

doi:10.15199/48.2022.09.15

## Instalacja do wytwarzania proszku ferromagnetycznego metodą elektrolizy w warunkach laboratoryjnych

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje koncepcję własnej metody wytwarzania proszku ferromagnetycznego w warunkach laboratoryjnych na małą skalę przy wykorzystaniu procesu elektrolizy chemicznej. Autorzy opracowali projekt i zbudowali stanowisko badawcze, którego kluczowym elementem jest separator magnetyczny, analizowany z wykorzystaniem programów FEMM i CFD. Proszki ferromagnetyczne, uzyskane z użyciem dwóch różnych elektrolitów: wodnego roztworu NaCl oraz wodnego roztworu FeSO<sub>4</sub> poddano testom potwierdzającym ich magnetyczne właściwości.

**Abstract.** The article presents the concept of own method of producing ferromagnetic powder in small-scale laboratory conditions using the chemical electrolysis process. The authors developed a project and built a test stand, the key element of which is a magnetic separator, analyzed with the use of FEMM and CFD programs. Ferromagnetic powders obtained with the use of two different electrolytes: aqueous NaCl solution and aqueous FeSO<sub>4</sub> solution were tested to confirm their magnetic properties. (Installation for the production of ferromagnetic powder by electrolysis in laboratory conditions).

**Słowa kluczowe:** proszek ferromagnetyczny, elektroliza, materiały SMART, separator magnetyczny.

**Keywords:** ferromagnetic powder, electrolysis, SMART materials, magnetic separator.

### Wstęp

Metody produkcji proszku ferromagnetycznego najogólniej można podzielić na metody mechaniczne oraz metody fizykochemiczne. Metody mechaniczne polegają na mieleniu metalu, bądź też na rozdrabnianiu metalu poprzez frezowanie, ścieranie lub też jego rozpylanie przez wirującą elektrodę. Metody fizykochemiczne polegają na kondensacji par metali lub na redukcji związków metali. Redukcja może mieć charakter chemiczny lub też elektrochemiczny. W tym drugim przypadku jest to elektroliza, którą przeprowadza się w roztworach wodnych i przy wykorzystaniu rozpuszczalnej anody [4,9].

Elektroliza, rozumiana jako nowy typ procesów chemicznych inicjowanych poprzez przepływ prądu, została przeprowadzona po raz pierwszy w 1800 roku przez dwóch fizyków W. Nicholson'a i A. Carlise'a. Przeprowadzili oni elektrolizę wody i dokonali jej rozkładu na wodór i tlen. Kolejnym krokiem, prowadzącym do lepszego poznania i opanowania odkrytego procesu, były prace prowadzone przez M. Faraday'a, ukierunkowane na zbadanie zachodzących zmian ilościowych. Z upływem lat znaczenie elektrolizy jako ważnego procesu technologicznego systematycznie rosło i zaczęło odgrywać coraz to większą rolę w przemyśle. Aktualnie proces elektrolizy jest szeroko stosowany w pozyskiwaniu metali, oczyszczaniu ich składu, jak również w pokrywaniu powierzchni powłokami metalicznymi. Jest on również wykorzystywany do otrzymywania gazów np. chloru i wodoru. Spektakularnym zastosowaniem elektrolizy była technologia otrzymywania ciężkiej wody zapoczątkowana w czasach II wojny światowej [2,5,9].

Zainteresowanie proszkami ferromagnetycznymi w technice i inżynierii wciąż rośnie. Odkrywane i opisywane są wciąż nowe zastosowania proszku ferromagnetycznego, a szerokie możliwości ich nowatorskiego wykorzystania są związane z dynamicznym rozwojem tak zwanych technologii proszkowych. Proszek ferromagnetyczny może być zawieszoną w cieczy, ale może też być półproduktem, który poprzez proces termicznego spiekania lub mechanicznego prasowania zostanie wykorzystany do formowania obwodów magnetycznych o różnych kształtach. Jeszcze inne zastosowania proszku wiążą się z jego wykorzystywaniem jako surowca w produkcji elastycznych materiałów magnetycznych.

