

Autoreferat

dr inż. Agnieszka Sobianowska-Turek

Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów
Wydział Inżynierii Środowiska
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 2025

1. Imię i nazwisko

Agnieszka Sobianowska-Turek

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne

2009 - doktor nauk technicznych (dyscyplina: Inżynieria środowiska)

Politechnika Wrocławska

Wydział Inżynierii Środowiska

Praca doktorska pt.: *Odzysk cynku i manganu z baterii Zn-C i Zn-Mn*

Promotor: prof. dr hab. inż. Włodzimierz Szczepaniak

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Marcinkowski, prof. dr hab. Kazimierz Szymański

2005 - magister inżynier (specjalność: Metalurgia chemiczna i korozja materiałów)

Politechnika Wrocławska

Wydział Chemiczny

Praca magisterska pt.: *Określenie optymalnego stężenia mieszanin kwasów C2-C6 alkili, mono, difosfonowych i aminoalkilofosfonowych do ochrony przed korozją stali St3s w wodnych układach chłodzących*

Promotor: dr hab. inż. Falewicz P., prof. PWr

Recenzent: dr hab. inż. Jan Masalski

Katholieke Hogeschool Sint-Lieven, Gent Belgia

Stypendium naukowo-badawcze SOCRATES – ERASMUS

Praca badawcza nt.: *Examination of antibacterial activity of salts of weak acids, and plant extracts*

Opiekun stażu: prof. dr inż. Hubert Paelinck

22.03.2005 - 16.06.2005

3. Studia podyplomowe

2014 - menadżer projektów badawczo-rozwojowych

Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu Menedżer Projektu Badawczo-Rozwojowego – studia podyplomowe dla pracowników naukowych Projekt Współfinansowany ze Śródków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki i realizowany pod nadzorem Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

4. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

X.2012 - obecnie adiunkt

Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów

X.2009 – IX.2012 samodzielny analityk

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

II.2008 – V.2009 *samodzielny analityk*

Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Laboratorium Toksykologii i Badań Środowiskowych

5. Informacje o zatrudnieniu poza jednostkami naukowymi realizujących prace badawczo-naukowo-wdrożeniowe

X.2020 – obecnie specjalista, Kierownik badań nad technologią recyklingu LIBs, **konsultant**

Zatrudnienie w firmie Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. realizującej projekt B+R+F pt.: *Opracowanie i pierwsze wdrożenie przemysłowe innowacyjnych technologii recyklingu baterii litowo-jonowych i katalizatorów z odzyskiem metali o strategicznym znaczeniu*, dotyczący rozwoju technologii bezpiecznego, przyjaznego środowisku i efektywnego finansowo transportu, przechowania i recyklingu baterii Li-ion oraz zużytych katalizatorów samochodowych. Projekt został opisany w tzw. projekt portfolio, przedstawionym Komisji Europejskiej w ramach programu Important Projects of Common European Interest (IPCEI) on Batteries. Czas realizacji projektu 2020 - 2027. Całkowity budżet projektu na lata 2020 – 2023, 383 959 417 zł

6. Osiągnięcia naukowe, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. z poz. 478 z późn. zm.)

6.1. Osiągnięcia naukowe stanowiące znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Na osiągnięcie naukowe opisane w habilitacji składają się **dwa dokonania**, tj.: cykl tematycznie powiązanych artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2b oraz zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2c ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

6.1.1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych

a. Tytuł osiągnięcia naukowego

***Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii.
Analiza mechanizmów procesów i implikacje dla gospodarki cyrkularnej.***

b. Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

IF: współczynnik oddziaływania zgodnie z rokiem opublikowania

MNiSW: liczba punktów MNiSW za publikację obowiązująca w 2025 roku

IC: liczba cytowani wg bazy Scopus bez autocytowań, w zestawieniu wykluczono te prace cytujące, w których pojawia się chociaż jeden z autorów pracy cytowanej

✉: autor korespondencyjny

H-1.Agnieszka Sobianowska-Turek✉, Włodzimierz Szczepaniak, Monika Zabłocka-Malicka. *Electrochemical evaluation of manganese reducers - recovery of Mn from Zn-Mn and Zn-C battery waste*. Journal of Power Sources. 2014, 270, 668-674. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.136>

(IF:6.217; MNiSW:140; IC:30)

H-2.Agnieszka Sobianowska-Turek✉, Włodzimierz Szczepaniak, Paweł Maciejewski, Małgorzata Gawlik-Kobylińska. *Recovery of zinc and manganese, and other metals (Fe, Cu, Ni, Co, Cd, Cr, Na, K) from Zn-MnO₂ and Zn-C waste batteries : hydroxyl and carbonate co-precipitation from solution after reducing acidic leaching with use of oxalic acid*. Journal of Power Sources. 2016, 325, 220-228. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.06.042>

(IF:6.395; MNiSW:140; IC:62)

H-3.Irena Szczygieł, Katarzyna K. Winiarska✉, **Agnieszka Sobianowska-Turek**. *The study of thermal, microstructural and magnetic properties of manganese-zinc ferrite prepared by co-precipitation method using different precipitants*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018, 134, 51-57. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-018-7417-2>

(IF:2.471; MNiSW:100; IC:14)

H-4.Agnieszka Sobianowska-Turek✉, Katarzyna L. Grudniewska, Paweł Maciejewski, Małgorzata Gawlik-Kobylińska. *Removal of Zn(II) and Mn(II) by ion flotation from aqueous solutions derived from Zn-C and Zn-Mn(II) batteries leaching*. Energies. 2021, 14, 5, 1335, 1-12. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1335>

(IF:3.252; MNiSW:140; IC:7)

H-5.Agnieszka Sobianowska-Turek✉. *Hydrometallurgical recovery of metals: Ce, La, Co, Fe, Mn, Ni and Zn from the stream of used Ni-MH cells*. Waste Management. 2018, 77, 213-219. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.046>

(IF:5.431; MNiSW:200; IC:33)

H-6. Agnieszka Sobianowska-Turek, Weronika Urbańska✉, Anna Janicka, Maciej Zawiślak, Jędrzej Matla. *The necessity of recycling of waste Li-Ion batteries used in electric vehicles as objects posing a threat to human health and the environment*. Recycling. 2021, 6, 2, 35, 1-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/recycling6020035>

(IF:0; MNiSW:20; IC:39)

H-7. Katarzyna Leszczyńska-Sejda✉, Andrzej Chmielarz, Dorota Kopyto, Michał Ochmański, Grzegorz Benke, Arkadiusz Palmowski, **Agnieszka Sobianowska-Turek**✉, Przemysław Łoś, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Karolina Goc. *An innovative method of leaching of battery masses produced in the processing of Li-Ion battery scrap*. Applied Sciences. 2024, 14, 1, 397, 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010397>

(IF:2.5; MNiSW:100; IC:0)

H-8. Agnieszka Sobianowska-Turek, Amelia Zielińska, Weronika Urbańska, Anna M. Mielniczek, Agnieszka Fornalczyk✉, Szymon Pawlak, Tomasz Matysa, Janusz Cebulski. *Optimizing acidic reductive leaching for lithium recovery: enhancing sustainable lithium supply for energy markets*. Energies. 2025, 18, 2, 398, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020398>

(IF:3.0; MNiSW:140; IC:1)

H-9. Agnieszka Sobianowska-Turek✉, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Michał Janosz. *Recovery of technical Li_2CO_3 from dust obtained after pyrometallurgical processing of Li-ion battery masses on a quarter-technological scale*. Waste Management. 2025, 204, 114943. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114943>

(IF:7.1; MNiSW:200; IC:0)

W/w publikacje składające się na osiągnięcie naukowe (zgodnie z rokiem opublikowania prac) sumaryczną wartość Impact Factor IF = 36.366 przy liczbie cytowań 186 (bez autocytowań z bazy Scopus). Łączna liczba punktów MNiSW za publikację obowiązująca w 2025 roku MNiSW = 1180.

c. Omówienie celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników

Moje osiągnięcie naukowe obejmuje **9 prac od H-1 do H-9** poświęconych zagadnieniom modelowania i/lub projektowania oraz badania procesów hydrometalurgicznych i pirometalurgicznych odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów wraz z implikacją uzyskanych wyników dla gospodarki cyrkularnej w warunkach przemysłowych, co szczegółowo przedstawione zostało w Podpkt. 6.1.2. *Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne,*

technologiczne lub artystyczne, niniejszego autoreferatu. Wskazane poniżej prace naukowe koncentrują się wokół zaawansowanych procesów przeróbki i/lub recyklingu przemysłowych odpadów chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów, tj.: baterii cynkowo-węglowych (Zn-C), baterii cynkowo-manganowych (Zn-Mn, alkalicznych), akumulatorów niklowo-wodorkowych (Ni-MH) oraz akumulatorów litowo-jonowych (Li-ion, LIBs). Prowadzone przeze mnie prace badawcze ewoluowały wraz z dynamicznymi zmianami wprowadzanych na rynek chemicznych źródeł energii. Celem nadrzędnym projektowanych i badanych przeze mnie procesów hydrometalurgicznych i/lub pirometalurgicznych było zawsze realne odpowiadanie na aktualne potrzeby odzysku surowców z baterii i akumulatorów różnego typu i rodzaju dominujących w strumieniu omawianych odpadów.

Badania te zaliczyć można do rozwijanych na świecie technologii odzysku elementarnego, uwarunkowanych na przetwarzanie różnego typu odpadów w surowce podstawowe, ewentualnie w nowe produkty, odmienne od zawartych w oryginalnych odpadach. Szczegółowa analiza porównawcza uzyskanych wyników prac modelowych oraz eksperymentalnych pozwoliła na opracowanie sposobów gospodarowania odpadami chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów w Polsce i Unii Europejskiej, obejmującej zarządzaniem odpadami (zbiórka i sortowanie), unieszkodliwianie odpadów (odpowiednio dobrana metoda mechaniczna) oraz zaprojektowanie technologii odzysku surowców do ponownego wykorzystania (odpowiednio dobrane metody pirometalurgiczne i/lub hydrometalurgiczne), spełniając wymogi litery obowiązującego polskiego prawa, tj.: Ustawy z dnia 24 kwietnia 2009 roku o bateriach i akumulatorach (Dz. U. 2009 nr 79 poz. 666), (ISAP, 2025).

➤ **Wstęp teoretyczny**

W obliczu intensywnego rozwoju technologii magazynowania energii, szczególne znaczenie zyskują zagadnienia odzysku surowców z zużytych chemicznych źródeł energii, nietładowalnych baterii, ogniw pierwszego rodzaju cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych oraz ładowalnych akumulatorów, ogniw drugiego rodzaju niklowo-wodorkowych i litowo-jonowych (Czerwiński, 2005; Lin i współ., 2022). Tradycyjne nietładowalne baterie Zn-C i Zn-Mn, powszechnie stosowane jeszcze na początku XXI wieku, zostały w znacznym stopniu zastąpione przez baterie i akumulatory nowej generacji początkowo Ni-MH, a obecnie dominujące ogniwa Li-ion. Zmiana ta pociągnęła za sobą istotne wyzwania środowiskowe, gospodarcze i technologiczne, związane z rosnącą ilością odpadów polimetalicznych oraz potrzebą efektywnego odzysku metali krytycznych, takich jak lit, kobalt, nikiel, mangan czy miedź do ponownej produkcji chemicznych źródeł energii. Zarówno tych litowych (niklowo-manganowo-kobaltowych - NMC, litowo-żelazowo-fosforowych - LFP, litowo-tytanowych - LTO, litowo-kobaltowych - LCO, litowo-manganowych - LMO, niklowo-kobaltowo-aluminiowych - NCA) ale też nowoprojektowanych nielitowych ogniwa sodowo-jonowych (Na-ion), cynkowo-

jonowych (ZIB), manganowo-jonowych (MIB), alumiowo-jonowych (AIB), chlorkowo-jonowych (CIB) czy fluorkowo-jonowych (FIB), które w niedługim czasie będą zastępować ogniwa LIBs (Lee i współ., 2025; Łoś i współ., 2024; Zhang i współ., 2022). Zgodnie z danymi Międzynarodowej Agencji Energii, w 2019 roku odpady baterii litowo-jonowych z pojazdów elektrycznych przekroczyły 500 000 ton, a do roku 2040 przewiduje się ich wzrost do ponad 8 mln ton rocznie (Lee i współ., 2025). W samej Europie sprzedaż baterii litowo-jonowych ma osiągnąć 250–1100 GWh do 2026 roku, z dalszym wzrostem do 4000 GWh do 2040 roku (Bruno i Fiore, 2025).

W obliczu ograniczonej dostępności surowców pierwotnych (rud) oraz niestabilności ich cen, recykling chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów staje się kluczowym elementem gospodarki cyrkularnej na całym świecie (Li i współ., 2025a; Li i współ., 2025b). Wśród stosowanych technologii odzysku dominują metody hydrometalurgiczne i/lub pirometalurgiczne poprzedzone metodami mechanicznymi (Kaas i współ., 2025).

Metody separacyjne (mechaniczne) stosowane są najczęściej do baterii i akumulatorów dużych (typu przemysłowego oraz samochodów elektrycznych, BEV – *Battery Electric Vehicles*) oraz jako operacja wstępna do większości technologii przeróbczych. Polegają one na mechanicznym rozluźnieniu struktury (korpusu) ogniwa i rozdzielaniu komponentów o charakterystycznych właściwościach fizycznych i/lub chemicznych (gęstości, rozmiarze, właściwościach magnetycznych i temperaturze parowania oraz kondensacji elektrolitu). Te czynności są zwykle proste i tańsze od innych procesów i z tego powodu stosowane są do przygotowania strumienia materiałowego przede wszystkim mas bateryjnych do dalszej przeróbki metodami metalurgii chemicznej (Ma i współ., 2025).

Procesy pirometalurgiczne (termiczne, wysokotemperaturowe) polegają na odzysku materiałów (w szczególności metali) poprzez przeprowadzenie ich w odpowiednio wysokich temperaturach do określonych faz skondensowanych (w tym stopu metalicznego i pyłu) lub do fazy gazowej z późniejszą kondensacją. Generalnie metody te są właściwe dla faz bogatych w odzyskiwane składniki, ewentualnie koncentrujących się w podwyższonych temperaturach w fazie gazowej (dotyczy to na przykład usuwania rtęci, pozyskiwania kadmu lub cynku). W odniesieniu do baterii i akumulatorów procesy te prowadzone mogą być zarówno w tradycyjny sposób, tj. korzystając z równowag utleniająco-redukujących układu wodoru – węgiel – tlen (HCO), jak i w sposób rozszerzony, który jest właściwy dla zaawansowanej metalurgii chemicznej, gdy wykorzystywane są procesy chlorowania (Latini i współ., 2022). Zaletą metod termicznych jest możliwość poddawania recyklingowi różnego rodzaju baterii i ogniw, w tym także zawierających zróżnicowane materiały organiczne co w przypadku ogniw litowo-jonowych jest kluczowe ze względu na elektrolity, które składają się z mieszaniny roztworów rozpuszczalników organicznych (Sobianowska-Turek i współ., 2023).

Procesy hydrometalurgiczne polegają na kwaśnym lub alkalicznym ługowaniu odpowiednio przygotowanych odpadów baterii i akumulatorów (po obróbce mechanicznej i/lub termicznej). Po nim następuje ciąg operacji fizykochemicznych, które prowadzą do rozdzielenia i koncentracji właściwych lub uciążliwych składników pomiędzy odpowiednie fazy, aż do produktów handlowych i półproduktów dla odrębnych procesów technologicznych pirometalurgicznych i/lub hydrometalurgicznych lub odpadów. Uważa się, że procesy hydrometalurgiczne są mniej energochłonne od pirometalurgicznych lecz odpady ciekłe, jak i stałe są bardziej uciążliwe dla środowiska. Zaletą procesów hydrometalurgicznych jest to, że umożliwiają w większości przypadków selektywny odzysk metali o podobnych właściwościach fizyko-chemicznych, na przykład niklu, kobaltu i manganu, co jest kluczowe w przetwarzaniu ogniw litowo-jonowych (Shen i współ., 2025).

Z perspektywy ekonomicznej, skuteczny recykling chemicznych źródeł energii różnego typu i rodzaju ma potencjał zmniejszenia kosztów produkcji nowych baterii i akumulatorów poprzez stabilizację dostaw surowców wtórnych (Rezaei i współ., 2025; Gao i współ., 2023). W obliczu tych wyzwań, gospodarka cyrkularna staje się niezbędnym elementem strategii zapewnienia stabilnych dostaw surowców do Unii Europejskiej. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1252 z dnia 11 kwietnia 2024 roku w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany rozporządzeń (UE) nr 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 i (UE) 2019/1020 (EUR-Lex, 2025a), podkreśla znaczenie recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów, co ma na celu zmniejszenie zależności od importu surowców strategicznych z Chińskiej Republiki Ludowej, Stanów Zjednoczonych Ameryki czy Kanady. Z tego powodu projektowanie i wdrażanie do warunków przemysłowych innowacyjnych, modułowych oraz hybrydowych pirometalurgicznych i/lub hydrometalurgicznych technologii recyklingu chemicznych źródeł energii różnego typu i rodzaju oraz rozwój lokalnych łańcuchów dostaw są kluczowe dla osiągnięcia następujących celów, tj.: co najmniej 10% rocznego zużycia surowców krytycznych ma pochodzić z wydobycia w Unii Europejskiej, co najmniej 40% ma być przetwarzane w krajach unijnych, co najmniej 25% ma pochodzić z recyklingu, a udział importu z jednego kraju trzeciego nie powinien przekraczać 65% rocznego zużycia danego surowca (EUR-Lex, 2025a).

Omówione poniżej prace naukowe i zawarte w nich wyniki koncentrują się na eksperymentalnych badaniach procesów odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii baterii Zn-C i Zn-Mn oraz akumulatorów Ni-MH i Li-ion. Jako naukowiec zajmujący się tematyką zrównoważonego rozwoju i gospodarki cyrkularnej, pragnę podkreślić, że przedstawione w nich wyniki badań dotyczą mechanizmów efektywnego odzysku metali, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów technologicznych i środowiskowych. Wykonane przeze mnie analizy uzyskanych danych eksperymentalnych pozwalają nie tylko lepiej zrozumieć przebieg procesów recyklingu odpadów

polimetalicznych chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów ale także wskazuje na ich potencjał w kontekście wdrażania zasad gospodarki cyrkularnej, przyczyniając się do zmniejszenia negatywnego wpływu elektryfikacji na środowisko oraz zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów.

➤ **Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii baterii cynkowo-węglowych (Zn-C) i cynkowo-manganowych (Zn-Mn)**

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w listopadzie 2009 roku kontynuowałam współpracę z firmą KGHM ECOREN S.A. (wcześniejsze nazwy firmy DKE Sp. z o.o., ECOREN DKE, obecna KGHM METRACO S.A.), koncentrując się na dalszym rozwoju innowacyjnej hydrometalurgicznej technologii recyklingu odpadów baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych, gromadzonych i przetwarzanych mechanicznie w przedsiębiorstwie, co szczegółowo opisane zostało w Podpkt. 6.1.2. *Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne*, niniejszego autoreferatu. Kontynuowane przeze mnie prace naukowo-badawcze w tym obszarze w początkowym etapie skupiały się na pogłębionej analizie mechanizmów procesów hydrometalurgicznych, których podstawowe założenia i skuteczność zostały wykazane podczas realizacji rozprawy doktorskiej. W dalszym ciągu przedmiotem mojego zainteresowania była masa bateryjna (frakcja paramagnetyczna), stanowiąca główny nośnik cynku i manganu, której potencjał odzysku został potwierdzony wcześniej w warunkach laboratoryjnych. Niemniej jednak szczególny nacisk położyłam na teoretyczne rozważania prowadzące do opracowania optymalnych warunków kwaśnego ługowania masy bateryjnej oraz analizę efektywności wykorzystania różnych reduktorów dla reakcji zmiany stopnia utlenienia manganu zgodnie z reakcją podstawową $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$, co zostało zaprezentowane w manuskrypcie:

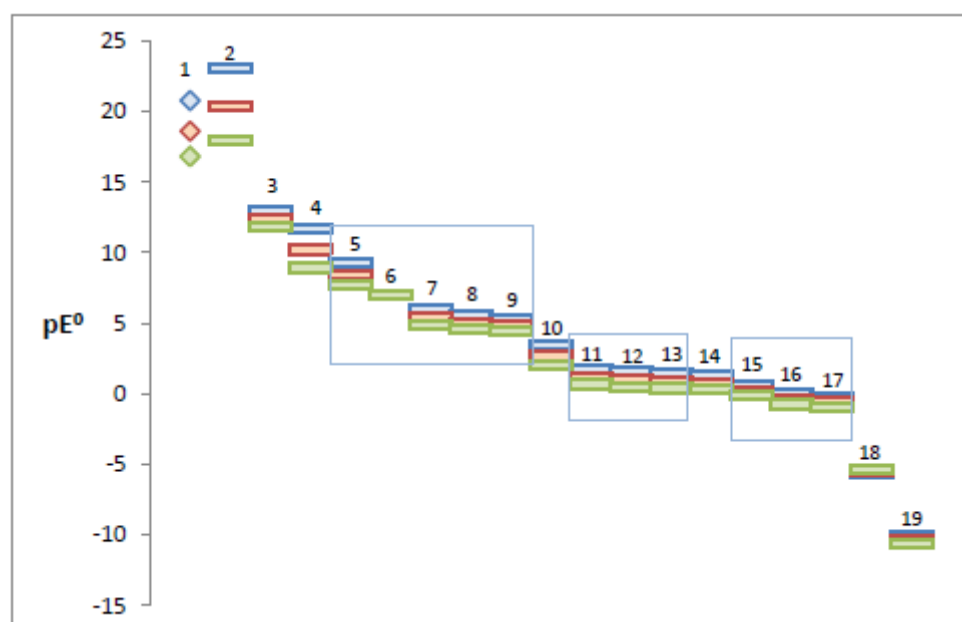
H-1. Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Monika Zabłocka-Malicka. ***Electrochemical evaluation of manganese reducers - recovery of Mn from Zn-Mn and Zn-C battery waste.*** Journal of Power Sources. 2014, 270, 668-674.

Aspektem badawczym publikacji były przede wszystkim zagadnienia odzysku manganu ze zużytych i/lub odpadowych baterii cynkowo-węglowych oraz cynkowo-manganowych w procesie kwaśnego ługowania frakcji paramagnetycznej. Przeprowadzone przy moim współudziale analizy teoretyczne koncentrowały się na opracowaniu klasyfikacji potencjalnych reduktorów manganu na podstawie ich standardowych potencjałów redoks, wyrażonych w skali potencjału oksydacyjno-redukcyjnego roztworu (pE). Teoretyczne termodynamiczne obliczenia wykonane zostały z wykorzystaniem programu HSC Chemistry®, co pozwoliło na wyznaczenie wartości standardowego potencjału redoks danej reakcji (pE_0) dla szeregu substancji organicznych i nieorganicznych w funkcji temperatury, a także ich porównanie z reakcją redukcji $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$, kluczową dla efektywnego ługowania tego pierwiastka z mas bateryjnych Zn-C i Zn-Mn.

Opracowana przy moim współudziale klasyfikacja objęta osiemnaście różnych reduktorów, wśród których znalazły się zarówno reduktory nieorganiczne: Cl^- , Fe^{2+} , H_2O_2 , $\text{S}_4\text{O}_3^{2-}$, FeS_2 , $\text{PbS}_{(s)}$, $\text{ZnS}_{(s)}$ i $\text{NiS}_{(s)}$, hydrazyna, jak i organiczne: tiomocznik, kwas adypinowy, kwas glutarowy, kwas bursztynowy, mocznik, metanol, glicerol, glukozę i kwas szczawiowy, przedstawiona na Rysunku 1 i 2, za pracą [H-1]. Analiza danych termodynamicznych wykazała, że choć pozycja danego reduktora w szeregu pE stanowi ważną wskazówkę doboru do badanych procesów hydrometalurgicznych, nie przesądza ona jednoznacznie o jego skuteczności w praktyce, gdyż istotny wpływ mają również czynniki kinetyczne i mechanizm zachodzących reakcji w procesie.

No.	Reducer	Red/ox reduction	pE equation	pE ⁰		
				25 °C	55 °C	85 °C
1	Basic reaction	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - 4/2\text{pH} - 1/2\log a_{\text{Mn}^{2+}}/a_{\text{MnO}_2}$	20.79	18.62	16.82
2	Cl^-	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- = 2\text{Cl}^-$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - 1/2\log a_{\text{Cl}^-}^2/p_{\text{Cl}_2}$	23.01	20.30	17.99
3	Fe^{2+}	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \log(a_{\text{Fe}^{2+}}/a_{\text{Fe}^{3+}})$	13.03	12.36	11.80
4	H_2O_2	$\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2(\text{a})$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/2\log(a_{\text{H}_2\text{O}_2})$	11.75	10.20	8.93
5*	$\text{S}_4\text{O}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-} + 26\text{H}^+ + 20\text{e}^- = \text{S}_4\text{O}_3^{2-} + 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - 13/10\text{pH} + 1/20\log(a_{\text{S}_4\text{O}_3^{2-}}/a_{\text{SO}_4^{2-}}^4)$	9.32	8.40	7.67
6	FeS_2	$\text{Fe}^{3+} + \text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+ + 15\text{e}^- = \text{FeS}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - 16/15\text{pH} + 1/15\log(a_{\text{Fe}^{3+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}}^4)$	7.02	6.99	6.99
7	$\text{PbS}_{(s)}$	$\text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{PbS} + 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} + 1/8\log(a_{\text{Pb}^{2+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}})$	6.06	5.41	4.89
8	$\text{ZnS}_{(s)}$	$\text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{ZnS} + 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} + 1/8\log(a_{\text{Zn}^{2+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}})$	5.60	5.04	4.61
9	$\text{NiS}_{(s)}$	$\text{Ni}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- = \text{NiS} + 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} + 1/8\log(a_{\text{Ni}^{2+}} \cdot a_{\text{SO}_4^{2-}})$	5.34	4.82	4.41
10	Thiourea $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$	$\text{N}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- = \text{CH}_4\text{N}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/12\log(a_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}}) - 0, 120$	3.39	2.66	2.07
11	Adipic acid $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4$	$6\text{CO}_2 + 26\text{H}^+ + 26\text{e}^- = \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4 + 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/26\log(a_{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4})$	1.69	1.13	0.666
12	Glutaric acid $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$	$5\text{CO}_2 + 20\text{H}^+ + 20\text{e}^- = \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4 + 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/20\log(a_{\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4})$	1.53	0.970	0.507
13	Succinic acid $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	$4\text{CO}_2 + 14\text{H}^+ + 14\text{e}^- = \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/14\log(a_{\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4})$	1.45	0.864	0.382
14	Urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	$\text{N}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{CO}(\text{NH}_2)_2(\text{a}) + \text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/6\log(a_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}) - 0, 100$	1.36	0.794	0.326
15	Methanol CH_3OH	$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- = \text{CH}_3\text{OH}(\text{a}) + 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/6\log(a_{\text{CH}_3\text{OH}})$	0.526	0.161	-0.136
16	Glycerol $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	$3\text{CO}_2 + 14\text{H}^+ + 14\text{e}^- = \text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/14\log(a_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3})$	-0.011	-0.410	-0.737
17	Glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$6\text{CO}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/24\log(a_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6})$	-0.200	-0.610	-0.945
18	Hydrazine N_2H_4	$\text{N}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = \text{N}_2\text{H}_4(\text{a})$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/4\log(a_{\text{N}_2\text{H}_4})$	-5.62	-5.49	-5.38
19	Oxalic acid $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	$2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{a})$	$\text{pE} = \text{pE}^0 - \text{pH} - 1/2\log(a_{\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4})$	-10.05	-10.37	-10.65

Rysunek 1. pE₀ – standardowe potencjały oksydacyjno-redukcyjne wybranych reduktorów stosowanych w kwaśnym ługowaniu materiałów manganowych (obliczone za pomocą programu HSC Chemistry® for Windows). (a) – substancje w roztworze (stan odniesienia), (s) – faza stała, (g) – faza gazowa, za pracą [H-1]



Rysunek 2. Standardowe potencjały oksydacyjno-redukcyjne reduktorów wyszczególnionych na Rysunku 1. Gdzie: 1 – reakcja podstawowa: $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$, pozostałe oznaczenia odpowiadają numerom wierszy z Rysunku 1. Rysunek obejmuje konwencjonalne grupy reduktorów, w kolejności malejącego potencjału: reduktory siarkowe, kwasy organiczne, alkohole (grupy -OH). Kolory odpowiadają temperaturom: 25 °C, 55 °C, 85 °C, za pracę [H-1]

W ramach części eksperymentalnej przeprowadziłam analizę wyników badań kwaśnego ługowania mas bateryjnych pochodzących z odpadów ogniwn Zn-C i Zn-Mn. Kwaśne ługowania przeprowadziłam z zastosowaniem trzech wybranych reduktorów: H_2O_2 , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ i $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, dodanych do roztworu H_2SO_4 w celu zwiększenia stopnia wyługowania manganu przy założeniu, że dla podstawowej reakcji $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$ E_{p0} wynoszą odpowiednio: 20,79, 18,62 i 16,82 w temperaturach 25°C, 55°C i 85°C reakcji. Wyniki eksperymentalne potwierdził teoretyczne przewidywania dotyczące skuteczności kwasu szczawiowego jako reduktora, który dzięki najniższemu potencjałowi redoks (pE_0 : -10,05/25°C; -10,37/55°C; -10,65/85°C) zapewnił najwyższy poziom przejścia manganu do roztworu na poziomie 75%. Natomiast mocznik, mimo że termodynamicznie można go uznać za reduktor o potencjale pośrednim (pE_0 : 1,36/25°C; 0,794/55°C; 0,326/85°C), okazał się w warunkach eksperymentu całkowicie nieskuteczny. W przypadku nadtlenu wodoru uzyskano średnią wydajność ługowania manganu na poziomie 50% pomimo, że standardowe potencjały redoks reakcji są niewiele niższe, niż dla podstawowej reakcji $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$ i wynoszą odpowiednio 11,75, 10,20 i 8,93 w temperaturach 25°C, 55°C i 85°C.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że przeprowadzone obliczenia termodynamiczne mogą stanowić skuteczne narzędzie w doborze reduktorów do hydrometalurgicznych procesów odzysku manganu, jednak muszą być zawsze wspierane badaniami doświadczalnymi ze względu na wpływ czynników pośrednich wynikających z przebiegu doświadczeń w których badane są odpady polimetaliczne o zróżnicowanym składowisku chemicznym ilościowo-jakościowym.

