

# AUTOREFERAT

dr inż. Paweł Lochyński  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu  
Instytut Inżynierii Środowiska  
pl. Grunwaldzki 24  
50-363 Wrocław

## Spis treści

1. Dane personalne .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej .....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych .....	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z 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).....	4
5. Pozostałe osiągnięcia badawcze .....	24
6. Udział w projektach badawczych i współpraca z gospodarką .....	29
7. Staże naukowe i współpraca z zagranicznymi ośrodkami badawczymi .....	32
8. Działalność dydaktyczna i organizacyjna .....	33
9. Nagrody i wyróżnienia .....	35
10. Podsumowanie dorobku.....	36

## 1. Dane personalne

Imię i nazwisko: **Paweł Lochyński**

Miejsce pracy: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska,  
pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2007.06.27 **magister inżynier**, kierunek: technologia chemiczna,  
specjalność: zarządzanie i systemy jakości w przemyśle chemicznym,  
Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny  
Tytuł pracy: „*Studium możliwości wytwarzania wersenianu sodowego metodą Münza*”  
Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Hoffmann

2013.01.30 **doktor nauk technicznych**, dyscyplina: technologia chemiczna,  
specjalność: elektrochemia techniczna i korozja,  
Politechnika Wroclawska, Wydział Chemiczny  
Tytuł pracy: „*Elektropolerowanie stali austenitycznej typu 304*”  
Promotor: prof. dr hab. inż. Bogdan Szczygieł

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

2012.12.01 **asystent**, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,  
– 2013.12.31 Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji,  
Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Infrastruktury i Techniki Sanitarnej

2014.01.01 **adiunkt**, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,  
– obecnie Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji,  
Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Infrastruktury i Techniki Sanitarnej

#### 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z 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)

##### Określenie osiągnięcia

Zgodnie z 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.) przedkładam osiągnięcie naukowe, którym jest cykl publikacji pt.:

##### „Ograniczenie powstawania zanieczyszczeń w procesie anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych”

Osiągnięcie jest udokumentowane **cyklem 6 indeksowanych w Web of Science powiązanych tematycznie publikacji, wydanych w latach 2018-2021 po uzyskaniu przez wnioskodawcę stopnia naukowego doktora**. W 5 pracach zgłoszonych do cyklu publikacji wnioskodawca jest pierwszym autorem oraz autorem korespondencyjnym. Wkład wnioskodawcy w opracowanie tych publikacji obejmował opracowanie hipotez, koncepcji oraz metodyki badawczej, wykonanie części badań, analizę i dyskusję wyników, jak również przygotowanie manuskryptów. W jednej publikacji wnioskodawca jest drugim autorem. Oświadczenia współautorów prac, dotyczące ich indywidualnego wkładu w powstanie publikacji zamieszczone są w załącznikach do wniosku.

Lp. <sup>1</sup>	Publikacje	pkt <sup>2</sup>	pkt <sup>3</sup>	IF <sup>4</sup>	IF <sup>5</sup>
H1	<b>Lochyński P.*</b> , Domańska M., & Kasprzyk K. (2019), Korozja sitopiaskownika wykonanego ze stali chromowo-niklowej/ Corrosion of the chromium-nickel steel sand remover. <i>Ochrona Przed Korozją</i> , 62(7), 225–235. <a href="http://doi.org/10.15199/40.2019.7.2">http://doi.org/10.15199/40.2019.7.2</a>	20	40	-	-
H2	Łyczkowska-Widłak E.*, <b>Lochyński P.</b> , & Nawrat G. (2020), Electrochemical Polishing of Austenitic Stainless Steels, <i>Materials</i> , 13(11), 1-25, Numer artykułu:2557. <a href="http://doi.org/10.3390/ma13112557">http://doi.org/10.3390/ma13112557</a>	140	140	3,623	3,920
H3	<b>Lochyński P.*</b> , Charazińska S., Łyczkowska-Widłak E., & Sikora A. (2019), Electropolishing of stainless steel in laboratory and industrial scale. <i>Metals</i> , 9(8), 1–15. <a href="http://doi.org/10.3390/met9080854">http://doi.org/10.3390/met9080854</a>	70	70	2,117	2,244
H4	<b>Lochyński P.*</b> , Charazińska S., Karczewski M., & Łyczkowska-Widłak E. (2021), A multi-factorial mathematical model for the selection of electropolishing parameters with a view to reducing the environmental impact. <i>Scientific Reports</i> (11), 1–13. <a href="http://doi.org/10.1038/s41598-021-88731-5">http://doi.org/10.1038/s41598-021-88731-5</a>	140	140	4,379	5,133
H5	<b>Lochyński P.*</b> , Charazińska S., Łyczkowska-Widłak E., Sikora A., & Karczewski M. (2018), Electrochemical Reduction of Industrial Baths Used for Electropolishing of Stainless Steel. <i>Advances in Materials Science and Engineering</i> , 2018, 1–12. <a href="http://doi.org/10.1155/2018/8197202">http://doi.org/10.1155/2018/8197202</a>	20	40	1,399	1,554
H6	<b>Lochyński P.*</b> , Wiercik P., Charazińska S., & Ostrowski M. (2021), Research on neutralization of wastewater from pickling and electropolishing processes, <i>Archives of Environmental Protection</i> , 47(4), 18-29. <a href="http://doi.org/10.24425/aep.2021.139499">http://doi.org/10.24425/aep.2021.139499</a>	100	100	1,489	1,952
<b>łącznie osiągnięcia:</b>		<b>490</b>	<b>530</b>	<b>13,007</b>	<b>14,803</b>

<sup>1</sup> numeracja oryginalnych prac twórczych odpowiada kolejności ich omawiania; <sup>2</sup> punkty za publikację (wg list MNiSW oraz MEiN) zgodne z rokiem wydania; <sup>3</sup> punkty za publikację według punktacji czasopism obowiązującej na dzień 10.12.2021; <sup>4</sup> IF publikacji zgodny z rokiem wydania, w przypadku publikacji z roku 2021 podano ostatni dostępny IF z roku 2020; <sup>5</sup> IF 5-letni;

\* autor korespondencyjny

## Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

### Wstęp

#### Potrzeba monitorowania zanieczyszczeń w kąpielach procesowych

Elektrochemiczna obróbka metali jest procesem generującym zanieczyszczenia niebezpieczne dla środowiska. Istotnym zagadnieniem, często pomijanym przez badaczy, jest nie tylko osiągnięcie jak najlepszej jakości elektropolerowanej powierzchni, ale także minimalizacja ładunków jonów metali w powstających po procesie ściekach. Przy odpowiednim doborze parametrów proces anodowego roztwarzania metali i stopów umożliwia końcową obróbkę powierzchni i zapewnia równomierne wygładzenie powierzchni w skali makroskopowej (usunięcie makronierówności powyżej 1  $\mu\text{m}$ ), jak również w skali mikroskopowej (usunięcie mikronierówności od 0,01 do 1  $\mu\text{m}$ ). Jacquet w latach 1935-1936 jako pierwszy przedstawił elektrochemiczny opis procesu elektropolerowania (Jacquet 1936). Jego prace dotyczyły anodowego roztwarzania miedzi w kwasie ortofosforowym(V). Od tego czasu na przestrzeni lat liczna grupa naukowców z całego świata zajmuje się określeniem parametrów i warunków prowadzenia procesu oraz doбором składu kąpeli dla różnych metali i ich stopów, takich jak srebro, tytan, kobalt, niob, pallad, aluminium, cynk, cyrkon, stal chromowa oraz chromowo-niklowa.

Na przestrzeni ostatnich 50 lat proces elektropolerowania austenitycznych stali stopowych nabrał szczególnego znaczenia przemysłowego, co generuje potrzebę badań w zakresie intensyfikacji oraz ograniczenia kosztów tego energochłonnego procesu. Badania są też uzasadnione z uwagi na rozwój wiedzy w odniesieniu m.in. do mechanizmu tego procesu. Ponadto zależność pomiędzy zanieczyszczeniem kąpeli procesowej a efektem procesu elektropolerowania nie została jeszcze dokładnie opisana. Istnieją doniesienia literaturowe nawiązujące do pogorszającego się efektu wygładzenia powierzchni stali chromowo-niklowych w miarę postępowania zanieczyszczenia kąpeli, jednak nie stanowią one opisu ilościowego (Hryniewicz 2004, Buhlert 2009, Haïdopoulos M. et al. 2006).

Elektropolerowane stale zawierające w swoim składzie 18-20% chromu i 8-10,5% niklu są najpowszechniej użytkowane z grupy chromowo-niklowych w praktyce przemysłowej. Znajdują zastosowanie w wielu branżach, m.in. spożywczej, chemicznej oraz farmaceutycznej (np. filtry do wody, reaktory farmaceutyczne czy zbiorniki na mleko). W branży techniki sanitarnej proces elektropolerowania wykorzystywany jest do elektrochemicznej obróbki wykonanych ze stali chromowo-niklowych elementów tłoczni ścieków z separacją ciał stałych. Ze względu na rodzaj zastosowań efekt elektropolerowania musi zapewnić niską chropowatość powierzchni (ograniczenie adhezji oraz rozwoju drobnoustrojów) oraz wysoką odporność korozyjną (zabezpieczenie przed przedostawaniem się produktów korozji stali do żywności, produktów i ścieków), a ze względu na walory dekoracyjne wysoki i równomierny połysk warstwy wierzchniej. Choć podejmowane są badania dotyczące wykorzystania obróbki plazmowej do polerowania powierzchni stali 304 (Deng 2019), to ze względu na koszty i ograniczenia techniczne najprawdopodobniej w najbliższym czasie nie znajdzie ona zastosowania przy obróbce urządzeń wielkogabarytowych o skomplikowanym kształcie.

Przemysł usług elektropolerowania (elektrolitycznego polerowania) stali nierdzewnych oczekuje odpowiedzi na pytanie: przy jakim zanieczyszczeniu kąpeli jonami żelaza, chromu, niklu

proces staje się ekonomicznie stopniowo coraz mniej opłacalny i jaki ma to wpływ na jakość powierzchni stali po elektropolerowaniu? Ten interdyscyplinarny problem nadal stanowi wyzwanie naukowe i ekonomiczne. Powstała potrzeba opracowania rozwiązań, które pozwoliłyby na określenie granicznego zanieczyszczenia kąpielii stosowanych w przemysłowym procesie elektropolerowania stali chromowo-niklowych oraz wskazania parametrów procesu w ujęciu możliwie jak najmniejszego generowania zanieczyszczeń ścieków. W literaturze naukowej brakowało doniesień uwzględniających poziom zanieczyszczenia stosowanych w przemyśle elektrolitów, a przy wyborze zalecanych parametrów procesu – uwzględniających aspekt wpływu na środowisko, czyli generowania zanieczyszczeń oraz zużycia energii elektrycznej. Długoterminowa, a czasem wieloletnia eksploatacja kąpielii procesowych do elektropolerowania w warunkach przemysłowych, potrzeba monitorowania zanieczyszczeń, wzrost cen energii elektrycznej oraz potrzeba ograniczenia negatywnego wpływu procesu anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych na środowisko stały się dla wnioskodawcy inspiracją do rozpoczęcia badań.

Wysokie ceny energii elektrycznej oraz stopniowe zaostrzenie wymagań dot. emisji do środowiska skłaniają ku poszukiwaniu możliwości dokładnego monitorowania zanieczyszczenia kąpielii procesowych oraz wykorzystania prezentowanego w cyklu publikacji modelu matematycznego umożliwiającego wyznaczenie granicznego zanieczyszczenia kąpielii. Opracowanie takiego modelu stanowi element nowości, a zarazem dotyczy ważnych zagadnień praktycznych, ekonomicznych i naukowych w ramach dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, energetyka i górnictwo.

### **Główne cele naukowe, których wyniki zawarte zostały w ramach cyklu publikacji**

Cel pracy:

Ograniczenie negatywnego wpływu procesu anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych na środowisko i opracowanie modelu matematycznego monitorowania zanieczyszczeń kąpielii do elektropolerowania w celu redukcji zanieczyszczeń u źródła ich powstawania.

Cele szczegółowe:

- ocena zależności między poziomem zanieczyszczenia kąpielii procesowej a skutecznością procesu anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych,
- weryfikacja możliwości wykorzystania elektrochemicznej redukcji do oczyszczania kąpielii przemysłowych do elektropolerowania,
- wykorzystanie opracowanego modelu matematycznego do doboru parametrów procesu elektropolerowania i wyznaczenia zakresu zanieczyszczenia kąpielii procesowych umożliwiających uzyskanie oczekiwanych właściwości użytkowych oraz dekoracyjnych powierzchni stali chromowo-niklowych,
- uzyskanie oczekiwanego efektu procesu przy możliwie niskim ładunku zanieczyszczeń oraz niskim zużyciu energii elektrycznej wykorzystywanej do procesów elektrodowych,
- ocena wpływu dodatków organicznych stosowanych w procesie elektropolerowania na proces neutralizacji ścieków z procesów trawienia i elektropolerowania stali chromowo-niklowych,
- określenie zmian składu pierwiastkowego osadów pogalwanicznych powstałych po neutralizacji ścieków z trawienia i elektropolerowania stali chromowo-niklowych.

### **Hipoteza badawcza sformułowana na etapie projektowania procedury badawczej**

Opracowanie modelu matematycznego monitorowania zanieczyszczeń kąpieli procesowych do elektropolerowania stali chromowo-niklowych może umożliwić redukcję zanieczyszczeń u źródła ich powstawania, kontrolę procesu anodowego roztwarzania oraz ograniczenie zużycia energii elektrycznej wykorzystywanej do procesów elektrodowych.

### **Omówienie osiągniętych wyników dotyczących ograniczenia powstawania zanieczyszczeń w procesie anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych**

Stale chromowo-niklowe znajdują szczególne zastosowanie w inżynierii środowiska do budowy urządzeń technologicznych instalowanych na oczyszczalniach ścieków, przepompowniach i w zakładach uzdatniania wody. Nieprawidłowa obróbka powierzchni, błędy konstrukcyjne oraz narażenie na oddziaływanie agresywnego środowiska siarkowodoru mogą doprowadzić do szybko postępujących uszkodzeń instalacji wykonanych ze stali nierdzewnych przedstawionych w publikacji [H1].

Jednym ze sposobów obróbki powierzchniowej metali jest elektropolerowanie (EP). Sam proces anodowego roztwarzania metali i stopów, choć przyczynia się do poprawy właściwości użytkowych i dekoracyjnych materiału, to wielokrotnie generuje szkodliwe dla środowiska zanieczyszczenia, co często bywa aspektem marginalizowanym przez badaczy. Badania naukowe i przemysłowe dotyczące elektropolerowania stali nierdzewnych, prowadzone w różnych jednostkach, koncentrują się na poprawie składu kąpieli, opracowaniu korzystniejszych parametrów procesu oraz intensyfikacji procesu (Lai et al. 2003, Kao et al. 2003, Hryniewicz et al. 2008, Lochyński et al. 2017, Nazneen et al. 2012, Han i Fang 2020a). Modyfikacja składu dla kąpieli, których głównymi składnikami są kwasy: ortofosforowy(V) i siarkowy(VI), wiąże się z koniecznością przeprowadzenia badań związków powierzchniowo czynnych. Ich celem jest poprawa wygładzenia powierzchni podczas procesu anodowego roztwarzania. Korzystne rezultaty można uzyskać, jeśli związki te zostaną zaabsorbowane w zagłębieniach występujących na powierzchni stali (Hocheng et al. 2001). Zastosowane dodatki powinny również przedłużyć okres eksploatacji kąpieli, czyli poprawiać ekonomiczny aspekt procesu. Obecnie najczęściej stosowanym dodatkiem poprawiającym połysk i wygładzenie powierzchni w procesie elektropolerowania, jest gliceryna. Znajduje ona zastosowanie w elektrochemicznej obróbce różnych metali i stopów: tytanu, kobaltu, niobu, miedzi, palladu, aluminium, cyrkonu, chromu, stali nierdzewnych (Baldin et al. 1985, Andreshak et al. 1991, Shieh et al. 2006). Pojawiają się również próby dwuetapowego elektropolerowania stali chromowo-niklowych w elektrolicie zawierającym wyłącznie kwas ortofosforowy(V), glicerynę i wodę (Han i Fang 2020b), ale nie należy oczekiwać, że rozwiązanie to znajdzie przemysłowe zastosowanie. Jest to nawiązanie do pierwszych badań nad procesem anodowego roztwarzania miedzi w kwasie ortofosforowym(V) (Jacquet 1936).

W wyniku anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych do roztworu przechodzą i stopniowo coraz bardziej go zanieczyszczają jony metali, głównie żelaza, chromu i niklu. Jest to nieunikniony, jak i początkowy etap, w którym powstają zanieczyszczenia. Ścieki technologiczne pochodzące z kąpieli technologicznych i płukania poprocesowego muszą być poddane neutralizacji i oczyszczaniu zanim będą mogły być odprowadzone do komunalnych urządzeń kanalizacyjnych. Zastosowanie dodatków organicznych w składzie kąpieli procesowych do elektropolerowania miało się przyczynić do ograniczenia powstawania zanieczyszczeń u źródła ich powstawania. Poszukiwano

rozwiązania, które zapewniłoby wygładzenie powierzchni stali chromowo-niklowych przy jednoczesnym możliwie małym ubytku masy materiału poddanego obróbce, co bezpośrednio ma wpływ na ograniczenie powstawania zanieczyszczeń u źródła.