Tak szeroki wachlarz możliwych zastosowań proszków ferromagnetycznych rodzi potrzebę opracowywania proszków o coraz to innych właściwościach fizycznych, mechanicznych i chemicznych. Aktualnie gotowe proszki ferromagnetyczne są oferowane na rynku przez różnych producentów. Oferowane proszki różnią się granulacją i kształtem drobin [6,7,8].

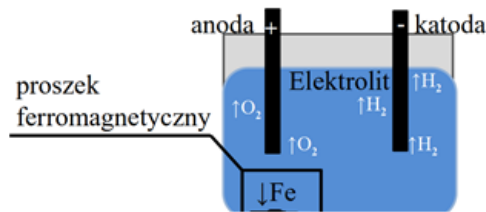
Autorzy artykułu, skupiający swoją uwagę głównie na nowych zastosowaniach proszków ferromagnetycznych w systemach mechatronicznych, postanowili opracować własną metodę wytwarzania proszku ferromagnetycznego na małą skalę dla lepszego poznania ich właściwości i lepszego rozeznania możliwości kształtowania ich różnych cech. Założeniem było opracowanie prostej metody, możliwej do zrealizowania w warunkach laboratoryjnych. Pewną wskazówką, dotyczącą możliwości otrzymywania proszków metodą elektrolizy, były doniesienia literaturowe z ostatnich lat. Dostępne opisy technologii były zbyt ogólnikowe i nie mogły stanowić podstawy do opracowania sposobu wytwarzania proszku. Autorzy poszli więc tropem własnych wstępnych eksperymentów fizykochemicznych, które po kilku miesiącach prób doprowadziły do opracowania instalacji do otrzymywania proszku ferromagnetycznego na małą skalę w warunkach laboratoryjnych na drodze procesu elektrolizy. Metoda ta nie jest inspirowana doniesieniami literaturowymi i według wiedzy autorów nie stanowi odzwierciedlenia żadnej z technologii opisanych w literaturze [1,3].

### Charakterystyka procesu elektrolizy prowadząca do produkcji proszku ferromagnetycznego

Opisywany proces fizykochemiczny wymaga zastosowania elektrolitu, w którym są zanurzone odpowiednie elektrody: anoda wykonana z żelaza (Fe) oraz katoda wykonana z miedzi (Cu). Elektrody te są podłączone do źródła napięcia stałego (do anody napięcie o potencjale dodatnim, do katody napięcie o potencjale ujemnym). Urządzenie do elektrolizy przedstawia w sposób ideowy rysunek 1

Katoda miedziana Cu, zanurzona w elektrolicie, jest źródłem elektronów, dzięki którym jony żelaza Fe<sup>2+</sup>, pochodzące z anody, przechodzą do stanu Fe<sup>0</sup>, stając się proszkiem ferromagnetycznym. Na anodzie Fe wydziela się tlen. Jest to zjawisko niepożądane, powodujące

powstawanie na powierzchni żelaznej elektrody złożeń określanych umownie mianem rdzy. Przebieg elektrolizy można opisać ciągiem czterech reakcji chemicznych. Ciągi reakcji chemicznych dla obu rodzajów elektrolitów, wykorzystywanych w eksperymentach laboratoryjnych: roztworu wodnego soli kuchennej NaCl oraz roztworu wodnego siarczku żelaza FeSO<sub>4</sub> zestawiono w tabeli 1.



Rys.1. Idea procesu elektrolizy w elektrolizerze z anodą Fe, katodą Cu i wodnym roztworem soli kuchennej NaCl jako elektrolitem.

Tabela 1. Ciągi reakcji chemicznych dla dwóch rodzajów elektrolitu: roztworu wodnego NaCl oraz roztworu wodnego FeSO<sub>4</sub>

	NaCl	FeSO <sub>4</sub>
Dysocjacja	NaCl → Na <sup>+</sup> + Cl <sup>-</sup>	FeSO <sub>4</sub> → Fe <sup>2+</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Reakcja na anodzie	2Cl <sup>-</sup> → Cl <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup>	4OH <sup>-</sup> → O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup>
Reakcja na katodzie	2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub>	
	Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → <b>Fe</b>	
Reakcja w elektrolicie	H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup> Na <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup> → NaOH	H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>