Podsumowanie

Podsumowując, tego rodzaju badania mają istotne znaczenie w kontekście odzysku strategicznych surowców metalicznych z trudno przetwarzalnych odpadów polimetalicznych, zwłaszcza odpadów chemicznych źródeł energii, które ze względu na swoją różnorodność składu i stopień degradacji stanowią poważne wyzwanie technologiczne i środowiskowe. Mangan jest pierwiastkiem szeroko wykorzystywanym w obecnie dominujących na rynku akumulatorach litowo-jonowych oraz nowych generacjach materiałów magazynujących energię, tj.: ogniwach litowo-manganowych (LMO) czy manganowo-litowych (MIB). W związku z ograniczoną dostępnością naturalnych złóż oraz rosnącym zapotrzebowaniem na surowce wykorzystywane w

technologiach niskoemisyjnych, opracowanie efektywnych metod odzysku metali z surowców wtórnych nabiera coraz większego znaczenia.

Prace ta wpisuje się w strategiczne kierunki rozwoju dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki, odpowiadając na globalne wyzwania związane z bezpieczeństwem surowcowym, ochroną zasobów naturalnych oraz minimalizacją wpływu działalności przemysłowej na środowisko. Integracja teoretycznych analiz termodynamicznych z praktyką hydrometalurgiczną pozwala na racjonalizację procesów przetwórczych, poprawę ich selektywności oraz redukcję zużycia reagentów i energii, co wprost przekłada się na ich opłacalność ekonomiczną i zrównoważony charakter. Podejście to zostało kontynuowane w wspólnych pracach przemysłowych prowadzonych z firmą KGHM Metraco S.A. mających na celu opatentowanie *Sposobu utylizacji masy odpadów baterii Zn-C i Zn-Mn powstałego po wydzieleniu frakcji ferromagnetycznej* (KGHM Metraco S.A., 2025).

Wiedza zdobyta w ramach powyżej opisanych badań wspiera rozwój nowoczesnych technologii recyklingu i może być z powodzeniem wykorzystywana również w innych obszarach odzysku metali z różnorodnych strumieni odpadów przemysłowych. Przykładem tego są wyniki prac badawczych zaprezentowane w publikacjach [H-7] i [H-8] niniejszego autoreferatu.

Tym samym, prowadzone przeze mnie badania nie tylko przyczyniają się do rozwoju naukowego i technologicznego, ale również wpływają na kształtowanie bardziej odpowiedzialnych i efektywnych systemów gospodarowania surowcami zarówno pierwotnymi pochodzącymi z rud jak i wtórnymi pochodzącymi z odpadów polimetalicznych.

Zagadnienia te znajdują kontynuację w kolejnym manuskrypcie, który dotyczy opracowania zintegrowanego podejścia do odzysku metali z zużytych baterii Zn-C i Zn-Mn, obejmującego jednostopniowe kwaśne ługowanie H_2SO_4 z dodatkiem kwasu szczawiowego w roli reduktora oraz odzysk metali w formie wodorotlenków i węglanów w jednostkowym procesie współstrącania:

H-2. Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Paweł Maciejewski, Małgorzata Gawlik-Kobylińska. ***Recovery of zinc and manganese, and other metals (Fe, Cu, Ni, Co, Cd, Cr, Na, K) from Zn-MnO₂ and Zn-C waste batteries : hydroxyl and carbonate co-precipitation from solution after reducing acidic leaching with use of oxalic acid.*** Journal of Power Sources. 2016, 325, 220-228.

Aspekt naukowy publikacji stanowiły przeprowadzone przeze mnie badania, których celem było opracowanie kompleksowej metody odzysku metali w postaci stałego produktu, w którego składzie chemicznym ilościowo-jakościowym dominował przede wszystkim cynk i mangan. Metale te odzyskiwałam z mas baterii pierwszego rodzaju Zn-C oraz Zn-Mn pochodzących z przemysłowego strumienia odpadów otrzymanego w

wyniku mechanicznej przeróbki. Samodzielnie zaprojektowane badania, zostały przeprowadzone na najdrobniejszej frakcji paramagnetycznej o uziarnieniu poniżej 2 mm. Ponieważ frakcja ta zawierała największy udział metali cynku oraz manganu i stanowiła ponad 78% całkowitej frakcji badawczej (frakcji ferromagnetycznej).

Proces badawczy opisany w niniejszym artykule obejmował wstępne ługowanie wodą masy bateryjnej w celu usunięcia alkaliów pochodzących z elektrolitów, takich jak NaOH lub NH_4Cl . W kolejnym etapie przeprowadziłam ługowanie kwaśne z wykorzystaniem H_2SO_4 oraz dodatkiem kwasu szczawiowego jako reduktora. Takie podejście umożliwiło redukcję MnO_2 do formy Mn^{2+} , co skutkowało jego wysokim stopniem przejścia do roztworu, zgodnie z danymi teoretycznymi i eksperymentalnymi przedstawionymi w pracy [H-1]. Uzyskane przeze mnie wyniki wykazały, że zastosowanie tej metody pozwala na wyługowaniu 93% manganu i 79% cynku do roztworu poługowniczego.

W dalszej części prac przeprowadziłam serie eksperymentów wytrącania metali z uzyskanego roztworu poługowniczego dwiema metody, tj. metodą z hydroksylową z wykorzystaniem NaOH oraz metodą węglanową z wykorzystaniem mieszaniny związków NH_4HCO_3 i NH_4OH . W przypadku metody hydroksylowej uzyskałam niemal całkowite strącenie metali: 100% dla Zn, Mn, Fe, Co, Cd, Cr oraz ponad 99% dla Cu i Ni. Metoda węglanowa, mimo nieco niższej efektywności dla Cu i Ni (odpowiednio 85,1% i 85,4%), również zapewniała pełne wytrącenie Mn, Fe, Co, Cd, Cr i 95,5% Zn z roztworu.

Opracowane przeze mnie metody odzysku surowców z ogniw pierwszego rodzaju Zn-C i Zn-Mn mogą znajdująca bezpośrednie zastosowanie w aplikacjach materiałowych, co nie tylko potwierdza ich praktyczny charakter, lecz także stanowi znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Podsumowanie

Uzyskane przeze mnie wyniki prac eksperymentalnych zaprezentowane w publikacji [H-2] dowodzą, że proces kwaśnego ługowania redukcyjnego z użyciem kwasu szczawiowego w roli reduktora, a następnie współstrącanie cynku i manganu w postaci soli węglanowych, stanowi skuteczną metodę odzysku metali z odpadów baterii Zn-C oraz Zn-Mn. Szczególnie istotne jest to, że zaprojektowane przeze mnie badania umożliwiły wykorzystanie otrzymanych osadów nie tylko do procesów dalszej separacji metali, ale również jako opatentowany dodatek do produkcji nawozów mineralnych (KGHM Metraco S.A., 2025) oraz surowiec do syntezy ferrytów manganowo-cynkowych (Mn-Zn) opisanych w manuskrypcie:

H-3. Irena Szczygieł, Katarzyna K. Winiarska, Agnieszka Sobianowska-Turek. *The study of thermal, microstructural and magnetic properties of manganese-zinc ferrite prepared by co-precipitation method using different precipitants*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018, 134, 51-57.

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki wspólnych prac eksperymentalnych z Naukowcami z Katedry Chemii Nieorganicznej, Wydziału Inżynieryjno-Ekonomicznego, Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu (2025), dotyczących syntezy oraz badań właściwości termicznych, mikrostrukturalnych i magnetycznych ferrytów Mn-Zn. Produkty te zostały otrzymane między innymi metodą współstrącania opisaną w artykule **[H-2]** z roztworów pozyskanych w wyniku ługowania mas bateryjnych zawierających Zn i Mn, kwasem H_2SO_4 bez dodatku reduktora mas bateryjnych zawierających cynk i mangan. Kwaśne ługowanie frakcji paramagnetycznych otrzymanych z przeróbki mechanicznej ogniw Zn-C i Zn-Mn prowadzone było przeze mnie w taki sposób aby gwarantowało wysoki stopień wyługowania cynku (85% - 95%) przy niewielkim stopniu wyługowania manganu (25% -30%).

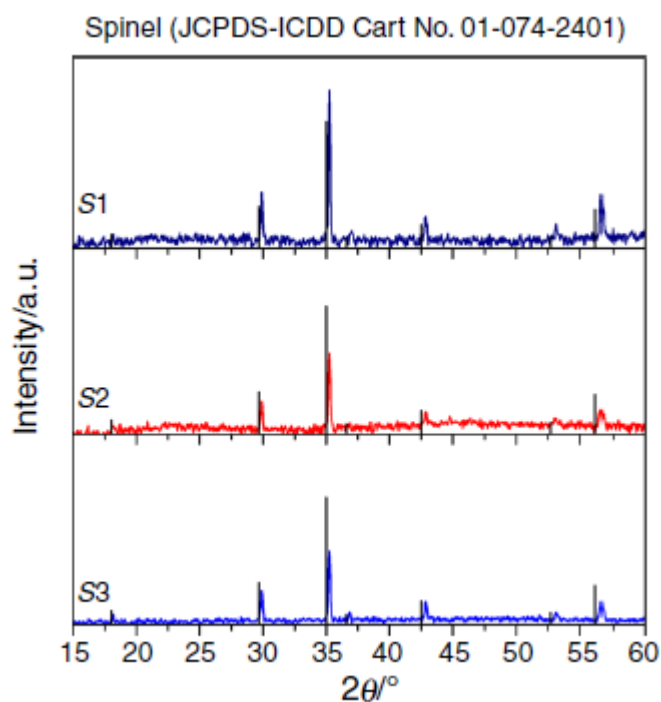
Aspektem badawczym publikacji było badanie wpływ rodzaju zastosowanego czynnika strącającego szczawianu amonu, węglanu sodu oraz wodorotlenku sodu na właściwości fizyko-chemiczne uzyskanych materiałów Mn-Zn. Otrzymane osady były poddane suszeniu, wstępnemu spiekaniu w temperaturze 850°C, a następnie mieleniu, prasowaniu i końcowemu spiekaniu w 1325°C w atmosferze kontrolowanej zawartości tlenu. Podstawowym produktem badań były mikrokryształiczne ferrytowe materiały Mn-Zn o stechiometrii zbliżonej do $Mn_{0,6}Zn_{0,4}Fe_2O_4$, których właściwości strukturalne i magnetyczne istotnie zależały od rodzaju zastosowanego odczynnika strącającego. Synteza prowadzona była w warunkach umożliwiających kontrolę pH oraz temperaturę strącania, co pozwoliło na uzyskanie trzech różnych próbek (oznaczonych w pracy **[H-3]** jako S1, S2 i S3) różniących się strukturą, gęstością, mikrostrukturą oraz parametrami magnetycznymi.

Badania TGA-DTA wykazały różnice w przebiegu przemian termicznych, wskazując na odmienną temperaturę dekompozycji osadów i powstawania fazy spinelowej, co umożliwiło ustalenie jednolitej temperatury końcowego spiekania na poziomie 1325°C. Z kolei analiza rentgenowska XRD potwierdziła obecność fazy spinelowej po spiekaniu końcowym oraz obecność fazy hematytu w osadach po etapie wstępnego spiekania.

Badania właściwości strukturalnych XRF, SEM oraz DIL wykazały, że najmniejszy skurcz liniowy oraz najmniejszą gęstość końcową miał ferryt otrzymany przy użyciu szczawianu amonu jako czynnika strącającego (S1), który jednocześnie cechował się najniższą przepuszczalnością magnetyczną, ale jednorodną, drobnoziarnistą strukturą i niewielką zawartością fazy niemagnetycznej. Przeciwnie, próbki S2 i S3 (uzyskane odpowiednio z jednostkowych procesów strącania z wykorzystaniem węglanu i wodorotlenku sodu) wykazały znacznie większy skurcz (powyżej 21%), wyższą gęstość i lepsze właściwości magnetyczne, ale zarazem ujawniły niejednorodną mikrostrukturę z obecnością porów międzyziarnowych i efektami nadmiernego wzrostu ziaren. Wartości początkowej przenikalności magnetycznej (μ_i) były w przypadku S2 i S3 zbliżone i istotnie wyższe niż w przypadku S1, ale niższe niż dla referencyjnych próbek przemysłowych Ferroxcube.

Jednocześnie materiały te wykazywały duże straty mocy, co ogranicza ich bezpośrednią aplikacyjność.

Spośród przedstawionych danych, szczególnie istotne dla charakterystyki produktu są informacje umieszczone na Rysunkach 3 i 4, za pracę **[H-3]** przedstawiające właściwości magnetyczne otrzymanych materiałów.



Rysunek 3. XRD ferrytu Mn–Zn spiekanego w temperaturze 1325°C, za pracę **[H-3]**

Measurement conditions	Temperature/°C	Sample			FXC reference sample	
		S1	S2	S3	Power grade ^a	HighPerm grade ^a
Initial permeability						
10 kHz; 0.1 mT	10	226	2649	2605	5694	11,352
30 kHz; 0.1 mT	25	237	2799	2887	6330	12,500
100 kHz; 0.1 mT	40	248	2963	3226	7255	13,452
200 kHz; 0.1 mT	55	259	3080	3626	8361	14,134
400 kHz; 0.1 mT	70	268	3151	4120	9623	14,734
1000 kHz; 0.1 mT	85	275	3150	4696	10,853	15,403
Loss factor						
100 kHz; 0.1 mT	25	–	–	–	–	0.9
200 kHz; 0.1 mT	25	–	–	–	–	8.4
400 kHz; 0.1 mT	25	–	23	23	1	29
1000 kHz; 0.1 mT	25	110	118	62	26	164
Power loss/mW cm ^{−3}						
25 kHz; 200 mT	25	2390.7	Not able to measure	Not able to measure	31.8	14.1
	90	5143.6			5.9	26.8
	95	5559.6			4.3	28.8
	100	6350.7			4.1	30.8
	105	6727.9			4.7	33.8
	110	7394.2			5.3	38.6

^aCommercially available ring core—Ferroxcube

Rysunek 4. Właściwości magnetyczne ferrytów otrzymanych metodą współstrącania oraz konwencjonalną metodą ceramiczną (próbki referencyjne), za pracę [H-3]

Podsumowanie

Prezentowane wyniki badań stanowią istotny wkład do rozwoju technologii odzysku surowców wtórnych i ich ponownego wykorzystania do syntezy zaawansowanych materiałów magnetycznych o potencjalnym zastosowaniu w mikroelektronice. Prace tego typu są odpowiedzią na rosnące globalne zapotrzebowanie na materiały o wysokich właściwościach magnetycznych, przy jednoczesnym ograniczaniu zużycia surowców pierwotnych (Nag i współ., 2025). Podobne badania prowadzone są obecnie na całym świecie, zarówno w ośrodkach akademickich, jak i przemysłowych, co potwierdza ich aktualność i znaczenie (Samoylenkoa i współ., 2024).

W obliczu kurczących się zasobów naturalnych oraz wyzwań związanych z gospodarką obiegu zamkniętego, opracowywana metoda pozyskiwania funkcjonalnych materiałów z odpadów może stanowić kluczowy kierunek rozwoju technologii materiałowych.

Co ważne, strumień odpadów baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych, nadal jest wytwarzany, ponieważ konsumenci powszechnie używają ogniw pierwszego rodzaju w sprzęcie gospodarstwa domowego, zabawkach oraz urządzeniach codziennego użytku. Z tego powodu badania nad odzyskiem metali cynku i manganu z omawianych chemicznych źródeł energii i ich wykorzystaniem do produkcji materiałów ferryty o kontrolowanych właściwościach strukturalnych i magnetycznych wpisują się w światowe trendy zrównoważonej inżynierii materiałowej oraz rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

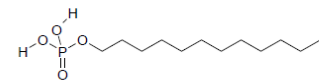
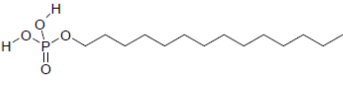
W ramach kolejnego etapu prac badawczych przeprowadziłam badania ukierunkowane na ocenę skuteczności procesu flotacji jonowej w usuwaniu jonów Zn^{2+} i Mn^{2+} z rozcieńczonych roztworów wodnych zarówno modelowych, jak i rzeczywistych otrzymanych po kwaśnym ługowaniu odpadów mas bateryjnych Zn-C i Zn-Mn, ze szczególnym uwzględnieniem doboru warunków procesu oraz efektywności zastosowanych kolektorów organicznych. Wyniki powyższych prac eksperymentalnych zostały opublikowane w manuskrypcie:

H-4. Agnieszka Sobianowska-Turek, Katarzyna L. Grudniewska, Paweł Maciejewski, Małgorzata Gawlik-Kobylińska. ***Removal of Zn(II) and Mn(II) by ion flotation from aqueous solvtions derived from Zn-C and Zn-Mn(II) batteries leaching.*** Energies. 2021, 14, 5, 1335, 1-12.

W ramach prowadzonych prac badawczych opracowałam oraz przeanalizowałam proces wydzielania jonów Zn^{2+} i Mn^{2+} z rozcieńczonych roztworów wodnych metodą flotacji jonowej. Celem badań było wyznaczenie optymalnych parametrów technologicznych jednostkowego procesu hydrometalurgicznego umożliwiających efektywny, selektywny oraz zgodny z zasadami zrównoważonego rozwoju odzysk metali z

surowców wtórnych odpadowych chemicznych źródeł energii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych.

Do procesu flotacji zastosowałam dwa organiczne kolektory – kwas m-dodecylowy (oznaczony w treści artykułu jako 32) oraz m-tetradecylowy (oznaczonych w treści artykułu jako 33), w obecności niejonowego środka pianotwórczego Triton X-100, charakterystyka kolektorów organicznych przedstawiona została na Rysunku 5, za pracą [H-4].

Structural Formula	Total Formula	Chemical Compound Name	Molar Mass, [u]	Number/Function of Chemical Compound
	$C_{12}H_{27}O_4P$	m-dodecylphosphoric acid	266.31	32 collector
	$C_{14}H_{31}O_4P$	m-tetradecylphosphoric acid	294.36	33 collector

Rysunek 5. Charakterystyka kwasów organicznych użytych w badaniach jako kolektory w procesie flotacji jonowej, za pracą [H-4]

Badania prowadziłam w warunkach otoczenia z wykorzystaniem roztworów modelowych, tj.: temperaturze 20°C - 21°C, ciśnieniu atmosferycznym i przepływie argonu równym 12 cm³/min. Uzyskując bardzo wysoką skuteczność procesu flotacji jonowej przy pH równym 5,0. Efektywność wydzielania kationów Zn²⁺ i Mn²⁺ osiągała wartość 98% dla obu jonów. W warunkach selektywnej flotacji jonowej, przy pH równym 9,0 i zastosowaniu kolektora C₁₂H₂₇O₄P oraz środka pianotwórczego Tritonu X-100, uzyskałam współczynnik selektywności Zn²⁺/Mn²⁺ równy 29,2 w czasie 10 minut.

W badaniach zrealizowałam również eksperymenty z wykorzystaniem roztworów rzeczywistych, uzyskanych po ługowaniu mas bateryjnych kwasem siarkowym(VI). Roztwory te zawierały 55,0 g/dm³ jonów Zn²⁺ i 25,7 g/dm³ jonów Mn²⁺. Opracowana metoda wykazała skuteczność nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale także przy wysokim stężeniu jonów w roztworach po procesowych, co potwierdziło jej potencjał aplikacyjny i operacyjną prostotę.

Uzyskane wyniki pozwoliły mi na zdefiniowanie najważniejszych czynników wpływające na efektywność i selektywność flotacji jonowej. Czynnikiem warunkującym skuteczność procesu okazały się między innymi: zastosowany kolektor, odczyn roztworu, stężenie reagentów oraz czas procesu. W szczególności w toku badań wykazałam, że kolektor C₁₂H₂₇O₄P umożliwia efektywne usuwanie jonów Zn²⁺ w szerokim zakresie pH od 2,0 do 7,0, przy czym maksymalna skuteczność, wynosząca 99,7%, została osiągnięta dla odczynu roztworu równego 7,0. Dla tych samych warunków usuwanie jonów Mn²⁺ utrzymywało się na poziomie około 74%. W przypadku kolektora C₁₄H₃₁O₄P najwyższą efektywność wydzielania kationów metali uzyskano w środowisku zasadowym, 99,1%

przy pH równym 10,0 i 91,6% przy pH równym 11,0, natomiast efektywność usuwania Mn^{2+} w tych warunkach była wyraźnie niższa.

Badania wykazały również, że wpływ środka pianotwórczego Tritonu X-100 zależy od odczynu roztworu. W warunkach kwaśnych jego obecność ograniczała skuteczność procesu, przykładowo przy pH równym 2,0 roztworu efektywność wydzielania jonów Zn^{2+} spadła z 80,4% do 40,1%, natomiast w środowisku zasadowym znacząco ją zwiększała, nawet do poziomu 96,3%. Wpływ ten był jednak mniej zauważalny w przypadku kationów Mn^{2+} . Ponadto, długość trwania procesu flotacji jonowej miała istotne znaczenie, ponieważ wydłużenie czasu flotacji powyżej 10 minut prowadziło do spadku efektywności, szczególnie w odniesieniu do kationów cynkowych. Przykładowo, dla kolektora kwasu m-dodecylofosforowego usuwanie jonów Zn^{2+} w 5-minutowym procesie przy pH równym 5,0 zawsze przekraczało 80%, natomiast w czasie 20 minut wynosiło nie więcej niż 20%.

Podsumowanie

Zgromadzony materiał badawczy dowodzi, że flotacja jonowa z zastosowaniem kolektorów $C_{12}H_{27}O_4P$ i $C_{14}H_{31}O_4P$ stanowi efektywną, selektywną i potencjalnie przemysłowo skalowalną metodę odzysku metali z odpadów chemicznych źródeł energii. Proces ten może być z powodzeniem wdrażana jako samodzielna technologia lub jako etap zintegrowany w ramach hybrydowych procesów hydrometalurgicznych. Dodatkowym atutem jest możliwość regeneracji roztworów procesowych, co wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zielonej chemii.

Kolejnym etapem mojej działalności badawczej było opracowanie procesu odzysku metali z zużytych i/lub odpadowych akumulatorów niklowo-wodorkowych (Ni-MH).

➤ Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii akumulatorów niklowo-wodorkowych (Ni-MH)

Ogniwa niklowo-wodorkowe pojawiły się na rynku jako bezpieczniejsza alternatywa dla akumulatorów niklowo-kadmowych (Ni-Cd) eliminująca zagrożenia związane z toksycznym kadmem, jak również baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych ze względu na możliwość wielokrotnego stosowania (ładowania). Dzięki zastosowaniu stopów metali ziem rzadkich (REE, *Rare Earth Elements*) takich jak lantan, cez, neodym i prazeodym jako materiałów anodowych, oraz niklu i kobaltu w katodzie, ogniwa Ni-MH, charakteryzujące się wysoką gęstością energii ($> 350 \text{ MJ/m}^3$). Z tego powodu szybko znalazły zastosowanie w elektronice użytkowej oraz w przemyśle motoryzacyjnym, zwłaszcza w hybrydowych pojazdach elektrycznych (Ahn i współ., 2020). Z perspektywy recykularnej gospodarki surowcowej, ogniwa Ni-MH zawierają znaczące ilości REE, szczególnie cennych ze względu na ograniczoną dostępność i ich koncentrację geograficzną w kilku krajach, między innymi w Chińskiej Republice Ludowej, Stanach Zjednoczonych Ameryki, Brazylii i Australii (Elements, 2025). Recykling tych ogniw stał się

nie tylko korzystny ekonomicznie, ale wręcz konieczny dla zabezpieczenia niezależności surowcowej Europy i realizacji strategii gospodarki o obiegu zamkniętym. Z badań wynika, że zawartość metali ziem rzadkich w anodach ogniw Ni-MH może sięgać nawet 20% wagowych, w tym La, Ce, Nd i Pr, natomiast zawartość niklu to ponad 40% masy akumulatora (Huang i współ., 2011).

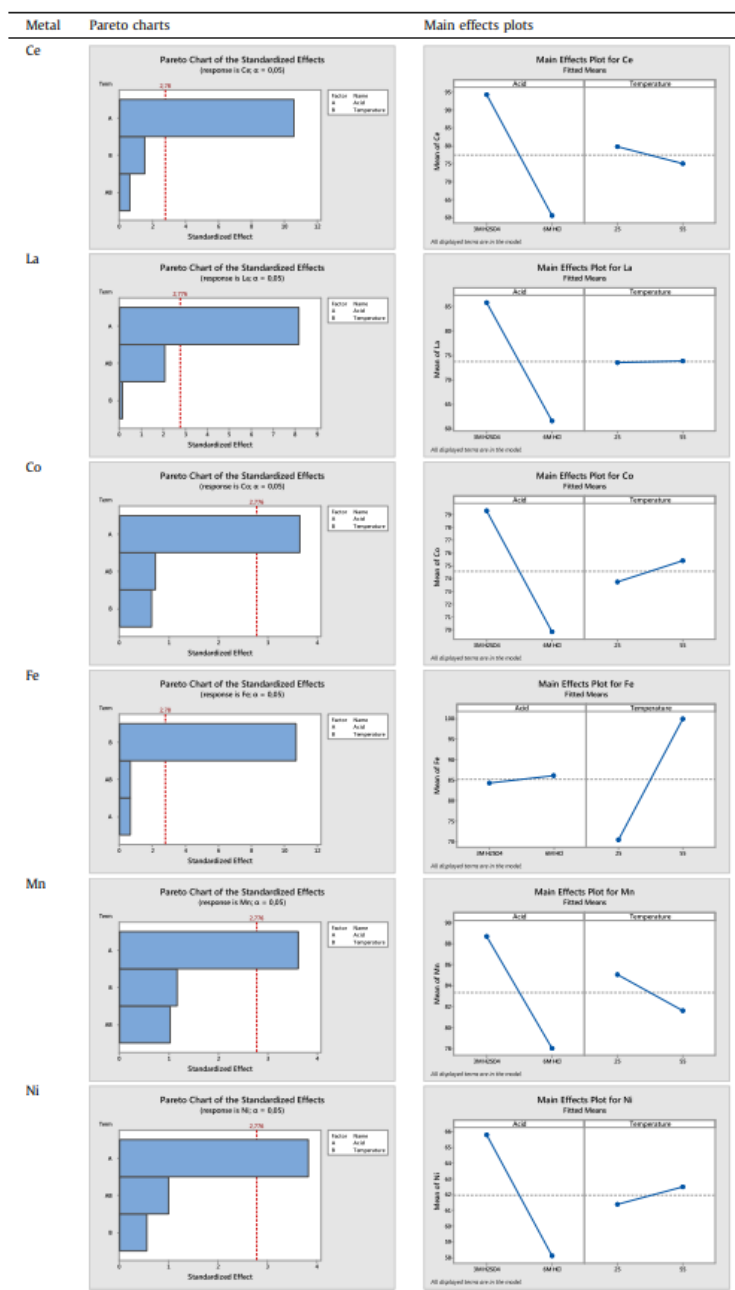
W ramach kolejnego etapu mojej działalności naukowo-badawczej skoncentrowałem się na opracowaniu i analizie efektywnej metod odzysku metali z ogniw niklowo-wodorkowych, ze szczególnym uwzględnieniem hydrometalurgicznych ścieżek kwaśnego ługowania, opublikowanych w manuskrypcie:

H-5. Agnieszka Sobianowska-Turek, 2018. ***Hydrometallurgical recovery of metals: Ce, La, Co, Fe, Mn, Ni and Zn from the stream of used Ni-MH cells.*** Waste Management 77, 213-219.