Znajomość mechanizmu elektropolerowania oraz odpowiedniego doboru elektrolitu i parametrów procesu daje solidne podstawy do wykorzystania tej techniki jako jednego z etapów końcowej obróbki materiałów. Na podstawie doniesień literaturowych (Datta i Landolt 2000, Lin i Hu 2008, Nawrat 2010) oraz dotychczasowych badań własnych autorów publikacji [H2] w pracy przedstawiono najbardziej prawdopodobny mechanizm elektropolerowania. Duża liczba różnych hipotez wygładzania powierzchni podczas elektropolerowania wynika ze złożoności procesu. Oprócz warstwy dyfuzyjnej, znanej również jako warstwa lepka, która pojawia się w pobliżu anody, warstwa tlenkowa zwykle powstaje również bezpośrednio na powierzchni anody. Częstym zjawiskiem wynikającym z nietypowego jednoczesnego tworzenia się obu tych warstw jest proces dyfuzji cząsteczek wody i migracji anionów w kierunku powierzchni anody. Substancje te są niezbędne w procesie elektrochemicznego tworzenia i chemicznego roztwarzania tlenków tworzących warstwę pasywną. Ze względu na konkurencyjność obu tych procesów nawet niewielkie różnice w szybkości migracji i dyfuzji akceptorów procesu roztwarzania mogą prowadzić do znacznych różnic w szybkości roztwarzania poszczególnych elementów struktury powierzchni anody. Związki organiczne o właściwościach kompleksujących stosuje się w procesie elektropolerowania w celu poprawy połysku i wygładzenia powierzchni. Zwiększenie lepkości i gęstości roztworu ma wpływ na grubość warstwy dyfuzyjnej i oddala potencjał anodowy od wartości termodynamicznej [H2]. Ze względu na elektrolity stosowane w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej zastosowanie kąpeli procesowej, której głównymi składnikami są stężone kwasy  $H_3PO_4$  i  $H_2SO_4$ , jest najbardziej uzasadnione.

Parametrem technologicznym, który odgrywa determinującą rolę w szybkości powstawania zanieczyszczeń u źródła i ma duży wpływ na ostateczny efekt elektropolerowania, jest gęstość prądu. W literaturze można znaleźć wiele analiz dotyczących procesu elektropolerowania, jednak w większości tych badań stosowano duże gęstości prądu ( $> 10 \text{ A/dm}^2$ ) (Haïdopoulos et al. 2006, Łyczkowska-Widłak et al. 2019), a nawet tak duże gęstości prądu jak  $50\text{-}1000 \text{ A/dm}^2$  (Rokosz et al. 2015). Niestety, w warunkach przemysłowych tak duża gęstość prądu jest niemożliwa do uzyskania z uwagi na dużą powierzchnię elementów poddawanych anodowemu roztwarzaniu. Niewiele eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzono dla małych gęstości prądu ( $<10 \text{ A/dm}^2$ ). Awad przedstawił wyniki elektropolerowania stali 304 przy gęstości prądu w zakresie od 1,25 do 25,5  $\text{A/dm}^2$  (Awad et al. 2012). Pozytywne efekty połysku powierzchni  $G=1750$ , przy ubytku masy wynoszącym  $27 \text{ mg/cm}^2$ , uzyskano przy gęstości prądu  $3,75 \text{ A/dm}^2$ . Istnieją również prace dostosowujące do stosowania głęboko eutektycznych rozpuszczalników w procesie elektropolerowania stali nierdzewnych typu 304 i 316, aczkolwiek aplikacje te nie są jeszcze wykorzystywane w praktyce przemysłowej (Winiarski et al. 2019, 2021).

Przy planowaniu procesów technologicznych należy brać pod uwagę nie tylko aspekty finansowe, efekty użytkowe i dekoracyjne, ale również aspekty ochrony środowiska. W związku z tym w celu intensyfikacji procesu należy poszukiwać rozwiązań, które zapewnią zadowalające wygładzenie powierzchni materiału poddanego obróbce, a jednocześnie zminimalizują negatywny wpływ procesu na środowisko. W omawianym przypadku ograniczenie wpływu na środowisko wymaga zmniejszenia ubytku masy materiału podczas procesu anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych oraz ograniczenia ilości jonów metali ciężkich Cr(III) i Ni(II) przenikających do kąpeli procesowych i ścieków. Należy również sprawdzić, jakie efekty uzyska się w skali laboratoryjnej i w skali technicznej, co było przedmiotem kolejnych badań. Stosowanym elektrolitem



**[H3]** były kąpiele fosforanowo-siarczanowe z dodatkiem trietanolaminy eksploatowane w warunkach przemysłowych oraz kąpiel o podobnym składzie przygotowana z czystych odczynników laboratoryjnych. Badania przeprowadzono na stali nierdzewnej AISI 304. Próbkę została wycięta z walcowanych na zimno blach o grubości 1,5 mm, a powierzchnia ekspozycji tych próbek wynosiła 0,4 dm<sup>2</sup>. Elektropolerowanie w warunkach przemysłowych przeprowadzono na próbkach o długości 1250 mm i szerokości ok. 132 mm, o powierzchni ok. 33,3 dm<sup>2</sup>, czyli powierzchnia ekspozycji próbek w skali technicznej była ponad 80-krotnie większa niż próbek laboratoryjnych. Zastosowanie małych próbek laboratoryjnych w warunkach przemysłowych nie dałoby wiarygodnych wyników ze względu na konieczność zastosowania bardzo niskiego natężenia prądu, które nie jest stosowane w przemyśle. Otrzymane wyniki badań **[H3]** w pewnej części umożliwiają predykcję wyników w skali technicznej w oparciu o badania laboratoryjne. Analizy prowadzone w laboratorium mogą więc dostarczyć wskazówek dot. warunków prowadzenia procesów w skali technicznej, jak również sugestii związanych ze spodziewanymi rezultatami. Kolejnym ważnym aspektem było oszacowanie ubytku masy, a więc i zanieczyszczeń pojawiających się w trakcie procesu. Główne wnioski porównania efektu procesu elektropolerowania **[H3]** w skali laboratoryjnej i przemysłowej zestawiono poniżej.

- Znajomość ubytku masy próbek w wyniku elektropolerowania w warunkach laboratoryjnych pozwala na określenie szacunkowych ubytków masy pierwiastków w warunkach przemysłowych z dokładnością nawet poniżej 5%. Daje to możliwość oszacowania stopnia zanieczyszczenia kąpeli przemysłowej. Jest to również podstawa do obliczenia przybliżonego ładunku zanieczyszczeń, które powstają w trakcie procesu w wyniku roztwarzania anodowego elektropolerowanych materiałów.
- Wyniki elektropolerowania w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem kąpeli przemysłowej pozwalają na wstępny dobór parametrów umożliwiających uzyskanie zadowalających wyników procesu prowadzonego w skali technicznej.
- Zastosowanie obrazowania metalograficznego z kontrastem Nomarskiego pozwala na wizualną ocenę defektów powstających na powierzchniach elektropolerowanych, nawet tych, których charakter jest trudny do opisu parametrami połysku i chropowatości.
- Czas anodowego roztwarzania analizowanych próbek tylko w niewielkim stopniu wpłynął na skład warstwy pasywnej. Pasywacja w roztworze kwasu azotowego pozwala na zmniejszenie warstwy zanieczyszczeń na powierzchni próbki.
- Poprawę właściwości morfologicznych powierzchni próbki potwierdzono zarówno za pomocą mikroskopii optycznej, jak i mikroskopii sił atomowych. Dane uzyskane za pomocą tych technik są zbieżne. Mając powyższe na uwadze, można optymalizować parametry procesu elektropolerowania w celu uzyskania oczekiwanych parametrów morfologicznych powierzchni w odniesieniu do zastosowania konkretnego produktu.

Na podstawie kilkuletniej współpracy z przemysłem elektrochemicznej obróbki stali nierdzewnej oraz po analizie literatury naukowej i patentowej, autor osiągnięcia określił, że monitorowanie zanieczyszczenia kąpeli procesowych, stopniowe zanieczyszczenie elektrolitów jonami metali oraz wpływ tych zanieczyszczeń na jakość elektropolerowanych powierzchni stali chromowo-niklowych nadal stanowi istotne wyzwanie naukowe i techniczne. Autor pracy

opracował koncepcję planu badań oraz projekt pt. „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)” LIDER/22/0187/L-7/15/NCBR/2016, który uzyskał finansowanie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER. Projekt obejmował zarówno wykonanie badań w skali laboratoryjnej, jak i długoterminowych w skali technicznej, został pomyślnie zrealizowany oraz rozliczony w latach 2017-2020. Autor pracy był pomysłodawcą i kierownikiem projektu badawczego odpowiedzialnym za opracowanie koncepcji badań i metodyki badawczej, współpracę z przemysłem i wykonanie badań w skali technicznej, analizę i interpretację uzyskanych wyników badań laboratoryjnych i przemysłowych we współpracy z zespołem badawczym, współpracę w zespole badawczym (motywacja i wymiana doświadczeń), nadzór nad planową realizacją projektu (wyniki badań, terminy, finanse). Głównym celem projektu było opracowanie nowatorskiego predykcyjnego modelu matematycznego, który w zestawieniu m.in. z cenami energii elektrycznej niezbędnej do procesów elektrodowych umożliwia wyznaczenie granicznego zanieczyszczenia kąpeli procesowej do elektropolerowania. Takie opracowanie odznacza się zarówno wartością naukową, jak i rynkową.

Monitorowanie zanieczyszczenia kąpeli procesowej do elektropolerowania, jak również stopniowa zmiana składu tej kąpeli w wyniku anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych odgrywają istotną rolę w uzyskaniu oczekiwanego efektu wygładzenia powierzchni. Postępujące zanieczyszczenie ma też wpływ na energochłonność procesu, a ze względu na ekonomikę procesu, jak i ochronę środowiska należy podejmować działania ukierunkowane na zmniejszanie zużycia energii elektrycznej. Celem kolejnych badań było [H4] określenie wpływu zanieczyszczenia kąpeli procesowej, czasu procesu, temperatury, gęstości prądu na uzyskiwane efekty. Badania zrealizowane były dla gęstości prądu 4 i 8 A/dm<sup>2</sup> oraz temperatur 35°C, 45°C i 55°C, które odpowiadają wartościom stosowanym w przemyśle. Takie parametry technologiczne są uzasadnione w odniesieniu do elektropolerowania detali wielkogabarytowych w skali technicznej. Oczekiwany efektem anodowego roztwarzania stali była poprawa jakości powierzchni przy zachowaniu minimalnego poziomu ubytku masy i minimalnego zużycia energii elektrycznej. Ocena obejmowała chropowatość powierzchni i połysk, co ma wpływ na właściwości użytkowe i dekoracyjne oraz odporność na korozję wżerową w środowisku zawierającym chlorki, które stanowi jedno z najbardziej agresywnych środowisk dla stali chromowo-niklowych (Lochyński et al. 2014). Otrzymane warstwy wierzchnie po elektropolerowaniu stali chromowo-niklowej poddano ocenie jakościowej [H4]. Zestawiono połysk warstw wierzchnich po anodowym roztwarzaniu stali dla wybranych parametrów procesu. Porównano wyniki uzyskane na początkowym etapie zanieczyszczenia kąpeli procesowych, jak również kąpeli po intensywnej eksploatacji i anodowym roztwarzaniu stali chromowo-niklowych (odpowiadającym zawartości 3% mas. jonów żelaza). Na podstawie badań laboratoryjnych należy stwierdzić, że w warunkach laboratoryjnych w zależności od parametrów prądowych przekroczenie 3-4% mas. jonów żelaza w kąpeli procesowej powoduje znaczące pogorszenie elektropolerowanych warstw wierzchnich. Zestawienie na jednym wykresie zależności ilorazu połysku i ubytku masy w funkcji zwiększającego się zanieczyszczenia kąpeli obrazowało dynamikę zmian efektów samego procesu przy wybranych parametrach gęstości prądu, temperatury i czasu procesu. Badania laboratoryjne wykazały, że istnieją znaczne różnice chropowatości powierzchni po elektropolerowaniu przy zastosowaniu gęstości prądu 4 A/dm<sup>2</sup>; 8 A/dm<sup>2</sup> w zależności od zastosowania lub braku zastosowania dodatku organicznego w składzie kąpeli fosforanowo-siarczanowej. W pracy [H4] zestawiono wyniki badań korozyjnych oraz rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (XPS – z ang. X-ray Photoelectron Spectroscopy). Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że proces elektropolerowania próbek ze stali 304 wpływa na zwiększenie wartości potencjału wżeru oraz poprawę odporności na korozję

w porównaniu z próbkami surowymi. Ponadto część wyników XPS skorelowano z wynikami odporności stali AISI 304 po elektropolerowaniu na korozję wżerową. Przy wysokim zanieczyszczeniu kąpeli procesowej obserwuje się obniżenie w składzie warstwy pasywnej proporcji pomiędzy Cr/Fe, co znajduje też odzwierciedlenie w pewnym obniżeniu odporności korozyjnej.

Kolejnym kierunkiem podjętych badań, związanych redukcją zanieczyszczeń u źródła ich powstawania, było sprawdzenie możliwości oczyszczania kąpeli procesowej do elektropolerowania w wyniku elektrochemicznej redukcji (ER), co zostało opisane w pracy [H5]. W badaniach wykorzystano eksploatowaną przez długi okres czasu kąpiel przemysłową z dodatkiem trietanolaminy, jej poziom zanieczyszczenia był bardzo duży (stężenie jonów Fe:Cr:Ni:Cu 50:15:2,2:1,45 g/dm<sup>3</sup>). Procesowi elektrochemicznej redukcji poddano 2000 cm<sup>3</sup> kąpeli umieszczonej w szklanym naczyniu w łaźni wodnej i stale mieszanej za pomocą mieszadła mechanicznego. Proces prowadzono w następujących warunkach: temperatura 50°C, prędkość obrotowa mieszadła 50 obr./min, gęstość prądu 0,0015 A/cm<sup>2</sup>. Proces ER składał się z 15 cykli po 12 godzin. Łączny czas trwania procesu elektrolizy wynosił 180 godzin. Po zakończeniu każdego cyklu trwającego 720 minut elektrody były płukane w wodzie destylowanej, a katoda była wymieniana na nową.

Porównano wpływ zanieczyszczenia kąpeli do elektropolerowania na takie parametry jak: chropowatość, połysk, redukcja masy i odporność na korozję. Przeprowadzone badania obejmowały redukcję zanieczyszczonej kąpeli przemysłowej za pomocą redukcji katodowej oraz monitorowanie zanieczyszczenia kąpeli za pomocą spektrometrii emisyjnej ICP-OES. Badania potencjodynamiczne w środowisku 0,5M chlorku sodu miały na celu określenie wpływu elektrochemicznej redukcji kąpeli procesowej na odporność na korozję wżerową próbek elektropolerowanych. W kąpeli po redukcji odporność ta była obniżona o ok. 0,1 V<sub>NEK</sub> w porównaniu z próbkami elektropolerowanymi przed redukcją. Testy potencjodynamiczne zostały przeprowadzone w 0,5M roztworze NaCl w celu określenia wpływu redukcji kąpeli na zmianę potencjału rozwoju wżeru (E<sub>pit</sub>) oraz potencjału anodowo-katodowego (E<sub>KA</sub>) próbek po procesie anodowego roztwarzania stali. Obliczenia przeprowadzone dla 24 pomiarów wykazały, że różnice między wynikami E<sub>pit</sub> były znaczące. Przeanalizowano istotność różnic między uzyskanymi wynikami za pomocą metod analizy danych stosowanych w różnych rodzajach oceny danych, m.in. w medycynie, analizie chemicznej czy inżynierii (Sueoka et al. 2015, Aun et al. 2016, Al-Ahmari et al. 2016).

Redukcja elektrochemiczna elektrolitu [H5] prowadzi do poprawy chropowatości i połysku po elektropolerowaniu nawet o około 500 GU (jednostek połysku). Jednocześnie widoczna jest redukcja masy – zmniejsza się ona nawet o 13% w stosunku do procesu prowadzonego w kąpeli przed redukcją, co ma pozytywny wpływ na spowolnienie procesu zanieczyszczania kąpeli i tym samym zmniejsza negatywny wpływ na środowisko. Kolejnym argumentem przemawiającym za redukcją kąpeli przemysłowych jest spowolnienie procesu zanieczyszczania katod podczas procesu elektropolerowania. W skali technicznej mogłoby to rozszerzyć możliwość prowadzenia procesu bez konieczności częstego czyszczenia katod. W analizowanym procesie redukcji w kąpeli technologicznej z zastosowaniem katodowej redukcji skuteczność usuwania miedzi i niklu wyniosła odpowiednio 53% i 47%. Uzyskane wyniki pozwalają na oszacowanie czasu trwania procesu niezbędnego do całkowitego usunięcia z roztworu jonów miedzi (340 h) i jonów niklu (380 h). Jednak realizacja takiego procesu na skalę przemysłową byłaby bardzo czas- i energochłonna. Dla kąpeli bez ER nastąpiło pogorszenie wartości chropowatości po procesie elektropolerowania w porównaniu z próbkami w stanie surowym, natomiast dla kąpeli z ER odnotowano stopniową poprawę wraz z wydłużeniem czasu trwania procesu. Uzyskane wyniki są związane z intensywnym zanieczyszczeniem elektrolitu przed procesem elektrochemicznej redukcji i z jego częściowym

oczyszczeniem. Redukcja masy próbek po elektropolerowaniu wzrastała proporcjonalnie do czasu trwania procesu. Zauważono również, że próbki elektropolerowane w kąpeli po elektrochemicznej redukcji charakteryzowały się mniejszym ubytkiem masy w porównaniu z próbkami elektropolerowanymi w kąpeli bez elektrochemicznej redukcji, dla wszystkich wariantów czasu trwania procesu. Jednocześnie w przypadku kąpeli po ER na katodzie osadzało się znacznie mniej zanieczyszczeń niż w przypadku kąpeli bez ER. Katody stosowane w zredukowanej kąpeli ulegają zanieczyszczeniu po dłuższym czasie, ponieważ zawartość jonów miedzi w kąpeli była mniejsza.

