic ion exchanger based on Fe-Mn hydrous oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, *365*(1), 213–221; doi: 10.1016/j.jcis.2011.09.023

Szlachta M., Neitola R., Peräniemi S., Vepsäläinen J.: Effective separation of uranium from mine process effluents using chitosan as a recyclable natural adsorbent. *Separation and Purification Technology*, 2020, 253, 117493; doi: 10.1016/j.seppur.2020.117493

Szozda R.: Barwniki organiczne. *Atest – Ochrona Pracy*, 2010, 8, 42–43.

Wawrzkiewicz M.: Zastosowanie sorbentów różnego typu w procesie usuwania barwników z roztworów wodnych i ścieków przemysłowych. *Przemysł Chemiczny*, 2012, 91, 45–52.

Wilmański K.: Rozwój technologii oczyszczania wody z użyciem pylistego węgla aktywnego w Polsce. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2016, 19, 265–275; doi: 10.17512/ios.2016.2.9

Xie X., Guo H., Yan M., Korshin G.: Interactions between natural organic matter (NOM) and the cationic dye toluidine blue at varying pHs and ionic strengths: Effects of NOM charges and Donnan gel potentials. *Chemosphere*, 2019, 236, 124272; doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.07.003

Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M.: Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 209, 172–184; doi: 10.1016/j.cis.2014.04.002

Yang X.Y., Al-Duri B.: Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 287(1), 25–34; doi: 10.1016/j.jcis.2005.01.093

Zhang S., Shao T., Karanfil T.: The effects of dissolved natural organic matter on the adsorption of synthetic organic chemicals by activated carbons and carbon nanotubes. *Water Research*, 2011, 45(3), 1378–1386; doi: 10.1016/j.watres.2010.10.023

5. INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ

Tematyka oczyszczania wód naturalnych i przemysłowych metodami adsorpcyjnymi stanowi główny obszar moich zainteresowań naukowych. Zagadnienia związane z procesem adsorpcji były przedmiotem moich prac badawczych prowadzonych w związku z rozprawą doktorską, a w kolejnych latach były tematem przewodnim podejmowanych przeze mnie badań naukowych w kierunku uzyskania stopnia doktora habilitowanego. Równolegle obszar moich zainteresowań stanowią jonowymienne i elektrochemiczne metody oczyszczania oraz odzysk cennych surowców ze strumieni odpadowych w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym.

Początki mojej aktywności naukowej związane były z Politechniką Wrocławską, gdzie zrealizowałam studia doktoranckie. W okresie po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych kontynuowałam działalność naukowo-badawczą na Wydziale Inżynierii Środowiska, początkowo na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego, a od 2010 r. na stanowisku adiunkta. W tym samym roku rozpoczęłam staż podoktorski na zagranicznym uniwersytecie. Następnie kontynuowałam pracę naukową na Wydziale, a w późniejszych latach i obecnie w zagranicznych instytucjach naukowych. Opis pozostałych osiągnięć będących wynikiem mojej aktywności naukowej w jednostce macierzystej oraz jednostkach zagranicznych prezentuję chronologicznie poniżej.

5.1. Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska – studia doktoranckie, 2003–2007

W toku studiów doktoranckich prace naukowo-badawcze prowadziłam pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Adamskiego. Rozprawę doktorską zatytułowaną *Analiza zjawisk w koagulacji objętościowej wspomaganej pylistym węglem aktywnym* zrealizowałam w ramach uzyskanych dwóch krajowych grantów promotorskich. Pierwszy był projektem badawczym promotorskim (projekt nr 2, pkt 2.9.3, zał. 4) finansowanym przez ówczesne Ministerstwo Nauki i Informatyzacji, a jego celem była analiza oraz ilościowy opis zjawisk zachodzących podczas procesu koagulacji objętościowej wody powierzchniowej z rzeki Odry wspomaganej adsorpcją na węglu aktywnym. Następnie jako laureatka uczelnianego konkursu otrzymałam dofinansowanie grantu wewnętrznego promotorskiego (projekt nr 1, pkt 2.9.3, zał. 4). Uzyskanie dofinansowania z Politechniki Wrocławskiej umożliwiło mi zrealizowanie dodatkowych prac badawczych, które zawarłam w dysertacji. W projekcie określiłam wpływ mas cząsteczkowych naturalnych substancji organicznych występujących w badanych próbach wody z Odry na skuteczność ich usuwania na drodze adsorpcji, wykorzystując do tego metody chromatograficzne do ich rozdziału na kilka frakcji.

Wyniki ze zrealizowanych prac badawczych upowszechniałam na zagranicznych i krajowych konferencjach (3 wystąpienia) oraz opublikowałam w czasopismach naukowych (9 artykułów), które wymieniłam w załączniku nr 4 do wniosku habilitacyjnego:

- Artykuły w czasopismach naukowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 22, *Water Science and Technology* (IF=2,430); artykuł nr 23, *Polish Journal of Environmental Studies* (IF=1,871); artykuł nr 24, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576); artykuł nr 25, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576); artykuł nr 26, *Environment Protection Engineering* (IF=0,887); artykuł nr 27, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576); artykuł nr 28, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576); artykuł nr 29, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576);
  - pkt 2.4.2: artykuł nr 1, *Environment Protection Engineering* (IF=0,887).
- Artykuły w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 18;
  - pkt 2.4.2: artykuł nr 1.
- Inne prace – rozdział w książce o zasięgu międzynarodowym:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 1.
- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienie nr 45 – poster;
  - pkt 2.7.2: wystąpienie nr 1 – prezentacja ustna; wystąpienie nr 2 – poster.

5.2. Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska – aktywność naukowa w ramach krajowych projektów badawczych własnych, 2007–2013

W pierwszych latach pracy naukowej, w okresie po uzyskaniu stopnia doktora zgłębiałam zagadnienia dotyczące usuwania zanieczyszczeń organicznych z wód w procesie adsorpcji. Pozyskałam środki na realizację projektu badawczego w ramach konkursu na wsparcie działalności naukowej pracowników Wydziału, którego byłam kierownikiem (projekt nr 9, pkt 2.9.2, zał. 4). W projekcie tym, zrealizowanym w latach 2008–2009, koncentrowałam się na problematyce usuwania prekursorów ubocznych produktów dezynfekcji metodą adsorpcji na porowatych adsorbentach węglowych. Uzyskane współautorskie rezultaty badań zostały opublikowane w raporcie sprawozdawczym (raport nr 6).

Wcześniej, w latach 2007–2008, byłam zaangażowana w badania nad usuwaniem zanieczyszczeń organicznych z wody powierzchniowej przy udziale procesów technologicznych, przeprowadzanych z wykorzystaniem sorbentów drobnoziarnistych, takich jak drobnoziarnista żywica anionowymienna (MIEX®) oraz drobnoziarnisty węgiel aktywny (projekt nr 10, pkt 2.9.2, zał. 4). W projekcie tym analizowano komplementarność procesu wymiany anionowej, adsorpcji oraz koagulacji objętościowej w usuwaniu zawartych w oczyszczanej wodzie substancji organicznych. Prace zrealizowano, wykorzystując wodę pochodzącą z obszarów torfowiskowych będących źródłem wody wodociągowej dla gminy Piechowice na Dolnym Śląsku. Projekt ten, podobnie jak poprzedni, został zrealizowany dzięki środkom finansowym pozyskanym w uczelnianym konkursie na projekty badawcze pracowników Wydziału. Efektem zrealizowanego projektu jest wieloautorska publikacja naukowa (nr 21) i raport sprawozdawczy (nr 7) oraz prezentacja na międzynarodowej konferencji (nr 43).