Prace badawcze opisane w niniejszej manuskrypcie zostały zrealizowane w ramach projektu pt.: *Odzysk metali z polimetalicznych odpadów chemicznych źródeł energii metodami metalurgii chemicznej*, dzięki uzyskanemu przeze mnie wsparciu finansowemu w konkursie na zadania badawcze służące rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, realizowanego w terminie od 1.07. do 15.11. 2015 roku.

W ramach prowadzonych badań, których wyniki przedstawiono w przywołanej publikacji, skoncentrowałem się na opracowaniu efektywnej metody odzysku metali z odpadowych ogniw niklowo-wodorkowych typu R6 (AA), z wykorzystaniem technik hydrometalurgicznych. Aspekt badawczy publikacji dotyczył przede wszystkim identyfikacji optymalnych parametrów kwaśnego ługowania frakcji paramagnetycznej (masy bateryjnej), powstającej po mechanicznej obróbce zużytych akumulatorów. Badania te miały na celu maksymalizację efektywności odzysku metali: Ce, La, Co, Fe, Mn, Ni i Zn do roztworu. Podstawową zmianą w podejściu do prowadzenia prac eksperymentalnych było zaprojektowanie pojedynczych, jednostkowych procesów kwaśnego ługowania już na początkowym etapie badań. Celem takiego podejścia było uniknięcie multiplikowania liczby eksperymentów optymalizujących poszczególne parametry procesu. Wcześniej taka sytuacja miała miejsce przy opracowywanej przeze mnie technologii przetwarzania strumienia zużytych ogniw pierwszego rodzaju cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych. Nowe podejście pozwoliło mi skrócić czas pracy w laboratorium oraz obniżyć koszty opracowania nowego rozwiązania. Do zaprojektowania prac badawczych wykorzystałem dedykowany do tego moduł *Design of Experiment* (DoE) programu statystycznego Minitab 17. Takie podejście do projektowania eksperymentów umożliwiło jednoczesne badanie wpływu wielu zmiennych na zmienną wynikową (odpowiedź). Plan eksperymentów zawierał informacje na temat serii przebiegów eksperymentów (jednostkowych testów ługowań), w których wprowadza się celowe zmiany w zmiennych wejściowych lub czynnikach i gromadzi dane. Na potrzeby części badawczej pracy w eksperymencie zaprojektowałem dwie zmienne o dwóch

wartościach, tak aby każda z nich została powtórzona dwukrotnie zgodnie z modelem. Sekwencja doświadczeń oraz wykaz zmiennych, dla których badano odzysk metalu, przedstawiłam następująco, numer doświadczenia: A, B (czynnik ługujący 6,0 M HCl, temperatura początkowa 25,0°C); C, D (czynnik ługujący 3,0 M H₂SO₄, temperatura początkowa 25,0°C); E, F (czynnik ługujący 6,0 M HCl, temperatura początkowa 55,0°C); G, H (czynnik ługujący 3,0 M H₂SO₄, temperatura początkowa 55,0°C). Uzyskane eksperymentalne wyniki stopnia wyługowania poszczególnych kationów metali wprowadziłam do modelu DoE wykonanego w programie statystycznego Minitab 17 i przeprowadziłam ich indywidualną analizę pod kątem zmienności stopnia wyługowania do roztworów badanych kationów metali Ce, La, Co, Fe, Mn oraz Ni w zależności od rodzaju użytego kwasu mineralnego (factor A) oraz temperatury początkowej procesu (factor B) oraz ich interakcji (factor A * factor B). Analizy nie przeprowadziłam jedynie dla jonów cynku, ponieważ metal ten nie wykazywał zmienności stopnia wyługowania dla wszystkich wykonanych eksperymentów odzyskano do roztworu 100% Zn. Program Minitab 17 wyznaczył wartość bezwzględną czynników wpływu dla wszystkich wykresów Pareto na poziomie 2,78 – Rysunek 6, za pracę [H-5]. Wynika z tego, iż wszystkie badane czynniki wpływu (factor A i B, A * B) przekraczające linię odniesienia są istotne na domyślnym poziomie α równym 0,05 dla procesu kwaśnego ługowania masy bateryjnej pochodzącej zużytych ogniw nikłowo-wodorkowych. Stąd głównym parametrem wpływającym na proces odzysku metali z masy bateryjnej okazał się dobór kwasu mineralnego (czynnika ługującego), ponieważ z przeanalizowanych danych wynika, iż użycie 3,0 M H₂SO₄ daje dużo lepsze wyniki stopnia odzysku metali Ce, La, Co, Mn oraz Ni do roztworu niż 6,0 M kwasu HCl, którego statystyczne użycie jest jedynie uzasadnione dla Fe. Przy założeniu, że jony żelaza w roztworze po ługowaniu zazwyczaj stanowią balast i zakłócają późniejszy selektywny odzysk w formie czystej innych metali metodami metalurgii chemicznej można przyjąć, iż stopień przejścia tego metalu do roztworu z masy bateryjnej mógłby w opisywanym procesie być na jak najniższy poziomie (Jeon i współ., 2025; Salehi i współ., 2023). Temperatura początkowa procesu nie wpływa w sposób statystycznie znaczący na wyniki końcowe procesu kwaśnego ługowania metali Ce, La, Co, Fe, Mn oraz Ni, dlatego ze względów ekonomicznych należy przyjąć, iż proces odzysku metali z frakcji paramagnetycznej powinno prowadzić się dla temperatury początkowej równej 25°C.



Rysunek 6. Wykresy Pareto czynników wpływu oraz wykresy głównych efektów, za pracę [H-5]

Podsumowanie

Wyznaczone optymalne parametry przeprowadzenia do roztworu jonów metali Co, Fe, Mn, Ni, Zn, Ce i La z frakcji paramagnetycznej odpadów akumulatorów Ni-MH potwierdzają częściowo wyniki zaprezentowane w pracach innych badaczy, że najskuteczniejszym czynnikiem ługującym dla tego rodzaju odpadów jest kwas siarkowy(VI) o stężeniu do $3,0 \text{ mol/dm}^3$ oraz że proces można prowadzić z dużą skutecznością jednoetapowo przy stosunku fazy stałej do ciekłej równej 1/10 lub 1/20. Jednak proces ługowania z wykorzystaniem H_2SO_4 można z wysoką skutecznością prowadzić w krótszym czasie do 75 minut oraz niższej temperaturze od $25,0^\circ\text{C}$ do $45,0^\circ\text{C}$.

Prezentowane wyniki badań mogą zatem stanowić fundament nowego, opłacalnego ekonomicznie rozwiązania hydrometalurgicznego, wykorzystującego stosunkowo niewielki, ale wciąż istotny strumień odpadów ogniwi Ni-MH (Otron i współ., 2025). Opracowana technologia umożliwia odzysk metali takich jak Co, Fe, Mn, Ni, Zn oraz metale ziem rzadkich (REE), w tym Ce i La, przy wysokim stopniu wyługowania do roztworu od 68,5% do nawet 100%. Rozwiązanie to może przyjąć formę modułowego, jednostkowego procesu, okresowo uruchamianego w momencie zgromadzenia przez zakład przetwórczy (rafinerię) odpowiedniej ilości odpadów Ni-MH. Może on także zostać zintegrowany z istniejącymi liniami do przetwarzania zużytych i/lub odpadowych ogniwi litowo-jonowych różnych typów i rodzajów, co dodatkowo zwiększa elastyczność i efektywność systemu odzysku.

Z punktu widzenia gospodarki cyrkularnej proponowane podejście wpisuje się w unijną strategię zamykania obiegu surowców, ograniczania zależności od dostaw surowców pierwotnych oraz redukcji negatywnego wpływu na środowisko. Umożliwia ono pełniejsze zagospodarowanie zasobów już wprowadzonych do obiegu, zgodnie z celami Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych (EUR-Lex, 2025a), które przewiduje, że do 2030 roku co najmniej 25% zużywanych surowców krytycznych ma pochodzić z recyklingu. Recykling ogniwi Ni-MH pomimo ich spadającego udziału w rynku pozostaje nadal strategicznie istotny ze względu na zawartość wartościowych pierwiastków, takich jak ces i lantan, których aktualne ceny rynkowe wynoszą odpowiednio 4,41 USD/kg i 3,11 USD/kg (Mineral Prices, 2025). Uwzględnienie tego strumienia odpadów polimetalicznych w procesach recyklingu pozwala ograniczyć zapotrzebowanie na pierwotne źródła metali, zmniejsza emisje do środowiska oraz zwiększa odporność łańcuchów dostaw czyniąc to rozwiązanie nie tylko technologicznie efektywnym, ale również systemowo istotnym.

Dodatkowo projektowanie eksperymentów w systemie DoE pozwoliło mi rozwinąć kompetencje w zakresie technik planowania badań, ponieważ byłam w stanie w krótkim czasie zoptymalizować procesy, zidentyfikować kluczowe czynniki wpływające na wyniki oraz zwiększyć efektywność prowadzonych działań.

W kolejnych pracach naukowo-badawczych kontynuowałam wykorzystanie modelowania statystycznego, co umożliwiło mi głębszą analizę procesów i lepsze zrozumienie zależności między zmiennymi. Jestem przekonana, że stosowanie zaawansowanych technik modelowania przyczyniło się do podniesienia jakości moich badań i ich wyników.

Ze względu na ograniczony dostęp do strumienia odpadów ogniwi niklowo-wodorkowych, a także z uwagi na fakt, że ten typ chemicznych źródeł energii został w dużej mierze wyparty z rynku przez ogniwa litowo-jonowe, charakteryzujące się wyższą gęstością energii, mniejszymi rozmiarami, brakiem efektu pamięci, niższym

współczynnikiem samorozładowania oraz dłuższą żywotnością – podjęłam działania zmierzające do rozpoczęcia badań naukowych nad modułowymi, jednostkowymi procesami ich recyklingu.

➤ **Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii akumulatorów litowo-jonowych (Li-ion, LIB)**

W związku z zamiarem rozpoczęcia własnych badań naukowych nad kolejną technologią recyklingu chemicznych źródeł energii, w szczególności akumulatorów litowo-jonowych, podjęłam szereg działań zmierzających do pozyskania finansowania i możliwości ich realizacji. W tym celu aktywnie aplikowałam do konkursów grantowych, a moje starania zaowocowały uzyskaniem i udziałem w projektach badawczych, w których pełniłam kluczowe role merytoryczne i organizacyjne.

W ramach projektu MINIATURA 1, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, w którym pełniłam rolę Kierownika badań, zrealizowanego na Politechnice Wrocławskiej, miałam możliwość zainicjowania prac badawczych w obszarze modelowania hydrometalurgicznych procesów odzysku metali z polimetalicznych odpadów chemicznych źródeł energii, akumulatorów litowo-jonowych (LIBs).

Głównym celem własnych badań prowadzonych w skali laboratoryjnej było opracowanie wstępnej hydrometalurgicznej metody odzysku kluczowych metali, takich jak nikiel, kobalt, lit, miedź oraz aluminium. Ostateczna forma, w jakiej metale były odzyskiwane, uwzględniały zarówno aspekty technologiczne, jak i handlowe. W badaniach przyjęto założenie wykorzystania nieprzebadanych dotąd kwasów organicznych, z lub bez dodatku reduktora, jako czynników ługujących w procesie selektywnego ługowania lub strącania metali, bez stosowania rozpuszczalników innych niż wodne. Dodatkowo, w dalszych etapach realizacji projektu rozważałam wzbogacenie metody hydrometalurgicznego ługowania o ekstrakcję rozpuszczalnikową za pomocą odrębnych faz lub zastosowanie materiałów jonowymiennych zwłaszcza w kontekście efektywnego odzysku surowców strategicznych: manganu, niklu, kobaltu oraz litu wymienionych w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany rozporządzeń (UE) Nr 168/2013, (UE) 2018/858, UE 2018/1724 i UE 2019/1020 z dnia 11.04.2024 (EUR-Lex, 2025a).

Kolejnym ważnym efektem mojej działalności naukowej było zaangażowanie się w realizację projektu badawczo-rozwojowego-wdrożeniowego (B+R+F) realizowanego przez firmę Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., w ramach konkursu Szybka Ścieżka – IPCEI opisaną szczegółowo w Podpkt. 6.1.2. *Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne*, niniejszego autoreferatu. W projekcie tym kierowałam i odpowiadałam za opracowanie technologii recyklingu baterii litowo-jonowych, co pozwoliło mi na poszerzenie wiedzy praktycznej, nawiązanie bliskiej współpracy z sektorem przemysłowym oraz bezpośredni udział w działaniach

wdrożeniowych nowych rozwiązań procesowych w skali przemysłowej, tj.: rafinerii metali z strumieni odpadów polimetalicznych zarówno ogniw litowo-jonowych jak i katalizatorów samochodowych (Łoś i współ., 2024a).

Oba przedsięwzięcia są ze sobą komplementarne i pozwoliły mi nie tylko rozwijać zaplecze naukowe w obszarze recyklingu chemicznych źródeł energii, ale także wykorzystać zdobyte doświadczenia w praktyce, wnosząc realny wkład w rozwój technologii przyjaznych środowisku i zgodnych z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego oraz w rozwój dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki, którą reprezentuje. W roku 2024 firma Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. uruchomiła zakład przetwarzania zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych, dokonując pilotażowego, pierwszego wdrożenia przemysłowego opracowanych przez Zespół Badań i Rozwoju technologii recyklingu, co szczegółowo opisane zostało w Podpkt. 6.1.2. *Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne*, niniejszego autoreferatu.

Na początku realizacji prac badawczych związanych z recyklingiem materiałowym odpadów LIBs, w celu właściwego zaplanowania i późniejszego projektowania procesów hydrometalurgicznych, a jak się później okazało również procesów pirometalurgicznych, związanych z przetwarzaniem ogniw litowo-jonowych, podjęłam decyzję o przeprowadzeniu szczegółowej analizy morfologii oraz składu chemicznego strumienia zużytych ogniw, ze szczególnym uwzględnieniem ogniw pochodzących z pojazdów elektrycznych (BEV), przedstawionych w manuskrypcie:

H-6. Agnieszka Sobianowska-Turek, Weronika Urbańska, Anna Janicka, Maciej Zawiślak, Jędrzej Matla. 2021. ***The necessity of recycling of waste Li-Ion batteries used in electric vehicles as objects posing a threat to human health and the environment.*** Recycling 6, 2, 35, 1-14.

Analiza ta została wykonana z jednoczesnym uwzględnieniem potencjalnych zagrożeń dla zdrowia człowieka i środowiska. Uzyskane wyniki umożliwiły mi świadome prowadzenie dalszych badań nad odzyskiem surowców wtórnych z pełnym rozeznaniem właściwości oraz szkodliwości wynikających ze składu chemicznego odpadów polimetalicznych LIBs.

Moje, tak szczegółowe, podejście do tematu wynika z wcześniejszych doświadczeń zdobytych podczas pracy nad hydrometalurgicznymi procesami przetwarzania chemicznych źródeł energii, takich jak baterie cynkowo-węglowe, cynkowo-manganowe oraz akumulatory niklowo-wodorkowe. Ponieważ, podczas analizy ilościowo-jakościowego składu mas bateryjnych, pochodzących z mechanicznej obróbki baterii Zn-C i Zn-Mn, stwierdzono obecność kadmu i rtęci. Jak się później okazało, metale te były celowo stosowane przez producentów ogniw w celu poprawy ich parametrów technicznych i wydłużenia żywotności (Sobianowska-Turek i współ., 2013). Istotne znaczenie miała również współpraca z firmą Mercedes-Benz Manufacturing Poland Sp. z

o.o. w 2020 roku, w ramach której opracowałam wraz z Naukowcami z Wydziału Inżynierii Środowiska oraz Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej analizę oraz wytyczne dotyczące pracy przy przemysłowej produkcji akumulatorów litowo-jonowych stosowanych w pojazdach elektrycznych. Celem tego opracowania było nie tylko zapewnienie bezpieczeństwa pracy z tego typu ogniwami, ale również przygotowanie materiałów edukacyjnych do celów szkoleniowych i kształcenia zawodowego (Sobianowska-Turek i współ., 2020).

Na początku lat 2020. szczegółowa morfologia oraz skład chemiczny przemysłowo produkowanych ogniw litowo-jonowych nie były powszechnie znane. Producenci nie ujawniali pełnych informacji na temat składu materiałów aktywnych stosowanych w katodach i anodach ani składu elektrolitów wykorzystywanych w tego typu chemicznych źródłach energii. Wiedzę w tym zakresie można było pozyskać niemal wyłącznie z publikacji naukowych oraz dokumentów patentowych i technologicznych, w szczególności tych dotyczących procesów recyklingu surowcowego ogniw Li-ion. Przegląd literaturowy przeprowadzony ponad pięć lat temu i zaprezentowany w pracy **[H-6]**, wciąż pozostaje w dużej mierze aktualny i wskazuje, jak ograniczony nadal jest dostęp do szczegółowych danych materiałowych na temat komercyjnie dostępnych ogniw litowych stanowiących coraz większy strumień odpadów polimetalicznych. Zmiany w tym temacie nastąpią dopiero w 2027 roku, kiedy to od 18 lutego zgodnie z Rozdziałem 9 - Cyfrowy paszport baterii, Rozporządzenia 2023/1542 w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniającego dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylającego dyrektywę 2006/66/WE, każda bateria przenośna wprowadzana do obrotu oraz produkty z wbudowanymi bateriami będą musiały umożliwiać ich łatwe usunięcie i wymianę przez użytkownika końcowego, a także zostaną objęte obowiązkiem oznakowania unikalnym kodem QR prowadzącym do cyfrowego paszportu baterii. Wymogi te dotyczą również lekkich środków transportu (LMT), baterii przemysłowych o pojemności powyżej 2 kWh oraz baterii do pojazdów elektrycznych, co w istotny sposób zwiększy transparentność składu i śladu środowiskowego oraz wprowadzi surowe standardy informacyjne i ekologiczne dla całego cyklu życia baterii i akumulatorów (EUR-Lex, 2025b).

W niniejszej publikacji przedstawiłam szczegółową analizę zagrożeń wynikających z zastosowania materiałów chemicznych stosowanych w budowie ogniw litowo-jonowych, z uwzględnieniem ich właściwości fizykochemicznych, toksykologicznych oraz klasyfikacji prawnej ujętych w obowiązujących aktach prawnych, takich jak Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 dotyczące klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin (CLP), a także w Rozporządzeniu REACH (WE nr 1907/2006) regulującym rejestrację, ocenę, udzielanie zezwoleń oraz stosowanie ograniczeń dla chemikaliów w Unii Europejskiej (EUR-Lex, 2025c; 2025d). Dokumenty te są podstawą do opracowywania kart charakterystyki substancji chemicznych (SDS), które zawierają informacje dotyczące identyfikacji

zagrożeń, składu chemicznego, właściwości fizykochemicznych, działań pierwszej pomocy, zasad postępowania w przypadku pożaru czy niekontrolowanego uwolnienia substancji do środowiska, a także środków ochrony indywidualnej, warunków przechowywania, stabilności chemicznej, reaktywności i oceny toksyczności. Karty SDS pozwalają również na właściwe planowanie działań związanych z utylizacją, transportem substancji oraz oceną ryzyka w kontekście przepisów bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska.

Wśród materiałów wykorzystywanych w katodach ogniw litowo-jonowych największe znaczenie komercyjne mają obecnie tlenki metali zawierające lit, a szczególnie LiNiMnCoO_2 (NMC), który może wywoływać reakcje alergiczne skóry oraz posiada właściwości rakotwórcze. Podobne zagrożenia wykazuje LiCoO_2 (LCO), powszechnie stosowany w ogniwach przeznaczonych do urządzeń elektronicznych. Przeciwnie do nich stanowią materiały katodowe w ogniwach LFP (LiFePO_4) i LMO (LiMn_2O_4), które nie są klasyfikowane jako substancje niebezpieczne, ale też nie są dominującymi chemicznymi źródłami energii wykorzystywanymi w pojazdach elektrycznych w krajach Unii Europejskiej w odróżnieniu od krajów azjatyckich. Anody wykonane z grafitu również nie wykazują toksyczności ani szkodliwości dla zdrowia człowieka czy środowiska. Jednak szczególnie istotnym komponentem ogniwa jest elektrolit, który najczęściej ma postać cieczy zawierające sole litu rozpuszczone w mieszaninie rozpuszczalników organicznych. Do najczęściej wykorzystywanych soli elektrolitycznych należą LiPF_6 , LiBF_4 i LiClO_4 . Szczególne zagrożenie stwarza LiPF_6 , który jest substancją łatwopalną i szkodliwą dla wielu narządów oraz tkanek zwierzęcych. Silnie toksyczne i łatwopalne właściwości wykazują również rozpuszczalniki organiczne wchodzące w skład elektrolitów, takie jak węglan etylenu (EC), węglan etylometylu (EMC) i węglan dietylu (DEC), co znacznie podnosi ryzyko związane z eksploatacją, przechowywaniem ogniw i wstępną obróbką separacyjną zużytych i/lub odpadowych akumulatorów LIBs. W przypadku uszkodzenia mechanicznego, nieszczelności lub samozapłonu ogniw litowo-jonowych wszystkiego typu i rodzaju, może dojść do emisji szeregu niebezpiecznych substancji chemicznych, m.in. benzenu, toluenu, akroleiny czy styrenu, które zagrażają zarówno zdrowiu ludzi, jak i środowisku. Zainicjowane w takich warunkach reakcje egzotermiczne mogą prowadzić do rozkładu wewnętrznych komponentów na przykład polifluorku winilidenu (PVDF), generując również toksyczne gazy o odmiennym chemicznym składzie ilościowo-jakościowym niż pierwotny elektrolit (Sobianowska-Turek i współ. 2023). Szczególne zagrożenie stanowi fluorowodór (HF), powstający w wyniku rozkładu LiPF_6 w obecności wilgoci. Kwas fluorowodorowy jest silnie żrący, wysoce toksyczny i niebezpieczny dla układu oddechowego, skóry oraz oczu człowieka. Możliwa jest także emisja tlenków metali kobaltu, niklu i manganu, które w formie pyłów lub aerozoli mogą być wdychane i akumulowane w organizmie, prowadząc do poważnych uszkodzeń układu oddechowego oraz nerwowego. Należy też zwrócić szczególną uwagę na możliwość powstawania cyjanowodoru (HCN), silnie toksycznego gazu tworzącego się w warunkach beztlenowych w wyniku rozkładu komponentów organicznych elektrolitu. W przypadku samozapłonu

ogniwa emitowane są również lotne związki organiczne (LZO), które zwiększają ryzyko wybuchu i stwarzają zagrożenie dla osób znajdujących się w pobliżu. Emisje te mogą nastąpić natychmiast po uszkodzeniu struktury ogniwa, szczególnie w wyniku efektu *thermal runaway*, czyli niekontrolowanego wzrostu temperatury wewnętrznej ogniwa prowadzącego do reakcji łańcuchowej. Wszystkie te emisje stanowią poważne zagrożenie w sytuacjach awaryjnych, a ich obecność potwierdza konieczność stosowania rygorystycznych procedur bezpieczeństwa na każdym etapie cyklu życia ogniw litowo-jonowych od eksploatacji i transportu, przez przechowywanie, aż po ich utylizację i recykling surowcowy.

Podsumowanie

Z uwagi na obecność substancji chemicznych o różnych poziomach zagrożenia, ogniwa litowo-jonowe należy traktować jako potencjalnie niebezpieczne produkty zarówno pod kątem indywidualnego użytkowania, jak i ujęcia systemowego: logistyka, transport, utylizacja i recykling surowcowy. Skuteczna ocena ryzyka, identyfikacja zagrożeń i wdrożenie odpowiednich procedur bezpieczeństwa muszą być oparte na wiedzy toksykologicznej, zgodności z regulacjami krajów członkowskich oraz analizie zawartych w dokumentacji kart charakterystyki danych substancji chemicznych wchodzących w skład ogniwa.

Ponieważ niewłaściwe postępowanie z zużytymi ogniwami lub ich składowanie bez odpowiednich zabezpieczeń może prowadzić do niekontrolowanego uwolnienia toksycznych substancji, zagrażających ludziom i środowisku. Dlatego też zgromadzona w manuskrypcie wiedza na temat właściwości toksykologicznych substancji chemicznych wchodzących w skład budowy ogniw litowo-jonowych różnego typu i rodzaju ma kluczowe znaczenie dla oceny ryzyka chemicznego podczas opracowania nowych jednostkowych procesów przetwarzania ogniw Li-ion oraz tworzenia skutecznych strategii zapobiegania i reagowania w sytuacjach awaryjnych.

Zgromadzona i usystematyzowana wiedza w tym obszarze było dla mnie niezbędna do przygotowania i realizacji badań zaprezentowanych w kolejnych trzech publikacjach wchodzących w skład niniejszego osiągnięcia naukowego. W których przedstawiłam nowatorskie metody ługowania kolektywnego i selektywnego metali z mas bateryjnych pozyskanych z odpadowych i/lub zużytych ogniw litowo-jonowych różnego typu i rodzaju **[H-7, H-8]** oraz odzysk surowców handlowych z omawianych odpadów **[H-9]**.

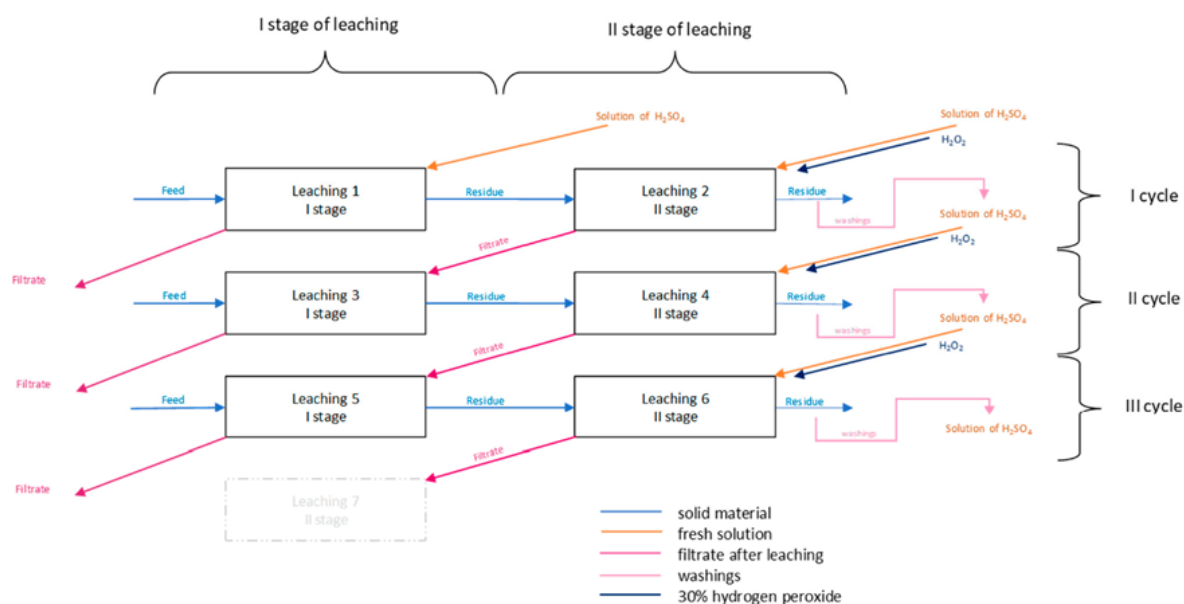
Wyniki tych badań stanowią istotny etap w kierunku rozwoju efektywnych i bezpiecznych procesów odzysku metali z odpadów chemicznych źródeł energii metodami metalurgii chemicznej, a także pozwalają lepiej zrozumieć przebieg i mechanizmy przetwarzania tego typu surowców wtórnych.