Z uwagi na zalety i wady elektrochemicznej redukcji, jak również możliwości i ograniczenia techniczne w skali przemysłowej oczyszczenia już zanieczyszczonych kąpeli, **ER w skali technicznej byłoby procesem czaso- i energochłonnym. Tym bardziej motywuje to do opracowania modelu matematycznego monitorowania zanieczyszczenia kąpeli procesowych i właściwego doboru parametrów procesu, ponieważ w sytuacji gdy nie możemy wyeliminować zanieczyszczeń, należy poszukiwać rozwiązań do redukcji tych zanieczyszczeń i minimalizacji negatywnego oddziaływania procesu na środowisko.** W artykule (Rakoczy et al. 2011) pt. „Model matematyczny oczyszczalni ścieków” Rakoczy et al. na podstawie charakterystyk widmowych (gęstości widmowe) zaproponował model matematyczny opisujący proces usuwania zawiesiny z funkcjonującej oczyszczalni ścieków. Podobne zagadnienie dot. opisu charakterystyk oczyszczania ścieków przedstawił Musik et al. w artykule „Transfer and weighting functions of a sewage treatment plant based on random input and output signal characteristics” (Musik i Kawecka-Typek 2004). Przedstawieni powyżej autorzy, choć zajmowali się inną tematyką badawczą, dla autora cyklu publikacji stanowili przyczynek świadczący o celowości funkcjonalnego zastosowania modeli matematycznych. Choć Nunez et al. wykorzystywała analizę ANOVA do badania wpływu parametrów procesu na chropowatość elektropolerowanych powierzchni, opracowany modelnie obejmował aspektów zanieczyszczenia kąpeli oraz analizy ekonomicznej (Nunez et al. 2009). Jimenez-Pichardo et al. w przeprowadzonych badaniach nad procesem czyszczenia i dezynfekcji stali chromowo-niklowej, stosowanej w przemyśle mleczarskim, z powodzeniem zastosowała model regresji drugiego rzędu w optymalizacji. Jednak opracowany model nie uwzględniał zmiennych parametrów procesu elektropolerowania (Jimenez-Pichardo 2016).

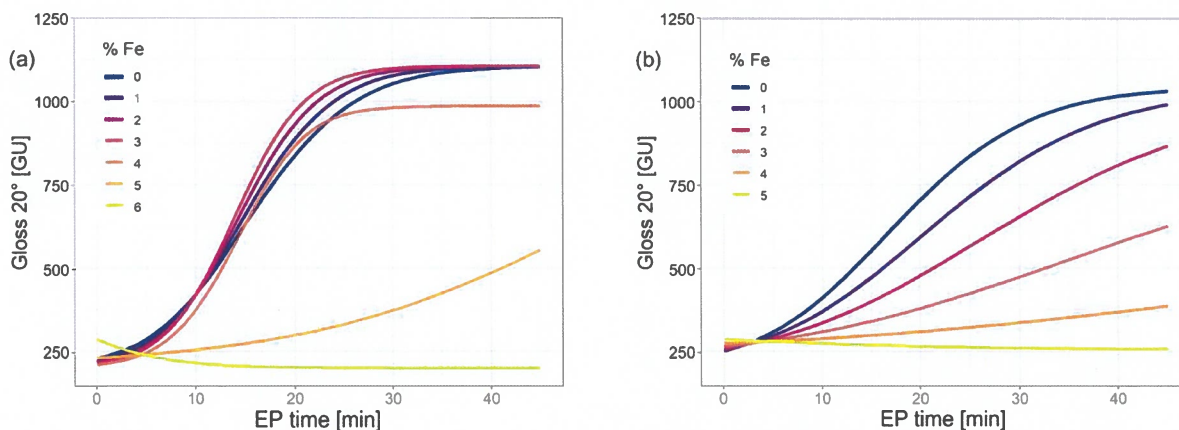
Przeprowadzone próby anodowego roztwarzania stali chromowo-niklowych w warunkach laboratoryjnych w zmiennych warunkach czasu, temperatury i gęstości prądu w zakresie zanieczyszczenia kąpeli procesowej 0-6% Fe pozwoliły na opracowanie wieloczynnikowego modelu matematycznego. **Opracowany model stwarza możliwość wyboru parametrów procesu zalecanych do osiągnięcia pożądanych przez użytkownika efektów. Opracowane rozwiązanie stanowi zbiór równań uwzględniających parametry jakości powierzchni takie jak: połysk i chropowatość, czas trwania procesu i gęstość prądu przekładające się na zużycie energii elektrycznej oraz ubytki masy elektropolerowanych elementów wpływające na szybkość zanieczyszczania kąpeli procesowych i ścieków. Jednym z pionierskich aspektów opracowanego modelu jest uwzględnianie poziomu zanieczyszczenia kąpeli procesowej, co w konsekwencji umożliwia wyznaczenie granicznego zanieczyszczenia elektrolitu.**

Wykorzystując otrzymane wyniki badań [H4] jakości elektropolerowanych powierzchni przy zmieniającym się poziomie zanieczyszczenia kąpeli procesowych, przeprowadzono predykcję pomiarów połysku i chropowatości z wykorzystaniem kilku wariantów analizy regresji. Zmiennymi uwzględnionymi w analizie były: czas procesu, temperatura, gęstość prądu oraz zanieczyszczenie kąpeli. W przypadku analizy chropowatości testowano wszystkie możliwe konfiguracje oddziaływań

między parametrami dla kilku rodzajów modeli, w tym modelu kwadratowego, modeli trzeciego i czwartego rzędu oraz modelu logistycznego. Ze względu na niezauważenie przez autorów pewnych lokalnych anomalii nieodpowiadających specyficie analizowanego procesu oraz w celu wyeliminowania zjawiska nadmiernego dopasowania „overfittingu”, które mogłoby obniżyć skuteczność modelu w przypadku dalszego wykorzystania modelu, analizę chropowatości przeprowadzono z wykorzystaniem modelu liniowego ze składową kwadratową czasu. Jego duża zmienność w stosunku do liczby punktów czasowych spowodowała, że zastosowanie funkcji wyższego rzędu było nieuzasadnione. Model skonstruowano dla poziomu zanieczyszczeń do 4%, ponieważ liczba defektów na powierzchni po elektropolerowaniu wpływających na chropowatość była bardzo duża. Jego dopasowanie oceniono przy użyciu programu R oraz kryterium informacyjnego Akaike (AIC). Do analizy poziomów połysku autorzy wykorzystali nieliniowy logistyczny model wzrostu, który jest powszechnie stosowany w modelowaniu wzrostu populacji, zgodnie z równaniem (1). Jego krzywa w kształcie litery S oraz górna granica pasowały do ogólnego zachowania punktów danych:

$$f(x) = \frac{\alpha}{1 + e^{-(\beta + \sum_{i=1}^n \varphi_i * x_i)}} \quad (1)$$

Z uwagi na to, iż model logistyczny rozpoczyna się od wartości 0, wartość połysku została obniżona o 200. Do otrzymanego w ten sposób wyniku należy zatem dodać 200, aby otrzymać wynik końcowy. W przypadku elektrolitu bez dodatków organicznych, ze względu na ogromne różnice w zachowaniu w zależności od poziomu zanieczyszczenia, zdecydowaliśmy się podzielić model na dwie oddzielne funkcje, w zależności od tego, czy poziom zanieczyszczenia był niższy niż 4%, czy wyższy niż 4% (lub równy). Użycie pojedynczego modelu dało znacznie niższe dopasowanie. Podobnie jak w przypadku elektrolitu z dodatkiem trietanolaminy nie było żadnych istotnych wad dla zastosowania pojedynczego modelu. Literatura sugeruje, że użycie współczynnika  $R^2$  do oceny dopasowania modelu nieliniowego jest błędne, ponieważ całkowita wariancja modelu nieliniowego nie jest równa sumie wariancji wyjaśnionej i wariancji błędu. Współczynnik  $R^2$  jest nieadekwatną miarą dla modeli nieliniowych w badaniach farmakologicznych i biochemicznych. Ze względu na nieliniowy charakter naszego modelu jego dopasowanie oceniono na podstawie RMSE (root-mean-squared-error) dopasowanego modelu. Eksperymentalne dane wejściowe dotyczące chropowatości i połysku były podstawą do stworzenia modeli logistycznych i kwadratowych odpowiednio dla elektrolitu bez dodatków organicznych oraz elektrolitu z trietanolaminą. Szczegółową charakterystykę parametrów modeli przedstawiono w „supplementary information” [H4]. Model ten uwzględnia tak wiele zmiennych i zależności między nimi, że przedstawienie go w czytelnej formie graficznej wymagało uproszczenia. Uproszczona wizualizacja modelu połysku (rys. 1) wykonana na podstawie wartości uzyskanych dla uśrednionych warunków temperatury i gęstości prądu, pozwala na zaobserwowanie ogólnych tendencji i różnic pomiędzy badanymi elektrolitami. W przypadku roztworu bez dodatków organicznych uzyskano podobne wyniki w zakresie 0-3% Fe, po czym zaobserwowano nieznaczne pogorszenie dla 4% Fe, a następnie nagły spadek wartości uzyskanego połysku w końcowej fazie eksploatacji kąpieli. W przypadku roztworu z trietanolaminą zmiany wartości uzyskanego połysku w zależności od zanieczyszczenia kąpieli są bardziej równomierne. Nie występują gwałtowne zmiany wraz z czasem eksploatacji i wzrostem zanieczyszczenia.



źródło: Lochyński P. et al., Scientific Reports 11, 2021, 1–13.

**Rys. 1.** Uproszczona graficzna ilustracja modelu matematycznego obrazująca wzrastający poziom zanieczyszczenia kąpeli procesowej: (a) elektrolit bez dodatków organicznych (b) elektrolit z trietanolaminą.

Na podstawie wyników laboratoryjnych w obrębie analizowanych zakresów parametrów, które znajdują największe uzasadnienie do realizacji procesów elektropolerowania elementów wielkogabarytowych w skali przemysłowej, wygenerowano wyniki z krokiem dla temperatury co  $1^{\circ}\text{C}$ , dla czasu co 1 minutę, dla gęstości prądu co  $1\text{ A/dm}^2$  i dla zanieczyszczenia co 1% Fe. W ten sposób **wygenerowano ponad 20 000 wyników** chropowatości, połysku i ubytku masy w zestawieniu z parametrami procesu. Dokonano selekcji wartości parametrów umożliwiających osiągnięcie zadowalającej jakości powierzchni (chropowatość  $Ra < 0.14\ \mu\text{m}$  i połysk powyżej 800 GU) przy jednoczesnym zachowaniu jak najmniejszego ubytku masy. **Minimalizacja ubytków masy elektropolerowanych detali jest istotnym zagadnieniem związanym z procesem anodowego roztwarzania, gdyż ma bezpośredni wpływ na ilość zanieczyszczeń powstających w trakcie procesu. Kolejnym aspektem istotnym do uwzględnienia jest możliwie jak najmniejszy jednostkowy ładunek elektryczny ( $\text{Ah/cm}^2$  elektropolerowanej powierzchni).** W ramach przeprowadzonych badań [H4] dla kąpeli bez dodatków organicznych oraz kąpeli z trietanolaminą przygotowano po 10 optymalnych zestawień chropowatości, połysku, ubytku masy, jednostkowego ładunku elektrycznego, czasu i temperatury procesu, gęstości prądu anodowego oraz odpowiedniego poziomu zanieczyszczenia kąpeli procesowej. Otrzymane zestawienie wygenerowano na podstawie opracowanych modeli. Zastosowanie takich wartości w procesie doboru optymalnych kryteriów uwzględnia zarówno potrzebę uzyskania odpowiednio błyszczącej i gładkiej powierzchni, jak i konieczność minimalizacji zanieczyszczenia kąpeli jonami metali. Czas elektropolerowania konieczny do uzyskania oczekiwanych rezultatów w przeanalizowanych przypadkach mieścił się w zakresie 15-19 min, a zakres temperatury w przedziale  $35\text{-}40^{\circ}\text{C}$ . Istotnie różniły się wytypowane zakresy zanieczyszczenia kąpeli. Dla kąpeli fosforanowo-siarczanowej bez dodatków organicznych warunki brzegowe spełniały poszczególne wartości w całym zakresie analizowanego zanieczyszczenia do ok. 5% Fe, jednak spośród nich te o najniższych ubytkach masy znajdowały się w zakresie 3-4% Fe. Dla kąpeli fosforanowo-siarczanowej z dodatkiem trietanolaminy punkty spełniające warunki brzegowe obserwowano w zakresie zanieczyszczenia kąpeli 0-3% Fe, jednak te o najniższych ubytkach masy znajdowały się pomiędzy 0-1% Fe. Różnica ta wynika z różnych charakterystyk pracy zastosowanych kąpeli w czasie ich eksploatacji.

**W ramach projektu badawczego „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)” opracowano program umożliwiający tworzenie wieloczynnikowego modelu matematycznego. W połączeniu modelu z algorytmem obliczeniowym kosztów procesowych możliwa jest predykcja efektu elektropolerowania w zestawieniu z kosztami procesu. Ponadto możliwe jest też wprowadzenie dodatkowych danych z badań w skali technicznej do dalszego udoskonalania modelu predykcyjnego. Opracowany zestaw równań uwzględniający wyniki badań w skali technicznej daje możliwość modyfikacji danych wejściowych oraz umożliwia określenie granicznego zanieczyszczenia kąpeli procesowej uzasadnionego ze względu na koszty. Wykorzystanie modelu matematycznego do doboru parametrów procesu elektropolerowania i zakresu zanieczyszczenia kąpeli procesowych umożliwia redukcję zanieczyszczeń u źródła ich powstawania. Jednocześnie możliwe jest uzyskanie oczekiwanych właściwości użytkowych i dekoracyjnych powierzchni stali chromowo-niklowych po elektropolerowaniu przy możliwie niskim ładunku zanieczyszczeń oraz niskim zużyciu energii elektrycznej wykorzystywanej do procesów elektrodowych.**

W celu określenia wpływu dodatków organicznych stosowanych w procesie elektropolerowania na proces neutralizacji ścieków z procesów elektropolerowania, jak również określenia zmian składu pierwiastkowego osadów pogalwanicznych powstałych po neutralizacji ścieków z trawienia i elektropolerowania stali chromowo-niklowych, zaplanowano i zrealizowano etap badań związany z oczyszczaniem i neutralizacją ścieków procesowych.

Ścieki przemysłowe z powierzchniowej obróbki metali mogą zawierać niebiodegradowalne, rakotwórcze i toksyczne jony metali ciężkich, które mają tendencję do kumulowania się w organizmach żywych, powodując wiele chorób i zaburzeń. Obecność jonów metali ciężkich w ściekach bytowych zaburza procesy mikrobiologiczne oczyszczania ścieków i może prowadzić do pogorszenia stanu środowiska naturalnego (Bugajski et al. 2017). Dlatego usuwanie jonów metali ciężkich ze ścieków i osadów ściekowych jest niezbędne dla ochrony środowiska i zdrowia ludzi (Ijagbemi et al. 2009). Usuwanie jonów metali ciężkich ze ścieków może być prowadzone za pomocą chemicznego strącania, wymiany jonowej, adsorpcji, procesów membranowych (odwrócona osmoza, ultrafiltracja, nanofiltracja, elektrodializa), koagulacji i flokulacji, flotacji oraz obróbki elektrochemicznej (Fu i Wang 2011, Kurniawan et al. 2006). Skuteczność konwencjonalnych metod oczyszczania tego typu ścieków jest często niezadowalająca, co przejawia się w nadmiernym stężeniu substancji niepożądanych w oczyszczonych ściekach. Wynika to m.in. z niejednorodnego składu ścieków oraz specyficznych właściwości fizykochemicznych substancji szkodliwych występujących w ściekach (Thomas et al. 2018, 2021).

Obróbka powierzchniowa stali chromowo-niklowej poprzez procesy trawienia i elektropolerowania powoduje powstawanie ścieków pogalwanicznych zawierających wysokie stężenia Ni(II), Cr(III), Fe(III) i Cu(II). Oczyszczanie tego typu ścieków polega zazwyczaj na dostosowaniu pH od 8 do 11 w celu wytrącenia kationów metalicznych w postaci odpowiedniego wodorotlenku, który jako osad jest następnie oddzielany podczas filtracji (Kurama, 2009). W przypadku mieszaniny metali ich wodorotlenki nie wytrącają się całkowicie przy jednym pH i każdy wodorotlenek metalu ma swój własny korzystny do wytrącania zakres pH, poza którym ma tendencję do rozpuszczania się. Wraz ze wzrostem pH zmniejsza się rozpuszczalność wytrąconych wodorotlenków metali, a wodorotlenki amfoteryczne reagują z anionami OH<sup>-</sup>, powodując ponowne przejście metali do ścieków. Ponadto organiczne czynniki kompleksujące utrudniałyby wytrącanie słabo rozpuszczalnych związków metali, jeśli są obecne w ściekach. Ich negatywny wpływ może być

wyeliminowany poprzez dostosowanie pH do optymalnego dla procesu strącania (Ain Zainuddin et al. 2019, Thomas et al. 2018).