W kolejnych latach koncentrowałam się na podjęciu oryginalnego i rozwojowego tematu, który pozwoliłby mi na zgromadzenie wartościowego materiału badawczego. Na

podstawie studiów literatury przedmiotu rozpoznałam obszary wymagające podjęcia dalszych badań i przygotowałam wniosek projektu badawczego własnego (N N523 563938), na który uzyskałam finansowanie w drodze konkursu z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (projekt nr 4, pkt 2.9.2, zał. 4). Byłam kierownikiem projektu i jego głównym wykonawcą. Projekt poświęcony był adsorpcji mikrozanieczyszczeń organicznych w postaci pestycydów oraz substancji humusowych i wybranych barwników organicznych, prowadzonej w układach oczyszczania jako proces samodzielny oraz hybrydowy, tj. w połączeniu z niskociśnieniową separacją membranową. Potrzeba prowadzenia badań w tym zakresie wynikała z faktu, że adsorpcja w układach, w których dodatkowo występuje szereg substancji organicznych o odmiennych właściwościach i budowie, jest złożonym, nierozpoznanym w pełni zagadnieniem. Ponadto literatura przedmiotu nie wyczerpywała problematyki czynników limitujących przebieg adsorpcji, mających kluczowe znaczenie przy optymalizacji warunków prowadzenia procesu w podobnych układach technologicznych oczyszczania wody. Zgromadzony, oryginalny materiał badawczy był bardzo obszerny, a uzyskane wyniki badań zostały częściowo wykorzystane do przygotowania monografii habilitacyjnej. Efektem zrealizowanych prac były 2 artykuły naukowe (nr 6 i 19) posiadające IF, 3 artykuły (nr 10, 14, 16) opublikowane w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, 4 wystąpienia (nr 13, 29, 30, 36) na międzynarodowych konferencjach naukowych oraz raport sprawozdawczy (nr 3).

Równolegle, w okresie 2009-2012, byłam wykonawcą w zespole naukowym kierowanym przez dr inż. Patryka Wójtowicza, realizującym projekt badawczy własny (N N523 450036), poświęcony modelowaniu przepływów i analizie zdolności napowietrzania strumienia w innowacyjnych regulatorach hydrodynamicznych (projekt nr 8, pkt 2.9.2., zał. 4). W projekcie realizowałam prace eksperymentalne z zakresu absorpcji tlenu na skutek napowietrzania wody za pomocą regulatorów wirowych. Uzyskane przeze mnie wyniki posłużyły do określenia zdolności napowietrzania strumienia przepływającej cieczy w innowacyjnych konstrukcjach regulatorów wirowych. Projekt ten miał pionierski charakter i ze względu na unikalny charakter konstrukcji regulatorów wyniki badań nie mają odpowiednika w literaturze przedmiotu. Wybrane konstrukcje innowacyjnych regulatorów hydrodynamicznych zostały wdrożone do produkcji przemysłowej przez ich pomysłodawcę. Rezultaty wspólnych prac naukowo-badawczych zostały opublikowane w czasopismach naukowych z listy JCR (3 artykuły), recenzowanych materiałach konferencyjnych (4 artykuły), raportach (4 raporty) oraz upowszechnione na licznych konferencjach naukowych (10 wystąpień).

Podsumowując, w wyniku zrealizowanych w latach 2007–2013 krajowych projektów badawczych powstało szereg współautorskich publikacji naukowych posiadających IF, raportów sprawozdawczych, prezentacji konferencyjnych oraz innych opracowań naukowych. Wszystkie prace zostały wymienione w załączniku nr 4 do wniosku habilitacyjnego:

- Artykuły w czasopismach naukowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 6, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576); artykuł nr 10, *Chemical Engineering Journal* (IF=16,744); artykuł nr 16, *Water Science and Technology* (IF=2,430); artykuł nr 18, *Environment Protection Engineering* (IF=0,887); artykuł nr 19, *Water Science and Technology* (IF=2,430); artykuł nr 21, *Water Science and Technology: Water Supply* (IF=1,768).

- Artykuły w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 4, *Web of Science* (Punkty MNiSW = 15); artykuły nr 10, 12, 13, 14, 16 i 17.
- Inne prace – raporty:
  - pkt 2.4.1: raporty nr 1, 2, 4, 5, 6 i 7.
- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienia nr 13, 14, 18, 31, 34, 39 i 41 – prezentacje ustne; wystąpienia nr 9, 29, 30, 32, 35, 36, 38 i 43 – postery.

5.3. Utrecht University, Faculty of Geosciences, Department of Earth Sciences, Utrecht, Holandia - aktywność naukowa w ramach stażu podoktorskiego, 2010–2012

Na stanowisku post-doctoral researcher w departamencie Earth Sciences Uniwersytetu w Utrechcie zostałam zatrudniona w drodze otwartego międzynarodowego konkursu (pobyt nr 2, pkt 2.11, zał. 4). Prace naukowo-badawcze realizowałam w grupie Geochemistry, w ramach projektu „SOWACOR – *Soil, Water and Coastal Resources*", pakietu roboczego „New Materials for Water Treatment" (projekt nr 5, pkt 2.9.2., zał 4). Projekt był finansowany przez King Abdullah University of Science and Technology z Arabii Saudyjskiej, a jego kierownikiem był prof. Philippe Van Cappellen, natomiast koordynatorem pakietu roboczego była dr Natalia Chubar.

Pracowałam w międzynarodowym zespole naukowym, w którym byłam odpowiedzialna za realizację prac mających na celu zbadanie zdolności adsorpcyjnych innowacyjnych materiałów otrzymanych na bazie mieszanych wodorotlenków Fe, Mn i Al, wobec szkodliwych jonów metali i związków chemicznych, m.in.: AsO_3^{3-}, AsO_4^{3-}, SeO_3^{2-}, SeO_4^{2-}, PO_4^{3}, CrO_4^{2-}, BrO_3^{-}, Br^{-}, F^{-}. Badania eksperymentalne procesu adsorpcji realizowałam w skali laboratoryjnej, w układach porcjowych i przepływowych. Do analizy odziaływań wybranych zanieczyszczeń z materiałami adsorpcyjnymi wykorzystywałam przede wszystkim techniki spektroskopowe (FTIR), natomiast w celu uzyskania informacji na temat struktury krystalicznej i składu fazowego materiałów – metody dyfrakcyjne (XRD). Morfologię powierzchni adsorbentów określałam za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM), pomiary wielkości ziaren oraz potencjału elektrokinetycznego powszechni materiałów wykonywałam z wykorzystaniem dostępnej specjalistycznej aparatury.