Omawiany poniżej artykuł **[H-7]** powstał w ramach realizacji projektu IPCEI, pt.: *Opracowanie i pierwsze wdrożenie przemysłowe innowacyjnych technologii recyklingu*

baterii litowo-jonowych i katalizatorów z odzyskiem metali o strategicznym znaczeniu. Projekt dotyczył rozwoju technologii bezpiecznego, przyjaznego środowisku i efektywnego finansowo transportu, przechowywania oraz recyklingu baterii litowo-jonowych (Li-ion) i zużytych katalizatorów samochodowych. W projekcie tym pełniłam funkcję Kierownika badań nad technologią recyklingu LIBs, co szczegółowo opisane zostało w kolejnych częściach niniejszego autoreferatu, tj.: Podpkt. 6.1.2. *Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne.* Wspólne prace Zespołu B+R Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. oraz Zespołu badawczego Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Metali Nieżelaznych, Centrum Hydroelektrometalurgii (Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach, 2025), zaowocowały przeprowadzeniem szczegółowych badań nad innowacyjną metodą wieloetapowego ługowania mas bateryjnych pochodzących z obróbki mechanicznej ogniw litowo-jonowych różnego typu i rodzaju.

H-7.Katarzyna Leszczyńska-Sejda, Andrzej Chmielarz, Dorota Kopyto, Michał Ochmański, Grzegorz Benke, Arkadiusz Palmowski, Agnieszka Sobianowska-Turek, Przemysław Łoś, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Karolina Goc, 2024. ***An innovative method of leaching of battery masses produced in the processing of Li-Ion battery scrap.*** Applied Sciences 14, 1, 397, 1-22.

Aspekt badawczy przywołanej publikacji koncentruje się na porównaniu dwóch metod ługowania mas bateryjnych LIBs. Pierwszą z nich było klasyczne, jednoetapowe ługowanie kwasem siarkowym(VI) z dodatkiem substancji wspomagającej w postaci nadtlenu wodoru, które jest szeroko opisywane w literaturze (Lan i współ., 2025). Drugą, opracowaną w ramach projektu autorska metoda dwuetapowego ługowania przeciwnieprądowego, wykorzystująca tę samą mieszaninę ługującą, tj.: H_2SO_4 i H_2O_2 . Dwuetapowe ługowanie w przeciwnieprądzie to innowacyjna metoda hydrometalurgiczna, w której masa bateryjna poddawana jest kolejno dwóm etapom ługowania. Roztwory ługujące przemieszczają się przeciwnie do kierunku przepływu fazy stałej (masy bateryjnej). W obu etapach stosowany jest ten sam roztwór – kwas siarkowy(VI) z dodatkiem perhydrolu. Metoda ta została zaprojektowana i przetestowana z myślą o możliwym wdrożeniu do warunków przemysłowych. Schemat przebiegu innowacyjnego, dwuetapowego procesu ługowania przeciwnieprądowego przedstawiono na Rysunku 7, który ilustruje kolejność i sposób realizacji etapów z uwzględnieniem recyrkulacji roztworów i etapowego podawania reagentów.



Rysunek 7. Diagram ilustrujący proces dwuetapowego ługowania w przeciwnym kierunku, za pracą [H-7]

Do badań wykorzystano trzy rodzaje mas baterijnych pozyskanych z różnych typów i rodzajów zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych, tj.: modułów samochodowych (Materiał I), tabletek i laptopów (Materiał II) oraz telefonów komórkowych (Materiał III). Materiały badawcze wykorzystane w eksperymentach, otrzymane zostały w wyniku obróbki mechanicznej strumienia odpadowych akumulatorów Li-ion w technologii stanowiącej *know-how* firmy Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., w których testowaniu, optymalizacji i wdrożeniu do warunków przemysłowych brał czynny udział pełniąc w projekcie rolę Kierownika badań nad technologią recyklingu LIBs. Próbkę różniły się znacząco składem chemicznym, m.in. zawartością kobaltu, niklu, miedzi i litu, co miało istotny wpływ na przebieg i efektywność jednostkowych procesów ługowania.

Jednoetapowe ługowania kilogramowych próbek mas baterijnych LIBs (niezależnie od ich składu) prowadzone były z wykorzystaniem 15% lub 20% roztworu kwasu siarkowego(VI) z dodatkiem 30% roztworu H_2O_2 w ilości 1 dm^3 lub 2 dm^3 , przez 2 godziny, przy stosunku fazy stałej do ciekłej wynoszącym 1:5 lub 1:4, w temperaturze 60°C . Zapewniając stopień wyługowania kobaltu, niklu, miedzi i litu na poziomie powyżej 95% w jednoetapowym procesie. Z kolei zastosowanie innowacyjnej metody dwuetapowego przeciwnieprądowego ługowania mas baterijnych LIBs przeprowadzonych dla tych samych parametrów początkowych, pozwalało na osiągnięcie jeszcze wyższej efektywności przejścia metali do roztworów, na poziomie znacznie przekraczającym 95%, przy jednoczesnym uzyskaniu stężenia kobaltu w roztworze po ługowaniu było jednym z kluczowych celów prowadzonych i nadzorowanych przeze mnie eksperymentów, ponieważ kolejny

etap projektowany przez Zespół B+R Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. obejmował innowacyjne procesy elektrowydziałania surowców metalicznych z wykorzystaniem metody potencjodynamicznej opisanych w patentach uzyskanych przez firmę Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. (2025a; 2025b), których jestem współautorką a które zostały szczegółowo opisane w Podpkt. 6.1.2. *Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne*, niniejszego autoreferatu. Nowatorski proces hydrometalurgiczny skraca również czas pojedynczego etapu ługowania do 1 godziny, a co istotne zmniejsza ilość powstających roztworów odpadowych oraz zużycie reagentów.

Jednym z kluczowych wyników prezentowanych w niniejszej pracy są ilościowo-jakościowe analizy chemiczne roztworów i prób stałych uzyskanych po wszystkich jednostkowych procesach kwaśnego ługowania z dodatkiem perhydrolu – zarówno w wariacie jednoetapowym, jak i dwuetapowym układzie przeciwprądowym. Ponieważ w próbach tych oznaczano nie tylko zawartość głównych metali: Co, Ni, Li, Cu i Mn, ale również stężenie żelaza, fosforu oraz co szczególnie istotne fluoru. Znajomość tych wartości ma kluczowe znaczenie przy projektowaniu procesów odzysku strategicznych surowców metalicznych z roztworów, ponieważ Fe, P i F stanowią potencjalne zanieczyszczenia produktów końcowych o czystości *battery grade*. Dodatkowo, znajomość stężenia fluoru w roztworach determinuje dobór odpowiednich materiałów konstrukcyjnych dla instalacji badawczych i/lub przemysłowych wykorzystywanych w jednostkowych procesach recyklingu LIBs, ze względu na jego właściwości korozyjne. Ponadto, świadomość zawartości fluoru w środowisku procesowym stanowi istotny czynnik wpływający na bezpieczeństwo pracy, szczególnie w kontekście ekspozycji personelu badawczego i/lub technicznego na potencjalnie toksyczne i reaktywne opary lub aerozole.

Podsumowanie

Podsumowując, opracowana metoda dwuetapowego ługowania przeciwprądowego stanowi istotny postęp w kierunku efektywnego, bezpiecznego, ekonomicznie uzasadnionego i przemysłowo skalowalnego recyklingu odpadów akumulatorów litowo-jonowych, będąc odpowiedzią na wyzwania związane z odzyskiem surowców strategicznych w gospodarce o obiegu zamkniętym.

Uzyskane wyniki badań nad dwuetapowym ługowaniem mas baterijnych LIBs różnego typu i rodzaju w układzie przeciwprądowym potwierdziły wysoką efektywność tej metody oraz jej potencjał aplikacyjny. Wysoki stopień wyługowania metali Ni, Co, Cu, Mn i Li do roztworu (>95%), ograniczone zużycie reagentów i zmniejszona ilość odpadów procesowych wskazują, że opracowana technologia może stanowić realną alternatywę dla klasycznych procesu jednoetapowego ługowania. Na podstawie zgromadzonych danych opracowano zgłoszenie patentowe dotyczący sposobu prowadzenia dwuetapowego procesu ługowania mas baterijnych, którego jestem współautorką

(Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., 2025c). Równocześnie rozpoczęto prace nad oceną możliwości wdrożenia tego jednostkowego procesu do warunków przemysłowych przez firmę Elemental Strategic Metals Sp. z o.o.

Kolejne etapy moich prac badawczych, realizowanych na Politechnice Wrocławskiej w ramach projektu MINIATURA 1, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki oraz kontynuowanych na Politechnice Śląskiej podczas stażu naukowego (opisanego szczegółowo w Podpkt. 7.1. *Stáže krajowe* niniejszego autoreferatu i przy współpracy Instytutu Górnictwa Odkrywkowego „Poltegor”, koncentrowały się na opracowaniu skutecznych metod selektywnego odzysku litu z mas bateryjnych, pochodzących z mechanicznego przetwarzania ogniw litowo-jonowych. Ze względu na odmienne właściwości fizykochemiczne litu, znacząco różniące się od właściwości niklu, kobaltu, miedzi czy manganu, konieczne było zaprojektowanie odrębnego, jednostkowego procesu ługowania, umożliwiającego selektywne przeprowadzenie litu do roztworu. Tak aby w dalszym etapie procesu technologicznego możliwy był jego odzysk w postaci odpowiednich związków chemicznych, takich jak Li_2CO_3 , LiOH lub LiCl , które stanowią produkty handlowe do ponownego wykorzystania przy produkcji ogniw Li-ion, co zostało przedstawione w manuskrypcie:

H-8. Agnieszka Sobianowska-Turek, Amelia Zielińska, Weronika Urbańska, Anna M. Mielniczek, Agnieszka Fornalczyk, Szymon Pawlak, Tomasz Małyś, Janusz Cebulski, 2025. ***Optimizing acidic reductive leaching for lithium recovery: enhancing sustainable lithium supply for energy markets***. *Energies*. 2025, 18, 2, 398,1-17.

Przedmiotem badań przedstawionych w przywołanej publikacji było opracowanie nowatorskiej metody selektywnego ługowania litu z mas bateryjnych pochodzących z recyklingu ogniw litowo-jonowych, z wykorzystaniem dotąd niebadanych mieszanin kwasów organicznych oraz znanych z literatury związków nieorganicznych. Kluczowym celem przeprowadzonych przeze mnie eksperymentów było uzyskanie wysokiej wydajności roztwarzania litu przy jednoczesnym ograniczeniu współługowania innych metali, takich jak kobalt, aluminium i miedź z mas bateryjnych ogniw Li-ion typ 18650 pochodzących z laptopów. Takie podejście znacząco upraszcza kolejne etapy oczyszczania i odzysku surowców, zwiększając efektywność całego procesu technologicznego recyklingu LIBs.

W przeprowadzonych przeze mnie badaniach zastosowano podejście statystyczne oparte na metodologii *Design of Experiments* (DoE) zaprojektowane w programie statystycznym Minitab 17, analogicznie jak w omawianej publikacji [H5]. Umożliwiło to systematyczne zaprojektowanie eksperymentów oraz analizę wpływu kluczowych zmiennych procesowych, takich jak stężenie kwasów, temperatura, czas trwania procesu oraz stosunek fazy stałej do ciekłej, na przebieg i efektywność ługowania poszczególnych metali. Zastosowanie tej metodyki ponownie pozwoliło w istotny sposób skrócić czas trwania badań wstępnych, dostarczając szybkich i wiarygodnych informacji na temat

parametrów jednostkowych ługowania mających kluczowy wpływ na skuteczność selektywnego przeprowadzenia litu do roztworu.

W ramach przeprowadzonych przeze mnie prac eksperymentalnych, analizie poddałam proces ługowania mas bateryjnych pochodzących ze zużytych ogniw litowo-jonowych, przy czym badania te zostały podzielone na dwa etapy, tj.: jednoetapowe kwaśne ługowanie nieredukcyjne oraz jednoetapowe ługowanie redukcyjne. W pierwszym etapie skupiłam się na procesie ługowania z zastosowaniem kwasu mrówkowego o różnych stężeniach 1,50 M, 3,25 M oraz 5,00 M, prowadzonym przy temperaturach początkowych 25,0°C, 40,0°C i 55,0°C oraz w trzech zakresach czasowych 30, 75 i 120 minut. Dodatkowo, w celu oceny wpływu stosunku fazy stałej do ciekłej, eksperymenty przeprowadziłam dla wartości s/l równych 1:5,0, 1:7,5 oraz 1:10, przy zachowaniu stałej prędkości mieszania wynoszącej 500 obr./min. Na podstawie analizy uzyskanych wyników z pierwszego etapu eksperymentów zidentyfikowałam optymalne parametry procesu, zapewniające najwyższą efektywność ługowania litu wykorzystując je w kolejnych badaniach.

W drugim etapie, dążąc do dalszej poprawy efektywności odzysku litu do roztworu, do wcześniej ustalonych optymalnych warunków, obejmujących stężenie kwasu mrówkowego 5,00 M, temperaturę 85°C, czas trwania procesu 120 minut, stosunek fazy stałej do ciekłej 1:10 oraz prędkość mieszania 500 obr./min, wprowadzałam dodatkowe związki organiczne pełniące funkcję reduktorów. Doboru reduktorów organicznych dokonałam na podstawie obliczeń przeprowadzonych w programie HSC Chemistry 9 (analogicznie jak w publikacji **[H-1]**), które wykazały, że wybrane związki organiczne: kwas adypinowy, kwas glutaranowy oraz kwas bursztynowy, posiadają niższy standardowy potencjał redoks w porównaniu z badanym materiałem LiCoO_2 . Potwierdzając ich termodynamiczną przydatność w procesach kwaśnego ługowania litu i kobaltu z frakcji paramagnetycznej (masy bateryjnej). Czyste kwasy organiczne w formie stałej dodawałam do układu ługującego w ilościach stechiometrycznych z 25% nadmiarem, w trzeciej minucie jednostkowego procesu ługowania. Związki te stosowano zarówno osobno, jak i w połączeniu z nadtlenkiem wodoru, co pozwoliło min na opracowanie najbardziej efektywnej kombinacji reagentów selektywnie ługujących lit.

W ramach badań opracowałam i zoptymalizowałam proces kwaśnego jednoetapowego ługowania redukcyjnego mas bateryjnych, pochodzącej ze zużytych ogniw litowo-jonowych, z wykorzystaniem kwasu mrówkowego w połączeniu z nowatorskimi reduktorami organicznymi. Najwyższą efektywność procesu uzyskano dla układu obejmującego mieszanie kwasu mrówkowego, kwasu glutaranowego oraz nadtlenku wodoru, prowadzonego w temperaturze 85°C, przez 120 minut, przy stosunku fazy stałej do ciekłej równej 1:10. W takich warunkach osiągnięto wydajność ługowania litu na poziomie 68,40% przy jednoczesnym przejściu do roztworu 31,00% kobaltu, 12,89% miedzi oraz 100% aluminium.

Podsumowanie

Podsumowując, wyniki te stanowią dowód na skuteczność zastosowanego przeze mnie podejścia i wskazują, że odpowiednio dobrane mieszaniny kwasów organicznych wspomaganych nadttlenkiem wodoru mogą znacząco poprawić efektywność oraz selektywność ługowania litu z mas bateryjnych pochodzących z przeróbki zużytych i/lub odpadowych akumulatorów litowo-jonowych. Ponadto, uzyskane dane eksperymentalne stanowią podstawę do opracowania skalowalnych i bardziej zrównoważonych rozwiązań technologicznych w recyklingu ogniw litowo-jonowych, wpisujących się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym.

W ostatnich latach coraz większą uwagę w badaniach nad odzyskiem metali z odpadów polimetalicznych zwraca się na możliwość zastąpienia tradycyjnych, nieorganicznych reagentów takich jak H_2SO_4 , HNO_3 czy HCl bardziej przyjaznymi dla środowiska związkami organicznymi. Hydrometalurgia, jako jedna z kluczowych technologii w gospodarce o obiegu zamkniętym, staje się naturalnym obszarem wdrażania zasad zielonej chemii, w tym wykorzystania „zielonych odczynników”.

Kwasy organiczne, takie jak kwas mrówkowy, szczawiowy, cytrynowy, winowy czy mlekowy, wykazują istotne zalety z punktu widzenia ochrony środowiska, ponieważ są biodegradowalne, mniej toksyczne, a także generują mniejszą ilość wtórnych zanieczyszczeń. Ich zastosowanie w procesach ługowania pozwala na ograniczenie ryzyka korozyjnego oraz poprawę bezpieczeństwa pracy. Dodatkowo, wiele z nich może pełnić równocześnie rolę reduktorów, co pozwala na uproszczenie i skrócenie procesu technologicznego.

Zastosowanie kwasów organicznych jako alternatywy dla tradycyjnych odczynników nieorganicznych znajduje szczególne uzasadnienie w przetwarzaniu odpadów chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów, gdzie ważna jest selektywność działania, efektywność odzysku oraz możliwość dalszego zagospodarowania powstałych roztworów poreakcyjnych (ścieków). W kontekście zwiększającego się znaczenia zielonych technologii oraz wymogów zrównoważonego rozwoju, kierunek ten stanowi istotny element modernizacji już funkcjonujących w warunkach przemysłowych procesów hydrometalurgicznych.

W ramach kolejnych realizowanych przeze mnie badań projektowych prowadzonych wspólnie z członkami Zespołu B+R firmy Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. zajmę się badaniami procesów wysokotemperaturowych stosowanych do przetwarzania odpadów chemicznych źródeł energii, w szczególności mas bateryjnych pochodzących z akumulatorów litowo-jonowych różnego typu i rodzaju, które zaprezentowane zostały w manuskrypcie:

H-9. Agnieszka Sobianowska-Turek, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Michał Janosz, 2025. ***Recovery of technical Li_2CO_3 from dust obtained after pyrometallurgical processing of Li-ion battery masses on a quarter-technological scale.*** Waste Management. 2025, 204, 114943.

Eksperymenty z wykorzystaniem metod pirometalurgicznych, zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej są mniej powszechne niż prace nad technologiami hydrometalurgicznymi (Rinne i współ., 2025). Wynika to przede wszystkim z wysokich kosztów jednostkowych procesów termicznych oraz z dotychczasowej dominacji na rynku produktów handlowych, takich jak sole metali bateryjnych (hydraty soli siarczanowych CuSO_4 , NiSO_4 , CoSO_4 , MnSO_4 oraz sole i wodorotlenek litu LiCl , Li_2CO_3 , LiOH o czystości *battery grade*), wykorzystywanych do produkcji ogniw Li-ion o różnych chemizmach m.in.: NMC, LFP, LTO, LCO, LMO, NCA. Jednak, w związku z dynamicznymi zmianami technologicznymi w budowie chemicznych źródeł energii oraz sytuacją geopolityczną, obserwuje się wzrost zapotrzebowania na inne produkty recyklingu, takie jak stopy metali, które stają się bardziej pożądane na rynkach światowych (Soltanizadeh i współ., 2025).

Z uwagi na powyższe czynniki, w trakcie realizacji projektu zaprojektowałam, nadzorowałam i przeprowadziłam testy procesów wysokotemperaturowych w skali ćwierć technologicznej, przetwarzając ponad 500 kg masy bateryjnej LIBs. Wszystkie prace eksperymentalne w skali ćwierć technologicznej wraz z analizami ilościowo-jakościowymi roztworów, prób stałych oraz gazów odlotowych zlecone zostały i wykonane zgodnie z koncepcją badawczą i pod moim nadzorem merytorycznym w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach posiadającym przemysłową infrastrukturę badawczą (2025). W trakcie realizacji omawianych przemysłowych prac eksperymentalnych pełniłam w Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. funkcje Kierownika badań nad technologią recyklingu LIBs.

Celem tych działań było zbadanie możliwości odzysku innych, alternatywnych produktów handlowych, niedostępnych lub nieefektywnie pozyskiwanych w powszechnie wdrażanych na świecie procesach hydrometalurgicznych głównie Li_2CO_3 , którego koncentracja w roztworach poługowniczych jest bardzo niska i wymaga wdrażania drogich jednostkowych procesów zateżania i oczyszczania.

Jednym z kluczowych aspektów badawczych przedstawionych w niniejszej pracy było opracowanie skutecznej metody odzysku węglanu litu (Li_2CO_3) o czystości technicznej z frakcji pyłowych powstających jako produkty uboczne procesów termicznego przetopu mas bateryjnych. Badania dotyczyły materiału w postaci pyłów odpadowych gromadzonych w workach filtracyjnych termicznej instalacji przemysłowej pieca elektrycznego łukowo-oporowego, które jak wykazano zawierają znaczne ilości Li przekraczające 10% masowych pyłu, przy jednoczesnej wysokiej zawartości fluoru 9,5%,

co stanowiło istotne wyzwanie technologiczne i środowiskowe w procesie odzysku surowcowego.

Głównym celem eksperymentów było potwierdzenie możliwości zastosowania metod hydrometalurgicznych do selektywnego odzysku litu w formie soli węglanowych oraz określenie optymalnych parametrów procesu selektywnego jednoetapowego kwaśnego ługowania pyłów. Ostatecznie w ramach prowadzonych badań wyznaczono zestaw optymalnych warunków procesowych, tj.: stosunek fazy stałej do ciekłej równy 0,25, stężenie H_2SO_4 wynoszące $137,2 \text{ g/dm}^3$, czas ługowania 2 godziny oraz temperaturę 50°C . Warunki te umożliwiały wyługowanie litu do roztworu, przy jednoczesnym utrzymaniu bardzo niskiego poziomu jonów fluorkowych w roztworze potługowniczym, co stanowi istotną przewagę względem klasycznych metod hydrometalurgicznych odzysku litu z mas bateryjnych, jak zaprezentowano to w pracy [H-7].

Zrealizowane prace badawcze potwierdziły, że możliwe jest uzyskanie produktu końcowego Li_2CO_3 o czystości technicznej po nieskomplikowanym technologicznie doczyszczeniu z jonów sodu i magnezu. Tym samym wykazano, że odpadowe frakcje pyłowe, do tej pory traktowane jako materiał bezwartościowy lub problematyczny w zagospodarowaniu, mogą stanowić źródło cennego surowca wtórnego. Wyniki te mają istotne znaczenie dla rozwoju zrównoważonych technologii recyklingu LIBs oraz strategii odzysku litu w warunkach gospodarki o obiegu zamkniętym w technologiach pirometalurgicznych w których do tej pory zakładano, że lit jest tracony.

Podsumowanie

Opracowany i opisany w niniejszym manuskrypcie hybrydowy proces odzysku technicznego Li_2CO_3 , łączący etapy pirometalurgiczne i hydrometalurgiczne, stanowi unikatowe w skali światowej rozwiązanie w zakresie przetwarzania odpadów bateryjnych typu LIBs. Proces ten umożliwia efektywny odzysk litu z pyłów powstałych po termicznej obróbce mas bateryjnych, uzyskiwanych w wyniku wcześniejszej mechanicznej obróbki zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych różnego typu i rodzaju.

Otrzymany w wyniku procesu Li_2CO_3 o czystości technicznej spełnia wymagania jakościowe surowca stosowanego w produkcji nowych ogniw Li-ion, co wpisuje się bezpośrednio w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym i stanowi odpowiedź na globalne wyzwania związane z odzyskiem i recyklingiem surowców krytycznych. Zaproponowana technologia może zostać zaadaptowana w warunkach przemysłowych jako nowoczesna strategia zarządzania odpadami bateryjnymi oraz zabezpieczenia dostępu do litu – pierwiastka kluczowego dla rozwoju nowoczesnych technologii energetycznych.

➤ Podsumowanie końcowe

Przedstawione badania procesów hydrometalurgicznych i pirometalurgicznych odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów wraz z implikacją uzyskanych wyników dla gospodarki cyrkularnej w warunkach przemysłowych, poświęcone zagadnieniom modelowania i/lub projektowania mogą podsumować w następujący sposób:

▪ **Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych**

pozwoły mi na opracowanie kompleksowej metody przetwarzania odpadowych ogniw Zn-C i Zn-Mn obejmującej jednostkowe procesy ługowania frakcji paramagnetycznej (masy bateryjnej) z wykorzystaniem jako czynników ługującego kwas siarkowy(VI) wraz z teoretycznym opracowaniem klasyfikacji potencjalnych reduktorów manganu dla podstawowej reakcji $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$, z uwzględnieniem ich standardowych potencjałów redoks, wyrażonych w skali potencjału oksydacyjno-redukcyjnego roztworu (pE). Teoretyczne termodynamiczne obliczenia wykonane zostały z wykorzystaniem programu HSC Chemistry® [H-1]. Jak również, opracowanie procedur odzysk surowców metalicznych w postaci wodorotlenków i/lub tlenków i/lub soli metali metodami współstrącaniowymi, które można wykorzystać jako dodatek do nawozów mineralnych [H-2] lub do produkcji ferrytów manganowo-cynkowych [H-3]. Badania te przyczyniły się także, do opracowania sposobu odzysku cynku i manganu z roztworów poługowniczych z metodą flotacji jonowej z wykorzystaniem jako kolektorów dwóch kwasów m-dodecyłowego oraz m-tetradecylowego, w obecności niejonowego środka pianotwórczego Triton X-100 [H-4];

▪ **Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii akumulatorów niklowo-wodorkowych**

pozwoły mi na wyznaczone optymalnych parametrów przeprowadzenia do roztworu jonów metali Co, Fe, Mn, Ni, Zn, Ce i La z masy bateryjnej odpadów akumulatorów Ni-MH wskazując, iż najskuteczniejszym czynnikiem ługującym dla tego rodzaju odpadów jest kwas siarkowy(VI) o stężeniu do $3,0 \text{ mol/dm}^3$ oraz że proces można prowadzić z dużą skutecznością jednoetapowo przy stosunku fazy stałej do ciekłej równej 1/10 lub 1/20 w czasie do 75 minut i temperaturze od $25,0^\circ\text{C}$ do $45,0^\circ\text{C}$. Dodatkowo projektowanie eksperymentów w systemie DoE rozwinęło moje kompetencje w zakresie technik planowania badań, ponieważ byłam w stanie w krótkim czasie zoptymalizować procesy, zidentyfikować kluczowe czynniki wpływające na wyniki oraz zwiększyć efektywność prowadzonych działań [H-5], umiejętność tą wykorzystywałam w kolejnych pracach eksperymentalnych nad odzyskiem metali z odpadów polimetalicznych;

- **Badania odzysku surowców z odpadów chemicznych źródeł energii akumulatorów litowo-jonowych**

pozwoły mi na przeprowadzenie szczegółowej analizy morfologii oraz składu chemicznego strumienia zużytych ogniw, ze szczególnym uwzględnieniem ogniw pochodzących z pojazdów elektrycznych (BEV), wskazując potencjalne zagrożenia dla zdrowia człowieka i środowiska. Uzyskane wyniki umożliwiły mi świadome prowadzenie dalszych badań nad odzyskiem surowców wtórnych z pełnym rozeznaniem właściwości oraz szkodliwości wynikających ze składu chemicznego odpadów polimetalicznych LIBs [H-6]. Pozwoły mi także na opracowanie jednostkowych procesów kwaśnego ługowania mas bateryjnych litowo-jonowych z wykorzystaniem kwasów nieorganicznych oraz organicznych z dodatkiem wyselekcjonowanych reduktorów. Procesy te prowadzone w wyznaczonych optymalnych warunkach jednoetapowych i/lub dwuetapowych przeciwprądowych ługowań pozwalają na selektywne lub kolektywne wyługowania metali Ni, Co, Cu, Mn i Li do roztworów z wydajnością powyżej 95% (ługowanie kolektywne metali) oraz 68,40% (ługowanie selektywne Li) [H-7 i H-8]. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów opracowałam założenia dla hybrydowego procesu odzysku technicznego węglaanu litu, łącząc etapy pirometalurgiczne i hydrometalurgiczne, stanowiącego unikatowe w skali światowej rozwiązanie w zakresie przetwarzania odpadów bateryjnych typu LIBs. Proces ten umożliwia efektywny odzysk Li_2CO_3 z pyłów powstałych po termicznej obróbce mas bateryjnych, uzyskiwanych w wyniku wcześniejszej mechanicznej obróbki zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych różnego typu i rodzaju [H-9].

Wyniki powyższych prac eksperymentalnych można uznać za znaczące dla rozwoju dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki, ponieważ wskazują optymalne warunki dla prowadzenia procesów odzysku surowców z polimetalicznych odpadów chemicznych źródeł energii, niejednokrotnie wyznaczając postawę dla aplikacji opracowanych jednostkowych procesów w warunkach przemysłowych ze szczególnym uwzględnieniem wymagań gospodarki cyrkularnej.