W pracy [H6] przedstawiono wyniki badań nad procesem neutralizacji przez strącanie chemiczne zarówno w warunkach laboratoryjnych na ściekach modelowych, jak i na ściekach rzeczywistych w próbach przemysłowych. W warunkach przemysłowych badano ścieki o różnym składzie, które charakteryzowały się szerokim zakresem stężeń początkowych. W badaniach zastosowano siarczek sodu lub środek dekompleksujący na bazie siarki organicznej do neutralizacji ścieków zawierających trietanolaminę lub glicerol. Oczyszczanie ścieków z elektropolerowania stanowi duże wyzwanie. Niemniej jednak ścieki z glicerolem są łatwiejsze do zneutralizowania niż te zawierające trietanolaminę. W skali przemysłowej zastosowanie środka dekompleksującego jest konieczne, aby osiągnąć wymagane wartości niklu w ściekach po oczyszczeniu poniżej 1 mg Ni/dm<sup>3</sup>. Nawet w przypadku wysokich stężeń jonów niklu w ściekach surowych, proces neutralizacji ścieków pochodzących tylko z samego trawienia był skuteczny. Poszukiwanie skutecznych metod neutralizacji i oczyszczania ścieków mieszanych jest szczególnie ważne w warunkach przemysłowych, gdzie zawsze możliwe jest całkowite rozdzielanie tych dwóch rodzajów ścieków. W pracy przedstawiono również wyniki badań składu osadów poneutralizacyjnych, a uzyskane wyniki mogą być przydatne w planowaniu dalszego zagospodarowania i utylizacji tego typu odpadów.

W celu przeprowadzenia badań laboratoryjnych [H6] przygotowano modelowe ścieki z trawienia (PIWW) i elektropolerowania (EPWW) poprzez rozcieńczenie stężonych kąpeli technologicznych intensywnie eksploatowanych w skali przemysłowej. Roztwór trawiący na bazie HNO<sub>3</sub> i HF oraz roztwór do elektropolerowania złożony z H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i trietanolaminy lub glicerolu mieszano z wodą dejonizowaną w różnych proporcjach, tworząc ścieki (PIWW i EPWW) o różnym stężeniu początkowym jonów żelaza, chromu, niklu i miedzi. W celu zachowania warunków umożliwiających wielokrotne próby neutralizacji, a jednocześnie dążąc do jak najlepszego odzwierciedlenia charakterystyki procesu, wybrane warianty odniesiono do zakresu zanieczyszczeń ścieków w skali przemysłowej. Poziom pH regulowano poprzez dodawanie do ścieków roztworu NaOH lub zawiesiny Ca(OH)<sub>2</sub>, aż do uzyskania pożądanej wartości pH mierzonej pH-metrem. Podczas procesu neutralizacji roztwór był stale mieszany za pomocą mieszadła magnetycznego. Po zakończeniu procesu neutralizacji otrzymany roztwór przefiltrowano przez papier filtracyjny Munktell Filter Paper Disc Grade 390 w celu oddzielenia osadu. Badania w skali technicznej obejmowały neutralizację ścieków za pomocą Ca(OH)<sub>2</sub> w komorze neutralizacyjnej z jednoczesną kontrolą pH, flokulację i przepompowanie osadu do osadnika oraz oddzielenie osadu od filtratu na prasie filtracyjnej. Przesącz mineralizowano stężonym HNO<sub>3</sub> przed badaniem stężenia metali za pomocą spektrometru optycznego ICP-OES. Badania ICP-OES (inductively coupled plasma - optical emission spectroscopy) przeprowadzono przy użyciu aparatu ICP-OES Thermo Scientific iCAP 7000 Series z automatycznym podajnikiem próbek i oprogramowaniem firmy Qtegra Intelligent Scientific Data Solution. W przypadku próbek przemysłowych osadów poneutralizacyjnych pomiary ICP-OES wykonano przy użyciu aparatu Thermo Scientific iCAP 7400 Duo.

Ze względu na aspekty ekonomiczne, techniczne i środowiskowe często stosowanymi środkami do neutralizacji kwaśnych ścieków technologicznych są wodorotlenek sodu lub wodorotlenek wapnia. W badaniach wstępnych dla ścieków z procesów trawienia (PIWW), elektropolerowania (EPWW) oraz ścieków mieszanych (PIWW+EPWW) [H6] sprawdzono wpływ NaOH lub Ca(OH)<sub>2</sub> na obniżenie zawartości jonów żelaza, chromu, niklu i miedzi po procesie neutralizacji. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń zdecydowano się na zastosowanie



$\text{Ca(OH)}_2$  w dalszym etapie badań oraz na monitorowanie zawartości jonów niklu w ściekach po oczyszczeniu. Największe trudności zaobserwowano z obniżeniem stężenia niklu w ściekach do wymaganych wartości poniżej  $1 \text{ mg Ni/dm}^3$ , gdyż spełnienie tego wymogu wiązałoby się również z niską zawartością jonów chromu i miedzi.

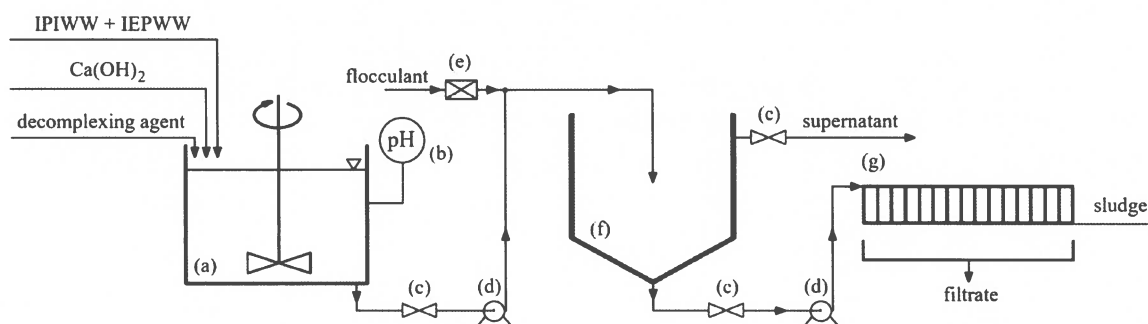
Neutralizacja i oczyszczanie ścieków z procesu trawienia (**PIWW**) obejmowało przeprowadzenie 16 prób o zawartości początkowej  $5\text{-}650 \text{ mg Ni/dm}^3$ . Korygowano pH za pomocą  $\text{Ca(OH)}_2$ , dostosowując je do możliwie najniższego  $\text{pH} = 8,5$ . Następnie, po oddzieleniu osadu na filtrze, przesącz po mineralizacji poddawano analizie ICP-OES. W ściekach oczyszczonych tylko w dwóch przypadkach uzyskano wyniki przekraczające wartość  $1 \text{ mg Ni/dm}^3$ . Przekroczenia te były niewielkie, w jednym przypadku o  $0,03 \text{ mg Ni/dm}^3$ , a w drugim o  $0,05 \text{ mg Ni/dm}^3$ . Na podstawie przeprowadzonych analiz należy stwierdzić, że proces usuwania niklu jest skuteczny dla ścieków trawiących w szerokim zakresie stężeń. Wydaje się, że chemiczne strącanie metali zawartych w **PIWW** jest bardzo skuteczne nie tylko w skali laboratoryjnej, ale również w skali przemysłowej, jak np. w hucie Old Fonye Steel (producent stali nierdzewnej w Szanghaju, Chiny), gdzie uzyskano podobną skuteczność neutralizacji wapnem ścieków z trawienia. Stężenia niklu w ściekach dopływających i odpływających z instalacji neutralizacji wynosiły odpowiednio  $1000 \text{ mg Ni/dm}^3$  i  $0,15 \text{ mg Ni/dm}^3$  (Dahlgren, 2010).

Przy neutralizacji i oczyszczaniu ścieków z procesu elektropolerowania (**EPWW**) określono wpływ dodatków stosowanych w kąpielach procesowych na skuteczność neutralizacji. W tym celu proces neutralizacji z wykorzystaniem  $\text{Ca(OH)}_2$  zastosowano do ścieków o różnych stężeniach początkowych zawierających trietanolaminę i glicerol. Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że w przypadku ścieków zawierających kąpiel do elektropolerowania z dodatkiem trietanolaminy znacznie trudniej jest usunąć nikiel w procesie neutralizacji w porównaniu ze ściekami z kąpeli z dodatkiem glicerolu. W przypadku kąpeli z dodatkiem glicerolu możliwe było obniżenie stężenia niklu poniżej wymaganego poziomu dla stężeń początkowych do  $14 \text{ mg Ni/dm}^3$ . W przypadku kąpeli z dodatkiem trietanolaminy wymagane obniżenie stężenia uzyskano tylko dla bardzo niskich stężeń początkowych. Zawartość niklu w ściekach nieoczyszczonych powyżej  $4 \text{ mg Ni/dm}^3$  przed neutralizacją nie gwarantowała uzyskania dopuszczalnej zawartości niklu po neutralizacji. **Autorzy publikacji [H6] nie natrafili jeszcze na badania porównujące wpływ czynników kompleksujących, takich jak trietanolamina czy gliceryna, na proces neutralizacji ścieków pogalwanicznych z przemysłu obróbki powierzchniowej stali chromowo-niklowej. Ponadto w wielu badaniach ścieki poddawane procesowi neutralizacji nie zawierają substancji kompleksującej.** Często brak jest również informacji, czy taki czynnik kompleksujący w ogóle występuje w ściekach oczyszczonych. Dodatkowo, jeśli niektórzy badacze analizują wpływ czynników kompleksujących na oczyszczanie ścieków z elektropolerowania, to z reguły stosują związki inne niż trietanolamina czy glicerol, np. kwas etylenodiaminotetraoctowy (EDTA), kwas nitrylotrójoctowy (NTA), kwas cytrynowy czy  $\text{NH}_2\text{EDTA}$  (Juang et al. 2006, Thomas et al. 2018, Wang et al. 2019).

Uzyskane wyniki wskazują, że niezależnie od stężenia niklu w ściekach surowych po procesie elektropolerowania redukcja jego stężenia poprzez strącanie chemiczne poniżej  $1 \text{ mg Ni/dm}^3$  nie jest możliwa bez dodatku środka dekompleksującego. Zastosowanie  $5 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S} \times 9\text{H}_2\text{O}$  o stężeniu  $12 \text{ g/dm}^3$  jako dodatku w procesie neutralizacji ścieków z elektropolerowania pozwoliło na znaczne obniżenie zawartości jonów niklu, nawet w przypadku wysokich stężeń początkowych. Dla ścieków surowych o zawartości niklu  $800 \text{ mg Ni/dm}^3$  uzyskano redukcję stężenia o około 96-99%, a dla ścieków surowych o stężeniu  $280 \text{ mg Ni/dm}^3$  – 93-99%. Pomimo tak wysokiego stopnia redukcji zawartości niklu w procesie neutralizacji z dodatkiem  $\text{Na}_2\text{S}$  uzyskane wartości stężenia końcowego

mieściły się w zakresie 6,3-30 mg Ni/dm<sup>3</sup> dla serii o wyższym stężeniu początkowym oraz 2,6-18,4 mg Ni/dm<sup>3</sup> dla serii o niższym stężeniu, jednocześnie znacznie przekraczając dopuszczalną wartość 1 mg Ni/dm<sup>3</sup>. Ain Zainuddin (Ain Zainuddin et al. 2019) dodał Na<sub>2</sub>S do wytrącenia jonów metali ciężkich ze ścieków kwaśnych z przemysłu galwanicznego zawierających nikiel na poziomie stężeń odpowiednio 12,32 mg Ni/dm<sup>3</sup> i 1,06 mg Ni/dm<sup>3</sup> i uzyskał odpowiednio 95,32% i 65,79% usunięcia jonów metalu. Przedstawione wyniki badań ścieków galwanicznych pozwoliły na wyjaśnienie trudności związanych z neutralizacją określonych rodzajów ścieków. Stosowanie dodatków w przemysłowych kąpielach elektropolerujących może powodować problemy ze skutecznym obniżeniem stężeń, szczególnie w przypadku stosowania trietanoloaminy. W przypadku niedostatecznej skuteczności procesu i przekroczenia dopuszczalnych norm konieczne jest skierowanie ścieków do ponownej neutralizacji lub poszukiwanie innych metod pozwalających na osiągnięcie oczekiwanych rezultatów.

**Badania w skali technicznej przeprowadzono na instalacji technologicznej przystosowanej do neutralizacji ścieków z procesów elektropolerowania i trawienia, wyposażonej w komorę reakcyjną o pojemności roboczej od 1,5 do 2,4 m<sup>3</sup>. Głównymi elementami instalacji były osadnik oraz prasa filtracyjna, na której następowało oddzielenie osadu od ścieków oczyszczonych i dopiero po tym procesie mogły być one odprowadzone do kanalizacji miejskiej. Ścieki z procesów trawienia i elektropolerowania dozowane były do komory neutralizacji, gdzie pod wpływem dodanej zawiesiny Ca(OH)<sub>2</sub> zachodziła reakcja neutralizacji i strącania osadów. Następnie ścieki kierowane były do osadnika, gdzie zachodziła sedymentacja, po czym trafiały na prasę filtracyjną (Rys. 2).**



źródło: Lochyński P. et al., Archives of Environmental Protection 47(4), 2021, 18-29

**Rys. 2.** Uproszczony schemat instalacji do oczyszczania i neutralizacji ścieków z procesów trawienia i elektropolerowania stali, a) komora neutralizacji, b) pH-metr, c) zawór, d) pompa, e) zawór zwrotny, f) osadnik, g) prasa filtracyjna.

Przeprowadzono dwie serie badań w skali technicznej. Pierwszą z zastosowaniem siarczku sodu, a drugą z zastosowaniem środka dekompleksującego na bazie siarki organicznej. Zastosowanie siarczku sodu może stwarzać ryzyko tworzenia się H<sub>2</sub>S przy niskim pH roztworu, choć odpowiednia kontrola pH i dodanie Na<sub>2</sub>S przy pH powyżej 8,0 może temu zapobiec. Jednoczesna neutralizacja ścieków przemysłowych z procesu trawienia oraz ścieków przemysłowych z procesu elektropolerowania (IPIWW + IEPWW) [H6] w skali technicznej pozwoliła na obniżenie stężenia jonów żelaza z 1043 mg Fe/dm<sup>3</sup> do 0,7 mg Fe/dm<sup>3</sup>, chromu z 242 mg Cr/dm<sup>3</sup> do wartości poniżej 0,05 mg Cr/dm<sup>3</sup>, niklu z 338 mg Ni/dm<sup>3</sup> do 0,85 mg Ni/dm<sup>3</sup> oraz miedzi z 77 mg Cu/dm<sup>3</sup> do 0,03 mg Cu/dm<sup>3</sup>. W trakcie badań w skali technicznej do mieszanki reakcyjnej o pH 9,5 dodawano

siarczek sodu. Wzrost pH o 0,5-1,0 wynikał z hydrolizy tej soli. Warto zaznaczyć, że podwyższenie pH do 10,5 podczas kolejnej serii neutralizacji wpłynęło negatywnie na efekt procesu, który dla chromu uzyskał spadek z 1043 mg Cr/dm<sup>3</sup> do 1,0 mg Cr/dm<sup>3</sup>, a dla jonów niklu z 338 mg Ni/dm<sup>3</sup> do 1,4 mg Ni/dm<sup>3</sup>, a więc wartość przekraczającą dopuszczalną, która wynosi 1 mg Ni/dm<sup>3</sup>. Po oddzieleniu osadu na prasie filtracyjnej pH oczyszczonych ścieków każdorazowo mieściło się w oczekiwanym zakresie (pH = 7,5-9,0).

Badania laboratoryjne wykazały, że ścieki z elektropolerowania o wysokim stężeniu początkowym niklu nie mogą być skutecznie neutralizowane jedynie za pomocą Ca(OH)<sub>2</sub> i Na<sub>2</sub>S. Na podstawie badań laboratoryjnych oraz dotychczasowych wyników prób technicznych, dla których uzyskane stężenia były zbliżone do wartości granicznych określonych polskimi przepisami, nie podjęto próby neutralizacji ścieków w ramach planowanej serii prób technicznych z zastosowaniem Na<sub>2</sub>S o stosunkowo wysokiej zawartości jonów niklu powyżej 350 mg Ni/dm<sup>3</sup> dla surowego IPIWW + IEPWW. W przypadku ścieków o zwiększonym udziale IEPWW i jednocześnie większym udziale H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oraz dodatków organicznych, nawet niższe zawartości jonów niklu znacznie poniżej 350 mg Ni/dm<sup>3</sup> mogą stanowić istotne wyzwanie. Trietanolamina oraz glicerol zawarte w kąpielach procesowych do elektropolerowania tworzą z jonami metali kompleksy, które szczególnie w przypadku jonów niklu utrudniają ich wytrącenie w postaci nierozpuszczalnych osadów (wodorotlenków i siarczków metali) i oczyszczenie ścieków do poziomu poniżej 1 mg Ni/dm<sup>3</sup>.