W toku stażu podoktorskiego uczestniczyłam również w realizacji dwóch grantów badawczych finansowych przez Netherlands Organization for Scientific Research z Holandii, których kierownikiem była dr Natalia Chubar (projekty nr 6 i 7, pkt 2.9.2., zał. 4). Oba granty, „Mechanism of Arsenate-Arsenite, Bromide-Bromate and Selenite-Selenite Adsorption by the New Adsorptive Materials – EXAFS" oraz „Investigation of the Structure of New Inorganic Ion Exchangers and the Mechanism of $H_2AsO_4^{-}$ Adsorption by These Materials – EXAFS", były zrealizowane w European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) we Francji. W trakcie pobytów badawczych w ESRF samodzielnie wykonywałam pomiary nowo otrzymanych, nieznanych do tej pory materiałów adsorpcyjnych i jonowymiennych, stosując unikatową technikę spektroskopową wykorzystującą oddziaływanie rentgenowskiego promieniowania

synchrotronowego z badanymi próbkami materiałów. Przygotowywałam próby do badań i rejestrowałam widma eksperymentalne. W badaniach stosowałam metodę EXAFS (ang. *Extended X-ray Absorption Fine Structure*), w której zakres widma zawiera się w przedziale od ok. 50 eV do 1000 eV za krawędzią adsorpcji i odpowiada rozciągniętej subtelnej strukturze widma absorpcyjnego promieniowania X.

Praca jako post-doctoral researcher na prestiżowym zagranicznym uniwersytecie w otoczeniu wybitnych pracowników nauki ukształtowała mnie jako naukowca i miała olbrzymi wpływ na moją dalszą karierę. Dzięki temu doświadczeniu znacznie wzbogaciłam swoją wiedzę, dorobek naukowy, poznałam nowe metody eksperymentalne, nabyłam praktyczne umiejętności z zakresu technik analitycznych wykorzystywanych w badaniach powierzchni materiałów oraz nawiązałam międzynarodowe kontakty.

Efektem wspólnych prac badawczych oraz nadal kontynuowanej współpracy naukowej z zespołem jest szereg artykułów opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach z listy JCR (5 artykułów), w recenzowanych materiałach konferencyjnych (3 artykuły) oraz wystąpień konferencyjnych (8 wystąpień) wymienionych w załączniku nr 4 do wniosku habilitacyjnego:

- Artykuły w czasopismach naukowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 3, *Solid State Sciences* (IF=3,752); artykuł nr 14, *Chemical Engineering Journal* (IF=16,744); artykuł nr 15, *Environmental Science and Technology* (IF=11,357); artykuł nr 17, *Chemical Engineering Journal* (IF=16,744); artykuł nr 20, J*ournal of Colloid and Interface Science* (IF=9,965).
- Artykuły w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: artykuły nr 1, 9 i 15.
- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienia nr 3, 22, 40 i 44 – prezentacje ustne; wystąpienia nr 24, 33, 37 i 42 – postery.

5.4. Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska – aktywność naukowa w ramach międzynarodowego projektu i zrealizowanych pobytów badawczych, 2014–2016

Podejmowana przeze mnie współpraca międzynarodowa i nawiązane kontakty zaowocowały zaproszeniem do wspólnego złożenia wniosku do 7 Programu Ramowego. Wniosek został pozytywnie zaopiniowany i międzynarodowe konsorcjum składające się z instytucji naukowych i partnerów przemysłowych z Finlandii, Szwecji, Irlandii, Portugalii i Rumunii, uzyskało środki finansowe na realizację 3-letniego projektu „SUSMIN – Tools for Sustainable Gold Mining in EU" (projekt nr 3, pkt 2.9.2, zał. 4). W projekcie pełniłam podwójną rolę: byłam jego kierownikiem z ramienia Politechniki oraz głównym wykonawcą pakietu roboczego „Mine Water Treatment Technologies". Byłam odpowiedzialna za koordynowanie oraz realizację prac badawczo-rozwojowych polegających na opracowaniu oryginalnego rozwiązania technologicznego w zakresie usuwania związków arsenu z wód pochodzących z kopalni złota, przy użyciu materiałów wykazujących właściwości adsorpcyjne i jonowymienne. Zakres zrealizowanych prac był bardzo szeroki i wymagał zaangażowania ze

strony stworzonego przeze mnie zespołu z Politechniki Wrocławskiej (dr inż. Patryka Wójtowicza, studentki Marzeny Kozielec, studenta Pawła Włodarczyka) oraz współpracy z partnerami projektu z Finlandii.

W badaniach koncentrowałam się na różnych kategoriach materiałów, takich jak ruda żelaza, granulowany wodorotlenek żelaza, materiały mineralne, biosorbent, granulowany węgiel aktywny. W pierwszej fazie określiłam właściwości fizykochemiczne i strukturalne materiałów. Następnie, wraz z zespołem zrealizowałam testy w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem roztworów modelowych i wytypowałam do dalszych badań materiały o największym potencjale aplikacyjnym. Następnie w ramach mojego pobytu naukowo-badawczego w Savonia University of Applied Sciences, Department of Engineering and Technology w Finlandii (pobyt nr 7, pkt 2.11, zał. 4) przeprowadziłam prace badawcze w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, w których wykorzystałam wody zanieczyszczone związkami arsenu pochodzące z dwóch kopalni złota. Zwieńczeniem prac potwierdzającym utylitarność opracowanego rozwiązania opartego na jonowymiennym materiale mineralnym była demonstracja technologii w skali pilotowej (TRL 6) na terenie kopalni złota w Finlandii, gdzie zrealizowałam swój kolejny pobyt naukowo-badawczy, kierując kampanią pilotową (pobyt nr 6, pkt 2.11, zał. 4). Kampania była zrealizowana we współpracy z partnerami z Finlandii, Geological Survey of Finland i kopalnią Dragon Mining.

W trakcie trwania projektu odbyłam również kilka krótkich wizyt o charakterze naukowo-technicznym (pobyty nr 11–13, pkt 2.11, zał. 4) w:

- University of Porto w zespole prof. António Fiúza oraz kopalni Castromil w Portugalii,
- Babes-Bolyai University w zespole prof. Calin Baciu oraz kopalniach Brad-Rovina i Rosia Montana w Rumunii,
- Luleå University of Technology w zespole prof. Lena Alakangas oraz kopalniach Aitik w Szwecji i Kittilä w Finlandii.

Wiedza, umiejętności i praktyczne doświadczenia w zakresie technologii oczyszczania wód kopalnianych, które nabyłam w trakcie realizacji projektu oraz odbytych pobytów badawczych, nakreśliły kierunki mojego dalszego rozwoju naukowego. Ponadto nawiązana współpraca z partnerami międzynarodowego konsorcjum, reprezentujących branżę wydobywczą przybliżyła mi problematykę gospodarki wodnej w zakładach przeróbczych, wykorzystania odpadów zgodnie z zasadą gospodarki o obiegu zamkniętym i wymaganiami środowiskowymi.

Rezultatem zrealizowanych wspólnych prac naukowo-badawczych w projekcie są artykuły opublikowane w czasopismach naukowych (3 artykuły) posiadające IF i materiałach konferencyjnych oraz liczne wystąpienia konferencyjne (11 wystąpień) wymienione w załączniku nr 4 do wniosku habilitacyjnego:

- Artykuły w czasopismach naukowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 7, *Environment Protection Engineering* (IF=0,887); artykuł nr 12, *Desalination and Water Treatment* (IF=1,273); artykuł nr 13, *Ochrona Środowiska* (IF=0,576).
- Artykuły w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: artykuły nr 3, 5, 8 i 11.