Składniki elektrolitu dysocjują na aniony (-) i kationy (+); kationy są przyciągane do ujemnej katody Cu, a aniony do dodatniej anody Fe. Żelazo anody jako metal o niższym potencjale elektrochemicznym niż wodór wypiera ten ostatni z elektrolitu. W elektrolizie, wytrącają się zatem drobiny żelaza pochodzące z rozpuszczającej się stopniowo anody. Kolejnym istotnym do rozwiązania zadaniem, niezbędnym do otrzymania proszku ferromagnetycznego, jest problem jego odseparowania od elektrolitu. W proponowanej metodzie proszek ferromagnetyczny, zawieszony w elektrolicie, jest wychwytywany na drodze magnetycznej w urządzeniu nazwanym separatorem magnetycznym.

## Koncepcja instalacji do produkcji proszku ferromagnetycznego

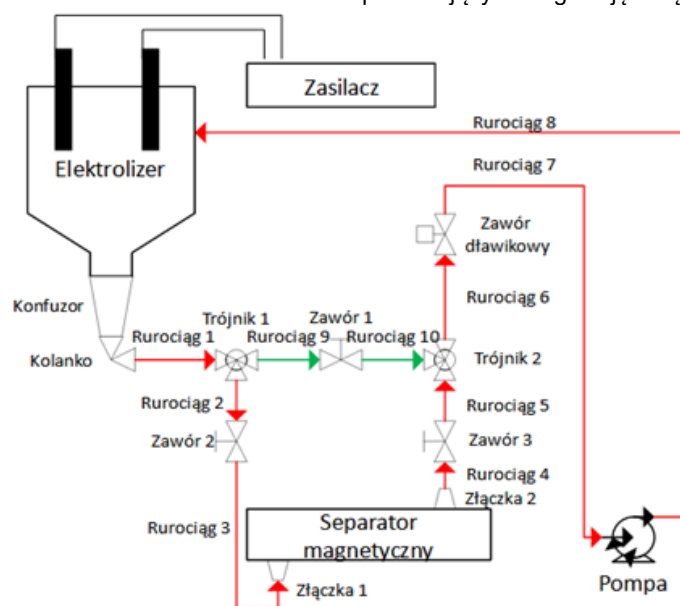
Na rysunku 2 przedstawiono w sposób ogólny schemat instalacji do produkcji proszku ferromagnetycznego.

Stanowisko składa się z: elektrolizera (urządzenia, w którym zachodzi elektroliza), separatora magnetycznego (w którym odbywa się wychwytywanie proszku ferromagnetycznego z elektrolitu), pompy (wymuszającej obieg elektrolitu w torze głównym i torze pomocniczym), zasilacza elektrolizera (źródło napięcia stałego o wartości 24V) oraz zasilacza pompy. Powyższe elementy są połączone rurociągami, oznaczonymi na rysunku 2 jako rurociągi: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 oraz zaworami: 1,2,3 i zaworem dławikowym.

**Tor główny**, związany z wytwarzaniem proszku ferromagnetycznego, zaznaczono na rysunku 2 kolorem czerwonym. Obejmuje on: elektrolizer, konfuzor, kolanko, rurociąg 1, trójnik 1, rurociąg 2, zawór 2, rurociąg 3, separator magnetyczny, rurociąg 4, zawór 3, rurociąg 5, trójnik 2, rurociąg 6, zawór dławikowy, rurociąg 7, pompę, oraz rurociąg 8. **Tor pomocniczy**, zaznaczony na rysunku 2 kolorem zielonym, służy do ominięcia separatora magnetycznego podczas procesu opróżniania separatora z proszku ferromagnetycznego (bez przerywania trwającej elektrolizy). Tor pomocniczy obejmuje: rurociąg 9, zawór 1 oraz rurociąg 10. W czasie opróżniania separatora staje się on fragmentem obiegu głównego.

W elektrolizerze, oprócz wspomnianego procesu, powstają gazy; w zależności od użytego elektrolitu jest to chlor i wodór dla roztworu wodnego soli kuchennej lub tlen i wodór dla roztworu wodnego siarczku żelaza. Atomy żelaza opadają na dno elektrolizera zakończonego stożkowym konfuzorem. Jeśli zawór 1 instalacji hydraulicznej jest w pozycji zamkniętej, a zawory 2 i 3 są w pozycji otwartej, to elektrolit wraz z proszkiem jest kierowany do separatora magnetycznego.