Kolejne próby techniczne przeprowadzono dodając do mieszaniny reakcyjnej środek dekompleksujący na bazie siarki organicznej. Porównano zawartość jonów żelaza, chromu, niklu i miedzi w ściekach przemysłowych z procesu trawienia i elektropolerowania dla serii 10 prób technicznych przed i po neutralizacji [H6]. Zdecydowana większość przeprowadzonych badań pozwoliła na uzyskanie wyników zawartości Cr, Ni, Cu poniżej 1,00 mg/dm<sup>3</sup> nawet przy bardzo wysokich stężeniach w ściekach surowych, odpowiednio: 200-7000 mg Cr/dm<sup>3</sup>, 60-3200 mg Ni/dm<sup>3</sup> i 30-2200 mg Cu/dm<sup>3</sup>. Jedynie w przypadku szóstej próby, która nie charakteryzowała się znacznymi zmianami względem pozostałych, nie uzyskano po neutralizacji w pełni zadowalających wyników, natomiast uzyskano 1,5 mg Cr/dm<sup>3</sup> i 1,5 mg Ni/dm<sup>3</sup>, co mogło być wynikiem niewłaściwie przeprowadzonego procesu neutralizacji ścieków. Nawet przy bardzo wysokich stężeniach jonów niklu w ściekach surowych, sięgających 2400-3200 mg Ni/dm<sup>3</sup> (IPIWW > IEPWW), po neutralizacji uzyskiwano wartości poniżej 0,7 mg Ni/dm<sup>3</sup>. Ścieki o składzie charakteryzującym się większym udziałem IEPWW (IPIWW < IEPWW) oczyszczono również do stężenia 0,5 mg Ni/dm<sup>3</sup> i 0,5 mg Cr/dm<sup>3</sup>. Bardzo wysoka początkowa zawartość jonów miedzi powyżej 2000 mg Cu/dm<sup>3</sup> nie stanowiła problemu w procesie neutralizacji i w efekcie uzyskano wynik poniżej 0,3 mg Cu/dm<sup>3</sup>, a w przypadku niższych stężeń - nawet poniżej 0,1 mg Cu/dm<sup>3</sup>.

Ważnym aspektem w kontekście opisu uzyskanych wyników badań neutralizacyjnych, choć często marginalizowanym, jest ocena składu osadów powstałych w wyniku procesu. Powstające osady są materiałami niebezpiecznymi, a ich odbiór możliwy jest jedynie przez wyspecjalizowane firmy zajmujące się zbiórką substancji niebezpiecznych. Odpady te potencjalnie mogą być źródłem cennych surowców, jednak wyzwaniem pozostaje dalsza obróbka tych osadów, a także stosunkowo duże uwodnienie i zmienność składu związana bezpośrednio ze zmiennym stężeniem ścieków surowych. W przeprowadzonych badaniach [H6] przedstawiono skład zawartości zanieczyszczeń w ściekach przemysłowych w g/dm<sup>3</sup> (żelazo, chrom, nikiel, miedź, fosfor, siarka) oraz odpowiadające im zanieczyszczenia w placku filtracyjnym w przeliczeniu na g/kg suchej masy (żelazo, chrom, nikiel, miedź, fosfor, siarka, wapń). Warto zwrócić uwagę na pewne zależności, które w przyszłości mogą pomóc w projektowaniu rozwiązań zagospodarowania odpadów z procesów trawienia

i elektropolerowania stali chromowo-niklowych. Stosunek zawartości Fe/Cr w osadach wahał się w granicach 4,0-4,4; zawartość P/S, niezależnie od rodzaju zneutralizowanych ścieków, w granicach 0,6-2,0. Zawartość wapnia wynosiła od 262 do 313 g Ca/kg s.m. (suchej masy), a zawartość żelaza, chromu i niklu odpowiednio: 31-126, 8-30 i 1-15 g/kg s.m. Zawartość fosforu i siarki w osadzie po neutralizacji wynosiła odpowiednio: 13-131 g P/kg s.m. i 30-74 g S/kg s.m. Uwodnienie osadów niezależnie od wykonanej próby i wyjściowego składu ścieków wynosiło od 61,7% do 71,4%. Zestawione wyniki badań technicznych należy oceniać holistycznie, analizując cały szereg uzyskanych wyników. Ze względu na fakt, że badania prowadzono w warunkach przemysłowych, nie można wykluczyć, że osad jest częściowo zanieczyszczony wcześniej przeprowadzoną partią neutralizacji. Starano się zminimalizować opisany powyżej potencjalny negatywny wpływ i w większości eksperymentów w skali technicznej neutralizowano ścieki surowe, które poprzedzone były neutralizacją ścieków o podobnym poziomie zanieczyszczeń.

**Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych badań w poszukiwaniu sposobów zagospodarowania odpadów lub zmniejszenia ich negatywnego wpływu na środowisko. Wzrost cen odbioru odpadów niebezpiecznych może przyczynić się do poszukiwania sposobów zmniejszenia zawartości wody w osadach filtracyjnych oraz rozwiązań zakładających ograniczenie powstawania zanieczyszczeń u źródła, poszukiwania metod odzysku lub zagospodarowania już częściowo wykorzystanych rozwiązań technologicznych, a także racjonalizacji zużycia wody płuczającej.**

## **Podsumowanie i wnioski**

Niewątpliwie nie można całkowicie wyeliminować negatywnego oddziaływania na środowisko cywilizacji ludzkiej i dlatego należy podejmować działania mające na celu minimalizację negatywnych skutków tych działań. W oparciu o metody inżynierskie oraz o nauki techniczne, przyrodnicze, prawne i ekonomiczne należy poszukiwać rozwiązań umożliwiających racjonalne gospodarowanie zasobami przyrody przy możliwie małym negatywnym oddziaływaniu działalności produkcyjnej na środowisko. W inżynierii środowiska wykorzystywane są też metody modelowania procesów oraz prognozowania stanu środowiska w oparciu o modelowanie. Interdyscyplinarny charakter badań naukowych, rozwojowych i wdrożeniowych wymaga wielokrotnie wieloaspektowej analizy i rozwiązania złożonych problemów naukowych. **Realizacja projektu pt. „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)” (LIDER, NCBR 2017-2020, kierownik projektu) wychodzi naprzeciw wyżej opisanym wyzwaniom. W wyniku zrealizowanych badań laboratoryjnych i technologicznych potwierdzono hipotezę, że opracowanie modelu matematycznego monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania stali chromowo-niklowych umożliwia redukcję zanieczyszczeń u źródła ich powstawania, kontrolę procesu oraz ograniczenie zużycia energii elektrycznej wykorzystywanej do procesów elektrodowych.** Ponadto w udokumentowanym cyklu publikacji zestawiono wyniki badań, które świadczą również o zrealizowaniu zaplanowanych celów szczegółowych.

Wnioskodawca dr inż. Paweł Lochyński jest pomysłodawcą koncepcji zaplanowanych i zrealizowanych badań, opracował metodykę badawczą odnoszącą się do zrealizowanych prac badawczych, był osobą odpowiedzialną za realizację badań w skali technicznej, interpretował wyniki badań i podejmował decyzje przy projektowaniu zakresu badań uzupełniających. Dodatkowo był autorem wniosku pt. „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych

do elektropolerowania (IonsMonit)”, koordynował pracę zespołu badawczego w czasie trwania projektu w latach 2017-2020 w roli kierownika projektu badawczego. Ponadto na mocy decyzji NCBR z 6 września 2021 r. uznano projekt za wykonany w całości. Rezultatem przeprowadzonych badań było sformułowanie szeregu wniosków odnoszących się do monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania stali chromowo-niklowych, redukcji zanieczyszczeń u źródła ich powstawania oraz oczyszczania i neutralizacji ścieków z procesów trawienia i elektropolerowania stali chromowo-niklowych:

- Znajomość ubytku masy próbek w wyniku elektropolerowania w warunkach laboratoryjnych pozwala na określenie szacunkowych ubytków masy pierwiastków w warunkach przemysłowych z dokładnością nawet poniżej 5%. Daje to możliwość oszacowania stopnia zanieczyszczenia kąpeli przemysłowej. Jest to również podstawa do obliczenia przybliżonego ładunku zanieczyszczeń, które powstają w trakcie procesu w wyniku anodowego roztwarzania się elektropolerowanych elementów.
- Zrealizowane badania w skali laboratoryjnej i technicznej umożliwiają określenie, przy jakich parametrach procesu możliwe jest uzyskanie oczekiwanego efektu obróbki elektrochemicznej przy możliwie niskim ładunku zanieczyszczeń oraz niskim zużyciu energii elektrycznej wykorzystywanej do procesów elektrodowych.
- Wykorzystanie opracowanego modelu matematycznego umożliwia monitorowanie kąpeli procesowej do elektropolerowania i przyczynia się do redukcji zanieczyszczeń u źródła ich powstawania.
- Możliwość wydzielenia strumieni ścieków z trawienia i elektropolerowania oraz monitorowania stopnia ich zanieczyszczenia, możliwość magazynowania ścieków, objętość komory neutralizacji, ilość zużytej wody oraz sposoby płukania detali mogą mieć wpływ na efektywne zarządzanie procesem neutralizacji ścieków.
- Wyniki badań laboratoryjnych wskazują na możliwość neutralizacji przy użyciu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  w przypadku ścieków pochodzących tylko z procesu trawienia stali. Nawet przy bardzo wysokich stężeniach początkowych dochodzących do  $650 \text{ mg Ni/dm}^3$ , możliwe było późniejsze obniżenie stężenia  $\text{Ni}(\text{II})$  do wartości poniżej  $1 \text{ mg Ni/dm}^3$ , przy jednoczesnym obniżeniu stężenia  $\text{Cr}(\text{III})$  i  $\text{Cu}(\text{II})$  również poniżej  $1 \text{ mg/dm}^3$ .
- Trudne do osiągnięcia było obniżenie stężenia poniżej  $1 \text{ mg Ni/dm}^3$  w przypadku ścieków mieszanych zawierających ścieki z procesu elektropolerowania lub z samego elektropolerowania. Ze względu na stosowanie dodatków organicznych utrudniających wytrącanie jonów metali w kąpielach elektropolerujących wskazane jest stosowanie środków dekompleksujących w celu uzyskania oczekiwanej skuteczności oczyszczania ścieków.
- Zastosowanie dodatków organicznych w kąpeli elektropolerującej utrudnia oczyszczanie powstających ścieków. W przypadku kąpeli zawierającej glicerol możliwe jest uzyskanie stężeń końcowych poniżej  $1 \text{ mg Ni/dm}^3$  przy stężeniu początkowym do  $14 \text{ mg Ni/dm}^3$  natomiast w przypadku kąpeli z trietanoloaminą było to możliwe tylko przy bardzo niskich stężeniach początkowych do  $4 \text{ mg Ni/dm}^3$ .
- Zastosowanie  $\text{Na}_2\text{S}$  jako dodatku do procesu neutralizacji, nawet w przypadku wysokich stężeń początkowych na poziomie  $280 \text{ mg Ni/dm}^3$  i  $800 \text{ mg Ni/dm}^3$ , pozwala na uzyskanie wysokiej skuteczności redukcji stężenia jonów niklu, wynoszącej odpowiednio 93-99% i 96-99%, pomimo tego, że uzyskane wyniki przekraczały wartości graniczne.
- Przedstawiona charakterystyka składu osadów po procesie neutralizacji może być przydatna w planowaniu zagospodarowania i neutralizacji odpadów takich jak osady pogalwaniczne.

**Literatura**

- Ain Zainuddin N.**, Azwan Raja Mamat T., Imam Maarof H., Wahidah Puasa S., Rohana Mohd Yatim S., Removal of Nickel, Zinc and Copper from Plating Process Industrial Raw Effluent Via Hydroxide Precipitation Versus Sulphide Precipitation, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 551:012122. (2019).
- Andreshak J.C.**, Datta M., Romankiw L.T., Vega L.F. U.S. Patent No. 5066370. (1991).
- Aun D. P.**, Peixoto I. F. D. C., Houmard M., Buono V. T. L., Enhancement of NiTi superelastic endodontic instruments by TiO<sub>2</sub> coating, Materials Science and Engineering: C, 68, 675–680 (2016).
- Al-Ahmari A.**, Ashfaq M., Alfaify A., Abdo B., Alomar A., Dawud A., Predicting surface quality of  $\gamma$ -TiAl produced by additive manufacturing process using response surface method, Journal of Mechanical Science and Technology, 30(1), 345–352 (2016).
- Awad A.M.**, Ghazy E.A., Abo El-Enin S.A., Mahmoud M.G., Electropolishing of AISI-304 stainless steel for protection against SRB biofilm. Surface & Coatings Technology 206 (14), 3165–3172 (2012).
- Baldin A.V.**, Matvienko A.F., Krivoshchapova E.M., Arbuzov V.L., Klotsman S.M. U.S.S.R. Patent No. 1171570 (1985).
- Banaś J.**, Lelek-Borkowska U., Mazurkiewicz B., Solarski W., Effect of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S on the composition and stability of passive film on iron alloys in geothermal water. Electrochimica Acta 52, 5704–5714 (2007).
- Buhlert M.**, Elektropolieren. Elektrolytisches Glänzen, Glätten und Entgraten von Edelstahl, Stahl, Messing, Kupfer, Aluminium und Titan, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 99-100 (2009).
- Bugajski P.M.**, Nowobilska-Majewska E., Kurek K., The variability of pollution load of organic, biogenic and chromium ions in wastewater inflow to the treatment plant in Nowy Targ, Journal of Water and Land Development, 35(1) 11–17 (2017).
- Datta M., Landolt D.**, Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication. Electrochimica Acta, 45, 2535–2558 (2000).
- Dahlgren L.**, Treatment of Spent Pickling Acid from Stainless Steel Production, Master of Science Thesis (2010).
- Deng T.**, Zheng Z., Li J., Xiong Y., Li J., Surface polishing of AISI 304 stainless steel with micro plasma beam irradiation. Applied Surface Science, 476, 796-805 (2019).
- Fu F.**, Wang Q., Removal of heavy metal ions from wastewaters : A review, Journal of Environmental Management, 92(3), 407–418 (2011).
- Han W.**, Fang F., Eco-friendly NaCl-based electrolyte for electropolishing 316L stainless steel. Journal of Manufacturing Processes, 58, 1257-1269 (2020).
- Han W.**, Fang F., Two-step electropolishing of 316L stainless steel in a sulfuric acid-free electrolyte. Journal of Materials Processing Technology, 279, 116558 (2020).
- Haïdopoulos M.**, Turgeon S., Sarra-Bournet C., Laroche G., Mantovani D., Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 17, 647-657 (2006).
- Hocheng H.**, Kao P.S., Chen Y.F., Electropolishing of 316L stainless steel for anticorrosion passivation. Journal of Materials Engineering and Performance 10(4), 414–418 (2001).
- Hryniewicz T.**, Technologia powierzchni i powłok, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, ISBN 8387424803, 138-154 (2004).
- Hryniewicz T.**, Rokicki R., Rokosz K., Surface characterization of AISI 316L biomaterials obtained by electropolishing in a magnetic field. Surface and Coatings Technology 202, 1668–1673 (2008).
- Ijagbemi C.O.**, Baek M.H., Kim D.S., Montmorillonite surface properties and sorption characteristics for heavy metal removal from aqueous solutions, Journal of Hazardous Materials, 166 (1), 538–546 (2009).

- Jacquet P.A.**, On the Anodic Behavior of Copper in Aqueous Solutions of Orthophosphoric Acid, *Transactions of the Electrochemical Society* 69, 629-655 (1936).
- Jimenez-Pichardo R.**, Meas-Vong Y., Regalado C., Santos-Cruz J., Castano-Tostado E., García-Almendarez B.E., *Food Control* 60, 320-328 (2016).
- Juang R. S.**, Kao H. C., Chen W., Column removal of Ni(II) from synthetic electroplating waste water using a strong-acid resin, *Separation and Purification Technology*, 49(1), 36–42 (2006).
- Kao P.S.**, Hocheng H., Optimization of electrochemical polishing of stainless steel by grey relational analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 140, 255–259 (2003).
- Kurniawan T. A.**, Chan G. Y. S., Lo W. H., Babel S., Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Chemical Engineering Journal*, 118(1–2), 83–98 (2006).
- Lai J.J.**, Lee S.J., The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* 140, 206–210 (2003).
- Lin C.-C.**, **Hu C.-C.**, Electropolishing of 304 stainless steel: Surface roughness control using experimental design strategies and a summarized electropolishing model. *Electrochimica Acta*, 53, 3356–3363 (2008).
- Lochyński P.**, Łyczkowska E., Szczygieł B., Kuczewski K., Korozja wżerowa trawionej i elektropolerowanej stali chromowo-niklowej. *Przemysł Chemiczny*, 93(5) 762-765 (2014).
- Lochyński P.**, Sikora A., Szczygieł B., Surface morphology and passive film composition after pickling and electropolishing. *Surface Engineering*, 33(5), 395-403 (2017).
- Łyczkowska-Widłak E.**, Lochyński P., Nawrat G., Chlebus E., Comparison of electropolished 316L steel samples manufactured by SLM and traditional technology. *Rapid Prototyping Journal* 25, 566–580 (2019).
- Masiuk S.**, Kawecka-Typek J., Transfer and weighting functions of a sewage treatment plant based on random input and output signal characteristics, *Chemical Engineering Journal*, 102(3), 233-239 (2004).
- Moya J.**, Phillips L., Schuda L., Clickner R., Birch R., Adjei N., Blood P., Chapman K., Castro R., Mahaffey K., Wood P., Diaz A., Lee R., *Exposure Factors Handbook: 2011 Edition*, U.S. Environmental Protection Agency Washington, EPA/600/R-090/052F (2011).
- NACE International.** NACE 0175/ISO 15156-3: Petroleum and Natural Gas Industries - Materials For Use in H<sub>2</sub>S-Containing Environments in Oil and Gas Production - Part 3: Cracking Resistant CRAs (Corrosion Resistant Alloys) and Other Alloys. Houston: NACE International (2009).
- Nawrat G.**, *Elektrochemiczne Metody Inżynierii Powierzchni*, Monografia; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej: Gliwice (2010).
- Nazneen F.**, Galvin P., Arrigan D., Thompson M., Benvenuto P., Herzog G., Electropolishing of medicalgrade stainless steel in preparation for surface nano-texturing. *Journal of Solid State Electrochemistry* 16(4), 1389–1397 (2012).
- Nunez P.J.**, Garcia-Plaza E., Martin A.R., Trujillo R., De la Cruz C., Methodology for optimizing the electropolishing of stainless steel AISI316L combining criteria of surface finish and dimensional precision, Third Manufacturing Engineering Society International Conference Mellville, N.Y., in AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, 11181, 130-140 (2009).
- Norma PN-EN 10088-1:2014-12**, Stale odporne na korozję – Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję.
- Rakoczy R.**, Masiuk S., Kordas M., Grądzik P., Model matematyczny oczyszczalni ścieków, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 50(5), 94-95 (2011).
- Rokosz K.**, Lahtinen J., Hryniewicz T., Rzadkiewicz S., XPS depth profiling analysis of passive surface layers formed on austenitic AISI 304L and AISI 316L SS after high-current-density electropolishing. *Surface and Coatings Technology* 276, 516–520 (2015).
- Sueoka Y.**, Sakakibara M., Sera K., Heavy metal behavior in lichen-mine waste interactions at an abandoned mine site in southwest Japan, *Metals*, 5(3), 1591–1608 (2015).