- Komunikaty w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: komunikaty nr 1 i 5.
- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienia nr 15, 16, 23 i 25 – prezentacje ustne; wystąpienia nr 8, 10, 12, 19, 26, 27 i 28 – postery.

5.5. University of Malaya, Department of Chemical Engineering, Centre for Separation Science and Technology, Kuala Lumpur, Malezja – aktywność naukowa w ramach pobytu jako visiting scientist, 2015

W 2014 roku zostałam laureatką programu Erasmus Mundus INTACT i uzyskałam dwumiesięczne stypendium wyjazdowe do uczelni partnerskiej w Malezji. Pobyt naukowy zrealizowałam w następnym roku (04–05.2015 r.) w Centre for Separation Science and Technology kierowanym wówczas przez wybitnego specjalistę prof. Mohameda Kheireddine'a Aroua (pobyt nr 4, pkt 2.11, zał. 4). Pobyt ten określił nowy obszar tematyczny w mojej pracy naukowej, obejmujący zagadnienia związane z oczyszczaniem wód i ścieków przemysłowych z wykorzystaniem metod elektrochemicznych.

Zespół prof. Aroua pracował nad oryginalną koncepcją wielofunkcyjnego reaktora do elektrochemicznego i adsorpcyjnego oczyszczania ścieków zawierających metale ciężkie i barwniki organiczne. Moim zadaniem było zapoznanie dr Mook Wei Tze i dr Farihahusnah Hussin (wówczas doktorantek) z metodami eksperymentalnymi, stosowanymi w badaniach procesu adsorpcji realizowanej w wydzielonym i wielofunkcyjnym reaktorze oraz sprawowanie nadzoru merytorycznego w tym zakresie. Wspólnie przygotowałyśmy układy badawcze do prowadzenia testów adsorpcji i elektrokoagulacji. W badaniach adsorpcji wykorzystano węgiel aktywny wytworzony z produktów odpadowych w postaci łupin palmowych, natomiast energię elektryczną do realizacji elektrokoagulacji pozyskałyśmy z odnawialnego źródła energii, wykorzystując system fotowoltaiczny. Uczestniczyłam w pracach poświęconych projektowaniu eksperymentów z zastosowaniem statystycznych narzędzi pozwalających na jednoczesną zmianę parametrów procesu elektrokoagulacji realizowanej indywidualnie oraz w układzie zintegrowanym i znalezienie optymalnych warunków do jego realizacji. Wykorzystałyśmy metodologię powierzchni odpowiedzi (ang. *response surface methodology* – RSM), która umożliwiła optymalizację procesu przy stosunkowo niewielkiej liczbie eksperymentów.

Wynikiem mojego zaangażowania w prace zespołu prof. Aroua było oficjalne powierzenie mi obowiązków promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim doktorantki Mook Wei Tze. Praca doktorska zatytułowana *Combined Adsorption-Electrocoagulation Process for Removal of Reactive Black 5 Dye from Aqueous Solution* została obroniona w 2018 r. Do realizacji procesu elektrokoagulacji doktorantka zaproponowała nowatorską konfigurację anody składającej się z podwójnej warstwy siatki żelaznej.

Z prof. Aroua i jego zespołem współpracuję nieprzerwanie do dziś. Efektem naszej owocnej współpracy jest kilka artykułów opublikowanych w czasopismach z listy JCR (6 artykułów) i wystąpień konferencyjnych (5 wystąpień) wymienionych w załączniku 4 do wniosku:

- Artykuły w czasopismach naukowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 1, *Chemosphere* (IF=8,943); artykuł nr 2, *Separation Science and Technology* (IF=2,799); artykuł nr 5, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* (IF=4,264); artykuł nr 8, *Journal of Environmental Sciences* (IF=6,796); artykuł nr 9, *Water Science and Technology* (IF=2,430); artykuł nr 11, *BioResources* (IF=1,747).
- Artykuły w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: artykuły nr 2, 6 i 7.
- Komunikaty w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych:
  - pkt 2.4.1: komunikaty nr 2, 3 i 4.
- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienie nr 2 – *pitch* poster; wystąpienia nr 11, 17, 20 i 21 – postery.

5.6. Geological Survey of Finland, Industrial Environments and Recycling Unit, Kuopio, Finlandia – aktywność naukowa w ramach pobytu jako senior scientist, 2018–2019

Moja działalność naukowo-badawcza w międzynarodowym projekcie SUSMIN (projekt nr 3, pkt 2.9.2, zał. 4) spotkała się z uznaniem i zostałam zaproszona przez Geological Survey of Finland (GTK) do dołączenia do projektu „SEXUM – Advanced Technologies for Sustainable Exploitation of Uranium-Bearing Mineral Resources" (projekt nr 2, pkt 2.9.2, zał.4). Zostałam zatrudniona na stanowisku senior scientist na okres od 10.2018 do 02.2019 r. w departamencie Industrial Environments and Recycling (pobyt nr 3, pkt 2.11, zał. 4). Projekt SEXUM był współfinansowany przez Academy of Finland (AKA, odpowiednik krajowego NCN), a jego kierownikiem był prof. Jouko Vepsäläinen z University of Eastern Finland.

W ramach pakietu roboczego „Development of Novel Methods and Materials for Uranium Removal from Effluents" uczestniczyłam w pracach mających na celu opracowanie nowego rozwiązania technologicznego, opartego na metodach adsorpcyjnych i jonowymiennych, służącego do odzysku uranu z wód po procesach przeróbki surowców o jego niskiej koncentracji. Wspólną propozycją zespołu było atrakcyjne rozwiązanie, polegające na wykorzystaniu chitozanu jako naturalnego polimeru pochodzącego ze źródeł odnawialnych, który może być poddany recyklingowi. Byłam odpowiedzialna za przeprowadzenie badań eksperymentalnych w skali laboratoryjnej, polegających na optymalizacji separacji uranu z rzeczywistych ścieków pochodzących z procesów przeróbczych przy użyciu biopolimeru, a następnie jego odzysku i regeneracji zużytego materiału w celu jego ponownego wykorzystania w układzie oczyszczania.

Doświadczenie zdobyte w trakcie kilkumiesięcznego pobytu badawczego w Geological Survey of Finland wraz z wiedzą i doświadczeniami wyniesionymi ze zrealizowanego wcześniej międzynarodowego projektu w Politechnice Wrocławskiej sprawiły, że tematyka szeroko pojętego oczyszczania wód kopalnianych oraz odzysku cennych surowców ze strumieni odpadowych stała się równoległym obszarem moich zainteresowań naukowych.

Osiągnięciem naukowym będącym wynikiem zrealizowanego pobytu badawczego był artykuł opublikowany w wysoko punktowanym czasopiśmie z listy JCR oraz wystąpienie konferencyjne wymienione w załączniku 4 do wniosku:

- Artykuły w czasopismach naukowych:
  - pkt 2.4.1: artykuł nr 4, *Separation and Purification Technology* (IF=9,136).
- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienie nr 7 – prezentacja ustna.