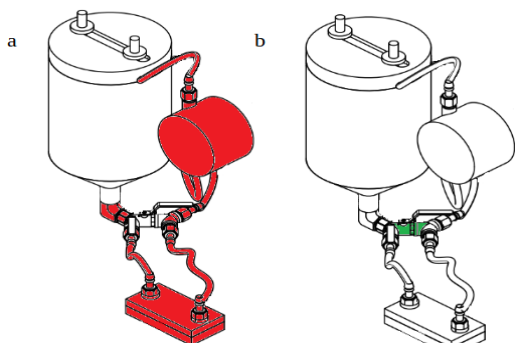
W separatorze magnetycznym, który zawiera szeregowo połączone celki i w którego części centralnej są umieszczone neodymowe magnesy trwałe, następuje odseparowanie proszku ferromagnetycznego (jego wyłapanie z zawiesiny). Oczyszczony z proszku elektrolit, po przejściu przez separator, jest transportowany ponownie do elektrolizera poprzez zawór dławikowy, pozwalający na regulację natężenia przepływu elektrolitu.



Rys.2. Schemat stanowiska do wytwarzania proszku ferromagnetycznego według koncepcji autorów.

### Konstrukcja stanowiska do wytwarzania proszku ferromagnetycznego

Na rysunku 3 przedstawiono wizualizację stanowiska do produkcji proszku ferromagnetycznego, wykonaną w programie Fusion 360 [11]. Kolorem czerwonym wyróżniono tor główny, związany z procesem wytwarzania proszku oraz kolorem zielonym - tor pomocniczy, umożliwiający opróżnianie separatora zawierającego wyłapany proszek ferromagnetyczny bez przerywania ciągłości procesu elektrolizy.

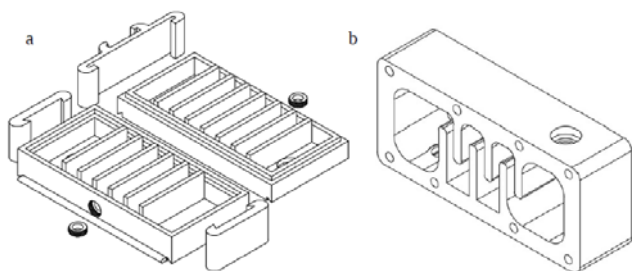


Rys.3. Wizualizacja stanowiska do produkcji proszku ferromagnetycznego, wykonana w programie Fusion 360: a) tor główny, b) tor pomocniczy

Najistotniejszą częścią stanowiska do wytwarzania proszku ferromagnetycznego decydującą w znacznym stopniu o wydajności instalacji, jest separator magnetyczny. Założono, że separator magnetyczny zostanie wykonany w technologii druku 3D na drukarce Ender 3 [10].

Rozważono dwie konstrukcje separatora magnetycznego: 2-częściową konstrukcję 5-celkową (rysunek 4a) oraz 1-częściową konstrukcję 2-celkową (rysunek 4b).

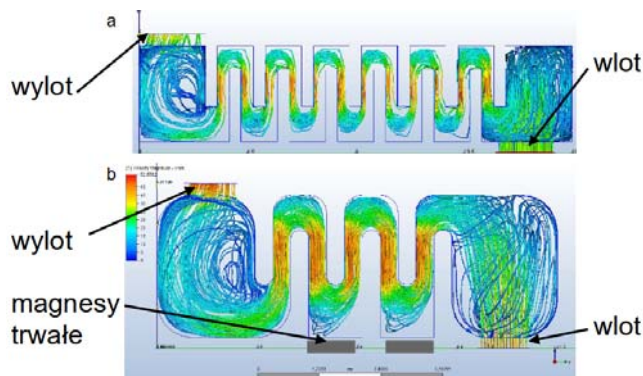
Konstrukcja 5-celkowa składa się z dwóch oddzielnych części (części dolnej i części górnej), drukowanych osobno. Istotną zaletą konstrukcji 2-celkowej (rysunek 4b) jest możliwość jej wydrukowania jako jednego monolitycznego elementu. Symulacyjne modele hydrodynamiczne opracowano w programie komputerowym CFD (ang. Computing Fluid Dynamics) dla obu rozwiązań konstrukcyjnych [12].