**Shieh J.M.**, Liu S.H., Dai B.T. U.S. Patent No. 20060070888. (2006).

**Thomas M.**, Białecka B., Zdebik D., Removal of copper, nickel and tin from model and real industrial wastewater using sodium trithiocarbonate. The negative impact of complexing compounds, *Archives of Environmental Protection*, 44(1), 33–47 (2018).

**Thomas M.**, Kozik V., Bąk A., Barbusiński K., Jazowiecka-Rakus J., Jampilek J., Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: An Application of Sodium Trithiocarbonate and Wastewater Toxicity Assessment, *Materials*, 14(3), 655 (2021).

**Wang Z.**, Li J., Song W., Zhang X., Song J., Decomplexation of electroplating wastewater by ozone-based advanced oxidation process, *Water Science and Technology*, 79(3), 589–596 (2019).

**Winiarski J.**, Marczewski M., Tylus W., Corrosion resistance of 304 stainless steel after anodic polarization in choline chloride-oxalic acid nonaqueous bath. *Ochrona przed Korozją* 62, 78–81 (2019).

**Winiarski J.**, Marczewski M., Urbaniak M., On the anodic polarization of 316 steel in a choline chloride, ethylene glycol deep eutectic solvent and its impact on the surface topography and corrosion resistance. *Ochrona przed Korozją* 64, 3–7 (2021).

## 5. Pozostałe osiągnięcia badawcze

Pozostałe osiągnięcia autora związane były z następującymi tematami naukowo-badawczymi: wykorzystanie elektrod diamentowych domieszkowanych borem do mineralizacji zanieczyszczeń organicznych, voltamperometryczna detekcja wybranych zanieczyszczeń, ocena ryzyka zdrowotnego związanego z eksploatacją wód gruntowych, ocena długoterminowego oddziaływania na środowisko zanieczyszczeń spowodowanych przez działalność górnictwa oraz zastosowanie biosorbentów do usuwania jonów metali ciężkich.

### Wykorzystanie elektrod diamentowych domieszkowanych borem do mineralizacji zanieczyszczeń organicznych

Publikacje związane z pozostałymi osiągnięciami naukowo-badawczymi dotyczącymi wykorzystania elektrod BDD do mineralizacji zanieczyszczeń organicznych:

**[A1]** **Lochyński P.\***, Dittmar T., Worch E., Kuczewski K., Wykorzystanie elektrod diamentowych domieszkowanych borem (BDD) do elektrochemicznego utlenienia związków organicznych. *Przemysł Chemiczny*, 94(12), 2275–2278 (2015). (IF=0,367)

**[A2]** **Lochyński P.\***, Glorian H., Schmalz V., Worch E., Dittmar T., An Innovative Method for the Determination of Dissolved Organic Carbon (DOC) Based on Electrochemical Decomposition with Boron-doped Diamond Electrodes, W: XXXVII. Moderní elektrochemické metody / Navratil T, Fojta M, Schwarzova K (red.), 2017, STRIZOVICKA 19, USTI NAD LABEM, 400 01, CZECH REPUBLIC, LENKA SRSENOVA-BEST SERVIS, s.128-131, ISBN 978-80-905221-5-2 (materiały konferencyjne indeksowane w Web of Science)

**[A3]** Glorian H.\*, Schmalz V., **Lochyński P.**, Fremdling P., Boernick H., Worch E., Dittmar T., Portable Analyzer for On-Site Determination of Dissolved Organic Carbon - Development and Field Testing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 1–13. (2018). (IF=2,468)



Wykorzystanie zaawansowanych metod utleniania AOP (advanced oxidation processes) z zastosowaniem elektrod BDD (boron-doped diamond) umożliwia rozkład toksycznych i trudno degradowalnych związków w wodach i ściekach. Skuteczność anodowej destrukcji toksycznych związków z zastosowaniem elektrod BDD potwierdzono dla takich zanieczyszczeń jak m.in. fenol (Britto-Costa et al. 2012; Iniesta et al. 2001), bisfenol A (Yoshihara et al. 2009) oraz antybiotyki i inne środków farmaceutyczne (Calzadilla et al. 2021). Elektrody BDD znaleźć mogą zastosowanie także przy dezynfekcji wstępnie oczyszczonych ścieków z przydomowych biologicznych oczyszczalni ścieków (Haaken D. et al. 2012). Zaletą tych metod jest relatywnie niski koszt eksploatacji instalacji i wysoka wydajność dezynfekcji różnego rodzaju mikroorganizmów oraz brak konieczności przechowywania dużych ilości chemikaliów. Wadą często jest cena materiału podłoża elektrody (niob), jak i całych elektrod oraz generowanie produktów ubocznych dezynfekcji (nadchloranów i halogenków organicznych oraz nieorganicznych chloranów). W pracy [A1] wykazano, że istnieje możliwość zastąpienia drogiego materiału podłoża elektrod, jakim jest niob (Nb), podłożem węglik krzemu-grafit (SiC-C). Naniesienie domieszkowanej borem warstwy diamentowej (BDD) na nowy materiał umożliwia zachowanie skuteczności anodowego utleniania związków organicznych. W wyniku przeprowadzonych badań określono, że zaleca się, aby do celów mineralizacji elektrody charakteryzowały się powierzchnią o możliwie dużej wielkości ziaren, czyli powyżej 1,2  $\mu\text{m}$ .

Celem kolejnej pracy było opracowanie i optymalizacja metody ilościowego oznaczania rozpuszczonego węgla organicznego przy zastosowaniu elektrody diamentowej domieszkowanej borem. Dane doświadczalne, w tym badania wpływu parametrów procesowych i hydrochemicznych, wykazały ogólną przydatność badanego rozwiązania do opracowania w najbliższej przyszłości prototypu urządzenia do terenowych pomiarów rozpuszczonego węgla organicznego [A2]. Skuteczna mineralizacja związków organicznych na elektrodach BDD umożliwiła naukowcom z TU Dresden (Niemcy) opracowanie prototypu przenośnego analizatora rozpuszczonego węgla organicznego DOC (dissolved organic carbon). Prezentowany we wspólnej publikacji [A3] analizator DOC jest wyposażony w celę elektrolityczną z elektrodami diamentowymi domieszkowanymi borem (BDD). Elektrody te umożliwiają utlenienie związków organicznych do ditlenku węgla, a pomiar następuje przy wykorzystaniu detektora NDIR. Rozpuszczony węgiel organiczny (DOC) jest parametrem sumarycznym, który jest często stosowany do monitorowania jakości wody oraz do oceny skuteczności procesów oczyszczania. Skonstruowany przenośny prototyp udowodnił swoją zdolność operacyjną w programie monitoringu środowiska w północnych Indiach [A3]. Granica oznaczalności ( $0,31 \text{ mg C/dm}^3$ ) jest odpowiednia dla wielu zastosowań, takich jak analiza wody powierzchniowej, gruntowej i pitnej. Uzyskane dane są zgodne z tymi otrzymanymi za pomocą uznanych metod, takich jak spalanie wysokotemperaturowe.

### **Woltamperometryczna detekcja wybranych związków organicznych z zastosowaniem elektrod diamentowych domieszkowanych borem**

Publikacje związane z pozostałymi osiągnięciami naukowo-badawczymi dotyczącymi zastosowania elektrod diamentowych domieszkowanych borem do woltamperometrycznej detekcji wybranych związków organicznych:

[B1] Brycht M., Lochyński P., Berek J., Skrzypek S., Kuczewski K., Schwarzova-Peckova K.\*, Electrochemical study of 4-chloro-3-methylphenol on anodically pretreated boron-doped diamond electrode in the absence and presence of a cationic surfactant. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 771, 1–9. (2016). (IF=3,012)

[B2] Fischer J., González-Martín J., Lochyński P., Dejmková H., Schwarzová-Pecková K., Vega M.\*, Voltammetric study of triazole antifungal agent terconazole on sp<sup>3</sup> and sp<sup>2</sup> carbon-based electrode materials. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 863, 1–10. (2020). (IF=4,464)

Chlorofenole są powszechnie stosowane jako środki do konserwacji drewna, pestycydy, rozpuszczalniki, antyseptyki czy środki dezynfekujące i są substancjami zanieczyszczającymi środowisko. Wiele z nich, w tym 4-chloro-3-metylofenol (*p*-chloro-*m*-krezol, PCMC), znajduje się na liście priorytetowych zanieczyszczeń amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (EPA, 2014) lub w dyrektywie w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej Unii Europejskiej (Dyrektywa UE, 2008). Kryterium efektu organoleptycznego wynoszące 3000 µg/dm<sup>3</sup> dla tego zanieczyszczenia jest bardziej rygorystyczne niż innych najwyższych dopuszczalnych stężeń, które nie są podawane. Rozpuszczalność PCMC w wodzie jest umiarkowana, tj. 0,38 g/100 mL w temperaturze 20°C. PCMC został po raz pierwszy zarejestrowany jako pestycyd w Stanach Zjednoczonych w 1968 roku. US EPA klasyfikuje PCMC jako czynnik rakotwórczy grupy D, substancja chemiczna z niewystarczającą ilością informacji lub bez informacji, aby ją sklasyfikować (EPA, 1997). Zdecydowanie najczęściej stosowanymi metodami wykrywania chlorofenoli, w tym PCMC, są techniki chromatograficzne. W pracy [B1] przedstawiono możliwości zastosowania elektrod BDD do bezpośredniego oznaczania PCMC z wykorzystaniem metod woltamperometrycznych. Dotychczas niewiele uwagi poświęcono wykorzystaniu elektrod opartych na BDD do oznaczania tej priorytetowej substancji zanieczyszczającej. W związku z tym zbadano możliwość zastosowania elektrod BDD i woltamperometrii w obecności kationowego środka powierzchniowo czynnego (bromek cetylotrimetyloamoniowy; CTAB) oraz bez CTAB. PCMC zapewnia dobrze zdefiniowany i wysoce powtarzalny pik utleniania w obszarze od +1000 mV do +1200 mV (vs.Ag |AgCl, 3 mol/dm<sup>3</sup> KCl) w środowisku wodnym w zakresie pH 2,0-10,0. Ponadto najlepsze wyniki badań woltamperometrycznych uzyskano w obecności kationowego środka powierzchniowo czynnego (CTAB) przy wartościach pH wyższych niż 9, ze względu na jego elektrostatyczne oddziaływanie z anionem fenolanowym PCMC. W zoptymalizowanych warunkach eksperymentalnych opracowane metody elektroanalityczne wykazują granice wykrywalności w zakresie 10<sup>-7</sup> mol/dm<sup>3</sup> w środowisku alkalicznym (0,01 mol/dm<sup>3</sup> NaOH) w obecności CTAB.

Azole to grupa związków chemicznych stosowanych jako pestycydy lub środki farmaceutyczne. Terkonazol należy do syntetycznych triazolowych leków przeciwgrzybiczych, hamujących biosyntezę ergosterolu lub innych steroli, a tym samym zaburzających syntezę ściany komórkowej u grzybów. W publikacji [B2] po raz pierwszy zbadano elektrochemiczne zachowanie terkonazolu za pomocą woltamperometrii cyklicznej i różnicowej woltamperometrii pulsowej na elektrodzie diamentowej domieszkowanej borem (BDD) o różnej obróbce powierzchni. Terkonazol w roztworach wodnych w zakresie pH od 2,0 do 12,0 ulega utlenieniu w dwóch etapach. W pracy zaproponowano mechanizm tych procesów. Znalezione optymalne warunki do oznaczania terkonazolu w stężeniu 0,1 mol L<sup>-1</sup> buforze fosforanowym pH 7,2. Za pomocą różnicowej woltamperometrii pulsowej uzyskano najniższą granicę wykrywalności 0,40 µmol/dm<sup>3</sup> oraz doskonałą powtarzalność (RSD 1,1%).

## Ocena ryzyka zdrowotnego związanego z eksploatacją wód gruntowych

Publikacje związane z pozostałymi osiągnięciami naukowo-badawczymi dotyczącymi oceny ryzyka zdrowotnego związanego z eksploatacją wód gruntowych:

- [C1] Kubicz J., Pawełczyk A., **Lochyński P.**, Environmental health risk posed by contamination of the individual water wells. *Chemosphere*, 208, 247–256 (2018). (IF=5,108)
- [C2] Kubicz J., **Lochyński P.**, Pawełczyk A., Karczewski M., Effects of drought on environmental health risk posed by groundwater contamination. *Chemosphere*, 263 (2021). (IF<sub>2020</sub>=7,086)

W badaniach opisanych w publikacjach [C1 i C2] do celów oceny ryzyka dla zdrowia zastosowano zmodyfikowaną procedurę opartą na wytycznych Environmental Protection Agency (USA) dla projektu „Superfund” (EPA, 1991a, b). Zasady szacowania ekspozycji i potencjalnych dawek pobranych poszczególnych zanieczyszczeń dla rozpatrywanych populacji (EPA, 1992; Moya 2011). W pracy [C1] przedstawiono wyniki analiz próbek wody pobranych z indywidualnych studni przeznaczonych do zaopatrywania gospodarstw domowych na terenach niezurbanizowanych o niskiej gęstości zaludnienia i wielokrotnie niewystarczająco rozwiniętej infrastrukturze wodno-kanalizacyjnej. Analizowano próbki wody gruntowej pobrane z 22 studni na terenach wiejskich, w ramach programu Państwowego Monitoringu Środowiska w latach 2005-2015. Studnie zlokalizowane były na terenach, na których zachodzą procesy suburbanizacji, w pobliżu miast: Leszno, Zielona Góra, Legnica, Wrocław i Opole. W wodach gruntowych badanych punktów stwierdzono stosunkowo wysokie stężenia szkodliwych zanieczyszczeń, co może zwiększać ryzyko wystąpienia incydentów zdrowotnych dla narażonej populacji. W oparciu o wieloletnie pomiary prowadzone w poszczególnych punktach oraz dane toksykologiczne oceniono indywidualne ryzyko zdrowotne związane z działaniem rakotwórczym u ludzi, wynikające z bezpośredniego spożycia takiej wody oraz kontaktu skórniego. Określono również poziomy zagrożenie nierakotwórczych. Obliczenia wykazały, że używanie nieuzdatnionej wody do spożycia i kąpieli może spowodować wzrost zagrożenia mutagennego i toksycznego u ludzi pobierających wodę w wybranych punktach pomiarowych. W zależności od miejsca obliczony poziom zagrożenia nierakotwórczego wyrażony wskaźnikiem zagrożenia HI, który nie powinien przekraczać wartości 1, waha się między 0,6 a 3,6. Ponadto w wybranych punktach pomiarowych obliczenia wskazują na nadmierne ryzyko zachorowania na raka w ciągu całego życia i wskaźnik ELCR jest rzędu  $10^{-4}$ . Oznacza to, że przed spożyciem woda czerpana bezpośrednio z wybranych studni wymagałaby pewnego uzdatnienia. Inną możliwością jest wykorzystanie wody z alternatywnych źródeł lub możliwie szybki rozwój brakującej infrastruktury wodno-kanalizacyjnej. W artykule [C2] porównano zawartości zanieczyszczeń w próbkach wód podziemnych w okresie suszy i okresie referencyjnym w ponad stu punktach pomiarowych. Badania miały na celu określenie, czy susza wpływa na wzrost narażenia ludności na ryzyko zdrowotne. Stwierdzono, że pomimo wystąpienia suszy oczekiwany wzrost stężenia zanieczyszczeń w wodzie nie następuje we wszystkich lokalizacjach. Analiza wszystkich danych zebranych w regionach, w których prowadzono badania, wykazała ogólny trend wzrostu środowiskowego ryzyka zdrowotnego spowodowanego zmianami zanieczyszczenia wód podziemnych w okresie suszy.