5.7. Geological Survey of Finland, Circular Economy Solutions Unit, Kuopio, Finlandia – aktywność naukowa w ramach pobytu jako senior scientist, 2019–obecnie

Na stanowisko senior scientist w departamencie Circular Economy Solutions w Geological Survey of Finland (GTK) zostałam zatrudniona w drodze otwartego międzynarodowego konkursu (pobyt nr 1, pkt 2.11, zał. 4). Mój pobyt w GTK rozpoczął się w marcu 2019 r. i trwa do chwili obecnej. Tematyka prac tych, które do tej pory zrealizowałam, lub tych, które są na etapie realizacji, związana jest z metodami oczyszczania wód kopalnianych, głównie fizyczno-chemicznymi i elektrochemicznymi, zagadnieniami odzysku strategicznych surowców ze strumieni odpadowych oraz postępowania z wodami technologicznymi i zamykania obiegów wody w instalacji przeróbczej surowców mineralnych. Realizowałam/realizuję prace naukowo-badawcze (projekt nr 1, pkt 2.9.1, zał. 4) i wdrożeniowe (projekt nr 1, pkt 2.9.2, zał. 4) oraz brałam/biorę udział w przedsięwzięciach o charakterze badawczo-rozwojowym, infrastrukturalnym (projekty nr 1–3, pkt 2.15, zał. 4) i komercyjnym (pkt 3.2, zał. 4). Ponadto jestem aktywna w obszarze dydaktyczno-szkoleniowym, m.in. pełnię funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim (pkt 6.1.C) i nadzoruję prace badawcze studentów (pkt 6.1.D), realizuję międzynarodowy projekt edukacyjny (projekt nr 2, pkt 2.9.2, zał. 4) i uczestniczę w programach europejskich zorientowanych na budowanie potencjału w krajach poza UE (programy nr 1 i 2, pkt 2.14, zał. 4).

Obecnie jestem kierownikiem dwóch międzynarodowych projektów będących w trakcie realizacji, współfinansowanych przez Europejski Instytut Innowacji i Technologii (ang. European Institute of Innovation and Technology – EIT) – EIT Raw Materials i EIT Raw Materials Academy, działający na rzecz wsparcia europejskiej innowacyjności w branży surowców mineralnych.

Pierwszy z nich to projekt „BrineRIS – Brines of RIS Countries as a Source of CRM and Energy Supply" (projekt nr 1, pkt 2.9.2, zał. 4), którego celem jest analiza potencjału solanek geotermalnych, występujących w krajach partnerów projektu, w kontekście opłacalnego pozyskiwania cennych metali, takich jak lit, oraz wykorzystania geotermii do produkcji energii elektrycznej. Uczestniczę w pracach naukowo-badawczych w pakiecie roboczym „Recovery Testing" poświęconym testowaniu innowacyjnych technologii bezpośredniej ekstrakcji litu z geotermalnych solanek (ekstrakcyjnych, adsorpcyjnych, elektrochemicznych). Jestem bezpośrednio odpowiedzialna za realizację badań naukowych z zakresu odzysku tego pierwiastka z wybranych solanek za pomocą metod adsorpcyjnych oraz biorę udział w pracach prowadzonych z wykorzystaniem techniki ekstrakcji za pomocą rozpuszczalników. W pakiecie tym planowane są także wspólne prace nad ekonomiczną oceną proponowanych rozwiązań. Dodatkowo pełnię rolę lidera pakietu roboczego „Capacity Building", poświęconego wzmocnieniu potencjału naukowego i technologicznego w zakresie zeroemisyjnych technologii związanych z geotermalnymi solankami w krajach partnerów

objętych Regionalnym Programem Innowacji EIT (EIT RIS), a więc w: Polsce, Węgrzech, Czechach, Słowacji, Hiszpanii i Portugalii. W tym celu, we współpracy z partnerami projektu, opracowałam 3-letni „Capacity Building Action Plan", obejmujący szkolenia, warsztaty, seminaria, wizyty studyjne, i koordynuję jego realizację w projekcie.

Drugim projektem jest projekt edukacyjny „MEITIM – Master in Entrepreneurship, Innovation and Technology Integration in Mining" (projekt nr 2, pkt 2.9.2, zał. 4), którego celem jest opracowanie nowej oferty dydaktycznej na poziomie studiów magisterskich (120 ECTS), zorientowanej na bardziej zrównoważone, innowacyjne górnictwo i będącej jednocześnie odpowiedzią na zapotrzebowanie krajowego oraz europejskiego rynku. Rola instytutów naukowych, w tym moja, oraz partnerów przemysłowych projektu polega na wsparciu reprezentantów środowiska akademickiego w opracowaniu takiego programu edukacyjnego, który wyposaży studentów w zestaw umiejętności niezbędnych to bycia innowacyjnymi, przedsiębiorczymi i kreatywnymi inżynierami, o bardzo dobrej orientacji i mentalności rynkowej. W projekcie planowane jest ubieganie się o przyznanie programowi prestiżowej akredytacji EIT Label Europejskiego Instytutu Innowacji i Technologii.

W latach 2019–2021 byłam koordynatorem naukowym międzynarodowego konsorcjum partnerów projektu „Morecovery – Modular Recovery Process Services for Hydrometallurgy and Water Treatment" (projekt nr 1, pkt 2.9.2, zał. 4). Był to projekt typu wdrożeniowego (KAVA 5 Upscaling) współfinansowany przez EIT Raw Materials, którego liderem były instytut Geological Survey of Finland. Zakres moich obowiązków w projekcie był szeroki. Koordynowałam prace realizowane przez partnerów projektu w poszczególnych pakietach roboczych mające na celu poszerzanie skali opracowanych w laboratorium technologii odzysku krytycznych pierwiastków ze strumieni odpadowych (m.in. wód kopalnianych, osadów, odpadów wydobywczych) oraz ich komercjalizację. Pełniłam również obowiązki kierownika projektu w okresie od 09.2020 do 03.2021 r. W projekcie byłam zaangażowana w realizację pakietu roboczego „Update of the Pilot Plant and Screening of the Potential Sites" i byłam współtwórcą układów technologicznych oczyszczania wód przemysłowych i odzysku pierwiastków. Pierwszą zaprojektowaną instalacją była mobilna stacja pilotowa, która została zabudowana w kontenerze magazynowym (morskim) o długości 12 m, pracowała w układzie przepływowym z maksymalną wydajnością 1,5 m^3/h. Natomiast wydajność drugiej instalacji, pracującej zarówno w układzie przepływowym, jak i porcjowym, była na poziomie 25 dm^3/h. Dodatkowo byłam głównym wykonawcą w pakiecie roboczym „Piloting Campaigns at Target Sites", w którym kierowałam dwoma kampaniami pilotowymi mającymi na celu demonstrację opracowanych w skali laboratoryjnej rozwiązań technologicznych do odzysku krytycznych metali, opartych na neutralizacji i chemicznym strącaniu, na poziomie gotowości technologicznej TRL 6–7 (ang. *technology readiness level* – TRL). W 2020 r. kierowałam 4-osobowym zespołem i koordynowałam prace w trakcie 8-tygodniowej kampanii pilotowej oczyszczania kopalnianych wód drenażowych i odzysku Ni i Co, prowadzonej z wykorzystaniem mobilnej stacji pilotowej na terenie kopalni w Finlandii. Prace zakończyły się demonstracją technologii na poziomie gotowości technologicznej TRL 7. W 2021 roku kierowałam 2-osobowym zespołem i koordynowałam prace w trakcie 4-tygodniowej kampanii pilotowej oczyszczania kwaśnych wód kopalnianych (ang. *acid mine drainage* – AMD) z kopalni operującej w południowej Hiszpani, na obszarze Iberyjskiego Pasa Pirytowego. Badania te były zorientowane na odzysk pierwiastków ziem rzadkich (ang. *rare*

earth elements – REE). W tym przypadku wykorzystana została instalacja o mniejszej wydajności, a prace zakończyły się na poziomie gotowości technologicznej TRL 6.