Rys.4. Dwie rozważone konstrukcje separatora magnetycznego: a) 2-częściowy 5-celkowy separator magnetyczny b) 1-częściowy 2-celkowy separator magnetyczny.

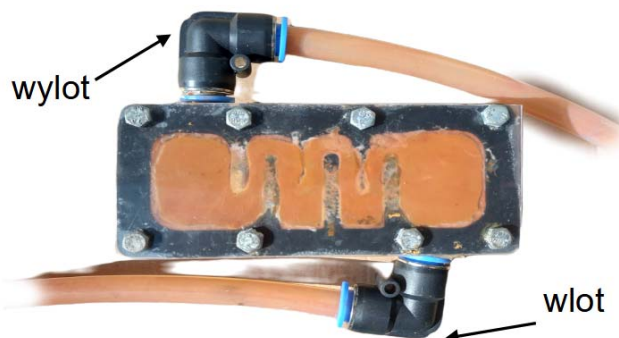
Wyniki symulacji przepływu elektrolitu przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5a i 5b. Po analizie cech konstrukcyjnych obu rozwiązań i rozważeniu technologii ich wykonania, jak też po wzięciu pod uwagę wyników symulacji, pozwalających na określenie charakteru przepływu cieczy (przepływ laminarny lub turbulentny), zdecydowano się na zastosowanie w budowanej instalacji

1-częściowego separatora 2-celkowego, zapewniającego większe natężenie przepływu oraz bardziej równomierny rozkład prędkości elektrolitu; oba te czynniki sprzyjają większej wydajności separatora magnetycznego. Dla wybranego separatora dobrano dwa jednakowe neodymowe magnesy trwałe w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 40 x 15 x 5 mm, których umiejscowienie w separatorze wskazują rysunki 5 i 7.



Rys.5. Wyniki symulacji przepływu elektrolitu: a) w 2-częściowym 5-celkowym separatorze magnetycznym, b) w 1-częściowym 2-celkowym separatorze magnetycznym (program CFD)

Gotowy separator, wykonany na drukarce 3D Ender 3 z filamentu PLA, został dodatkowo uszczelniony żywicą epoksydową i pokryty silikonem. Zamknięcie separatora stanowi płyta z polipropylenu, przymocowana do separatora za pomocą 8 śrub (zdjęcie na rysunku 6).

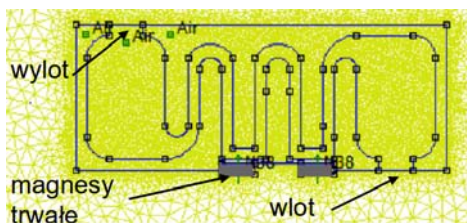


Rys.6. Zdjęcie zbudowanego separatora magnetycznego

Warto podkreślić, że zdjęcie separatora magnetycznego zostało wykonane po przeprowadzeniu kilkunastu cykli wytwarzania proszku, stąd też na ściankach separatora oraz na ściankach rurek łączeniowych jest widoczny brunatny nalot, związany z osadzaniem się cienkiej warstwy rdzy.

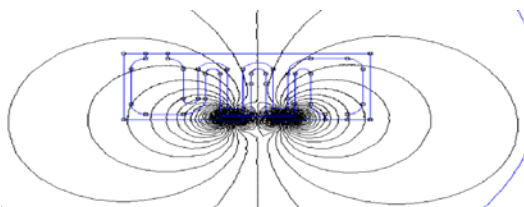
Wyznaczenie rozkładu przestrzennego pola magnetycznego, wytwarzanego w separatorze magnetycznym przez dwa neodymowe magnesy trwałe, przeprowadzono w programie FEMM. Wygenerowaną siatkę przestrzenną 2D przedstawia rysunek 7.