## Ocena długoterminowego oddziaływania na środowisko zanieczyszczeń spowodowanych przez działalność górnictw oraz zastosowanie biosorbentów do usuwania jonów metali ciężkich

Publikacje związane z pozostałymi osiągnięciami naukowo-badawczymi dotyczącymi badań dendrochemicznych i oceny długoterminowego oddziaływania na środowisko zanieczyszczeń spowodowanych przez działalność górnictw, zastosowania biosorbentów do usuwania jonów metali ciężkich:

- [D1] Dobrzańska J., **Lochyński P.**, Kalbarczyk R., Ziemiańska M., Challenges in the Application of Dendrochemistry in Research on Historical Environmental Pollution in an Old Copper Mining Area. *Forests*, 12(11), 1505 (2021). (IF<sub>2020</sub>=2,634)
- [D2] Charazińska S., Burszta-Adamiak E., **Lochyński P.**, Recent trends in Ni(II) sorption from aqueous solutions using natural materials. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, published on-line (2021). (IF<sub>2020</sub>=8,044)
- [D3] Charazińska S., **Lochyński P.**, Burszta-Adamiak E., Removal of heavy metal ions from acidic electrolyte for stainless steel electropolishing via adsorption using Polish peats, *Journal of Water Process Engineering*, 42, 1-10, numer artykułu:102169 (2021). (IF<sub>2020</sub>=5,485)

Bieżące zainteresowania badawcze opublikowane w 2021 r. związane były z oceną długoterminowego oddziaływania na środowisko zanieczyszczeń spowodowanych przez działalność górnictw w miejscowości Iwiny (woj. dolnośląskie). Wykonano badania dendrochemiczne [D1], a materiał badawczy w postaci próbek drewna (*Quercus robur* L.) pobrano z drzewostanów rosnących na terenach zanieczyszczonych. W próbkach analizowano zawartość 11 pierwiastków (Cd, Mn, Ni, Zn, Cr, Co, Pb, Cu, Fe, Al, Ag) techniką ICP-OES oraz kontrolnie ICP-MS. Uzyskane wyniki wykazały silny, długofalowy wpływ przemysłu miedziowego, wyrażający się znacznym wzrostem średnich zawartości: Mn, Ni, Zn, Cr, Pb, Cu i Fe w drzewach z obszaru przemysłowego w porównaniu z próbą kontrolną [D1].

W obszarze zainteresowań badawczych znalazły się też prace dotyczące wykorzystania materiałów pochodzenia naturalnego stosowanych do adsorpcji jonów metali ciężkich z roztworów wodnych, ze szczególnym uwzględnieniem związków niklu. W pracy [D2] podjęto próbę klasyfikacji biosorbentów ze względu na ich pochodzenie. Z przeprowadzonych analiz wynika, że głównym trendem ostatnich lat jest wykorzystanie biomasy, jednak inne materiały pochodzenia naturalnego również cieszą się nieśląbnącym zainteresowaniem badaczy [D2]. W kolejnej pracy [D3] zbadano możliwość wykorzystania polskich borowin z 5 uzdrowisk (Połczyn Zdrój, Goczałkowice Zdrój, Wieniec Zdrój, Kamień Pomorski i Kołobrzeg) do sorpcji jonów metali ciężkich ze ścieków przemysłowych z procesu elektropolowania stali. Zastosowany materiał okazał się skuteczny zarówno dla modelowych ścieków laboratoryjnych, jak i przemysłowych, charakteryzujących się wysokimi stężeniami początkowymi metali takich jak żelazo, chrom, nikiel i miedź. Całkowita wydajność usuwania wynosiła 30,7 mg/g, a przeprowadzone badania wskazywały na następującą kolejność usuwania: Fe(III) > Cr(III) > Cu(II) > Ni(II). Sposób prowadzenia badań oraz właściwości przebadanych materiałów otwierają nowe możliwości usuwania jonów metali ciężkich w roztworach o odczynie kwaśnym bez uprzedniej korekty pH.

**Wykaz opublikowanych prac naukowych wnioskodawcy z zakresu inżynierii środowiska, analityki zanieczyszczeń, oceny ryzyka zdrowotnego oraz obróbki powierzchniowej materiałów metalowych zestawiono w załączniku 3, rozdział II. INFORMACJA O AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ.**

## Literatura

- Britto-Costa P. H.**, Ruotolo L. A. M. (2012). Phenol removal from wastewaters by electrochemical oxidation using boron doped diamond (BDD) and Ti/TiO<sub>2</sub>. 7RuO<sub>4</sub>. 3O<sub>2</sub> dsa® electrodes. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29(4), 763-773.
- Calzadilla W.**, Espinoza L. C., Diaz-Cru M. S., Sunyer A., Aranda M., Peña-Farfal C., Salazar R. (2021). Simultaneous degradation of 30 pharmaceuticals by anodic oxidation: Main intermediaries and by-products. *Chemosphere*, 269, 128753.
- Directive 2008/105/EC** of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council (OJ L 348, 24.12.2008, p. 84–97).
- Environmental Protection Agency (EPA)**, 1991a. Risk Assessment Guidance for Superfund. Vol. I. Human Health Evaluation Manual. Part B. Development of Risk-based Preliminary Remediation Goals. Interim. EPA/540R-92/003. Publication 9285.7e01B. Office of Emergency and Remedial Response. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. (1991)
- Environmental Protection Agency (EPA)**, 1991b. Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I, Human Health Evaluation Manual, Supplemental Guidance „Standard Default Exposure Factors”, OSWER Directive: 9285.6e03. (1991)
- Environmental Protection Agency (EPA)**, 1992. Guidelines for exposure assessment. Fed. Regist. 57 (104), 22888e22938 (1992).
- Environmental Protection Agency (EPA)**, 1997. Method EPA-738-F-96-018, prevention, pesticides and toxic substances (7508 W).
- Environmental Protection Agency (EPA)**, 2014. Priority pollutant list, <http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf> (accessed 2015-13-12)
- Haaken D.**, Dittmar T., Schmalz V., Worch E. (2012). Influence of operating conditions and wastewater-specific parameters on the electrochemical bulk disinfection of biologically treated sewage at boron-doped diamond (BDD) electrodes, *Desalination and Water Treatment*, 46:1-3, 160-167.
- Iniesta J.**, Michaud P. A., Panizza M., Cerisola G., Aldaz A., Comninellis C. (2001). Electrochemical oxidation of phenol at boron-doped diamond electrode. *Electrochimica Acta*, 46(23), 3573-3578.
- Yoshihara S.**, Murugananthan M. (2009). Decomposition of various endocrine-disrupting chemicals at boron-doped diamond electrode. *Electrochimica Acta*, 54(7), 2031-2038.

## 6. Udział w projektach badawczych i współpraca z gospodarką

W obszarze badań naukowych wnioskodawca prowadzi ponad 15-letnią współpracę z przemysłem elektrochemicznym – ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., dotyczącą bezpieczeństwa procesów, monitorowania zanieczyszczeń, zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w procesach elektrodowych, procesu neutralizacji oraz oczyszczenia ścieków, jak również ograniczania negatywnego oddziaływania procesów chemicznej i elektrochemicznej obróbki metali na środowisko. W ramach współpracy z Technische Universität Dresden wnioskodawca realizował badania dotyczące opracowania prototypu przenośnego urządzenia umożliwiającego oznaczanie węgla organicznego w warunkach polowych przy wykorzystaniu metod elektrochemicznych.

## Projekty zrealizowane w latach 2010-2020

- 2017.01.01  
– 2020.09.30
- Kierownik projektu badawczego** „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)”, finansowanego w ramach **programu LIDER przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju**, LIDER/22/0187/L-7/15/NCBR/2016. Opracowanie nowatorskiego modelu matematycznego, który pozwala na określenie granicznego zanieczyszczenia kąpeli stosowanych w przemysłowym procesie elektropolerowania stali chromowo-niklowych. Ponadto model ten ma zastosowanie nawet dla zmieniających się kosztów odczynników chemicznych oraz energii elektrycznej. **Dotychczas ukazało się 5 publikacji związanych z realizacją projektu [H2]-[H6] (Załącznik 2, str. 4).**
- 2017.10.01  
– 2019.03.31
- Wnioskodawca i wykonawca projektu** pt. „Niklowanie lutowanych elementów z miedzi i mosiądzu oraz zwiększenie bezpieczeństwa realizowanych procesów technologicznych” w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „MOZART”. W ramach projektu „Mozart” Miasto Wrocław udziela finansowego wsparcia partnerstwom naukowo-biznesowym.
- 2015.08.01  
– 2015.09.30
- Stypendysta Dresden Fellowship Program** Technische Universität Dresden (Niemcy). Podczas pobytu w Dreźnie **wykonywał badania do projektu NIRWINDU** finansowanego przez Bundesministerium für Bildung und Forschung (Niemcy). Projekt dotyczył opracowywania i testowania środków zapewniających zrównoważone dostawy wody pitnej w Indiach. Badania laboratoryjne przeprowadzone przez wnioskodawcę związane były z określeniem najbardziej korzystnego zakresu parametrów umożliwiających oznaczenie DOC (węgla organicznego) w badanych próbkach. W 2018 r. prototyp urządzenia do pomiaru węgla organicznego został przetestowany w Indiach podczas testów polowych wykonanych przez naukowców z Institut für Wasserchemie TU Drezno. Badania zrealizowane przez wnioskodawcę opublikowano: Glorian H., Schmalz V., **Lochyński P.**, Fremdling P., Boernick H., Worch E., Dittmar T., *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(11) (2018) 1-13 (IF=2,468).
- 2014.10.01  
– 2015.07.31;  
2015.10.01  
– 2016.05.31
- Wnioskodawca i wykonawca projektu** pt. „Rozwój stosowanych oraz wprowadzenie nowych usług z zakresu chemicznej i elektrochemicznej obróbki powierzchniowej metali” w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „MOZART”. W ramach projektu „Mozart” Miasto Wrocław udziela finansowego wsparcia partnerstwom naukowo-biznesowym. **Efektom projektu jest „Wdrożenie usługi chemicznego oczyszczania i pasywacji lutowanych wyrobów wykonanych z miedzi i mosiądzu” w ECM Sp. z o.o., luty 2015.**
- 2010.09.29  
– 2012.09.28
- Wykonawca grantu promotorskiego** „Elektropolerowanie stali austenitycznej typu 304”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, N N204 519139

## **Wybrane projekty i wdrożenia zrealizowane w latach 2006-2021 we współpracy z przemysłem**

### **Po uzyskaniu stopnia doktora**

- 1. Członek zespołu zaangażowanego w projekt modernizacji instalacji do neutralizacji ścieków (etap I) ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., 2020-2021 (pomysłodawca umieszczenia aż 4 zbiorników buforowych na ścieki technologiczne z uwzględnieniem ich różnego przeznaczenia)**
2. Członek zespołu zaangażowanego w projekt modernizacji największej wanny procesowej do elektropolerowania wraz ze zwiększeniem objętości roboczej z 16 m<sup>3</sup> do 18,5 m<sup>3</sup>, ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., 2020-2021 (organizowanie i moderowanie spotkań zespołu, wsparcie techniczne)
3. Zrealizowanie projektu pt. „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpieli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)” (program LIDER, NCBR) we współpracy z ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., 2017-2020 (kierownik projektu, pomysłodawca; opis projektu znajduje się powyżej)
4. Zrealizowanie 18-miesięcznego projektu w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „MOZART” pt. „Niklowanie lutowanych elementów z miedzi i mosiądzu oraz zwiększenie bezpieczeństwa realizowanych procesów technologicznych”, ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., 2017-2019 (wnioskodawca i wykonawca projektu; opis projektu znajduje się powyżej)
5. Dostosowanie dokumentacji Systemu Zarządzania Jakością do wymagań i zmian w normie ISO 9001:2015, ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., 2016-2017 (opracowanie macierzy ryzyka dla realizowanych procesów głównych i pomocniczych wraz z przeprowadzeniem oceny, uzupełnienie dokumentacji o nowe wymagania normy)
6. Członek zespołu zaangażowanego w przygotowanie projektu nowej linii procesowej do oczyszczania i pasywacji lutowanych wyrobów wykonanych z miedzi i mosiądzu, ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k., 2017-2018 (przygotowanie założeń projektowych związanych z przebiegiem poszczególnych etapów procesu i kontrolą parametrów, wsparcie techniczne)
- 7. Wdrożenie usługi chemicznego oczyszczania i pasywacji lutowanych wyrobów wykonanych z miedzi i mosiądzu w ECM Sp. z o.o., luty 2015**
8. Zrealizowanie 18-miesięcznego projektu w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „MOZART” pt. „Rozwój stosowanych oraz wprowadzenie nowych usług z zakresu chemicznej i elektrochemicznej obróbki powierzchniowej metali”, ECM Sp. z o.o., 2014-2016 (wnioskodawca i wykonawca projektu; opis projektu znajduje się powyżej)

### **Przed uzyskaniem stopnia doktora**

- 9. Opracowanie sposobu korekty kąpieli przemysłowych do elektropolerowania stali chromowo-niklowych i nadzór nad wdrożeniem w ECM Sp. z o.o., czerwiec-wrzesień 2012**

10. Wnioskodawca był odpowiedzialny za aplikację technologii i poszerzenie zakresu usług ECM Sp. z o.o. - elektropolerowanie aluminium, 2011-2012
11. Wnioskodawca był odpowiedzialny za aplikację technologii i poszerzenie zakresu usług ECM Sp. z o.o. - elektropolerowanie miedzi i mosiądzu, 2010-2011
12. Wnioskodawca był odpowiedzialny za aplikację technologii i poszerzenie zakresu usług ECM Sp. z o.o. - chromianowanie aluminium, 2010-2011
13. Wnioskodawca był zaangażowany w przygotowanie wniosku o uzyskanie pozwolenia wodnoprawnego dla ECM Sp. z o.o., 2010 (koordynator odpowiedzialny za przygotowanie wniosku)
14. Wnioskodawca był zaangażowany w przygotowanie projektu specjalistycznej linii do pasywacji stali nierdzewnej, opracowanie instrukcji technologicznej „Pasywacja z dichromianem potasu” oraz przygotował ECM Sp. z o.o. do audytu zewnętrznego przeprowadzonego przez ARTUS Aerospace & Demence Group, Francja, 2008-2009
15. Zaprojektowanie i koordynacja prac przebudowy Linii Technologicznej - Linia Automatyczna do Elektropolerowania i nadzór nad wdrożeniem w ECM Sp. z o.o., 2007
16. Przygotowanie dokumentacji Systemu Zarządzania Jakością, ECM Sp. z o.o., 2006-2008 (koordynowanie przygotowania procedur dotyczących procesów głównych i pomocniczych, opracowanie schematów blokowych dla poszczególnych procesów, pomoc w przygotowaniu pozostałych dokumentów SZJ)

## 7. Staże naukowe i współpraca z zagranicznymi ośrodkami badawczymi

**Współpraca z zagranicznymi ośrodkami badawczymi zainicjowana była odbyciem staży zagranicznych** w Technische Universität Dresden (Niemcy), Institut für Wasserchemie (**2013, 2015**) oraz Charles University of Prague (Czechy), UNESCO Laboratory of Environmental Electrochemistry (**2014**). Wnioskodawca wybrał powyższe grupy badawcze ze względu na zbieżne zainteresowania naukowe obejmujące wykorzystanie metod elektrochemicznych do detekcji i usuwania zanieczyszczeń organicznych w środowisku. **W ramach współpracy z TU Drezno** przygotowano **2 wspólne publikacje oraz materiały konferencyjne indeksowane w Web of Science**, a wyniki badań były prezentowane na **5 konferencjach naukowych w Polsce, Czechach i w Niemczech**. **W 2015 r. autor osiągnięcia był Laureatem DRESDEN Fellowship Programme - Technische Universität Dresden**, zagranicznego stypendium dla najlepszych naukowców. **W 2019 r. wnioskodawca był opiekunem miesięcznego stażu doktorantki z TU Drezno w ramach programu PROM (NAWA)**. Staż ten odbył się w Wydziałowym Laboratorium Badań Środowiskowych Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. W wyniku wspólnej wizyty studyjnej w Niemczech (25.07.2019 r.) doktorantka wnioskodawcy, której jest on promotorem pomocniczym, realizowała w 2020 r. 4-miesięczny staż naukowo-badawczy w Institut für Wasserchemie (TU Drezno).

**Efektym współpracy z UNESCO Laboratory of Environmental Electrochemistry, Charles University of Prague są 2 publikacje indeksowane w Web of Science i prezentacja wspólnych wyników badań na 1 konferencji naukowej. Ponadto od 2015 roku 4 dyplomantów wnioskodawcy realizowało swoje badania do prac inżynierskich w ramach 3-miesięcznych staży naukowo-badawczych na Charles University of Prague.**



W wyniku współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi powstały następujące publikacje w czasopismach z listy JCR *Przemysł Chemiczny* **2015**, 94(12), 2275-2278 (IF=0,367); *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **2016**, 771, 1-9 (IF=3,012); *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2018**, 15(11),1-13 (IF=2,468); *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **2020**, 863, 1-10 (IF=4,464).

### **Podoktorskie staże naukowo-badawcze zrealizowane w zagranicznych ośrodkach naukowych**

- 2021.09.13 – 2021.09.23 Staż naukowy w UNESCO Laboratory of Environmental Electrochemistry, Charles University of Prague (Czechy), Faculty of Science, Department of Analytical Chemistry. Poznanie możliwości zastosowania modyfikacji powierzchni elektrod diamentowych do detekcji zanieczyszczeń. Omówienie wstępnych założeń i możliwości wnioskowania o bilateralny projekt badawczy.
- 2015.08.01 – 2015.09.30 Zagraniczny staż naukowo-badawczy w Technische Universität Dresden (Niemcy), Institut für Wasserchemie. Badania były częścią międzynarodowego projektu NIRWINDU i dotyczyły prób laboratoryjnych, które miały na celu określenie zakresu parametrów umożliwiających jak najdokładniejsze wykrycie DOC (węgla organicznego) w badanych próbkach. W wyniku zrealizowanych badań powstały 2 prace naukowe i 3 zgłoszenia konferencyjne.
- 2014.09.02 – 2014.10.02 Zagraniczny staż naukowo-badawczy w UNESCO Laboratory of Environmental Electrochemistry, Charles University of Prague (Czechy), Faculty of Science, Department of Analytical Chemistry. Badania dotyczyły elektrochemicznej detekcji 4-chloro-3-metylofenolu (PCMC). W wyniku zrealizowanych badań powstała 1 publikacja i 1 zgłoszenie konferencyjne.
- 2013.07.01 – 2013.09.30 Zagraniczny staż naukowo-badawczy w Technische Universität Dresden (Niemcy), Institut für Wasserchemie. Badania były związane z wykorzystaniem elektrod diamentowych domieszkowanych borem (BDD) do elektrochemicznego utlenienia związków organicznych. W wyniku zrealizowanych badań powstała 1 publikacja i 2 zgłoszenia konferencyjne.