Osiągnięciem o wymiarze utylitarnym, będącym wynikiem zrealizowanego projektu „Morecovery" jest skomercjalizowanie zwalidowanych przeze mnie technologii odzysku wybranych krytycznych pierwiastków z wód kopalnianych, które od 2022 r. są komercyjnie oferowane przez Geological Survey of Finland oraz Savonia University of Applied Sciences z Finlandii. Ze względu na trwający proces komercjalizacji prace nad wspólnymi publikacjami zostały podjęte niedawno. Wyniki z wybranych prac upowszechniałam na międzynarodowych konferencjach (4 wystąpienia) oraz w formie wykładów (2 wykłady) wygłoszonych za zaproszenie, które wymieniłam w załączniku nr 4 do wniosku habilitacyjnego:

- Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych:
  - pkt 2.7.1: wystąpienie nr 1 – prezentacja ustna; wystąpienie nr 6 – poster; prezentacja ustna – wystąpienie nr 4 i 5.
- Wykłady wygłoszone na zaproszenie instytucji zagranicznych:
  - pkt 2.7.1: wykłady nr 1 i 2.

Równocześnie, w latach 2019–2021, brałam udział w realizacji projektu infrastrukturalnego „Kuopio Water Cluster" (projekt nr 3, pkt 2.15, zał. 4) finansowanego z regionalnych funduszy strukturalnych. Byłam odpowiedzialna za przygotowanie specyfikacji technicznej do postępowania przetargowego dotyczącego analizatora typu online z dyspersją energii (ang. *energy dispersive X-ray fluorescence* – EDXRF), w którym do analizy składu pierwiastkowego materiałów ciekłych wykorzystywana jest metoda fluorescencji rentgenowskiej, oraz koordynowałam instalację i rozruch spektrometru w mobilnej stacji pilotowej oczyszczania wód i odzysku pierwiastków.

Od 2021 roku jestem również zaangażowana w projekt infrastrukturalny (projekt nr 2, pkt 2.15, zał. 4), którego przedmiotem jest modernizacja i digitalizacja zakładu przeróbki surowców mineralnych oraz wybudowanie nowych laboratoriów (infrastruktura znana pod nazwą GTK Mintec). Moja rola w tym przedsięwzięciu polega na dostarczeniu wiedzy eksperckiej w kwestiach związanych z oczyszczaniem wód i ścieków przemysłowych. Jestem kierownikiem podprojektu „Water Pilot", w którym jestem bezpośrednio odpowiedzialna za koncepcję stacji pilotowej oczyszczania wód kopalnianych, sprawowanie nadzoru merytorycznego nad realizowanymi pracami oraz przygotowanie specyfikacji technicznej do postępowania przetargowego na zakup instalacji pilotowych, w szczególności układu do koagulacji objętościowej i wielostopniowego chemicznego strącania wraz z sedymentacją, elektrochemicznego i elektrodialitycznego oczyszczania, instalacji do realizacji procesu adsorpcji i wymiany jonowej w układzie przepływowym oraz systemów nisko- i wysokociśnieniowej separacji membranowej.

6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

Posiadam wieloletnie doświadczenie dydaktyczne zdobyte w toku studiów doktoranckich (2003–2007), następnie jako pracownik naukowo-dydaktyczny prowadzący zajęcia w pełnym wymiarze, promotor prac inżynierskich i magisterskich, recenzent prac dyplomowych, wykładowca w szkole letniej (2007–2018) oraz jako promotor prac inżynierskich, promotor pomocniczy w przewodach doktorskich i recenzent prac doktorskich realizowanych w jednostkach zagranicznych (2015-2022).

A. Aktywnie uczestniczyłam w procesie dydaktycznym studentów Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, prowadząc szereg zajęć w języku polskim i angielskim w formie wykładów, seminariów, ćwiczeń, projektów i laboratoriów oraz opracowując materiały dydaktyczne do zajęć.

- Zajęcia w języku polskim prowadziłam zarówno w Politechnice Wrocławskiej we Wrocławiu, jak i w Zamiejscowym Ośrodku Dydaktycznym w Wałbrzychu, na stacjonarnych i niestacjonarnych studiach I i II-go stopnia, kierunku Inżynieria Środowiska i Ochrona Środowiska (od 2003 r):
  - Chemia wody – wykład, ćwiczenia, laboratorium.
  - Chemia wody i powietrza – ćwiczenia.
  - Oczyszczanie wody – projekt, laboratorium.
  - Oczyszczanie wody i ścieków – projekt.
  - Oczyszczanie ścieków – laboratorium.
  - Technologie przyszłości w oczyszczaniu wody (kurs autorski, wybieralny) – seminarium.
- Zajęcia dydaktyczne w języku angielskim prowadziłam na stacjonarnych studiach II-go stopnia Environmental Quality Management (EQM) na Wydziale Inżynierii Środowiska oraz dla studentów studiujących w Politechnice Wrocławskiej w ramach programu Erasmus i w ramach 6-tygodniowej Szkoły Letniej WUST Summer School. Kursy w języku angielskim są moimi autorskimi kursami, do których przygotowałam karty przedmiotów, instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych oraz materiały dydaktyczne do wykładu (od 2007 r.):
  - Environmental Chemistry (kurs autorski) – wykład, laboratorium.
  - Water Treatment Technology (kurs autorski) – laboratorium.
  - Wastewater Treatment Technology (kurs autorski) – laboratorium.

B. Zrealizowałam autorskie zajęcia dydaktyczne na stacjonarnych studiach I-go stopnia w zagranicznej uczelni Savonia University of Applied Sciences w Finlandii, w ramach uzyskanych stypendiów wyjazdowych z programu Erasmus+ „Mobility of Staff in Higher Education" (2018 r.):
  - Water Treatment Technologies (kurs autorski) – laboratorium.
  - Wastewater Treatment Technologies (kurs autorski) – laboratorium.

C. Dotychczas byłam promotorem łącznie 37 prac dyplomowych zrealizowanych w jednostce macierzystej oraz uczelni zagranicznej, a także promotorem pomocniczym w 2 przewodach doktorskich w zagranicznych uczelniach:

- Byłam promotorem 16 prac inżynierskich i 15 magisterskich zrealizowanych w języku polskim oraz 3 prac magisterskich zrealizowanych w języku angielskim na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, kierunkach Inżynieria Środowiska, Ochrona Środowiska i Environmental Quality Management.
- Pod moją opieką swoje prace dyplomowe zrealizowało 3 dyplomantów studiów I-go stopnia z Shanghai Second Polytechnic University, Chiny (Wanqing Chen, Wenqi Zhang, Xinyue Wang), w ramach podwójnego dyplomowania z Savonia University of Applied Sciences, Finlandia (2018 r.).
- Byłam promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim doktorantki Mook Wei Tze, zrealizowanym w latach 2015–2018 w Faculty of Engineering, University of Malaya, Malezja, którego promotorem był prof. Mohamed Kheireddine Aroua. Tytuł rozprawy: *Combined Adsorption-Electrocoagulation Process for Removal of Reactive Black 5 dye from Aqueous Solution*.
- Od 2020 roku pełnię funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim doktorantki Elmiry Brooshan, realizowanym w School of Engineering, Aalto University, Finlandia, którego promotorem jest prof. Riku Vahala. Tytuł rozprawy: *Decentralized Water Treatment with Recycled Industrial Material*.