- **Perspektywy dalszych prac naukowo-badawczych**

W kontekście dynamicznego rozwoju chemicznych źródeł energii oraz elektryfikacji transportu, rośnie zapotrzebowanie na wydajne i trwałe ogniwa, w tym akumulatory anionowo-jonowe i kationowo-jonowe oraz nowej generacji ogniwa półprzewodnikowe, przepływowe czy wodorowe. Równocześnie, ich masowe wdrażanie do powszechnego użytku generować będzie wyzwania związane z odpowiedzialnym zagospodarowaniem odpadów oraz odzyskiem surowców.

Dlatego, w moich dalszych badaniach naukowych kluczowym kierunkiem pozostaje projektowanie zintegrowanych, niskoemisyjnych i efektywnych energetycznie procesów recyklingu ogniw nowej generacji, które umożliwią selektywny odzysk metali krytycznych

i/lub strategicznych bez degradacji ich właściwości użytkowych. Szczególną uwagę chciałabym poświęcić na rozwój technologii recyklingu metodami hydrometalurgicznymi, które wpisują się w zasady zielonej chemii i gospodarki obiegu zamkniętego, a co za tym idzie rozwój dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki, którą reprezentuje.

Ważnym aspektem pozostaje również dla mnie interdyscyplinarna współpraca naukowców z dziedziny chemii materiałowej, inżynierii procesowej, elektrochemii i analizy cyklu życia, w celu opracowywania ogniw, które już na etapie projektowania (ekoprojektowania) będą zoptymalizowane pod kątem przyszłego recyklingu. W tym kontekście naukowcy mają realny wpływ na cały łańcuch wartości chemicznych źródeł energii od doboru materiałów aktywnych i konstrukcji ogniwa, po rekomendacje dotyczące standaryzacji komponentów i uproszczenia demontażu. Ponieważ, nowoczesne strategie ekoprojektowania powinny uwzględniać takie elementy jak minimalizacja użycia trudno odzyskiwanych metali, zastępowanie toksycznych rozpuszczalników, łatwość separacji elektrod i kolektorów prądowych oraz zastosowanie materiałów biodegradowalnych lub łatwo przetwarzalnych.

➤ Literatura

Ahn, N.-K., Shim, H.-W., Kim, D.-W., Swain, B., 2020. *Valorization of waste NiMH battery through recovery of critical rare earth metal: A simple recycling process for the circular economy*. Waste Management 104, 254-261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.014>

Bruno, M., Fiore, S., 2025. *Review of upstream processes for Li-ion batteries recycling: Safety and economic concerns*. Journal of Cleaner Production 501, 145327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145327>

Czerwiński, A., 2005. *Akumulatory, baterie, ogniwa*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa

Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., 2025a. Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś. *Sposób prowadzenia procesu odzysku miedzi (Cu) z roztworów elektrolitów otrzymanych w wyniku ługowania odzyskanej ze zużytych baterii litowo-jonowych czarnej*. Zgłoszenie nr. P 442384 z dnia 28.09.2022. Opublikowany i otrzymany 3.03.2025. Patent Polska, nr PL 246778

Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., 2025b. Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś. Patent. *Sposób prowadzenia procesu odzysku kobaltu, niklu i tlenku manganu(IV) z elektrolitów otrzymanych w wyniku ługowania odzyskanej ze zużytych baterii litowo-jonowych czarnej masy*. Zgłoszenie nr P 442385 z dnia 28.09.2022. Opublikowany i otrzymany 17.03.2025. Patent. Polska, nr PL 246860

Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., 2025c. Katarzyna Leszczyńska-Sejda, Andrzej Chmielarz, Dorota Kopyto, Michał Ochmański, Julita Sztandera, Grzegorz Benke,

Arkadiusz Palmowski, Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś, Marcin Kozak, Radosław Guzik. *Sposób prowadzenia procesu dwustopniowego ługowania mas bateryjnych*. Zgłoszenie P 440688 z dnia 18.03.2022

Elements, 2025. *Rare Earths Elements: Where in the World Are They?* <https://elements.visualcapitalist.com/rare-earth-elements-where-in-the-world-are-they/> (4.06.2025)

EUR-Lex, 2025a. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany rozporządzeń (UE) NR 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 i (UE) 2019/1020, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=consil:PE_78_2023_REV_1 (11.04.2025)

EUR-Lex, 2025b. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, zmieniające dyrektywę 2008/98/WE i rozporządzenie (UE) 2019/1020 oraz uchylające dyrektywę 2006/66/WE (Tekst mający znaczenie dla EOG), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32023R1542> (16.06.2025)

EUR-Lex, 2025c. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin, zmieniające i uchylające dyrektywy 67/548/EWG i 1999/45/WE oraz zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 (Tekst mający znaczenie dla EOG), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008R1272> (16.06.2025)

EUR-Lex, 2025d. Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32006R1907> (16.06.2025)

Gao, P., Yuan, P., Yue, T., Zhao, X., Shen, B., 2023. *Recycling metal resources from various spent batteries to prepare electrode materials for energy storage: A critical review*. Journal of Energy Storage 68, 107652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107652>

Huang, K., Li, J., Xu, Z., 2011. *Enhancement of the recycling of waste Ni–Cd and Ni–MH batteries by mechanical treatment*. Waste Management 31, 1292–1299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.006>

- ISAP, 2025. *Ustawa z dnia 24 kwietnia 2009 roku o bateriach i akumulatorach* (Dz. U. 2009 nr 79 poz. 666), <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20090790666> (10.04.2025).
- Jeon, J.H., Yun, S.H., Wen, J.X., Lee, M.S., 2025. *Development of a Hydrometallurgical Process for the Recovery of Valuable Metals from Synthetic Sulfuric Acid Leaching Solution of Ni-MH Batteries*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2025.2473084>
- Kaas, A., Wilke, C., Peuker, U.A., 2025. *Influence of shredder and mill settings on the material recoveries and product qualities of a two-stage mechanical recycling process of automotive lithium-ion batteries*. Waste Management 204, 114912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114912>
- KGHM Metraco S. A., 2025. Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Adam Żurek, Wojciech Satora, Artur Starowicz. *Sposób utylizacji masy odpadów baterii Zn-C i Zn-Mn pozostałego po wydzieleniu frakcji ferromagnetycznej*. Zgłoszenie nr P 396082 z dnia 25.08.2011. Opublikowany i otrzymany 29.01.2016. Patent Polska, nr 220853
- Lan, Y., Tan, L., Wu, N., Wen, J., Yao, W., Tang, Y., Cheng, H.-M., 2025. *Current status and outlook of recycling spent lithium-ion batteries*. Journal of Energy Storage 110, 115374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115374>
- Latini, D., Vaccari, M., Lagnoni, M., Orefice, M., Mathieux, F., Huisman, J., Tognotti, L., Bertei, A., 2022. *A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling*. Journal of Power Sources 546, 231979. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231979>
- Lee, C., Arby, D.S., Kim, C., Lim, J., Kwon, K., Chung, E., 2025. *Hydrometallurgical process of spent lithium-ion battery recycling Part. 1 Chemical leaching of valuable metals from cathode active materials: Review and case study*. Hydrometallurgy 235, 106494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2025.106494>
- Li, J., Li, H., Jiao, J., Xu, Y., 2025a. *Which policy can effectively alleviate the impact of raw material price fluctuations on battery recycling?* Environmental Impact Assessment Review 115, 107996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107996>
- Li, J., Nazari, S., Ma, X., Wei, N., He, Y., 2025b. *A critical review on the advances in thermal reduction technology for recycling spent lithium-ion batteries*. Next Materials 8, 100641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100641>
- Lin, X., Wang, X., Liu, G., Guobin Zhang, G., 2022. *Recycling of Power Lithium-Ion Batteries. Technology, Equipment, and Policies*. Wiley-Vch, Pekin

- Łoś, P., Jacek-Krakus, S., Markowicz, J., Łabuz, A., Sobianowska-Turek, A., Zygmunt, M., Janosz, M., Fornalczyk, A., 2024b. *A selective separation of platinum group metals from the Fe-PGM alloy using electrodeposition combined with electrochemical dealloying*. Journal of the Electrochemical Society 171, 1, 012506, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad1d96>
- Łoś, P., Łabuz, A., Sobianowska-Turek, A., Fornalczyk, A., Zygmunt, M., Janosz, M., 2024a. *Potencjodynamiczne elektrowydziałanie miedzi. Badania w skali laboratoryjnej i pilotowej: badania w skali laboratoryjnej i pilotowej*. Przemysł Chemiczny 103, 1, 130-135. DOI: <https://doi.org/10.15199/62.2024.1.12>
- Ma, X., Meng, Z., Bellonia, M.V., Spangenberg, J., Harper, G., Gratz, E., Elsa Olivetti, E., Arsenault, R., Wang, Y., 2025. *The evolution of lithium-ion battery recycling*. Nature Reviews Clean Technology 1, 75-94. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44359-024-00010-4>
- Mineral Prices, 2025. <https://mineralprices.com/rare-earths/> (6.06.2025)
- Nag, A., Gandhi, D., Jayabalan, B., Premkumar, M., Abhishek Pathak, A., Pavan Bijalwan, P., Bhagat, A.N., Bhadu, M., 2025. *Stress induced MnZn ferrite synthesis from pickling plant by-product of steel industry*. Journal of the Australian Ceramic Society. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41779-025-01221-z>
- Otron, A.M.A.-A., Tran, L.-H., Blais, J.-F., 2025. *Mass balance and economic study of a treatment chain for nickel, cobalt and rareearth elements recovery from Ni-MH batteries*. Environmental Technology 46, 9, 1369-1383. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2387374>
- Rezaei, M., Nekahi, A., Kumar, A.M.R., Nizami, A., Li, X., Deng, S., Nanda, J., Zaghib, K., 2025. *A review of lithium-ion battery recycling for enabling a circular economy*. Journal of Power Sources 630, 236157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.236157>
- Rinne, M., Lappalainen, H., Lundström, M., 2025. *Evaluating the possibilities and limitations of the pyrometallurgical recycling of waste Li-ion batteries using simulation and life cycle assessment*. Green Chemistry 27, 2522. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4GC05409A>
- Salehi, H., Maroufi, S., Mofarah, S.S., Nekouei, R.K., Sahajwalla, V., 2023. *Recovery of rare earth metals from Ni-MH batteries: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 178, 113248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113248>
- Samoylenko, Z.A., Ivakhnenko, N.N., Pushenko, E.I., Badekinb, M.Y., Sycheva, V.Y., 2024. *Relationship of Locally Inhomogeneous, Elastic, and Magnetic Fields in Mn-Zn Ferrites*. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 18, 920-928. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451024700654>

- Shen, J., Zhou, M., Liu, W., Shi, Y., Tang, W., Deng, Y., Liu, R., Zuo, Y., Zhang, J., 2025. *Advanced direct recycling technology enables a second life of spent lithium-ion battery*. *Energy Storage Materials* 74, 103964. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103964>
- Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach, <https://imn.lukasiewicz.gov.pl/> (16.06.2025)
- Sobianowska-Turek, A., Łoś, P., Fornalczyk, A., Zygmunt M., 2023. *Potential market value of electrolyte condensate recovered from LIBs mechanical*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 6, 19-20. DOI: <https://doi.org/10.15199/17.2023.6.5>
- Sobianowska-Turek, A., Szczepaniak, W., Marcinkowski, T., Zamorska-Wojdyła, D., 2013. *Content of mercury and cadmium in the stream of spent zinc-carbon batteries*. *Ecological Chemistry and Engineering*. A. 20, 4/5, 573-583. DOI: [http://dx.doi.org/10.2428/ecea.2013.20\(04\)054](http://dx.doi.org/10.2428/ecea.2013.20(04)054)
- Sobianowska-Turek, A., Urbańska, W., Matla, J., Zawiaślak, M., Janicka, A., 2020. *Analizy i wytyczne dotyczące pracy przy budowie akumulatorów litowo-jonowych stosowanych w samochodach elektrycznych oraz pracy z akumulatorami litowo-jonowymi*. Raporty Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej, Ser. SPR nr 6 Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, <https://uew.pl/> (24.06.2025)
- Zhang, S., Long, T., Zhang, H.-Z., Zhao, Q.-Y., Zhang, F., Wu, X.-W., Zeng, X.-X., 2022. *Electrolytes for Multivalent Metal-Ion Batteries: Current Status and Future Prospect*. *Chemistry, Sustainability, Energy, Materials* 15, e202200999. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.202200999>

6.1.2. Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne

Drugim w dorobku osiągnięciem naukowym, stanowiącym znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka są opracowane innowacyjne technologie recyklingu strumieni zużytych i/lub odpadowych chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów, wdrożone do praktyk przemysłowych. Badane i zaprojektowane przeze mnie zaawansowane procesy przeróbki i/lub recyklingu przemysłowych odpadów polimetalicznych baterii i akumulatorów, różnego typu i rodzaju, zalicza się obecnie na świecie do zaawansowanych technologii odzysku surowców krytycznych. Surowce te są niezbędne do funkcjonowania i integralności szeregu gałęzi przemysłowych, głównie sektorów związanych z odnawialnymi źródłami energii, cyfryzacji, kosmicznego i obronności^[1]. Opisane osiągnięcia technologiczne i procesowe dotyczą odzysku manganu, niklu, kobaltu, litu oraz miedzi, które zdefiniowane są w grupie 34 surowców krytycznych, ale także są wpisane na listę 17 surowców strategicznych w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany rozporządzeń (UE) Nr 168/2013, (UE) 2018/858, UE 2018/1724 i UE 2019/1020 z dnia 11.04.2024^[2]. Surowce krytyczne, to substancje chemiczne na których światowy popyt stale rośnie, a których produkcja jest złożona procesowo i technologicznie, a dodatkowo dostęp do złóż naturalnych we wszystkich krajach Unii Europejskiej jest ograniczony. Niesie to za sobą wysokie ryzyko występowania problemów z podażą. Opisane poniżej opracowania projektowe i technologiczne dotyczą badań i wdrożeń do warunków industrialnych procesów przetwarzania oryginalnych materiałów, będących surowcami metalonośnymi, po wstępnym mechanicznym rozdrobnieniu w dużej skali przemysłowej odpadów chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów. Opracowania te odnoszą się bezpośrednio do Rozdziału 3., Sekcji 1., Art. 1. Pkt. 1a, Podpkt. (iii) przywołanego rozporządzenia stwierdzającego, iż aby do 2030 roku znacząco wzrosła zdolności krajów unijnych w zakresie każdego z surowców strategicznych powinna zostać osiągnięta „*zdolność Unii w zakresie recyklingu, w tym w odniesieniu do wszystkich pośrednich etapów recyklingu, pozwalająca na pokrycie co najmniej 25% jej rocznego zużycia surowców strategicznych, a jednocześnie pozwalająca na recykling znacznie rosnących ilości każdego z surowców strategicznych z odpadów*”^[2]. Stąd w obliczu rosnącego deficytu surowców do produkcji baterii i akumulatorów, projektowane przeze mnie procesy technologiczne są niezwykle istotne. Z danych przemysłowych wynika, że do

¹ Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Nowe rozporządzenie UE dot. surowców krytycznych – bazowe informacje i cele, zaproszenie na spotkanie informacyjne dot. projektów strategicznych oraz na konsultacje dla przedsiębiorców*, <https://www.gov.pl/web/klimat/nowe-rozporzadzenie-ue-dot-surowcow-krytycznych> (10.04.2025)

² EUR-Lex, *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmian rozporządzeń (UE) Nr 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 i (UE) 2019/1020 z dnia 11.04.2024*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=consil:PE_78_2023_REV_1 (11.04.2025)

2034 roku zapotrzebowanie na surowce wykorzystywane w produkcji chemicznych źródeł energii baterii i akumulatorów znacznie przewyższy ich dostępność. Szacuje się, że do tego roku wielkość deficytu litu w postaci Li_2CO_3 wyniesie 572 000 ton, niklu 839 000 ton, kobaltu 91 000 ton a manganu 307 000 ton^[3]. W związku z powyższym, wszystkie nowo opracowywane, innowacyjne technologie mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności pozyskiwania i przetwarzania surowców bateryjnych. Z tego powodu, prowadzone przeze mnie badania naukowe i prace przemysłowe koncentrują się na zrównoważonym wykorzystaniu zasobów, co jest kluczowe w kontekście przyszłych wyzwań związanych z deficytem dotyczących wyżej wymienionych metali. Wspierając rozwój nowych technologii, wniosłam znaczący wkład w zapewnienie stabilności rynku surowców akumulatorowych w nadchodzących latach.

Opracowane przeze mnie, oryginalne osiągnięcia procesowe i technologiczne realizowane były/są wraz z dwoma przedsiębiorstwami KGHM Metraco S.A.^[4] oraz Elemental Strategic Metals Sp. z o.o.^[5] wchodzącej w skład Elemental Holding Capital Group^[6], które są liderami w obszarze górnictwa miejskiego (*urban mining*) w Polsce i na świecie. *Urban mining*, czyli odzysk surowców krytycznych z odpadów elektrycznych i elektronicznych, baterii i akumulatorów, katalizatorów samochodowych oraz innych odpadów miejskich, zyskuje na popularności w Polsce i Unii Europejskiej jako sposób na zrównoważone pozyskiwanie metali^[7]. Rozwój górnictwa miejskiego wpływa korzystnie na całą gospodarkę surowcową Unii Europejskiej oraz sprzyja rozwojowi innowacyjnych technologii recyklingu i odzysku surowców z odpadów polimetalicznych^[8]. W marcu 2025 Komisja Europejska ogłosiła listę 47 projektów strategicznych, które mają na celu zabezpieczenie i dywersyfikację dostaw surowców na rynek europejski. Na liście znalazły się dwa projekty z Polski. Pierwszy Zakładu Rafinacji Pierwiastków Ziemi Rzadkich w Puławach, drugi Zakładu Recyklingu Baterii „Polvolt” w Zawierciu należący do Elemental Battery Metals. Łączna wartość inwestycji dla wszystkich 47 projektów wynosi 22,5 mld euro^[9].

Poniżej przedstawiłam szczegółowe informacje opisujące oryginalne osiągnięcia procesowe oraz technologiczne zrealizowane w obu wymienionych powyżej

³ Elements, <https://elements.visualcapitalist.com/visualizing-the-supply-deficit-of-battery-minerals-2024-2034p/> (16.04.2025)

⁴ KGHM Metraco S.A., <https://metraco.pl/> (11.04.2025)

⁵ Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., <https://www.elementalsm.pl/> (11.04.2025)

⁶ Elemental Holding Capital Group, <https://elemental-holding.com.pl/> (11.04.2025)

⁷ Firmansyah, M.L., Rizki, I.N., Ullah, N., 2025. *Recent advances in urban mining technology: A focus on electronic waste recycling potential in Indonesia*. Cleaner Waste Systems 10, 100239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100239>

⁸ Ecoekonomia, <https://ecoekonomia.pl/2024/09/09/bezpieczenstwo-surowcowe-z-recyklingu/> (30.04.2025)

⁹ Ministerstwo Klimatu i Środowiska, <https://www.gov.pl/web/klimat/dwa-polskie-projekty-na-liscie-strategicznym-inicjatyw-ue> (30.04.2025)

przedsiębiorstwach, mających znaczący wpływ na rozwój dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki.

❖ **KGHM METRACO S.A.**

(wcześniejsze nazwy firmy DKE Sp. z o.o., ECOREN DKE, KGHM ECOREN S.A.)

2005-2016

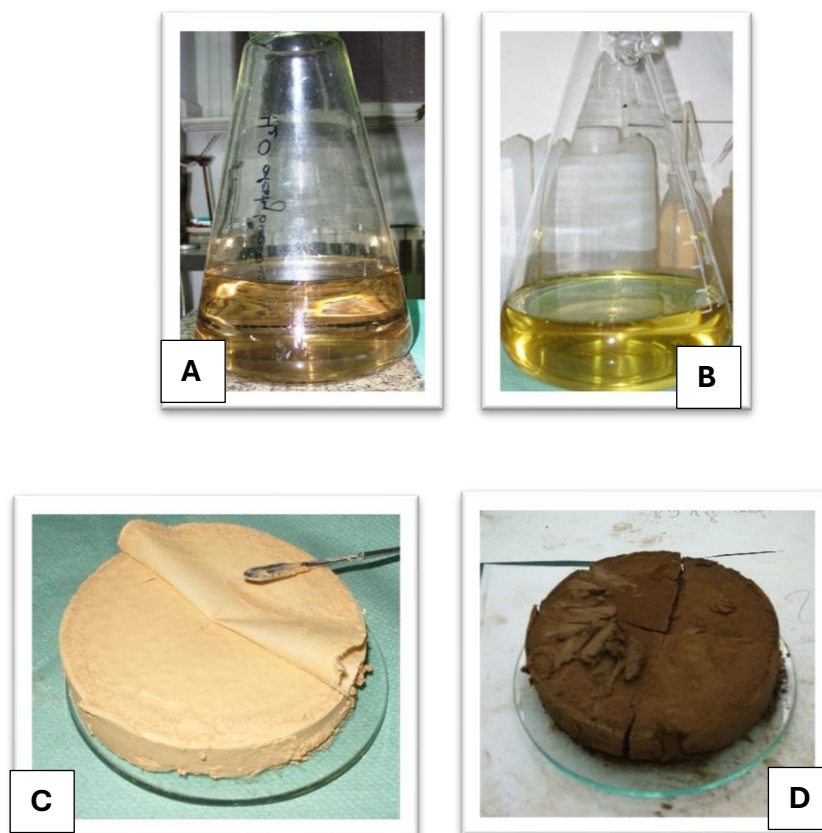
Współprace naukowo-badawczą z firmą rozpoczęłam w 2005 roku podczas realizacji pracy doktorskiej pt.: *Odzysk cynku i manganu z baterii Zn-C i Zn-Mn*. Przedsiębiorstwo ECOREN DKE z Polkowic przekazało mi wówczas do badań główny strumień materiałowy powstający w trakcie przetwarzania mechanicznego odpadów baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych – frakcję paramagnetyczną. Moim zadaniem badawczym była przeróbka bogatego w cynk i mangan materiału odpadowego, w celu odzysku obu tych metali. Co w tamtym czasie miało, ale również obecnie ma duże znaczenie dla zapewnienia standardów polityki ekologicznej Unii Europejskiej i wynikających stąd przepisów. W ramach pracy doktorskiej opracowałam wstępne założenia do procesu przeróbki strumienia odpadów frakcji paramagnetycznej. W swojej pracy doktorskiej wykazałam, że jest możliwe prowadzenie procesu kwaśnego ługowania surowca baterijnego, w którym do roztworu, w pojedynczej operacji (ługowaniu jednostopniowym), przeprowadzone są oba metale, tj. cynk i mangan z wydajnością odpowiednio 80% - 90% i 90% - 100%. W przypadku manganu konieczne jest, dla osiągnięcia takiej wydajności, użycie reduktora. W toku badań ustaliłam, że może nim być, oprócz wymienionego w literaturze nadtlenku wodoru, kwas szczawiowy. Oba metale odzyskałam z roztworu do postaci mieszaniny tlenkowej (wodorotlenkowej) na drodze współstrącania wodorotlenkiem sodu. Ważnym elementem mojej pracy doktorskiej było to, że badałam proces ługowania zarówno w stężonych roztworach kwasu siarkowego(VI), jak i rozcieńczonych (te drugie były omawiane w literaturze), wskazując na ich specyficzne cechy (miedzy innymi w stężonych roztworach nie ma potrzeby dodawania reduktora dla odzysku manganu). W pracy doktorskiej zaproponowałam ostatecznie określoną wersję procesu, którą w danych warunkach można nazwać optymalną z kompletną informacją o wszystkich parametrach procesu (w różnych wariantach). Opracowane ciągi technologiczne pozwala na wybór pomiędzy procesami z zestalaniem względnie wysokich temperaturach z wykorzystaniem H_2SO_4 (i późniejszym ługowaniem takiej masy wodą) i procesami roztworami prowadzonymi w temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia dla których konieczna byłaby optymalizacja do danych warunków przemysłowych. Wyniki prac badawczych, uzyskane podczas realizacji doktoratu, pozwoliły firmie KGHM ECOREN S.A. na podjęcie decyzji o dalszych pracach badawczo-przemysłowych nad kompleksową technologią przetwarzania baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych metodami hydrometalurgicznymi.

Dalsze badania prowadzone wspólnie z firmą KGHM ECOREN S.A., rozpoczęte już po obronie pracy doktorskiej, skalowane były od prac laboratoryjnych, przez

wielkolaboratoryjne aż do póltechnologicznych. Prace te prowadzone były na Politechnice Wrocławskiej oraz w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach (obecnie Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach w Centrum Hydroelektrometalurgii)^[10]. Wszystkie badania eksperymentalne po uzyskaniu stopnia doktora, obejmowały tym razem optymalizację procesu dwustopniowego kwaśnego ługowania z lub bez dodatku reduktora. Ponadto, eksperymenty obejmowały nie tylko frakcję paramagnetyczną, ale mieszaninę frakcji paramagnetycznej i diamagnetycznej (zmieszanych w odpowiednich proporcjach masowych) po wcześniejszym wydzieleniu frakcji ferromagnetycznej. Prace te miały na celu odzysk metali (głównie cynku i osobno manganu) do produktów handlowych w postaci roztworów i/lub substancji stałych, mających zastosowanie do produkcji nawozów mineralnych – Rysunek 8. Proces kwaśnego ługowania, ze względu na konieczność użycia reduktora do pełnego przekształcenia manganu do formy rozpuszczalnej, optymalizowany był dla dwóch etapów. W pierwszym etapie, roztwarzano zmieszaną frakcję paramagnetyczną i frakcję diamagnetyczną w rozcieńczonym roztworze kwasu siarkowego(VI) bez dodatku reduktora. W etapie tym do roztworu przechodził prawie cały cynk (> 95%) i mniejsza część manganu (< 30%). W drugim etapie, w trakcie kolejnego roztwarzania pozostałości, po etapie pierwszym w rozcieńczonym roztworze kwasu siarkowego(VI), dodawany był reduktor i do roztworu przeprowadzona została pozostała część manganu (Mn). Badanymi reduktorami związków manganu zawartych w frakcji paramagnetycznej oprócz perhydrolu i kwasu szczawiowego były następujące substancje: związki siarki na +4 stopniu utlenienia, gliceryna, hydrazyna, mieszanina kwasu adypinowego, kwasu glutarowego i kwasu bursztynowego (handlowa nazwa mieszaniny kwasów organicznych to KDK) oraz metanol. Teoretyczne metody doboru czynników wspomagających drugi etap kwaśnego ługowania frakcji paramagnetycznej i frakcji diamagnetycznej wynikające z właściwości termodynamicznych weryfikowane w warunkach eksperymentalnych przedstawione zostały w publikacji naukowej pt.: *Electrochemical evaluation of manganese reducers - recovery of Mn from Zn-Mn and Zn-C battery waste*, Agnieszka Sobianowska -Turek i współ. [H-1] i stanowią część osiągnięcia naukowego, tj.: cyklu tematycznie powiązanych artykułów naukowych. Z uzyskanych roztworów, po regulacji pH za pomocą roztworu wodorotlenku sodu (NaOH), wytrącano węglany obu metali roztworem buforowym składającym się NH_4HCO_3 rozpuszczanym w NH_4OH i/lub Na_2CO_3 . Część prac eksperymentalnych przedstawiających wyniki optymalizacji procesów współstrącania metali przedstawiono w pracy pt.: *Recovery of zinc and manganese, and other metals (Fe, Cu, Ni, Co, Cd, Cr, Na, K) from Zn-MnO₂ and Zn-C waste batteries: hydroxyl and carbonate co-precipitation from solution after reducing acidic leaching with use of oxalic acid*, Agnieszka Sobianowska-Turek i współ. [H-2] przywołanej w pkt. 6.1.1.

¹⁰ Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie metali nieżelaznych w Gliwicach, <https://imn.lukasiewicz.gov.pl/>, (16.04.2025)

niniejszego dokumentu i stanowią część osiągnięcia naukowego, tj.: cyklu tematycznie powiązanych artykułów naukowych.



Rysunek 8. Produkty końcowe technologii recyklingu masy odpadów baterii cynkowo-węglowych i cynkowo-manganowych pozostałej po wydzieleniu frakcji ferromagnetycznej, zgodnie z polskim patentem nr 220853 firmy KGHM Metraco S.A.: A – roztwór uzyskany po pierwszym etapie kwaśnego ługowania odpadów bateryjnych z wykorzystaniem H_2SO_4 , B – roztwór uzyskany po drugim etapie kwaśnego redukcyjnego ługowania z wykorzystaniem H_2SO_4 i $C_2H_2O_4$, C i D – osad mokry i suchy otrzymany z współstrącania $ZnCO_3$ i $MnCO_3$ z roztworu uzyskanego po pierwszym etapie kwaśnego ługowania z wykorzystaniem jako czynnika strąceniowego roztwór buforu amonowego NH_4HCO_3 i NH_4OH ^[11].