## **8. Działalność dydaktyczna i organizacyjna**

**Wnioskodawca jest promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr inż. Sylwii Charazińskiej pt. „Usuwanie niklu ze ścieków pochodzących z obróbki stali chromowo-niklowych”, której promotorem jest dr hab. inż. Ewa Burszta-Adamiak, prof. uczelni. Badania dotyczą wykorzystania materii organicznej do usuwania zanieczyszczeń ze ścieków pochodzących z obróbki stali chromowo-niklowych. Wszczęcie przewodu nastąpiło na 880 posiedzeniu Rady Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu w dniu 20 marca 2019 r.**

Wnioskodawca prowadził wykłady i ćwiczenia laboratoryjne z przedmiotów takich jak chemia, chemia wody i ścieków, metodologia badań naukowych, chemia budowlana, bezpieczeństwo chemiczne na kierunkach: inżynieria środowiska, inżynieria i gospodarka wodna, inżynieria bezpieczeństwa i budownictwo. Opracował program nowego przedmiotu: „bezpieczeństwo procesów technologicznych” i prowadzi zajęcia na studiach magisterskich. W ramach prowadzonych zajęć organizował praktyczne zajęcia dydaktyczne w JRG-3 zajmującej się ratownictwem chemicznym oraz w zakładach przemysłowych BOSCH oraz 3M.

Jest opiekunem 8 prac magisterskich oraz 11 prac inżynierskich. **Ponad połowa prac dyplomowych była realizowana we współpracy z otoczeniem gospodarczym, a jedna we współpracy z Jednostką Ratowniczo-Gaśniczą JRG-3 w Wrocławiu, 4 prace były wykonane we współpracy z naukowcami z Charles University of Prague. Badania były realizowane w ramach studenckich 3-miesięcznych zagranicznych staży naukowo-badawczych w Czechach.**

### **Wybrane zaangażowania oraz osiągnięcia wnioskodawcy w ramach działalności organizacyjnej, dydaktycznej i popularyzującej naukę**

- 2021 organizacja i przeprowadzenie zajęć laboratoryjnych dla uczniów z ZSET w Rakowicach Wielkich pt. „Zastosowanie spektrofotometrii (UV-VIS) do oznaczania Fe(III) i Fe(II) w wodzie”, Laboratorium Badań Środowiskowych, Instytutu Inżynierii Środowiska
- 2021 opracowanie koncepcji i koordynowanie nagrania filmu promującego Laboratorium Badań Środowiskowych Instytutu Inżynierii Środowiska
- 2021 - obecnie, opiekun roku na kierunku inżynieria środowiska na okres I i II cyklu kształcenia
- 2020 opracowanie koncepcji strony internetowej projektu „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)”, która umożliwi promocję założeń i efektów projektu: [www.ionsmonit.upwr.edu.pl](http://www.ionsmonit.upwr.edu.pl) (wersje językowe: polski, angielski)
- 2020 opracowanie koncepcji animacji popularno-naukowej promującej projekt IonsMonit <https://www.youtube.com/watch?v=jZuNCztvheQ> (lektor: język polski, napisy: język angielski)
- 2019 wykład w Institut für Wasserchemie TU Dresden obejmujący promocję zaplecza badawczego, projektów oraz kierunków badań realizowanych na Wydziale Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (Drezno, 25 lipca 2019)
- 2019 organizator i moderator seminarium naukowego Instytutu Inżynierii Środowiska dot. zdecentralizowanych systemów oczyszczania ścieków, monitorowania mikrozanieczyszczeń, usuwania jonów metali ciężkich oraz współpracy z Institut für Wasserchemie TU Dresden, prelegenci Dr. rer. nat. Thomas Dittmar, Yang Liu M. Sc. (Wrocław, 25 kwietnia 2019)
- 2019 - obecnie, członek rady dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (przedstawiciel grupy doktorów)
- 2019 - obecnie, członek Wiodącego Zespołu Badawczego „Woda – Klimat – Środowisko” na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu

- 2017 zaangażowanie i pomoc w przygotowaniu materiałów zdjęciowych do e-learningowego szkolenia BHP dla studentów rozpoczynających studia na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu
- 2016 pokaz i zajęcia praktyczne dla młodzieży szkolnej dotyczące chromatografii jonowej w ramach Dni Wody na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu oraz Dni Otwartych Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- 2016 - obecnie, członek rady programowej kierunku inżynieria bezpieczeństwa
- 2014 Markowska J., Markowski J., Lochyński P.: Holistyczne nauczanie przedmiotów przyrodniczych. Przygotowanie wykładu wraz z pokazem na Konferencji Inaugurującej Funkcjonowanie Sieci Nauczycieli Przedmiotów Przyrodniczych, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu (11-12 grudnia 2014)

## 9. Nagrody i wyróżnienia

- 2021 Laureat nagrody „Naukowiec Przyszłości 2021” w kategorii: „Nauka dla lepszego życia w przyszłości”. Nagroda przyznana za realizację projektu badawczego pt. „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)” oraz pozytywne podejście do upowszechniania dotychczasowych wyników przedsięwzięć wśród całego społeczeństwa (**załącznik**)
- 2021 Nagroda Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (zespołowa II stopnia) dla zespołu Paweł Wiercik, Paweł Lochyński za osiągnięcia naukowe
- 2020 Medal Stulecia Odzyskania Niepodległości nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej
- 2019 Nagroda Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (zespołowa I stopnia) dla zespołu Paweł Lochyński, Edyta Łyczkowska-Widłak w dziedzinie badań naukowych za cykl publikacji
- 2017 Wyróżnienie w konkursie na najlepszy poster pt. „Elektrochemiczne oczyszczanie kąpeli do elektropolerowania” dla zespołu w składzie Sylwia Charazińska, Edyta Łyczkowska-Widłak, Paweł Lochyński, XXV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Antykorozyja Systemy-Materiały-Powłoki
- 2017 Nagroda Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (zespołowa II stopnia) dla zespołu Paweł Lochyński, Krzysztof Kuczewski w dziedzinie badań naukowych za cykl publikacji
- 2016 Nagroda Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (zespołowa II stopnia) dla zespołu Paweł Lochyński, Krzysztof Kuczewski w dziedzinie badań naukowych za cykl publikacji
- 2014 I Nagroda im. prof. Żaka przyznana przez Polskie Towarzystwo Galwanotechniczne za pracę doktorską

## 10. Podsumowanie dorobku

**Zainteresowania badawcze wnioskodawcy obejmują wiele obszarów związanych z inżynierią środowiska** takich jak: oczyszczanie ścieków przemysłowych i ograniczanie powstawania zanieczyszczeń u źródła, zastosowanie zaawansowanych procesów utleniania AOP (Advanced Oxidation Processes) z wykorzystaniem elektrod diamentowych domieszkowanych borem czy ocena ryzyka zdrowotnego związanego z eksploatacją wód gruntowych. Dodatkowo wnioskodawca realizował badania dotyczące elektrochemicznej detekcji zanieczyszczeń, jak również elektrochemicznej obróbki metali i stopów. Jest członkiem Wiodącego Zespołu Badawczego „Woda – klimat – środowisko” na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu. Aktywnie uczestniczył w badaniach dotyczących elektrochemicznej detekcji 4-chloro-3-metylofenolu oraz stworzenia pionierskiego modelu monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania.

Dorobek naukowy, badawczy i wdrożeniowy wnioskodawcy obejmuje 40 opublikowanych prac naukowych (w tym przed doktoratem 12), 41 abstraktów, posterów i wystąpień konferencyjnych oraz **16 zrealizowanych projektów i wdrożeń dla przemysłu. 28 spośród 40 prac naukowych jest indeksowanych w Web of Science** (w tym przed doktoratem 4), a **23 prace posiadają współczynnik Impact Factor (w tym przed doktoratem 1)**. Wnioskodawca jest laureatem nagrody im. prof. Żaka przyznanej przez PTG za pracę doktorską.

Łączna liczba punktów MNiSW i MEiN wynosi **1428 (w tym przed doktoratem 36 punktów)** (Załącznik 3, tabela 1). Zgodnie z Web of Science, jak również bazą Scopus **indeks Hirscha wnioskodawcy wynosi 7, a suma cytowań według Web of Science 140** (Załącznik 3, tabela 1). Sumaryczny Impact Factor publikacji naukowych z listy Journal Citation Reports to **IF=60,303 (w tym przed doktoratem IF=0,344)**. Za prowadzoną działalność naukową wnioskodawca otrzymał cztery nagrody Rektora - I i II stopnia. Recenzował 9 artykułów naukowych dla międzynarodowych czasopism, m.in. dla Chemosphere (Elsevier), Journal of Materials Processing Technology (Elsevier), czy Urban Water Journal (Taylor & Francis).

Wnioskodawca realizował badania w **3 projektach badawczych krajowych i zagranicznych** (w tym 1 przed doktoratem) finansowanych przez **MNiSzW i NCBR (Polska), BBF (Niemcy)** oraz w **2 projektach na rzecz podmiotów gospodarczych**. Był głównym wykonawcą grantu finansowanego przez MNiSzW, następnie po uzyskaniu stopnia doktora dwukrotnie realizował 18-miesięczne projekty w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „MOZART”, a w latach **2017-2020 kierował grantem finansowanym przez NCBR**. Wnioskodawca był zaangażowany w wykonanie badań w ramach **międzynarodowego projektu NIRWINDU** finansowanego przez Bundesministerium für Bildung und Forschung (Niemcy), który dotyczył opracowania i testowania środków zapewniających zrównoważone dostawy wody pitnej w Indiach.

Wnioskodawca dr inż. Paweł Lochyński był pomysłodawcą i kierownikiem projektu badawczego pt. „**Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)**” (2017-2020, NCBR, LIDER). Opracował metodykę badawczą odnoszącą się do zrealizowanych prac badawczych, realizował badania w skali technicznej, dokonywał interpretacji wyników badań i podejmował decyzję w zakresie badań uzupełniających. Dodatkowo koordynował pracę 5-osobowego zespołu badawczego w czasie trwania projektu.

Pismem z dnia 6 września 2021 r. NCBR uznało projekt za wykonany w całości. Rezultatem przeprowadzonych badań było opracowanie modelu matematycznego umożliwiającego

**monitorowanie zanieczyszczeń kąpeli procesowych do elektropolerowania stali chromowo-niklowych, redukcję zanieczyszczeń u źródła ich powstawania.**

Zrealizowano również badania w zakresie oczyszczania i neutralizacji ścieków z procesów trawienia i elektropolerowania stali chromowo-niklowych. **Za zrealizowanie projektu oraz jego efekty wnioskodawca został wyróżniony nagrodą „Naukowiec Przyszłości 2021” w kategorii: „Nauka dla lepszego życia w przyszłości”.**

**Wnioskodawca od ponad 7 lat współpracuje z dwoma zagranicznymi ośrodkami badawczymi z Niemiec i Czech: Institut für Wasserchemie, Technische Universität Dresden oraz UNESCO Laboratory of Environmental Electrochemistry, Charles University of Prague. W tych jednostkach badawczych odbył 4 zagraniczne staże naukowo-badawcze w okresie 2013-2020. Wnioskodawca wybrał powyższe grupy badawcze ze względu na zbieżne zainteresowania naukowe obejmujące wykorzystanie metod elektrochemicznych do detekcji i usuwania zanieczyszczeń organicznych w środowisku. Wyniki wspólnych badań były prezentowane na 6 konferencjach naukowych w Polsce, Czechach i w Niemczech. Dotychczas ukazało się 5 prac naukowych będących efektem współpracy zagranicznej (4 publikacje oraz 1 materiały konferencyjne indeksowane w Web of Science), m.in.: *Przemysł Chemiczny* **2015**, 94(12), 2275-2278 (IF=0,367); *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **2016**, 771, 1-9 (IF=3,012); *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2018**, 15(11),1-13 (IF=2,468); *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **2020**, 863, 1-10 (IF=4,464).**

**W 2015 r. wnioskodawca otrzymał stypendium zagraniczne dla najlepszych naukowców DRESDEN Fellowship Programme - Technische Universität Dresden.** W 2019 był opiekunem miesięcznego stażu doktorantki z TU Drezno w ramach programu PROM (NAWA). Staż ten odbył się w Laboratorium Badań Środowiskowych Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. W wyniku wspólnej wizyty studyjnej w Niemczech (25.07.2019) doktorantka wnioskodawcy, której jest on promotorem pomocniczym, realizowała w 2020 4-miesięczny staż naukowo-badawczy w Institut für Wasserchemie (TU Drezno). Ponadto od 2015 roku 4 dyplomantów wnioskodawcy realizowało swoje badania do prac inżynierskich w ramach 3-miesięcznych staży naukowo-badawczych na Charles University of Prague.

**Od ponad 15 lat wnioskodawca współpracuje z przemysłem elektrochemicznym - ECM Sp. z o.o. i Wspólnicy Sp. k.** Prowadzone badania i projekty dotyczyły m.in. bezpieczeństwa procesów, wprowadzenia nowych usług, monitorowania zanieczyszczeń, zmniejszenia zużycia energii elektrycznej w procesach elektrodowych, procesu neutralizacji oraz oczyszczenia ścieków, jak również ograniczania negatywnego oddziaływania procesów chemicznej i elektrochemicznej obróbki metali na środowisko. Przed uzyskaniem stopnia doktora wnioskodawca był zaangażowany w przygotowanie wniosku o pozwolenie wodno-prawne dla ECM Sp. z o.o. oraz przygotowanie dokumentacji Systemu Zarządzania Jakością (koordynowanie przygotowania procedur i instrukcji technologicznych). Zaprojektował i koordynował prace przebudowy Linii Technologicznej - Linia Automatyczna do Elektropolerowania (2007). Ponadto był odpowiedzialny za aplikację technologii i poszerzenie zakresu usług o elektropolerowanie miedzi i mosiądzu oraz aluminium, chromowanie aluminium.

**Jest autorem wdrożenia dotyczącego opracowania sposobu korekty kąpeli przemysłowych do elektropolerowania stali chromowo-niklowych (2012). Po uzyskaniu stopnia doktora zrealizował wdrożenie usługi chemicznego oczyszczania i pasywacji lutowanych wyrobów wykonanych z miedzi i mosiądzu (2015).** Ponadto był odpowiedzialny za dostosowanie dokumentacji Systemu Zarządzania

Jakością do wymagań zmian w normie ISO 9001:2015, przygotowanie instrukcji stanowiskowej obsługi instalacji do neutralizacji ścieków oraz był członkiem zespołu zaangażowanego w projekt modernizacji instalacji do neutralizacji ścieków (2020-2021). Wykonywał badania w skali technicznej do projektu „Pionierski model monitorowania zanieczyszczeń kąpieli procesowych do elektropolerowania (IonsMonit)” (2017-2020) oraz zrealizował dwa projekty w ramach Miejskiego Programu Wsparcia Partnerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki oraz Sektora Aktywności Gospodarczej „MOZART”, trwające po 18 miesięcy każdy (2014-2016, 2017-2019).

**Wnioskodawca jest promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr inż. Sylwii Charazińskiej**, wykonywanym pod opieką dr hab. inż. Ewy Burszty-Adamiak, prof. uczelni. Badania dotyczą wykorzystania materii organicznej do usuwania zanieczyszczeń ze ścieków przemysłowych. W trakcie pracy na UPWr wnioskodawca prowadził wykłady i zajęcia laboratoryjne z 6 przedmiotów na 4 kierunkach studiów. Opracował nowy przedmiot: „bezpieczeństwo procesów technologicznych” na studiach magisterskich. Był opiekunem 8 prac magisterskich oraz 11 prac inżynierskich. **Ponad połowa prac dyplomowych była realizowana we współpracy z otoczeniem gospodarczym**, a jedna we współpracy z Jednostką Ratowniczo-Gaśniczą JRG-3 w Wrocławiu, 4 prace były wykonane we współpracy z naukowcami z Charles University of Prague (Czechy).

**Wnioskodawca dwukrotnie został wybrany na przedstawiciela grupy doktorów w wyborach do rady dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (2019, 2020). Od pięciu lat jest też członkiem rady programowej kierunku inżynieria bezpieczeństwa.** W ramach działalności popularyzującej naukę opracował koncepcję strony internetowej [www.ionsmonit.upwr.edu.pl](http://www.ionsmonit.upwr.edu.pl) oraz animacji popularno-naukowej promującej projekt IonsMonit (2020), był zaangażowany w pomoc w przygotowaniu materiałów zdjęciowych do e-learningowego szkolenia BHP dla studentów rozpoczynających studia na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu (2017), zrealizował pokaz i zajęcia praktyczne dotyczące chromatografii jonowej dla młodzieży szkolnej w ramach Dni Wody na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu (2016) oraz Dni Otwartych Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (2016). Był współtwórcą wykładu i pokazu dotyczącego holistycznego nauczania przedmiotów przyrodniczych na Konferencji Inaugurującej Funkcjonowanie Sieci Nauczycieli Przedmiotów Przyrodniczych (2014).

Za działalność społeczną, która wykracza poza zakres osiągnięć naukowych, dydaktycznych i organizacyjnych, wnioskodawca w 2020 roku został odznaczony przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej Medalem Stulecia Odzyskania Niepodległości.



(podpis wnioskodawcy)