D. Kilkukrotnie sprawowałam opiekę nad studentami uczelni zagranicznych i nadzorowałam realizację ich prac, takich jak:

- Praca badawcza studenta studiów magisterskich z Glasgow Caledonian University, zrealizowana na Wydziale Inżynierii Środowiska (Ruben Itarte Irisarri, 2004 r.).
- Prace studentów realizujących prace dyplomowe inżynierskie z Savonia University of Applied Sciences, Finlandia w ramach 3-miesięcznych praktyk studenckich w Geological Survey of Finland (Anni Muttonen, 2019 r.; Peetu Pesonen, 2020 r.).
- Praca badawcza doktoranta z University of Huelva, Hiszpania, zrealizowana w ramach wspólnego międzynarodowego projektu w Savonia University of Applied Sciences i Geological Survey of Finland, Finlandia (Jonatan Romero Matos, 2021 r.).

E. Byłam recenzentem 12 prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich zrealizowanych na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej oraz 2 prac doktorskich zrealizowanych na zagranicznych uniwersytetach (recenzje wymienione pkt 2.13, zał. 4). Należą do nich:

- Dysertacja doktorantki Maria Mamelkina *Treatment of Mining Waters by Electrocoagulation*", zrealizowana w School of Engineering, Lappeenranta University of Technology, Finlandia, w 2020 r.
- Dysertacja doktorantki Alba Gómez Arias *Hydrogeochemical Assessment, Water Treatment and Revalorization of Dumps, Tailings and Drainages Produced at Phalaborwa Industrial Complex*, zrealizowana w Faculty of Experimental Science, University of Huelva, Hiszpania i Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State, RPA, w 2020 r.

F. Spośród innych osiągnieć pragnę wymienić:

- Angażowanie studentów studiów I-go i II-go stopnia Wydziału Inżynierii Środowiska w realizację prac badawczych w ramach międzynarodowego projektu o akronimie SUSMIN (projekt nr 3, pkt 2.9.2., zał. 4) oraz wspólne przygotowanie komunikatów i referatu w celu ich prezentacji w formie posterów i prezentacji ustnej na międzynarodowych konferencjach naukowych (wystąpienia konferencyjne nr 19, 25 i 26, pkt 2.7, zał. 4).
- Współautorstwo podręcznika w języku angielskim: W. Adamski, M. Szlachta *Water Treatment Technology: Principles and modeling*. Wydawnictwo Printpap Łódź, Wrocław, 2011, ISBN: 978-83-62098-68-2 (publikacja wymieniona w pkt 2.4, zał. 4).
- Powołanie do Dyplomowej Komisji Egzaminacyjnej w UNESCO Institute for Water Education, Delft, Holandia, w 2011 r. w celu egzaminowania studentów z zakresu oczyszczania wód.
- Podnoszenie kwalifikacji nauczyciela akademickiego przez podejmowanie szkoleń i realizację kursów. Należą do nich:
    - Kurs języka angielskiego doskonalący efektywność komunikacji językowej w procesie nauczania akademickiego w Studium Języków Obcych Politechniki Wrocławskiej, 2008 r.
    - Szkolenie „Supervising Research Master and PhD Students" dla nauczycieli akademickich pracujących ze studentami obcokrajowcami. Szkolenie prowadzone było w języku angielskim, Uniwersytet Wrocławski, 2008 r.
    - Szkolenie „Working in the Multicultural Classroom" dla nauczycieli akademickich pracujących ze studentami obcokrajowcami. Szkolenie prowadzone było w języku angielskim, Uniwersytet Wrocławski, 2008 r.
    - Uzyskanie przygotowania pedagogicznego do wykonywania zawodu nauczyciela w ramach zrealizowanego dwusemestralnego studium pedagogicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego, rok akademicki 2002/2003.

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

Od rozpoczęcia studiów doktoranckich w Politechnice Wrocławskiej regularnie angażowałam się w obsługę studentów zagranicznych przyjeżdzających na Uczelnię w ramach programu Erasmus. Uczestniczyłam w inicjatywach mających na celu umiędzynarodowienie uczelni i poszerzenie współpracy międzynarodowej na Wydziale oraz w organizacji i obsłudze wizyt przedstawicieli uczelni zagranicznych wizytujących Wydział.

Moja praca na rzecz Wydziału obejmowała również aktualizowanie kart przedmiotów, które prowadziłam na kierunkach Inżynieria Środowiska i Ochrona Środowiska, oraz regularne uczestniczenie w semestralnych zapisach komputerowych studentów Wydziału na zajęcia dydaktyczne. Byłam zaangażowana w przygotowanie specyfikacji do zakupu anglojęzycznej literatury naukowej w tematyce poświęconej oczyszczaniu wód i ścieków na potrzeby Biblioteki Wydziałowej oraz uczestniczyłam w pracach poświęconych planowaniu przedsięwzięć inwestycyjnych dotyczących rozbudowy i modernizacji infrastruktury i bazy laboratoryjnej w Laboratorium Fizykochemii Środowiska Wydziału.

W 2017 roku zostałam powołana przez Radę Wydziału Inżynierii Środowiska na opiekuna Szkoły Letniej „WUST Summer School" zorganizowanej dla studentów Uczelni Partnerskich z Indii i Francji na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, w okresie 19.06–28.07.2017. Koordynowałam realizację Szkoły Letniej na Wydziale w kooperacji z Działem Współpracy Międzynarodowej Politechniki Wrocławskiej. Byłam odpowiedzialna za opracowanie programu nauczania, planu zajęć i regulaminu kursów, organizację wycieczek dydaktycznych studentów do wrocławskiego Zakładu Uzdatniania Wody „Mokry Dwór" i wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków „Janówek" oraz prowadzenie zajęć laboratoryjnych z zakresu oczyszczania wód i ścieków.

Biorę czynny udział w pracach komitetów organizacyjnych i naukowych krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych. Współorganizowałam dwie krajowe konferencje dla doktorantów i młodych pracowników nauki, I Konferencję Naukową Doktorantów „Zagadnienia Interdyscyplinarne w Inżynierii Ochrony Środowiska" w 2005 r. i rok później II Ogólnopolską Konferencję Naukową „Interdyscyplinarne Zagadnienia w Inżynierii Ochrony Środowiska". Od 2012 roku wielokrotnie byłam członkiem komitetów organizacyjnych i naukowych konferencji międzynarodowych (pkt 2.8, zał. 4), z których zdecydowana większość była zorganizowana przez stowarzyszenie International Water Association (IWA). Moje zaangażowanie w komitetach konferencji IWA wynika z faktu, iż jestem wieloletnim członkiem stowarzyszenia (od 2007 r.) i aktywnie wspieram działania na rzecz rozwoju programu IWA dla Młodych Naukowców w regionie państw Europy Środkowowschodniej.