Współpraca objęła wykonanie szeregu opracowań literaturowych i badawczych w/w zakresie i zakończyła się udzieleniem patentu polskiego firmie KGHM Metraco S.A, którego jestem pierwszym współautorem i posiadam 35% udział, na technologię utylizacji masy odpadów baterii Zn-C i Zn-Mn pozostałej po wydzieleniu frakcji ferromagnetycznej.

¹¹ KGHM Metraco S. A., Patent polski nr 220853, <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.396082>, (16.04.2025)

W celu rozgraniczenia osiągnięć uzyskanych przed doktoratem, zamieszczam poniżej listę opracowań laboratoryjnych i literaturowych wykonane przed datą nadania stopnia doktora

- Włodzimierz Szczepaniak, Monika Zabłocka-Malicka, Agnieszka Sobianowska-Turek. *Odzysk surowcowy z odpadów bateryjnych, ze szczególnym uwzględnieniem materiału gromadzonego w DKE Sp. z o.o. w Polkowicach*, Politechnika Wrocławska, opracowanie literaturowe, 2006
- Włodzimierz Szczepaniak, Agnieszka Sobianowska-Turek. *Wytworzenie 1 kg materiału zawierającego $ZnCO_3$ i 1 kg materiału zawierającego $MnCO_3$* , Politechnika Wrocławska, opracowanie laboratoryjne, 2009
- Włodzimierz Szczepaniak, Agnieszka Sobianowska-Turek. *Preparatyka materiału węglowego*, Politechnika Wrocławska, opracowanie laboratoryjne, 2009
- Włodzimierz Szczepaniak, Agnieszka Sobianowska-Turek. *Rynek recyklingu baterii niklowo-kadmowych, niklowo-wodorkowych i litowo-jonowych w Polsce*, Politechnika Wrocławska, opracowanie literaturowe, 2009

Natomiast opracowania laboratoryjne i literaturowe wykonane po uzyskaniu stopnia doktora, to

- Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Adam Żurek, Wojciech Satora, Artur Starowicz. Projekt wynalazczości pt.: *Hydrometalurgiczna przeróbka frakcji diamagnetycznej i paramagnetycznej powstałej po mechanicznej obróbce strumienia zużytych baterii Zn-C i Zn-Mn*, KGHM ECOREN S.A., 2010
- Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak. *Dobór nowego potencjalnego reduktora dwutlenku manganu (MnO_2) zawartego w mieszaninie frakcji paramagnetycznej i diamagnetycznej pochodzącej z obróbki mechanicznej strumienia zużytych baterii Zn-C i Zn-Mn do procesu dwuetapowego kwaśnego ługowania*, opracowanie laboratoryjne, Politechnika Wrocławska, 2010
- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Dobór potencjalnego nowego reduktora dwutlenku manganu (MnO_2) zawartego w mieszaninie frakcji paramagnetycznej i diamagnetycznej, pochodzącej z obróbki mechanicznej strumienia zużytych baterii Zn-C i Zn-Mn do procesu dwuetapowego kwaśnego ługowania*, opracowanie literaturowe, 2010

- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Koreferat ze sprawozdania IMN nr 6824/10 pt. Wykonanie prób w celu zaprojektowania instalacji przemysłowej do przerobu mieszaniny frakcji paramagnetycznej i diamagnetycznej (tzw. czarnej masy), pochodzącej z recyklingu baterii cynkowo-manganowych w celu otrzymania dwóch produktów - węglanu cynku i węglanu manganu, 2010*

Uzyskany patent polski

- KGHM Metraco S. A., Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Adam Żurek, Wojciech Satora, Artur Starowicz. *Sposób utylizacji masy odpadów baterii Zn-C i Zn-Mn pozostałego po wydzieleniu frakcji ferromagnetycznej*. Zgłoszenie nr P 396082 z dnia 25.08.2011. Opublikowany i otrzymany 29.01.2016. Patent Polska, nr 220853

❖ **Elemental Strategic Metals Sp. z o.o.**

2020 - obecnie

Moim największym osiągnięciem na styku nauki i przemysłu jest współpraca z firmą Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. Współpraca ta zakończyła się wdrożeniem opracowanej przeze mnie technologii dotyczącej recyklingu baterii LiBs do warunków przemysłowych. Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. realizuje projekt *Opracowanie i pierwsze wdrożenie przemysłowe innowacyjnych technologii recyklingu baterii litowo-jonowych i katalizatorów z odzyskiem metali o strategicznym znaczeniu*, dotyczący rozwoju technologii bezpiecznego, przyjaznego środowisku i efektywnego finansowo transportu, przechowywania i recyklingu baterii litowo-jonowych (Li-ion) oraz zużytych katalizatorów samochodowych. Projekt ten został opisany w tzw. project portfolio, przedstawionym Komisji Europejskiej w ramach programu Important Projects of Common European Interest (IPCEI) on Batteries i zaakceptowanym decyzją KEC (2019) 8823 z dnia 9 grudnia 2019 roku. Następnie w wyniku oceny, prowadzonej w ramach konkursu nr 8/1.1.1/2020 – Szybka ścieżka – IPCEI, organizowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w dniu 23 grudnia 2020 roku zawarta została umowa o dofinansowanie projektu, którego całkowity budżet wynosił 383 959 417 zł na okres realizacji 2020 - 2023. Celem nadrzędnym projektu jest zwiększenie wolumenu recyklingu baterii litowo-jonowych i katalizatorów samochodowych oraz odzysku metali o strategicznym znaczeniu dla europejskiego przemysłu bateryjnego i elektromobilności głównie litu, kobaltu, niklu, manganu, platyny, palladu i rodu. W ramach projektu Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. rozwijało w nowoutworzonym Laboratorium Działu Badań i Rozwoju innowacyjne procesy odzysku metali istotnych dla elektromobilności. W latach 2021 – 2023 w projekcie tym pełniłam rolę Kierownika badań nad technologią recyklingu baterii litowo-jonowych, będąc jednocześnie na urlopie bezpłatnym na Politechnice Wrocławskiej. W oparciu o uzyskane przeze mnie wyniki badań,

wytypowałam z pozostałymi członkami Zespołu Badań i Rozwoju, optymalną technologię recyklingu zużytych i/lub odpadowych ogniw LIBs. Równocześnie brałam udział w opracowaniu założeń projektowych na potrzeby projektu instalacji rafinacji metali litu, kobaltu, niklu oraz manganu. W oparciu o powyższe, Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. wybudowało pierwszy tego rodzaju zakład, dokonując pilotażowego, pierwszego wdrożenia przemysłowego opracowanych przez Zespół Badań i Rozwoju technologii (którego byłam członkiem). Projekt obejmował zakończoną, już fazę badań przemysłowych i eksperymentalnych prac rozwojowych (RDI, *Research, Development and Innovation*) oraz trwającą obecnie fazę pierwszego wdrożenia przemysłowego - inwestycyjną (FID, *First Industrial Deployment*). W fazie RDI prowadzone były badania związane z opracowaniem i rozwojem technologii recyklingu baterii litowo-jonowych (Li-ion) oraz katalizatorów samochodowych, a także testy technologii w skali laboratoryjnej. W fazie FID wybudowana została w Zawierciu w Strefie Aktywności Gospodarczej fabryka rafinerii metali wraz z instalacją pilotażową, w której prowadzone są dalsze badania w celu walidacji i optymalizacji procesów technologicznych (opracowanych wcześniej w fazie RDI) w skali zbliżonej do skali produkcji przemysłowej^[12]. Na autorską technologię firmy Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. przetwarzania zużytych i/lub odpadowych baterii i akumulatorów litowo-jonowych składają się trzy główne etapy. Etap pierwszy obejmuje rozładowanie ogniw z odzyskiem energii i/lub chemiczne rozładowanie odpadów w cieczach elektrolitycznych. Etap drugi, to obróbka mechaniczna kruszenie, mielenie, kondensacja elektrolitu oraz rozdział metodami fizycznymi frakcji surowcowych. Jednostkowy proces obróbki mechanicznej w przypadku dużych ogniw pochodzących z samochodów elektrycznych poprzedzony jest demontażem ręcznym obudów z modułów akumulatorów BEV (*Battery Electric Vehicles*). Zaawansowana separacja prowadzi do uzyskania produktów handlowych w postaci frakcji: aluminium i miedzi, stali, tworzyw sztucznych oraz masy bateryjnej. Masa bateryjna w skład której wchodzi cenne pierwiastki kobalt, nikiel, mangan i lit oraz grafit/węgiel stanowi wsad do trzeciego etapu technologii odzysku metodami metalurgii chemicznej krytycznych surowców metalicznych. Na unikatowy w skali światowej proces rafinacji wyżej wymienionych metali składa się ciąg operacji hydrometalurgicznych m.in. wielostopniowe kwaśne ługowanie z/lub bez dodatku czynnika wspomagającego (reduktora), strącanie i/lub współstrącanie zanieczyszczeń i/lub produktów w postaci wodorotlenkowej i/lub węglanowej, elektrowydziałanie i/lub ekstrakcja rozpuszczalnikowa czystych metali i/lub soli metali. Uzyskane produkty o czystości technicznej i/lub *battery grade* (czystości bateryjnej) mogą być wykorzystane do ponownej produkcji ogniw litowo-jonowych lub w innych gałęziach przemysłowych^[13]. W okresie przypadającym na lata 2024 - 2027 firma Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. przewidziała i kontynuuje szereg działań, związanych z walidacją wszelkich procesów badawczych i technologicznych, prowadzonych w instalacji pilotażowej, optymalizację

¹² AE Elemental JV, <https://aeelemental.com/> (22.04.2025)

¹³ Elemental Battery Metals, <https://elementalbatteries.com/> (16.04.2025)

procesów technologicznych i efektywności prowadzonej działalności oraz realizację efektów zewnętrznych projektu (*spillover effects*), związanych z rozpowszechnianiem efektów projektu oraz ogólnym wpływem realizacji projektu na społeczeństwo, gospodarkę i poziom jej innowacyjności. W tej fazie projektu zatrudniona jestem w firmie Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. na stanowisku Konsultanta. Obecnie do moich zadań należy doradztwo naukowe, badawcze i technologiczne w aspektach technologicznych realizowanych przez firmę projektów.

Praca w tak dużym projekcie B+R+F pozwoliła mi na współpracę z wieloma instytucjami naukowymi i firmami przemysłowymi na całym świecie. W latach 2021 - 2024 projektowałam, realizowałam i nadzorowałam wraz z Zespołem Badań i Rozwoju, badania przemysłowe w poszczególnych obszarach technologii recyklingu baterii i akumulatorów litowo-jonowych (Li-ion) zleconymi m.in. w Niemczech: URT Umwelt und Recyclingtechnik GmbH^[14] i BHS Sonthofen^[15] – obróbka mechaniczna, SGL Carbon^[16] – badanie produktów węglowo-grafitowych, w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej: Ascend Elements^[12,17] – odzysk litu metodami termicznymi i hydrometalurgicznymi, Korei Południowej: Jae Young Tech. Co., Ltd.^[18] – odzysk metali metodami hydrometalurgicznymi, w Chińskiej Republice Ludowej: Kopperchem^[19] i Btree Recycling Technologies^[20] – odzysk metali metodami ekstrakcji rozpuszczalnikowej oraz w Polsce: Electrecity Industrial Sp. z o.o. – testy i procedury rozładowania ogniw, Montech Sp. z o.o.^[21] – testy techniczne procesów filtracji przemysłowych, Selvita^[22] – opracowanie metod analitycznych kondensatów elektrolitów, DEEK Fire Solutions Sp. z o.o.^[23] – testy palności i systemy gaszenia LIBs, Bipromet S.A, Grupa KHGM^[24] i Prochem S.A.^[25] – projektowanie instalacji przemysłowej recyklingu LIBs.

Kierowałam, pilotowałam, nadzorowałam i brałam czynny udział w zleconych przez Zespół Badań i Rozwoju Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. badaniach testowych w skali laboratoryjnej, wielkolaboratoryjnej i półprzemysłowej recyklingu LIBs w polskich jednostkach naukowych m.in. Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach w Centrach: Hutnictwa, Hydroelektrometalurgii, Ochrony Środowiska i Chemii Analitycznej^[10], Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Chemii

¹⁴ URT Umwelt und Recyclingtechnik GmbH, <https://www.urt-recycling.com/seite/en/disposal/04/-/Home.html> (17.04.2025)

¹⁵ BHS Sonthofen, <https://www.bhs-sonthofen.com/recycling-technology> (17.04.2025)

¹⁶ SGL Carbon, <https://www.sglcarbon.com/en/> (22.04.2025)

¹⁷ Ascend Elements, <https://ascendelements.com/> (17.04.2025)

¹⁸ Jae Young Tech. Co., Ltd., <http://jaeyoungtech.co.kr/> (22.04.2025)

¹⁹ Kopperchem, <https://en.kopperchem.com/> (17.04.2025)

²⁰ Btree Recycling Technologies, <https://btree.tech/> (17.04.2025)

²¹ Montech Sp. z o.o., <https://montech.pl/> (22.04.2025)

²² Selvita, <https://selvita.com/pl/> (22.04.2025)

²³ DEKK Fire Solutions Sp. z o.o., <https://dekk.pl/> (22.04.2025)

²⁴ Bipromet S.A., Grupa KHGM, <https://www.bipromet.com/> (22.04.2025)

²⁵ Prochem S.A., <https://prochem.com.pl/> (22.04.2025)

Przemysłowej w Warszawie z Grupą badawczą Technologii Chemicznej, Sekcją procesów elektrochemicznych^[26], Uniwersytetem Jana Długosza w Częstochowie, Wydziałem Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technologicznych, Instytutem Chemii^[27], Instytucie Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk w Zabrze^[28] oraz Głównym Instytucie Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy^[29].

Dodatkowo chciałam zaznaczyć, że część z uzyskanych wyników prac naukowych i przemysłowych konsultowana była i/lub realizowana równolegle w Korea National Institute for Raw Metals^[30] (Korea Południowa) oraz Centrach badawczych firm Boree Recycling Technologies^[20], Kopperchem^[19] (Chińskiej Republice Ludowej) oraz Ascent Element^[17] (Stany Zjednoczone Ameryki).

Byłam też opiekunem trzymiesięcznego stażu doktorskiego (czerwiec-sierpień 2022) dotyczącego zadania badawczego w zakresie selektywnego usuwania jonów kobaltu z roztworów po kwaśnym ługowaniu mas bateryjnych i/lub stopu metali z wykorzystaniem komercyjnych dostępnych ekstrahentów/wymieniaczy jonowych dr Joanny Kończyk (stażystka) z Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego im. Jana Długosza w Częstochowie.

Największymi ujawnionymi osiągnięciami Zespołu Badań i Rozwoju nie stanowiącymi *know-how* firmy Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., którym kierowałam w latach 2021 - 2024, jest:

- ✓ opracowanie przemysłowego hydrometalurgicznego procesu ługowania mas bateryjnych powstałych po obróbce mechanicznej zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych różnego typu i rodzaju oraz elektrochemiczny odzysk metali miedzi, niklu i kobaltu oraz tlenku manganu(IV) z roztworów po ługowaniu metodami potencjodynamicznymi, które stanowią nowe produkty, odmienne od tych zawartych w oryginalnych odpadach LIBs,
- ✓ opracowanie przemysłowego hybrydowego pirometalurgicznego i hydrometalurgicznego procesu odzysku technicznego Li_2CO_3 z pyłu uzyskanego po termicznym przetwarzaniu mas bateryjnych powstałych po obróbce mechanicznej zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych różnego typu i

²⁶ Sieci Badawcza Łukasiewicz, Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie, <https://ichp.lukasiewicz.gov.pl/> (17.04.2025)

²⁷ Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie, <https://www.ujd.edu.pl/> (17.04.2025)

²⁸ Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk w Zabrze, <http://ipis.pan.pl/pl/#page-top> (17.04.2025)

²⁹ Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, <https://gig.eu/pl> (17.04.2025)

³⁰ Korea National Institute for Raw Metals, <https://www.koram.re.kr/en/> (22.04.2025)

rodzaju, które stanowią produkty handlowy wykorzystywane do produkcji nowych ogniw Li-ion.

Wyniki badań nad innowacyjną metodą ługowania mas bateryjnych powstałych w wyniku przerobu odpadów baterii LIBs, opisane szczegółowo w artykule pt.: *An innovative method of leaching of battery masses produced in the processing of Li-Ion battery scrap*, Katarzyna Leszczyńska-Sejda i współ. [H-7], zostały przywołane w części 6.1.1. niniejszego autoreferatu i stanowią część osiągnięcia naukowego tj. cyklu tematycznie powiązanych publikacji naukowych. Wyniki te pozwoliły na sformułowanie zgłoszenia patentowego *Sposób prowadzenia procesu dwustopniowego ługowania mas bateryjnych* oraz rozważenie przez Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. wdrożenie w tej formie procesu kwaśnego ługowania mas bateryjnych do warunków przemysłowych^[31].

W odniesieniu do procesów elektrochemicznego odzysku surowców bateryjnych według danych literaturowych nie ma obecnie w warunkach eksploatacji komercyjnej standardowej technologii recyklingu zużytych ogniw litowo-jonowych, a sam proces charakteryzuje się dużą zmiennością wsadu baterii i akumulatorów LIBs z uwagi na ich różne typy, budowę i skład chemiczny ilościowo-jakościowy. Złożoność i zmienność wsadu strumienia odpadów poddanych procesowi recyklingu powoduje, że zastosowane technologie muszą wykazywać się efektywnością w szerokim zakresie parametrów. Stanowi to jedną z głównych trudności procesu przemysłowego rozdziatu i recyklingu odpadów polimetalicznych ogniw litowych^[32]. Dlatego też zarówno w procesach przemysłowych, jak i w badaniach laboratoryjnych często dokonuje się wyboru takiego substratu i/lub jednostkowego procesu technologicznego, który zapewnia możliwie najprostszy i najbardziej powtarzalny efekt recyklingu z uwagi na mniejszą złożoność i zmienność składu. Separacja jonów metali Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} i Mn^{4+} w procesach elektrochemicznych opracowanych przez Zespół Badań i Rozwoju Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. może być realizowana z minimalną modyfikacją lub bez modyfikacji składu elektrolitu uzyskanego po kwaśnym, redukcyjnym, wielostopniowym ługowaniu mas bateryjnych, czyli bez zastosowania dodatkowych odczynników i materiałów chemicznych. Produkty otrzymywane w procesach elektrochemicznych, to metale Cu, Co i Ni o różnej czystości przedstawione na Rysunkach od 9 do 11 oraz MnO_2 . Przykładowe i zarazem szczegółowe wyniki badań w skali laboratoryjnej i pilotowej innowacyjnego procesu potencjodynamicznego odmiedziowania roztworów otrzymanych w wyniku kwaśnego redukcyjnego ługowania mas bateryjnych litowo-jonowych zostały opublikowane w artykule pt.: *Potencjodynamiczne elektrowydziałanie miedzi. Badania w*

³¹ Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., Zgłoszenie patentowe P441429, <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.440688> (22.04.2025)

³² Ma, X., Meng, Z., Bellonia, M.V., Spangenberg, J., Harper, G., Gratz, E., Olivetti, E., Renata Arsenault, R., Wang, Y., 2025. *The evolution of lithium-ion battery recycling*. Nature Reviews Clean Technology 1, 75–94. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44359-024-00010-4>

skali laboratoryjnej i pilotowej, Przemysław Łoś i współ.^[33] przywołanej poniżej. W publikacji tej, określone w skali laboratoryjnej optymalne warunki potencjodynamicznego odmiedziowania elektrolitów porównano z procesem prowadzonymi w skali pilotowej, w instalacji elektrochemicznej odtwarzającej w kluczowych aspektach warunki procesu komercyjnego (typ i rozmiar elektrod, temperaturę), Rysunek 12. Wykazano też, że kwaśne roztwory poługownicze mogą być odmiedziowane do poziomu poniżej 20 ppm miedzi. Natomiast otrzymana w procesie miedź katodowa może mieć postać litej katody, folii lub proszków (albo nanoproszków). Uzyskane wyniki potwierdziły, że opracowana metoda potencjodynamicznego elektrowydzielania miedzi ma realny potencjał zastosowania komercyjnego, zwłaszcza w procesach odzyskiwania metalicznej miedzi z surowców wtórnych.

W 2025 roku Firmie Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. udzielono dwóch patentów polskich, na odzysk metali metodami elektrochemicznymi z roztworów po ługowaniu mas bateryjnych litowo-jonowych (Li-ion)^[34,35], których jestem pierwszym współautorem.



Rysunek 9. Osad katodowy miedzi (po lewej) oraz folia miedziana po usunięciu z elektrody stalowej (po prawej)^[34]

³³ Łoś, P., Łabuz, A., Sobianowska-Turek, A., Fornalczyk, A., Zygmunt, M., Janosz, M., 2024. Potencjodynamiczne elektrowydzielanie miedzi. *Badania w skali laboratoryjnej i pilotowej: badania w skali laboratoryjnej i pilotowej*. Przemysł Chemiczny 103, 1, 130-135.
DOI: <https://doi.org/10.15199/62.2024.1.12>

³⁴ Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., Patent polski nr 246778, <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.442384> (22.04.2025)

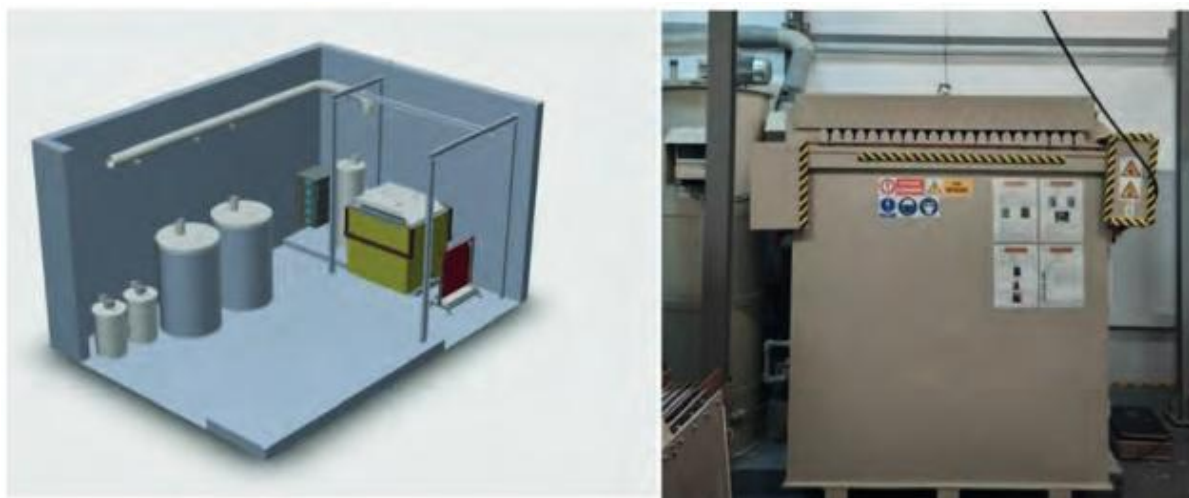
³⁵ Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., Patent polski nr 246860, <https://ewyszukiwarka.pue.uprp.gov.pl/search/pwp-details/P.442385> (22.04.2025)



Rysunek 10. Osad katodowy kobaltu (po lewej) oraz produkt kobaltowy po usunięciu z elektrody stalowej (po prawej)^[35]



Rysunek 11. Osad katodowy niklu (po lewej) oraz produkt niklowy po usunięciu z elektrody stalowej (po prawej)^[35]



Rysunek 12. Pilotowe stanowisko badawcze do testów elektrowydzielania metali z roztworów po kwaśnym redukcyjnym ługowaniu mas bateryjnych pochodzących z ogniw

Li-ion, firmy Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., znajdujące się w Laboratorium Działu Badań i Rozwoju^[33]

Wyniki badań nad innowacyjnym procesem hybrydowym łączącym metody pirometalurgiczne i hydrometalurgiczne w celu odzysku technicznego Li_2CO_3 z pyłów po termicznym przetwarzaniu mas bateryjnych uzyskanych po obróbce mechanicznej zużytych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych, opisane zostały szczegółowo w artykule pt.: *Recovery of technical Li_2CO_3 from dust obtained after pyrometallurgical processing of Li-ion battery masses on a quarter-technological scale* [H-9] Agnieszka Sobianowska-Turek i współ. i przywołane w Podpkt. 6.1.1. niniejszego autoreferatu i stanowią część osiągnięcia naukowego, tj.: cyklu tematycznie powiązanych publikacji naukowych.

W odniesieniu do technologii hybrydowej, proces przeróbczy rozpoczyna się od przetopu redukcyjnego masy bateryjnej LIBs, prowadzącej do powstania trzech frakcji: stopu metali (Co-Ni-Cu-(Fe), produkt handlowy), pyłu (zawierającego Li i F) oraz żużla (zawierającego Li) – Rysunek 13. Szczególną wartość wykazuje pył z filtrów workowych, który zawiera wysokie stężenia litu i fluoru. Dzięki optymalizacji warunków selektywnego ługowania kwasem mineralnym, możliwe jest selektywne ługowanie litu i jego odzysk w postaci technicznego Li_2CO_3 metodą straceniową, stanowiącego pełnowartościowy surowiec wtórny dla przemysłu^[36].

I. Masa bateryjna LIBs



II. Granulacja masy bateryjnej LIBs



³⁶ KBR, <https://www.kbr.com/en/insights-news/stories/neptune-energy-achieves-milestone-first-battery-grade-lithium-carbonate-brine-using-kbrs-purelir-technology> (15.06.2025)

III. Redukcyjne topienie granulowanej masy akumulatorowej w piecu łukowo-oporowym



IV. Produkty procesów pirometalurgicznych przetwarzania LIBs

Ni-Co-Cu-(Fe) stop

Żużel

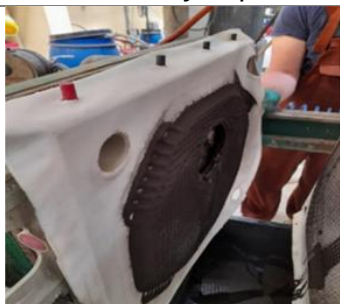
Li-F pył



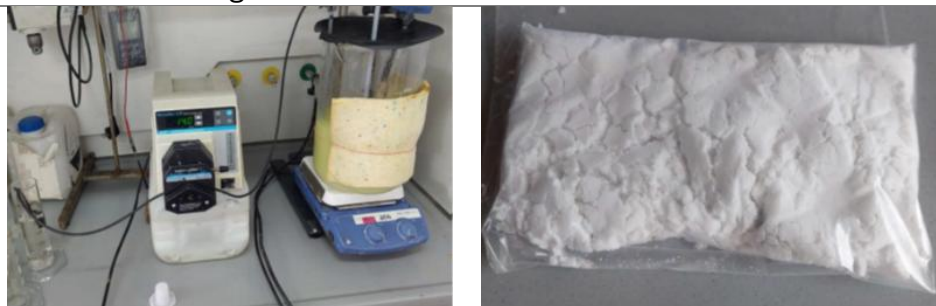
V. Li-F pył ługowanie



VI. Filtracja zawiesiny po ługowaniu za pomocą prasy komorowo-membranowej (prasy CM) z półkami ustawionymi pionowo



VII. Stracanie technicznego Li_2CO_3



Rysunek 13. Jednostkowe procesy przetwarzania masy akumulatorowej pochodzącej z ogniw litowo-jonowych (LIB) w celu uzyskania komercyjnego produktu technicznego Li_2CO_3 wraz z urządzeniami i sprzętem wykorzystywanym w badaniach, za pracą [H-9]

W trakcie realizacji zadań projektowych Zespół Badań i Rozwoju Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. przygotował liczne materiały publikacyjne, opracowania procesowe i/lub technologiczne oraz zgłoszenia patentowe, samodzielnie, jak i w kooperacji z wyżej wymienionymi instytucjami naukowymi i przemysłowymi z Polski i ze Świata stanowiące znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Poniżej zamieszczam listę opublikowanych artykułów, materiałów konferencyjnych i zgłoszeń patentowych z obszaru recyklingu ogniw litowo-jonowych (Li-ion) oraz katalizatorów w kolejności chronologicznej.