6.3. Osiągnięcia w zakresie popularyzacji nauki

W ramach działań na rzecz popularyzacji nauki opublikowałam blog naukowy pt. „Separation of Uranium from Mine Tailings Water Using a Recyclable Bioactive Polymer" poświęcony problematyce zanieczyszczenia wód kopalnianych uranem. Blog został opublikowany 12.01.2021 r. na oficjalnej stronie internetowej Geological Survey of Finland w sekcji *Current/Blog post*.

W celu upowszechnienia wiedzy o realizowanym międzynarodowym projekcie o akronimie Morecovery (projekt nr 1, pkt 2.9.2, zał. 4,) i popularyzacji jego osiągnięć przygotowałam notę informacyjną „Project Targets Rare Earth Element Recovery", która została opublikowana w popularnonaukowym magazynie *The Source* stowarzyszenia IWA w numerze z października 2019 r. W kolejnym roku opublikowałam blog pt. „From Laboratory to Market – Experiences from the Ongoing Morecovery Project" podsumowujący dwuletnie doświadczenia z realizacji projektu. Blog ukazał się 01.12.2020 r. na stronie internetowej Geological Survey of Finland w sekcji *Current/Blog post*. Udzieliłam również wywiadu EIT Raw Materials, w którym popularyzowałam osiągnięcia naukowe partnerów projektu. Treść rozmowy ukazała. 09.12.2020 r. się na ich oficjalnej stronie internetowej w sekcji *News*.

We wcześniejszych latach czynnie uczestniczyłam w Dolnośląskich Festiwalach Nauki (DFN) organizowanych w Politechnice Wrocławskiej: uczestniczyłam w przygotowaniach imprezy pod hasłem „Nowoczesne technologie szansą dla ochrony środowiska" podczas VIII DFN (2005 r.) oraz „Technologie w inżynierii środowiska szansą dla przyszłych pokoleń" i „Laboratorium polem bitwy o czyste środowisko" podczas XI DFN (2006 r.). Zajmowałam się przygotowaniem materiałów do pokazów edukacyjnych, przeprowadzałam pokazy

laboratoryjne z zakresu chemii wody i oczyszczania wód oraz współorganizowałam wycieczkę edukacyjną młodzieży do wrocławskiego Zakładu Uzdatniania Wody „Mokry Dwór".

Aktywnie włączyłam się również w działania zachęcające licealistów do podjęcia studiów na Wydziale Inżynierii Środowiska. W latach 2003–2006 brałam czynny udział w promocji oferty edukacyjnej Wydziału na Dolnośląskich Prezentacjach Edukacyjnych TARED. Uczestniczyłam również w promocji kształcenia na Wydziale podczas Dni Otwartych Wydziału Inżynierii Środowiska. Przeprowadzałam interaktywne pokazy edukacyjne i eksperymenty laboratoryjne związane z tematyką oczyszczania wód, w których młodzież mogła aktywnie uczestniczyć. Brałam także udział w przygotowywaniu materiałów promocyjnych Wydziału. Moja działalność została wyróżniona przez Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska dyplomem za zaangażowanie i czynny udział w promocji Wydziału.

7. INNE INFORMACJE DOTYCZĄCE KARIERY ZAWODOWEJ

7.1. Nagrody i stypendia

Wielokrotnie byłam nagradzana za osiągnięcia naukowe i wysoki poziom prowadzonych badań, dorobek publikacyjny oraz działania na rzecz popularyzacji nauki. Byłam laureatką prestiżowych stypendiów i zostałam uhonorowana nagrodami, takimi jak:

- Nagroda „Reward for Exemplary Action" przyznana przez Geological Survey of Finland za profesjonalizm i wysoki poziom prowadzonych badań naukowych, 2021.
- Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej za działalność naukową i publikacyjną przyznane w 2010, 2012, 2014, 2016, 2017 oraz 2018 r.
- Stypendia wyjazdowe Erasmus+ „Mobility of Staff in Higher Education" – dwa stypendia na realizację zajęć dydaktycznych na zagranicznej uczelni Savonia University of Applied Sciences, Finlandia, 2018 r.
- Nagroda stowarzyszenia International Water Association za wyróżniający wkład w rozwój programu dla Młodych Naukowców (ang. Young Water Professionals – YWP) w regionie państw Europy Środkowowschodniej, 2018 r.
- Stypendium naukowe dla Wybitnych Młodych Naukowców Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego – 3-letnie stypendium w latach 2013–2016.
- Stypendium dla postdoc-ów z Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Młoda kadra 2015 plus" przyznane przez Politechnikę Wrocławską – roczne stypendium w 2015 r.
- Stypendium wyjazdowe Erasmus Mundus INTACT – dwumiesięczne stypendium na pobyt naukowy w University of Malaya, Malezja, 2014 r.
- Stypendium naukowe doktoranckie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, II–IV rok studiów doktoranckich, w latach 2004–2007.
- Stypendium naukowe doktoranckie Rektora Politechniki Wrocławskiej, III i IV rok studiów doktoranckich, w latach 2005–2007.
- Wyróżnienie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej za zaangażowanie i czynny udział w promocji Wydziału, 2006 r.

7.2. Kursy i szkolenia

Wzbogacam swoją wiedzę i doskonalę warsztat naukowy, biorąc udział w wielu certyfikowanych kursach dokształcających i szkoleniach. Należą do nich m.in.:

- Kurs „Nanofiltration and Reverse Osmosis in Water Treatment", Delft University of Technology, 7-tygodniowy kurs online, 09–10.2021 r.
- Szkolenie „Radiation Safety", Geological Survey of Finland, 01.09.2021, Kuopio, Finlandia.
- Szkolenie „Basics to Project Management", Hause, Finlandia, szkolenie online, 11.02 i 18.02.2021 r.
- Kurs „A Circular Economy of Metals: Towards a Sustainable Societal Metabolism", Leiden University; 6-tygodniowy kurs online, 12.2020-01.2021 r.
- Kurs „Circular Economy – Sustainable Materials Management", Lund University, EIT Raw Materials, VITO, Geological Survey of Denmark and Greenland, National Technical University of Athens, Ghent University, Delft University of Technology, 5-tygodniowy kurs online, 05–06.2020 r.
- Kurs „Hydrometallurgy in Raw Materials Utilization – Introduction to Hydrometallurgy", Norwegian University of Science and Technology, kurs online 08–09.2020 r. (34 godziny).
- Kurs „Hydrometallurgy in Raw Materials Utilization - Advanced Course in Hydrometallurgy", Norwegian University of Science and Technology, kurs online 11.2020 r. (12 godzin).
- Szkolenie „X-ray Fluorescence Analyser in REE Analytics", Geological Survey of Finland, 27.03.2019 r., Kuopio, Finlandia.
- Szkolenie „Risk Assessment in Innovation Projects (KAVAs)", EIT Raw Materials Academy, 27–29.11.2019 r., Berlin, Niemcy.
- Kurs „Statistica – Kurs podstawowy", StatSoft Polska, 29.02–1.03.2016 r., Kraków, Polska.
- Kurs „Wysokosprawna chromatografia cieczowa", Wydział Chemiczny Politechniki Gdańskiej, 22–26.06.2009 r., Gdańsk, Polska.

MSzlachta

……..……..……

(podpis wnioskodawcy)

PODPIS ZAUFANY
MAŁGORZATA
SZLACHTA
07.09.2022 18:15:54 [GMT+2]
Dokument podpisany elektronicznie podpisem zaufanym