Publikacje

- **H-9.** Agnieszka Sobianowska-Turek, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Michał Janosz. *Recovery of technical Li_2CO_3 from dust obtained after pyrometallurgical processing of Li-ion battery masses on a quarter-technological scale.* Waste Management. 2025, 204, 114943.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114943>
(IF:7.1; MNiSW: 200; IC:0)
- **H-7.** Katarzyna Leszczyńska-Sejda, Andrzej Chmielarz, Dorota Kopyto, Michał Ochmański, Grzegorz Benke, Arkadiusz Palmowski, Agnieszka Sobianowska-Turek, Przemysław Łoś, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Karolina Goc. *An innovative method of leaching of battery masses produced in the processing of Li-Ion battery scrap.* Applied Sciences. 2024, vol. 14, nr 1, art. 397, s. 1-22.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010397>
(IF:2.5; MNiSW: 100; IC:0)

- Przemysław Łoś, Adrian Łabuz, Agnieszka Sobianowska-Turek, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt, Michał Janosz. *Potencjodynamiczne elektrowydzielanie miedzi. Badania w skali laboratoryjnej i pilotowej: badania w skali laboratoryjnej i pilotowej*. Przemysł Chemiczny. 2024, vol. 103, nr 1, s. 130-135.
 DOI: <https://doi.org/10.15199/62.2024.1.12>
 (IF:0.3; MNiSW: 70; IC:0)
- Przemysław Łoś, Sabina Jacek-Krakus, Justyna Markowicz, Adrian Łabuz, Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Michał Janosz, Agnieszka Fornalczyk. *A selective separation of platinum group metals from the Fe-PGM alloy using electrodeposition combined with electrochemical dealloying*. *Journal of the Electrochemical Society*. 2024. vol. 171, nr 1, 012506, s. 1-9.
 DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad1d96>
 (IF: 3.1; MNiSW: 100; IC:1)
- Agnieszka Sobianowska-Turek, Przemysław Łoś, Agnieszka Fornalczyk, Michał Zygmunt. *Potential market value of electrolyte condensate recovered from LIBs mechanical treatment*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. 2023, nr 6, s. 19-20.
 DOI: <https://doi.org/10.15199/17.2023.6.5>
 (IF: 0; MNiSW: 20; IC:0)

Konferencje naukowe i przemysłowe

- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Hydrometalurgiczny przerób ogniw litowo-jonowych*. Środkowoeuropejskie Forum Technologiczne/Central European Technology Forum. Innowacyjne technologie w metalurgii metali niezależnych, Wrocław 24-25.10.2022. Polska Izba Gospodarcza Zaawansowanych Technologii
- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Elemental Strategic Metals process innovations of lithium-ion batteries recycling to achieve more efficient recovery of different products from wide range of battery scrap*. 27th International Congress for Battery Recycling ICBR 2022, September 14 – 16, 2022, Salzburg, Austria, Session: New developments in lithium-ion recycling

Zgłoszenia patentowe

- Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś. *Sposób prowadzenia procesu kolektywnego współstrącania fluoru z roztworów otrzymanych po jednostkowym procesie kwaśnego jednostopniowego lub dwustopniowego ługowania mas bateryjnych powstałych z przerobu zużytych*,

niekompletnych i/lub odpadowych ogniw litowo-jonowych (Li-ion). Zgłoszenie P 441429 z dnia 9.06.2022

- Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. Katarzyna Leszczyńska-Sejda, Andrzej Chmielarz, Dorota Kopyto, Michał Ochmański, Julita Sztandera, Grzegorz Benke, Arkadiusz Palmowski, Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś, Marcin Kozak, Radosław Guzik. *Sposób prowadzenia procesu dwustopniowego ługowania mas bateryjnych*. Zgłoszenie P 440688 z dnia 18.03.2022

Uzyskane patenty

- Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś. *Sposób prowadzenia procesu odzysku miedzi (Cu) z roztworów elektrolitów otrzymanych w wyniku ługowania odzyskanej ze zużytych baterii litowo-jonowych czarnej*. Zgłoszenie nr. P 442384 z dnia 28.09.2022. Opublikowany i otrzymany 3.03.2025. Patent Polska, nr PL 246778
- Elemental Strategic Metals Sp. z o.o., Agnieszka Sobianowska-Turek, Michał Zygmunt, Przemysław Łoś. Patent. *Sposób prowadzenia procesu odzysku kobaltu, niklu i tlenku manganu(IV) z elektrolitów otrzymanych w wyniku ługowania odzyskanej ze zużytych baterii litowo-jonowych czarnej masy*. Zgłoszenie nr P 442385 z dnia 28.09.2022. Opublikowany i otrzymany 17.03.2025. Patent. Polska, nr PL 246860

7. Informacje o wykazaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, współpracowałam z kilkoma uczelniami oraz jednostkami naukowymi krajowymi i zagranicznymi, co znacząco wzbogaciło moje doświadczenie i wiedzę. Zaangażowanie w różnorodne projekty badawcze oraz udział w interdyscyplinarnych zespołach naukowych pozwoliły mi na rozwinięcie umiejętności analitycznego i krytycznego myślenia. Współpraca z renomowanymi ośrodkami badawczymi takimi jak Politechnika Śląska^[37], Uniwersytet w Rostock^[38] w Niemczech, greckim Hellenic Mediterranean University^[39], Technická Univerzita w słowackich Koszycach^[40], norweskim University of Science and Technology^[41] oraz Politechnika Częstochowska^[42] umożliwiła mi dostęp do nowoczesnych narzędzi i metodologii, które

³⁷ Politechnika Śląska, <https://www.polsl.pl/> (12.04.2025)

³⁸ Universität Rostock, <https://www.uni-rostock.de/> (12.04.2025)

³⁹ Hellenic Mediterranean University, <https://hmu.gr/en/home/#> (12.04.2025)

⁴⁰ Technická Univerzita v Košiciach, <https://www.tuke.sk/en> (29.04.2025)

⁴¹ Norwegian University of Science and Technology, <https://www.ntnu.edu/> (29.04.2025)

⁴² Politechnika Częstochowska, <https://www.polsl.pl/> (12.04.2025)

wykorzystałem w swoich pracach naukowych. Dzięki wymianie doświadczeń z naukowcami z różnych dziedzin mogłam spojrzeć na moje badania z nowej perspektywy.

Poniżej przedstawiłam kluczowe osiągnięcia oraz wnioski płynące z mojej aktywności naukowej w tych różnorodnych środowiskach naukowych.

7.1. Staże krajowe

- ❖ Laureatka stypendium stażowego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Podziałanie 4.1.1.: Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni, Rozwój Potencjału Dydaktyczno-Naukowego Młodej Kadry Akademickiej Politechniki Wrocławskiej; Temat stażu: *Odzysk Zn i Mn z roztworów po kwaśnym ługowaniu odpadów bateryjnych metodami flotacyjnymi*; Opiekun stażu: dr hab. inż. Ulewicz M., prof. nadzw. PCz. Miejsce realizacji stażu: Politechnika Częstochowska, Charakter stażu: badawczy, Termin stażu: 1.07.2014 - 31.08.2014

W ramach grantu stażowego w grupie badawczej zapoznałam się z technikami hydrometalurgicznymi w szczególności flotacją jonową i flotoekstrakcją, pozwalającymi na wydzielenie i/lub rozdzielenie kationów metali z roztworów wodnych stosowanymi przez zespół naukowców Politechniki Częstochowskiej oraz wykonałam szereg badań własnych mających na celu odzysk jonów cynku(II) i manganu(II) z roztworów po kwaśnym ługowaniu zużytych małowymiarowych ogniw galwanicznych stosując w roli kolektorów (przenośników jonów metali) jonizowalne eter y lariatowe. Przeprowadzone badania, na roztworach modelowych o odczynie kwaśnym o pH w zakresie od 1,5 do 5,0 pozwoliły na określenie wpływu wybranych czynników determinujących procesy flotacji jonowej i flotoekstrakcji, tj. wielkości wnęki korony, długości łańcucha węglowodorowego i rodzaj grupy kwasowej jonizowalnych eterów lariatowych. Najbardziej efektywne przenośniki metali, z modelowych roztworach wodnych, zostały wykorzystane w separacji jonów Zn^{2+} i manganu Mn^{+2} z odpadowych roztworów rzeczywistych. Wynikiem realizowanej problematyki badawczej w ramach stażu było uzyskanie oryginalnych wyników, które stanowią istotny wkład w poznanie możliwości odzysku surowców krytycznych o strategicznym znaczeniu metali cynku i manganu z roztworów po kwaśnym redukcyjnym ługowaniu zużytych chemicznych źródeł energii opublikowanych w czasopiśmie *Physicochemical Problems of Mineral Processing* oraz zaprezentowane na konferencji naukowej zamieszczonych poniżej. Badania naukowe związane z metodami flotacyjnymi i flotoekstrakcyjnymi rozdzielenia kationów metali z roztworów przemysłowych są przez mnie kontynuowane przez cały okres kariery naukowej w odniesieniu do innych grup metali co zostało przedstawione w Załączniku z wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny do niniejszego autoreferatu.

Publikacja

Agnieszka Sobianowska-Turek, Małgorzata Ulewicz, Katarzyna Sobianowska. *Ion flotation and solvent sublation of zinc(II) and manganese(II) in the presence of proton-ionizable lariat ethers*. Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2016, vol. 52, nr 2, s. 1048-1060. DOI: <https://doi.org/10.5277/ppmp160241>

(IF:0.901; MNiSW: 70; IC:4)

Referat konferencyjny

Agnieszka Sobianowska-Turek, Małgorzata Ulewicz, Katarzyna Sobianowska. *Odzysk cynku i manganu po kwaśnym ługowaniu odpadów bateryjnych metodą flotacji jonowej*. XI Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, XI Waste Forum, 24-27.05.2015 Kołobrzeg

- ❖ Staż naukowy w Politechnice Śląskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej w Katedrze Inżynierii Produkcji; Temat stażu: *Przetwarzanie strumienia odpadów polimetalicznych pochodzących z odpadów elektronicznych oraz odpadów baterii i akumulatorów*. Opiekunki stażu: dr hab. inż. Agnieszka Fornalczyk, prof. PŚ. Miejsce realizacji stażu: Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Katedra Inżynierii Produkcji, Charakter stażu: badawczy, Termin stażu: 3.09.2024-17.09.2024

Staż naukowy zrealizowany w Katedrze Inżynierii Produkcyjnej oraz przy wsparciu zespołu badawczego Katedry Metalurgii i Recyklingu Politechniki Śląskiej, dotyczący hydrometalurgicznego przerobu odpadów strumienia odpadów polimetalicznych pochodzących z odpadów elektrycznych oraz odpadów baterii i akumulatorów, skoncentrował się na przeprowadzeniu badań kwaśnego selektywnego ługowania litu (Li) z mas bateryjnych pochodzących z wstępnie przetworzonych mechanicznie odpadów małogabarytowych akumulatorów LIBs typu 18650. Odzysk litu z materiału badawczego prowadzony był metodami hydrometalurgicznymi z wykorzystaniem jako czynników ługujących i reduktorów związków organicznych nie stosowanych w warunkach przemysłowych ze względu na niższe wydajności przejścia metali do roztworów ale posiadającymi status „zielonych” odczynników bardziej przyjaznych środowisku. Efektem realizowanej problematyki badawczej w ramach stażu było uzyskanie oryginalnych wyników porównawczych selektywnego i/lub kolektywnego ługowania metali bateryjnych litu, manganu, niklu, kobaltu ale również aluminium i miedzi z wykorzystaniem mieszaniny roztworów kwasu nieorganicznego (H_2SO_4) i/lub kwasów organicznych (kwas mrówkowy – CH_2O_2 , kwas adypinowy – $C_6H_{10}O_4$, kwas glutarowy – $C_5H_8O_4$, kwas bursztynowy – $C_4H_6O_4$) i/lub perhydrolu (H_2O_2) z masy bateryjnej, opublikowanych w czasopiśmie *Energies*. Artykuł pt.: *Optimizing acidic reductive leaching for lithium recovery: enhancing sustainable lithium supply for energy markets*, Agnieszka Sobianowska-Turek i współ. [H-8], stanowi część osiągnięcia naukowego opisanego w

niniejszym autoreferacie. Uzyskane wyniki prac badawczych ze względu na duży przemysłowy potencjał aplikacyjny są przeze mnie kontynuowane w chwili obecnej.

Publikacja

H-8. Agnieszka Sobianowska-Turek, Amelia Zielińska, Weronika Urbańska, Anna M. Mielniczek, Agnieszka Fornalczyk, Szymon Pawlak, Tomasz Małysa, Janusz Cebulski. *Optimizing acidic reductive leaching for lithium recovery: enhancing sustainable lithium supply for energy markets*. Energies. 2025, vol. 18, nr 2, art. 398, s. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18020398>.

(IF:3.0; MNiSW:140; IC:1)

7.2. Naukowe zagraniczne wyjazdy studyjne i szkoleniowe

- ❖ Laureatka konkursu na wizytę studyjną Rostock (Niemcy) w projekcie pn. „Laboratorium biznesu” Projekt współfinansowany przez UE w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Priorytet VIII: Regionalne kadry gospodarki, Działanie 8.2: Transfer Wiedzy, Podziałanie 8.2.1.: Wsparcie dla współpracy strefy nauki i przedsiębiorstw. Konkurs organizowany przez Dolnośląską Agencję Rozwoju Regionalnego S.A. oraz Hanzeatycki Instytut Przedsiębiorczości i Rozwoju Regionalnego przy Uniwersytecie w Rostocku w Niemczech. Termin wyjazdu studyjnego: 21-24.10.2014

Wyjazd studyjny miał na celu zapoznanie uczestników z efektywnymi metodami współpracy pomiędzy uczelniami wyższymi a firmami w Niemczech, które realizują różnorodne zadania badawczo-wdrożeniowe. Mieliśmy okazję obserwować praktyczne przykłady współdziałania, które prowadzą do innowacyjnych rozwiązań i wspierają rozwój różnych branż przemysłowych. W trakcie wizyt na Uniwersytecie w Rostock oraz firmach, omawiane były kluczowe aspekty partnerstw akademicko-przemysłowych oraz wyzwania, które mogą się pojawić w procesie współpracy. Wyjazd miał na celu nie tylko naukę zrealizowanych projektów, ale także zainspirowanie uczestników do wprowadzania podobnych modeli współpracy w swoich środowiskach akademickich.

- ❖ Wyjazd szkoleniowy dla nauczycieli akademickich w ramach Akcji Erasmus+ KA 131-HED Mobilność studentów i pracowników instytucji szkolnictwa wyższego wspierane przez fundusze polityki wewnętrznej UE na Hellenic Mediterranean University, Department of Electrical & Computer Engineering. Opiekun stażu: dr Dimitra Vernardou. Termin stażu: 15 - 19.09.2025, zaplanowany i potwierdzony

Wizyta w Hellenic Mediterranean University będzie miała charakter *job shadowing*. Szkolenie będzie polegało na towarzyszeniu pracownikom Department of Electrical & Computer Engineering w ich codziennej pracy naukowej, co pozwoli mi na zapoznanie się z zapleczem badawczym instytucji goszczącej. Dodatkowo przyczyni się do zdobycia nowych umiejętności i wiedzy oraz stworzeniu trwałych partnerstw poprzez aktywną

obserwacje. Głównymi wartościami dodanymi mobilność, zarówno dla zaangażowanej instytucji jak i dla mnie będą poszerzenie i rozwój wiedzy, umiejętności i kompetencji. W szczególności w zakresie zwiększenia kompetencji zawodowych, udoskonalenia znajomości języka obcego, rozwinięcia kluczowych kompetencji społecznych dzięki współpracy w środowisku międzykulturowym oraz udoskonalenia warsztatu badawczego. *Job shadowing* w Hellenic Mediterranean University w Department of Electrical & Computer Engineering pozwoli mi na obserwowanie realnej pracy zagranicznej uczelni. Umożliwi rozmowy z wieloma osobami pełniącymi różne funkcje, obserwację pracy instytucji naukowo-badawczej oraz poznanie kultury organizacji. Pozwoli dostrzec różne rozwiązania i inne sposoby radzenia sobie z zagadnieniami natury naukowej jak i edukacyjnej. Wizyta na uniwersytecie w Grecji będzie miała na celu nie tylko poznanie lokalnych zasobów naukowo-badawczych, ale również zapoznanie się z zespołem badawczym dr Dimitry Vernardou, ponieważ w listopadzie 2024 roku złożony został wniosek konkursowy *Next Generation Naval Energy System* (NG-NAVENSYS) na grant badawczy w ramach Europejskich Funduszy Obronności (EDF)^[43] przez grecką firmę AKMON S.A.^[44] wraz z 17 konsorcjantami przemysłowo-naukowymi z całej Unii Europejskiej. W przypadku uzyskania finansowania planuję dołączyć do zespołu dr Dimitry Vernardou w roli wykonawcy jednego z zadań z ramienia Politechniki Wrocławskiej, związanego z ekoprojektowaniem nowych chemicznych źródeł energii (baterii i akumulatorów), zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1781 z dnia 13 czerwca 2024 roku w sprawie ustanowienia ram ustalania wymogów ekoprojektu w odniesieniu do zrównoważonych produktów oraz zmiany dyrektywy (UE) 2020/1828 i rozporządzenia (UE) 2023/1542 i uchylenia dyrektywy 2009/125/WE^[45].

8. Informacje o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę i sztukę

8.1. Działalność dydaktyczna

W ramach mojej działalności dydaktycznej zarówno przed jak i po uzyskaniu stopnia doktora, aktywnie angażuje się w realizację licznych projektów szkoleniowych, które pozwoliły mi na rozwijanie innowacyjnych metod nauczania. W trakcie mojej pracy naukowo-dydaktycznej uczestniczyłam także w zagranicznych wyjazdach studyjnych i dydaktycznych, co umożliwiło mi poszerzenie kompetencji oraz wymianę doświadczeń z międzynarodowymi partnerami. W celu wzbogacenia oferty edukacyjnej Wydziału

⁴³ Ministerstwo Obrony Narodowej RP, Europejski Fundusz Obronny 2024, <https://www.gov.pl/web/obrona-narodowa/europejski-fundusz-obronny-2024> (17.04.2025)

⁴⁴ AKMON S.A., <https://akmonsa.gr/> (17.04.2025)

⁴⁵ EUR-Lex, Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1781 z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie ustanowienia ram ustalania wymogów ekoprojektu w odniesieniu do zrównoważonych produktów oraz zmiany dyrektywy (UE) 2020/1828 i rozporządzenia (UE) 2023/1542 i uchylenia dyrektywy 2009/125/WE (Tekst mający znaczenie dla EOG), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:32024R1781> (17.04.2025)

Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, utworzyłam nowe kursy, odpowiadające na aktualne potrzeby rynku pracodawców i studentów. Prowadzę także zajęcia na różnych poziomach zaawansowania, dbając o wysoką jakość dydaktyki i indywidualne podejście do słuchaczy. Działalność dydaktyczna stanowi integralną część mojego rozwoju zawodowego i przyczynia się do podnoszenia standardów nauczania w mojej jednostce naukowej.

W kolejnych punktach niniejszego autoreferatu umieściłam szczegółowe informacje dotyczące działalności dydaktycznej zrealizowanej po uzyskaniu stopnia doktora.

8.1.1. Projekty dydaktyczne

Uczestniczę w II Edycji projektu *Rozwoju kompetencji nauczycieli: dydaktycznych, cyfrowych i w zakresie zielonej transformacji*^[46]. Projekt finansowany z Funduszy Europejskich dla Rozwoju Społecznego (FERS) 2021-2027, będącym kluczowym elementem kontynuacji działań Programu Wiedza Edukacja Rozwój (POWER). Projekt realizowany jest przez Centrum Doskonałości Dydaktycznej Politechniki Wrocławskiej i ukierunkowany na wspieranie rozwoju umiejętności kadry akademickiej i doktorantów, oferty szkolnictwa wyższego do potrzeb rozwoju gospodarki, ze szczególnym uwzględnieniem zielonej i cyfrowej transformacji, 1.05.2025 - 30.12.2025.

Zrealizowane szkolenia w ramach projektu:

- Skuteczna komunikacja – microteaching
- Modelowanie generatywne w AI – teoria i aspekty etyczne.

8.1.2. Zagraniczne wyjazdy dydaktyczne

Głównym celem zagranicznych wyjazdów dydaktycznych w ramach Akcji Erasmus+ KA 131-HED było prowadzenie wykładów tematycznych dla studentów z różnych uczelni europejskich, co umożliwiło mi dzielenie się wiedzą oraz wymianę doświadczeń z młodymi naukowcami. Podczas tych wyjazdów nie tylko rozwijałam swoje umiejętności pedagogiczne, ale również wzbogacałam swoją perspektywę kulturową, co ma istotny wpływ na moją pracę akademicką. Udział w programie Erasmus+ pozwolił mi na nawiązanie cennych kontaktów międzynarodowych oraz zrozumienie różnorodności metod nauczania w Europie. W ramach Akcji Erasmus+ KA 131-HED na norweskim University of Science and Technology w Trondheim i słowackim Technical University w Koszycach przeprowadziłam cykle powiązanych ze sobą trzech wykładów w języku angielskim:

- *Recycling of used polymetallic waste and/or waste lithium-ion cells*
- *Ecodesign of non-lithium cells*
- *Non-lithium cells in recycling processes.*

⁴⁶ Politechnika Wrocławska, <https://dice.pwr.edu.pl/> (21.06.2025)

Poniżej znajdują się szczegółowe informacje dotyczące zrealizowanych zagranicznych wyjazdów dydaktycznych.

- Wyjazd dydaktyczny dla nauczycieli akademickich w ramach Akcji Erasmus+ KA 131-HED Mobilność studentów i pracowników instytucji szkolnictwa wyższego wspierane przez fundusze polityki wewnętrznej UE na Norwegian University of Science and Technology Department of Geosciences and Petroleum, Trondheim, Norwegia. Opiekun stażu: Pshem Kowalczyk, Professor in Minerals Engineering. Termin stażu: 2 - 8.06.2024
- Wyjazd dydaktyczny dla nauczycieli akademickich w ramach Akcji Erasmus+ KA 131-HED Mobilność studentów i pracowników instytucji szkolnictwa wyższego wspierane przez fundusze polityki wewnętrznej UE na Technical University in Kosice, Institute of Materials and Quality Engineering, Faculty of Materials, Metallurgy and Recycling w Słowacji. Opiekun stażu: assoc. prof. Oksana Velgosová, PhD., Termin stażu: 4 - 7.12.2024

8.1.3. Utworzone nowe kursy dydaktyczne

Opracowywałam nowe kursy dydaktyczne lub poszczególne grupy laboratoriów do poszczególnych zajęć na pierwszym, drugim i trzecim stopniu:

- Technologie odzysku surowców z zużytych chemicznych źródeł energii – autorski wykład wybieralny (10 h)
- Gospodarka odpadami przemysłowymi i niebezpiecznymi 1 – laboratorium, przygotowanie nowych zajęć laboratoryjnych: Metody przerobu zużytych baterii Zn-C i Zn-Mn (9 h)
- Eco-design of chemical energy sources - lithium cells vs. non-lithium cells - autorski wybieralny wykład i laboratorium (15 h)
- Technologie wspierające GOZ – autorski wybieralny wykład i projekt (45 h).

8.1.4. Prowadzone zajęcia dydaktyczne

Jako nauczyciel akademicki prowadziłam dotychczas w każdym semestrze zajęcia dydaktyczne zarówno na pierwszym jak i drugim stopniu w formie wykładów, projektów, laboratoriów, seminariów oraz ćwiczeń w wymiarze przekraczającym pensum:

- Chemia – ćwiczenia
- Chemia nieorganiczna – ćwiczenia
- Gospodarka odpadami – projekt
- Gospodarka odpadami 2 – projekt
- Fizykochemia odpadów – laboratorium
- Technologie bioenergetyczne – laboratorium, projekt

- Podstawy rekultywacji gleb i gruntów – wykład, projekt
- Rekultywacja i sanitacja terenów – wykład
- Chemia gleby i odpadów – wykład, laboratorium, projekt
- Gleboznawstwo – wykład, laboratorium
- Gospodarka odpadami przemysłowymi i niebezpiecznymi 1 – laboratorium
- Gospodarka odpadami i przemysłowymi i niebezpiecznymi 2 – seminarium
- Rekultywacja starych składowisk i miejsc zanieczyszczonych – projekt, seminarium
- Gospodarka surowcami – wykład
- Technologie odzysku surowców z zużytych chemicznych źródeł energii – wykład
- Gospodarka odpadami przemysłowymi – wykład, laboratorium
- Recykling odpadów polimetalicznych – wykład
- Zrównoważony transport: strategie, energie, emisje – wykład
- Paliwa alternatywne – wykład, seminarium
- Technologie remediacji terenów zanieczyszczonych – wykład, projekt
- Zarządzanie odpadami w zakładach przemysłowych – projekt, laboratorium
- Zarządzanie innowacjami w inżynierii środowiska – wykład, seminarium
- Gospodarka o obiegu zamkniętym – wykład
- Gospodarka odpadami w obiegu zamkniętym – projekt
- Geopolityczny rozwój motoryzacji – wykład.

8.1.5. Organizacja wycieczek dydaktycznych

Regularnie organizuje (z wyłączeniem okresu pandemii oraz urlopu bezpłatnego na Politechnice Wrocławskiej związanego z realizacją projektu IPCEI - Element Strategic Metals Sp. z o.o.) wycieczki dydaktyczne studentów Wydziału Inżynierii Środowiska do:

- ZM Silesia S.A. w Oławie - Huta Oława oraz Muzeum Mineralogicznego im. K. Maślankiewicza przy Uniwersytecie Wrocławskim w ramach zajęć Gospodarki surowcami – wykład, semestrach zimowych rok akademicki 2018/2019 oraz 2019/2020
- Cargill Poland Sp. z o.o. wraz z kołem naukowym Environmental Team, sekcja Gospodarka Odpadami w ramach zajęć z Technologii bioenergetycznych – laboratorium, projekt, semestrach zimowych rok akademicki 2014/2015 oraz 2015/2016.

Korzyści, jakie płyną z uczestnictwa w tych wycieczkach, obejmują między innymi możliwość praktycznego zastosowania zdobytej wiedzy teoretycznej, poznanie najnowszych technologii i rozwiązań stosowanych w branży, rozwijanie umiejętności analitycznego myślenia oraz rozwiązywania problemów, a także nawiązywanie kontaktów z przedstawicielami przemysłu i potencjalnymi pracodawcami.

8.1.6. Organizacja zawodowych praktyk uczniowskich i studenckich

Byłam organizatorem i opiekunem zawodowych praktyk uczniowskich i studenckich, dbając o odpowiednie zaplanowanie programu, organizację materiałów oraz koordynację z opiekunami praktyk. Dzięki temu uczniowie i studenci mogli skorzystać z dobrze zorganizowanego i wartościowego doświadczenia, które wsparło ich rozwój zawodowy:

- Opiekun zawodowych praktyk uczniów z XV Technikum im. Marii Skłodowskiej-Curie we Wrocławiu na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, maj-czerwiec 2020
- Organizacja letnich praktyk studenckich w firmie KGHM Metraco S.A., Odział Odzysku Surowców. Opiekun stażu ze strony firmy Artur Starowicz, lipiec-sierpień 2015.

8.1.7. Promotorstwo prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich

Jestem również aktywnym promotorem oraz recenzentem prac dyplomowych. Sumaryczna liczba promotorstw prac dyplomowych wynosi 25, w tym 18 prac magisterskich i 6 prac inżynierskich. Sporządziłam również 5 recenzji prac dyplomowych.

Wyniki prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich zostały opublikowane wspólnie z dyplomantami w postaci artykułów polskich wydawnictwach naukowych oraz referatów konferencyjnych. Tego rodzaju publikacje mają dla dyplomantów ogromne znaczenie, ponieważ stanowią nie tylko oficjalne potwierdzenie ich osiągnięć naukowych, ale są także ważnym krokiem w rozwoju ich kariery naukowej czy zawodowej. Współpraca przy przygotowaniu artykułów pozwala studentom zdobyć cenne doświadczenie w zakresie prezentowania wyników badań, rozwija umiejętności pisania naukowego oraz buduje ich reputację w środowisku naukowym. Ponadto, uczestnictwo w procesie publikacji motywuje ich do pogłębiania wiedzy i aktywnego angażowania się w rozwijanie własnych kompetencji badawczych.

- Agnieszka Sobianowska-Turek, Weronika Urbańska, Kamil Banaszkiewicz, Przemysław Lewko, Tadeusz Marcinkowski, Iwona Pasiecznik. *Odzysk Ni, Cd i Co ze zużytych baterii niklowo-kadmowych (Ni-Cd) i niklowo-wodorkowych (Ni-MH) metodą ekstrakcji rozpuszczalnikowej*. Przemysł Chemiczny. 2020, t. 99, nr 1, s. 62-65
(IF:0.464; MNiSW:70; IC:0)
- Agnieszka Sobianowska-Turek, Stefania Wasiewska, Weronika Wierzbicka. *Przerób zużytych baterii litowo-jonowych (Li-jon) w Polsce*. Przemysł Chemiczny. 2016, t. 95, nr 9, s. 1815-1821
(IF:0.385; MNiSW: 70; IC:1)

- Katarzyna Rudowicz, Weronika Wierzbicka, Agnieszka Sobianowska-Turek, Katarzyna Sobianowska. *Odzysk jonów cynku(II) i manganu(II) z roztworów po kwaśnym ługowaniu zużytych chemicznie źródeł energii metodą flotacji jonowej*. Otwarta Innowacja. 2015, nr 1-3, s. 4-6

Dodatkowo praca magisterska dyplomantki Anety Ceglińskiej, pt.: *Odzysk metali i surowców wtórnych wybranymi metodami hydrometalurgicznymi*, której byłam promotorem została wyróżniona w dwóch konkursach krajowych na najlepszą pracę magisterską zrealizowaną w roku akademickim 2023/2024:

- w III edycji konkursu na najlepszą badawczą pracę magisterską zrealizowaną w roku akademickim 2023/2024 Polskiego Towarzystwa Chemicznego. Konkurs organizowany przez Oddział Wrocławski Polskiego Towarzystwa Chemicznego
- w Konkursie o nagrodę Prezesa Agencji Rozwoju Przemysłu S.A. na najlepszą pracę magisterską w zakresie zrównoważonego zarządzania wodą i energią na obszarach przemysłowych zrealizowaną w roku akademickim 2023/2024.

8.1.8. Promotorstwo pomocnicze prac doktorskich

Po uzyskaniu stopnia doktora byłam promotorem pomocniczym dwóch prac doktorskich. Współpromotorstwo prac doktorskich stanowi istotny element procesu kształcenia doktorantów, umożliwiając im korzystanie z różnorodnych perspektyw i doświadczeń badawczych. Dzięki zaangażowaniu dwóch ekspertów z różnych dziedzin, doktoranci mają szansę na szersze spojrzenie na swoje projekty oraz lepsze wsparcie w realizacji złożonych zagadnień badawczych.

- Martin Geczew, *Usuwanie związków ropopochodnych w procesach tlenowego przekształcania odpadów*. Promotor prof. dr hab. inż. Tadeusz Marcinkowski, doktorat nieobroniony, 2014-2016
- Weronika Wierzbicka, *Odzysk metali ze zużytych ogniw Li-ion metodą ługowania*. Promotor prof. dr hab. inż. Tadeusz Marcinkowski, doktorat obroniony, 2018-2019

8.2. Działalność organizacyjna

8.2.1. Działalność organizacyjna

Moja działalność organizacyjna obejmuje przede wszystkim aktywności związane z pracą redakcyjną w międzynarodowym czasopiśmie *Physicochemical Problems of*

Mineral Processing, koordynację różnych wydarzeń akademickich, takich jak konferencje, seminaria oraz pracę w wydziałowej komisji programowej. Działalność organizacyjna jest dla mnie okazją do zdobycia cennych kompetencji interpersonalnych i organizacyjnych.

Poniżej znajdują się szczegółowe informacje dotyczące działalności organizacyjnej po uzyskaniu stopnia doktora.

8.2.1.1. Funkcja redaktora czasopisma

Od 2024 roku pełnienie funkcji redaktora w międzynarodowym czasopiśmie *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej (IF₂₀₂₀: 1,5, MNiSW₂₀₂₅: 70), <https://www.journalssystem.com/ppmp/>. Rola ta umożliwia mi zdobycie cennego doświadczenia w zakresie oceny i redakcji artykułów, co pozytywnie wpływa na rozwój kompetencji naukowych i zawodowych. Dodatkowo funkcja redaktora czasopisma pozwala mi na budowanie silnej sieci kontaktów międzynarodowych.

8.2.1.2. Konferencje i seminaria naukowe

Uczestnictwo w konferencjach naukowych w roli członka komitetu naukowego stanowiło dla mnie na przestrzeni kilku lat, istotne potwierdzenie mojego zaangażowania i uznania w środowisku akademickim. Pełnienie tej funkcji pozwala mi aktywnie wpływać na kształtowanie wysokiego poziomu prezentowanych badań oraz rozwijać sieć współpracy z innymi specjalistami w różnych dziedzinach naukowych.

- Członek komitetu naukowego XII Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, XII Waste Forum, 21-24.05.2017 Gniezno, Organizowane przez Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Oddział Wielkopolski
- Członek komitetu naukowego Students Science Conference, 21-24.10.2017 Wrocław, Politechnika Wrocławska
- Członek komitetu naukowego XI Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, XI Waste Forum, 24-27.05.2015 Kołobrzeg, Organizowane przez Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Oddział Wielkopolski

8.2.1.3. Komisja programowa

Od października 2024 roku jestem członkiem komisji programowej kierunku Inżynieria Środowiska, powoływanej na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Bycie członkiem komisji programowej kierunku Inżynierii Środowiska, pozwala mi na aktywne kształtowanie i rozwijanie kierunku studiów, tak aby odpowiadał potrzebom rynku pracy. To doświadczenie umożliwia także dostosowywanie programów nauczania do nowych wyzwań związanych z ochroną środowiska.

8.2.2. Popularyzacja nauki

W trakcie swojej kariery naukowej brałam udział w licznych wydarzeniach popularyzujących naukę, podczas których wygłaszałam referaty, prezentowałam postery oraz umieszczałam komunikaty konferencyjne zarówno jako współautor, jak i autor indywidualny. Prezentowane podczas tych konferencji wyniki obejmowały zarówno osiągnięcia naukowe, jak i przemysłowe, pochodzące z prac realizowanych po uzyskaniu stopnia doktora. Udział w tych wydarzeniach pozwolił mi na szerokie upowszechnianie wyników moich badań oraz na wymianę doświadczeń z innymi specjalistami z dziedziny.

W kolejnych punktach niniejszego autoreferatu umieściłam szczegółowe informacje dotyczące działalności popularyzacyjnej nauki zrealizowanej po uzyskaniu stopnia doktora.

8.2.2.1. Udział w naukowych konferencjach krajowych i międzynarodowych

Poniżej umieszczam chronologiczną listę konferencji krajowych i międzynarodowych w których brałam czynny udział po nadaniu stopnia doktora.

Wygłoszone referaty

- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Ekoprojektowanie produktów na przykładzie ogniw nielitowych*. Konferencja naukowa na rzecz zrównoważonego rozwoju i poprawy jakości życia mieszkańców Wrocławia, Wrocław 21.10.2024. VERGOconnect Wrocław
- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Hydrometalurgiczny przerób ogniw litowo-jonowych*. Środkowoeuropejskie Forum Technologiczne/Central European Technology Forum. Innowacyjne technologie w metalurgii metali niezależnych, Wrocław 24-25.10.2022. Polska Izba Gospodarcza Zaawansowanych Technologii
- Agnieszka Sobianowska-Turek. *Elemental Strategic Metals process innovations of lithium-ion batteries recycling to achieve more efficient recovery of different products from wide range of battery scrap*. 27th International Congress for Battery Recycling ICBR 2022, September 14 – 16, 2022, Salzburg, Austria, Session: New developments in lithium-ion recycling
- Weronika Wierzbicka, Agnieszka Sobianowska-Turek, Iwona Pasiecznik. *Recykling zużytych baterii i akumulatorów w Polsce*. XII Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, XII Waste Forum, 21-24.05.2017 Gniezno
- Joanna Kończyk, Agnieszka Sobianowska-Turek, Katarzyna Sobianowska. *Ekstrakcyjne wydzielanie jonów metali ciężkich z roztworów po kwaśnym ługowaniu odpadów*

baterijnych przy użyciu rezorcynarenów. XI Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, XI Waste Forum, 24-27.05.2015 Kołobrzeg

- Agnieszka Sobianowska-Turek, Małgorzata Ulewicz, Katarzyna Sobianowska. *Odzysk cynku i manganu po kwaśnym ługowaniu odpadów baterijnych metodą flotacji jonowej. XI Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, XI Waste Forum, 24-27.05.2015 Kołobrzeg*
- Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Monika Zabłocka-Malicka. *Podstawy elektrochemiczne odzysku manganu z odpadów baterijnych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Problemy Recyklingu 2011, 5-8.10.2011, Józefów/k. Otwocka*
- Włodzimierz Szczepaniak, Agnieszka Sobianowska-Turek, Monika Zabłocka-Malicka. *Odzysk manganu z rud i odpadów baterii. X Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami, Kompleksowe Zarządzanie Gospodarką Odpadami, Rydzyna Poznań 2011*

Postery

- Agnieszka Sobianowska-Turek, Piotr Mońka, Aneta Ceglińska, Weronika Urbańska, Anna Mielniczek, Agnieszka Fornalczyk. *Raw material potential of type A polymetallic printed circuit board waste. The Fifth International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance ISPEM 2025, 25-27.06.2025, Wrocław University of Science and Technology, Poland*
- Agnieszka Sobianowska-Turek, Przemysław Łoś, Michał Gieroń, Krzysztof Woźniak, Bartłomiej Turek, Agnieszka Fornalczyk. *Odzysk miedzi metodą elektrodpozycji potencjodynamicznej z roztworów przemysłowych. Konferencja Naukowa w ramach 75-lecia Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, 12-13.06.2025*
- Amelia Zielińska, Agnieszka Sobianowska-Turek. *Co, Li, Cu and Al recovery from the stream of spent galvanic cells of the second lithium-ion type with methods of chemical metallurgy. 9th World Convention on Waste Recycling and Reuse, 11-12.03.2019 Singapore*
- Joanna Kończyk, Agnieszka Sobianowska-Turek, Katarzyna Sobianowska. *Zużyte baterie jako źródło metali ciężkich. Konferencja Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne, zagrożenia CBRNE, 08 - 09.06.2016 Częstochowa*
- Joanna Kończyk, Agnieszka Sobianowska-Turek, Katarzyna Sobianowska. *Odzysk niklu, kadmu i kobaltu ze strumienia zużytych baterii na drodze kwaśnego ługowania.*

58 Zjazd Naukowy Polskiego Towarzystwa Chemicznego w Gdańsku, 21-25.09.2015
Gdańsk

- Katarzyna Sobianowska, Joanna Kończyk, Władysław Walkowiak, Agnieszka Sobianowska-Turek. *Rola związków makrocyklicznych w procesie flotacyjnego wydzielania kationów baru(II) i strontu(II) z roztworów wodnych*. 57 Zjazd Polskiego Towarzystwa Chemicznego oraz Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego w Częstochowie, 14-18.09.2014 Częstochowa
- Anna Janicka, Michał Janicki, Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak. *Volatile organic compounds emission from modified, biomass fueled small-scale boiler*. Międzynarodowa Konferencja Central European Conference ECOpole'12, 10-13.10.2013
- Agnieszka Sobianowska-Turek, Włodzimierz Szczepaniak, Tadeusz Marcinkowski, Dorota Zmorska-Wojdyła. *The content of mercury and cadmium in the stream of spent zinc-carbon batteries type R6, standard AA*. Międzynarodowa Konferencja Central European Conference ECOpole'12, 10-13.10.2013;
- Czesław Kolanek, Agnieszka Sobianowska-Turek, Wojciech Walkowiak, Adam Nowak. *Problemy eksploatacyjne systemu Urea-SCR*. XI Kongres budowy i eksploatacji urządzeń technicznych Radom 2011

Komunikat konferencyjny

- Irena Szczygieł, Katarzyna Winiarska, Agnieszka Sobianowska-Turek. *The study of thermal, microstructural and magnetic properties of manganese-zinc ferrite prepared by co-precipitation method using different precipitants*. 4th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC4), 28-31 August 2017

8.3. Działalność popularyzująca naukę

Podczas mojej działalności zawodowej aktywnie uczestniczyłam w wydarzeniach popularno-naukowych skierowanych do dzieci i młodzieży, gdzie prezentowałam i omawiałam różnorodne eksperymenty naukowe. Celem tych inicjatyw było zainteresowanie młodych ludzi światem nauki oraz wyjaśnienie zjawisk przyrodniczych w sposób przystępny i inspirujący. Udział w tych wydarzeniach miał istotny wpływ na rozwój ich ciekawości poznawczej i pasji do nauki.

Poniżej zamieszczam chronologiczną listę wydarzeń popularno-naukowych w których brałam czynny udział po uzyskaniu stopnia doktora.

❖ Noc Politechniki, 2023

Noc Politechniki to coroczne wydarzenie, podczas którego Uczelnia otwiera swoje laboratoria, pracownie i sale wykładowe dla odwiedzających. Goście mają okazję zobaczyć, czym na co dzień zajmują się naukowcy i studenci, prezentując swoje projekty i badania.

❖ Zajęcia z pasją – Edycja I, II, III, 2017 - 2018

Współpraca z Wrocławskim Centrum Rozwoju Społecznego (WCRS) w ramach Projektu Akademii Talentów i Uzdolnień Wrocławskiej Koncepcji Edukacyjnej. Współpraca obejmowała przygotowanie oraz prowadzenie wykładów i zajęć laboratoryjnych dla dzieci i młodzieży w wieku szkolnym. Zajęcia odbywały się na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej, koordynator zajęć dr inż. Katarzyna Grudniewska.

❖ Dolnośląski Festiwal Nauki, 2014 – 2024

W ramach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki aktywnie uczestniczyłam w organizacji tego corocznego wydarzenia popularnonaukowego, które we wrześniu we Wrocławiu i w październiku w regionie przyciąga miłośników nauki, kultury i sztuki. Miałam okazję współpracować z wrocławskimi uczelniami wyższymi, instytutami Polskiej Akademii Nauk oraz innymi środowiskami pozauczelnianymi, co pozwoliło mi na zdobycie cennego doświadczenia w zakresie organizacji wydarzeń naukowych.

- ✓ XXIV Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Inżynierii Środowiska PWr, 2021. *Współczesne wyzwania w gospodarce odpadami*. Prowadzący: Weronika Urbańska, Agnieszka Sobianowska-Turek
- ✓ XXII Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Inżynierii Środowiska PWr, 2020. *Odpady to MEGAgamy*. Prowadzący: Agnieszka Sobianowska-Turek, Weronika Urbańska
- ✓ XXII Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Inżynierii Środowiska PWr, 2019. *Odpady to MEGAgamy*, Prowadzący: Agnieszka Sobianowska-Turek, Weronika Urbańska
- ✓ XX Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Inżynierii Środowiska PWr, 2017. *Świat recyklingu*. Prowadzący: Kamil Banaszkiewicz, Iwona Pasiecznik, Agnieszka Sobianowska-Turek
- ✓ XIX Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Inżynierii Środowiska PWr, 2016. *Świat recyklingu*. Prowadzący: Kamil Banaszkiewicz, Iwona Pasiecznik, Agnieszka Sobianowska-Turek

- ✓ XVIII Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Inżynierii Środowiska PWr, 2015. *Świat recyklingu*. Prowadzący: Kamil Banaszkiewicz, Iwona Pasiecznik, Agnieszka Sobianowska-Turek
- ✓ XVII Dolnośląski Festiwal Nauki na Wydziale Chemicznym PWr, 2014. *Cytrynowa melodia*. Prowadzący Katarzyna Sobianowska, Agnieszka Świst, Agnieszka Sobianowska-Turek
- ❖ Współpraca ze szkołami ponadgimnazjalnymi organizowana na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej. Koordynatorzy projektu: prof. dr hab. Jadwiga Sołoducho, dr hab. inż. Joanna Cabaj, dr inż. Katarzyna Grudniewska. Funkcja w projekcie: wykładowca 2014 – 2016
- ❖ X Ogólnopolska Olimpiada Kreatywności Destination Imagination – *Oczyma Wyobraźni*. Organizator Fundacja Wpierania i Rozwoju Kreatywności oraz Wrocławskie Centrum Rozwoju Społecznego, 07 - 08.03.2015, miejsce: Wrocławskie Centrum Kongresowe przy Hali Stulecia, 2015
- ❖ Współpraca z Centrum Wspierania Inicjatyw Pozarządowych akcji informacyjno-edukacyjnej "Od eko-samorządu do eko-społeczeństwa". Projekt dofinansowany z środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. 2013

9. Analiza dorobku – dane bibliometryczne

W niniejszej części autoreferatu przedstawiono analizę dorobku naukowego w oparciu o wskaźniki bibliometryczne – na dzień 1.07.2025. Zestawienie uwzględnia liczbę opublikowanych prac naukowych, cytowań oraz wskaźniki wpływu i indeksy cytowań, odzwierciedlające zasięg oraz jakość prowadzonych przeze mnie badań. Dane zaprezentowane w Tabeli 1 stanowią podstawę do oceny aktywności naukowej i jej oddziaływania w dyscyplinie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki.

Tabela 1. Analiza dorobku – dane bibliometryczne, stan na dzień 1.07.2025

Dana bibliometryczna	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
Liczba opublikowanych prac	16 (M-17 – M-32)*	40 (M-33 – M-72, w tym prace H-1 do H-9)*
Liczba punktów MNiSW za opublikowane prace obowiązująca w 2025 roku	80 (M-17 – M-32)*	2470 (M-33 – M-72, w tym prace H-1 do H-9)*
Liczba punktów MNiSW za opublikowane prace H-1 do H-9 obowiązująca w 2025 roku	-	1180
Liczba cytowani wg bazy Scopus bez autocytowań opublikowanych prac**	0	222
Liczba cytowani wg bazy Scopus bez autocytowań opublikowanych prac H-1 do H-9**	-	186
Sumaryczny Impact Factor zgodnie z rokiem opublikowania prac	0	56,920
Sumaryczny Impact Factor zgodnie z rokiem opublikowania prac H-1 do H-9	-	36,366
IH wg bazy Scopus	0	8
IH wg bazy Scopus bez autocytowań opublikowanych prac**	0	7

* Numeracja zgodna z *Wykazem osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących wkład w rozwój określonej dyscypliny*, stanowiącą integralną część niniejszego autoreferatu

** W zestawieniu wykluczono te prace cytujące, w których pojawia się chociaż jeden z autorów pracy cytowanej

10. Inne informacje ważne z punktu widzenia dotychczasowej kariery naukowej i zawodowej

10.1. Udział w projektach badawczych, rozwojowych, wdrożeniowych

Wszystkie kierowane i realizowane przeze mnie projekty badawcze, rozwojowe i wdrożeniowe realizowane po uzyskaniu stopnia doktora, wymienione poniżej, związane są z zagadnieniami inżynierii ochrony środowiska. Koncentrują się one na zaawansowanych procesach przeróbki i/lub recyklingu przemysłowych odpadów polimetalicznych, a także na innowacjach w procesach produkcji energii elektrycznej i ciepłej, które mają na celu ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko. Zmiany te obejmują zastosowanie bardziej efektywnych technologii katalitycznych oraz optymalizację procesów, co pozwala na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń i zużycia surowców naturalnych.

Poniżej zamieszczam listę projektów badawczych, rozwojowych, wdrożeniowych po uzyskaniu stopnia doktora w kolejności chronologicznej i wskazaniem pełnionej funkcji/roli.

W roli kierownika projektu, kierownika badań

- ❖ **MINIATURA 1.** Politechnika Wrocławska. *Modelowanie hydrometalurgicznych procesów odzysku metali z polimetalicznych odpadów chemicznych źródeł energii drugiego rodzaju* (2017/01/X/ST10/00267), konkurs organizowany przez Narodowe Centrum Nauki. Rola w projekcie Kierownik projektu, 1.09.2017 - 31.08.2018. Całkowity budżet projektu: 49 500 zł
- ❖ **Szybka Ścieżka – IPCEI 8/1.1.1/2020.** Elemental Strategic Metals Sp. z o.o. realizująca projekt B+R+F *Opracowanie i pierwsze wdrożenie przemysłowe innowacyjnych technologii recyklingu baterii litowo-jonowych i katalizatorów z odzyskiem metali o strategicznym znaczeniu*, dotyczący rozwoju technologii bezpiecznego, przyjaznego środowisku i efektywnego finansowo transportu, przechowywania i recyklingu baterii Li-ion oraz zużytych katalizatorów samochodowych. Konkurs organizowany przez Narodowe centrum Badań i Rozwoju. Rola w projekcie Specjalista, Kierownik badań nad technologią LIBs, Konsultant. 10.2020 – obecnie. Konkurs organizowany przez Unię Europejską Całkowity budżet projektu 383 959 417 zł

W roli wykonawcy

- ❖ Uczestnictwo w projekcie II CuBR: *Osadzanie powłok ochronnych i dekoracyjnych na bazie renu i jego związków - ReNewTech*; Beneficjenci: Politechnika Łódzka, KGHM Cuprum Sp. z o.o. Centrum Badawczo Rozwojowe, Politechnika Warszawska, BOHAMET S.A.; Zrealizowane zadanie w projekcie: wykonanie podziałania 3.1 Analiza rynku powłok z udziałem renu-producentów i odbiorcy, w działaniu 3. Ocena potencjału

technologicznego wraz z analizą ekonomiczną opracowanych technologii osadzania powłok z udziałem renu, Rola w projekcie Wykonawca, 15.06.2016 - 31.08.2016

- ❖ Uczestnictwo w grantie Demonstrator finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: *Opracowanie i przetestowanie w skali demonstracyjnej innowacyjnego, kompaktowego modułu wytwarzania energii elektrycznej z biomasy* Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (UOD-DEM-1-527/001). Zrealizowane zadanie w projekcie: Przeprowadzenie analiz chemicznych w zakresie chromatografii gazowej prób spalin silnika zasilanego syngazem, Rola w projekcie Wykonawca, 5.10.2015 - 08.12.2015
- ❖ Uczestnictwo w projekcie rozwojowym finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: *Redukcja Emisji Węglowodorów (Produktów niepełnego spalania) z kotłów małej mocy poprzez poprawę procesów spalania za pomocą katalizatorów* (NR14-0016-10/2010), Rola w projekcie Główny Wykonawca 21.12.2010 - 31.12.2012

10.2. Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

Poniżej przedstawiam swoje doświadczenia w pracy w zespołach eksperckich i konkursowych po dacie nadania stopnia doktora, głównie związanych z oceną wniosków złożonych przez przedsiębiorców z/lub bez konsorcjum z uczelniami, chcących pozyskać niezbędne fundusze na wdrożenie swoich innowacyjnych rozwiązań do warunków przemysłowych. Praca ta stanowi dla mnie doskonałą okazję do wymiany wiedzy i doświadczeń z pozostałymi członkami zespołów eksperckich, które przyczyniły się do rozwinięcia mojej współpracy naukowo-przemysłowej i realizacji ambitnych projektów badawczych, np. Szybka Ścieżka – IPCEI 8/1.1.1/2020 w Elemental Strategic Metals Sp. z o.o..

- ❖ Ekspert w Programie Dobry Pomysł finansowanym przez Ministerstwo Rozwoju ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, Priorytet 2: Wsparcie otoczenia i potencjału przedsiębiorstw do prowadzenia działalności B+R+I, Działanie 2.4: Współpraca w ramach krajowego systemu innowacji POIR, Poddziałanie 2.4.1 Inno_LAB_Centrum analiz i pilotaży nowych instrumentów oraz przez konsorcjantów w latach 2017-2018
- ❖ Ekspert w Narodowego Centrum Badań i Rozwoju od 2018 roku, czynnie uczestniczyłam w procesie oceny merytorycznej wniosków o dofinansowanie w poniżej wymienionych konkursach organizowanych przez NCBiR:
 - 15 wniosków o dofinansowanie złożonych w ramach różnych konkursów „Szybka Ścieżka” realizowanych w Programie Operacyjnym Inteligentny Rozwój 2014-2020;
 - 2 wniosków o dofinansowanie złożonych w ramach konkursu realizowanego w Rządowym Programie Strategicznym Hydrostrateg;

- wniosku o dofinansowanie złożonych w ramach II polsko-chińskiego konkursu bilateralnego

10.3. Opiniowanie i recenzowanie publikacji naukowych

Podczas swojej dotychczasowej kariery naukowej byłam recenzentem wielu czasopism. Opiniowanie i recenzowanie publikacji naukowych postrzegam jako szansę na spojrzenie znane mi kwestie z nowej często innej perspektywy, a także na poznanie nowych zagadnień oraz zjawisk im towarzyszących. Stanowi to dla mnie również cenną możliwość samorozwoju. Poniżej przedstawiam tylko niektóre z nich wykonane po uzyskaniu stopnia doktora:

❖ w czasopismach międzynarodowych

- Wydawnictwo Elsevier, czasopisma: Applied Energy, International Biodeterioration & Biodegradation, Hydrometallurgy, Waste Management, Journal of Cleaner Production, Resources, Conservation & Recycling
- Wydawnictwo Springer, czasopismo: Ionics;
- Wydawnictwo MDPI, czasopisma: Metals, Minerals, Sustainability, Applied Sciences, Crystals, Microorganism, Energies
- Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wydział Inżynierii Środowiska: Environmental Protection Engineering
- Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii: Physicochemical Problems of Mineral Processing

❖ w czasopismach polskich

- Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie: Chemistry. Environment. Biotechnology

❖ publikacje z konferencji międzynarodowych

- International Conference on New Material and Chemical Industry, November 18-20 2017, Sanya, Chiny, www.icnmci.org
- Students Science Conference, September 21-24 2017, Wrocław, Polska, www.ssc.pwr.edu.pl

❖ rozdział w monografii naukowej

- Wydawnictwo Naukowe TYGIEL sp. z o.o.

10.4. Dodatkowe informacje ważne z punktu widzenia dotychczasowej kariery naukowej i zawodowej

W mojej dotychczasowej karierze naukowej istotne miejsce zajmują dodatkowe nie wymienione powyżej osiągnięcia, które miały istotny wpływ na rozwój mojej działalności naukowo-badawczej. Uczestnictwo w konkursach i projektach wewnętrznych Uczelni pozwoliło mi na realizację innowacyjnych inicjatyw oraz zdobycie cennych doświadczeń. Zdobyte nagrody JM Rektora stanowią potwierdzenie wysokiej jakości mojej pracy naukowej i zaangażowania w rozwój środowiska akademickiego. Odznaczenia państwowe są natomiast wyrazem uznania dla mojego wkładu w dziedzinie nauki i działalności społecznej. Wszystkie te osiągnięcia stanowią ważne kamienie milowe na drodze mojej kariery naukowej i motywują do dalszych działań.

Poniżej znajdują się szczegółowe informacje ważne z punktu widzenia dotychczasowej kariery naukowej po uzyskaniu stopnia doktora.

10.5. Projekty wewnętrzne Politechniki Wrocławskiej

- Laureatka konkursowy o dofinansowanie zadania badawczego służącego rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej na rok 2015, pt.: *Odzysk metali z polimetalicznych odpadów chemicznych źródeł energii metodami metalurgii chemicznej*, 1.07.2015 - 15.11.2015

Wyniki prac badawczych zrealizowanych w ramach wyżej opisanego konkursu zostały opublikowane w artykule pt.: *Hydrometallurgical recovery of metals: Ce, La, Co, Fe, Mn, Ni and Zn from the stream of used Ni-MH cells*, Agnieszka Sobianowska-Turek [H-5] i stanowi część osiągnięcia naukowego opisanego w niniejszym autoreferacie.

H-5. Agnieszka Sobianowska-Turek. *Hydrometallurgical recovery of metals: Ce, La, Co, Fe, Mn, Ni and Zn from the stream of used Ni-MH cells*. Waste Management. 2018, vol. 77, s. 213-219

(IF:5.431; MNI:200; IC:33)

- Laureatka Konkursu na sfinansowanie zakupu drobnej aparatury, materiałów i odczynników służącego rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, 2018

10.6. Konkursy wewnętrzne Politechniki Wrocławskiej

- Laureatka konkursu SECUNDUS ogłoszona przez JM rektora Politechniki Wrocławskiej, wyróżnienie otrzymują osoby zajmujące pierwsze miejsce w grupie osób wyróżnionych w danej dyscyplinie naukowej, 2024, 2025

10.7. Nagrody JM Rektora Politechniki Wrocławskiej

Po uzyskaniu stopnia doktora zostałam wyróżniona trzema Nagrodami Indywidualnymi Rektora Politechniki Wrocławskiej, które były uznaniem za moje zaangażowanie i osiągnięcia naukowo-dydaktyczne, które przyczyniają się do rozwoju społeczności akademickiej.

- 2017 Nagroda indywidualna Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu za wyróżniający wkład działalność Uczelni
- 2019 Nagroda indywidualna Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu za wyróżniający wkład działalność Uczelni
- 2024 Nagroda indywidualna Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu za wyróżniający wkład działalność Uczelni.

10.8. Odznaczenia państwowe

W 2020 roku zostałam odznaczona Medalem III Stopnia za Długoletnią Służbę z tytułu pracy w instytucji publicznej

Agnieszka Sobianowska-Turek