Rozkład przestrzenny 2D pola magnetycznego charakteryzują dwa rysunki: rysunek 8, przedstawiający przebieg linii sił pola magnetycznego oraz rysunek 9, pozwalający odczytać wartości indukcji magnetycznej (średnia wartość indukcji magnetycznej w strefie przyciągania proszku magnetycznego, odczytana po przeprowadzeniu symulacji, wynosi 0,18 T).

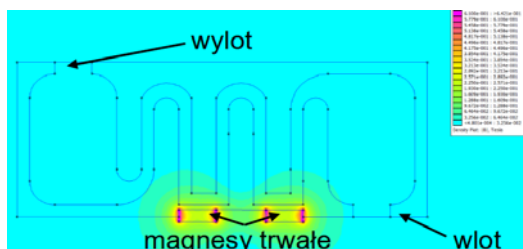


Rys.7.

Przygotowana do obliczeń symulacyjnych siatka przestrzenna 2D dla 1-częściowego 2-celkowego separatora magnetycznego.



Rys.8. Przebieg linii sił pola magnetycznego w 1-częściowym 2-celkowym separatorze magnetycznym.



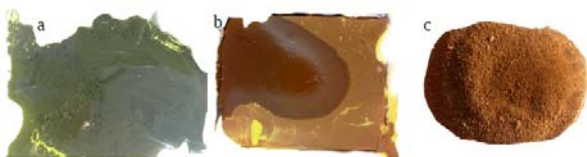
Rys.9. Rozkład przestrzenny 2D indukcji magnetycznej w 1-częściowym 2-celkowym separatorze magnetycznym.

Opisywany elektrolizer został wykonany z polimeru HDPE i ma kształt cylindra. Jego zakończenie stanowi konfuzor, który również został wydrukowany w technologii druku 3D z filamentu PLA. Dla zwiększenia jego szczelności został pokryty warstwą żywicy epoksydowej (rysunek 3). Do budowy toru głównego i toru dodatkowego hydraulicznej instalacji obiegu elektrolitu wykorzystano standardowe elementy hydrauliczne (rys. 2).

### Badania laboratoryjne elektrolitycznej metody wytwarzania proszku ferromagnetycznego

Jak wskazano w poprzednim rozdziale, badaniom poddano dwa rodzaje elektrolitów: wodny roztwór soli NaCl oraz wodny roztwór siarczku żelaza  $FeSO_4$ .

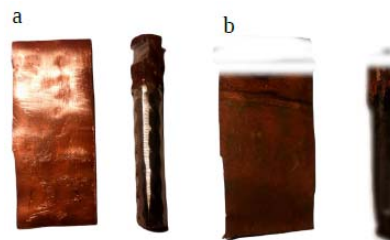
Poszczególne stany proszku, otrzymanego poprzez elektrolizę wodnego roztworu soli NaCl oraz jego reakcję na przyłożone zewnętrzne pole magnetyczne (wytworzone za pomocą magnesu neodymowego), pokazują odpowiednio zdjęcia na rysunkach 10a i 10b oraz na rysunku 10c.



Rys.10. Zdjęcia stanu proszku ferromagnetycznego: a) po wyjęciu z separatora magnetycznego b) w trakcie suszenia i po zmieleniu c) po przyłożeniu od spodu naczynka z proszkiem ferromagnetycznym neodymowego magnesu pastylkowego.

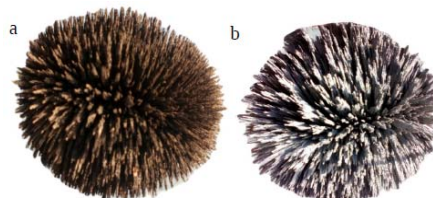
Otrzymany w wyniku elektrolizy proszek ferromagnetyczny, przedstawiony na rysunku 10a (zdjęcie wykonano natychmiast po wyjęciu proszku z separatora) charakteryzował się czarnozieloną barwą. Po wysuszeniu zmienił on barwę na brunatną. Ze względu na to, że w procesie suszenia doszło do niepożądanego agregacji drobin, niejednorodny proszek został dodatkowo zmielony. Reakcję wysuszonego i zmielonego proszku na zewnętrzne pole magnetyczne pokazuje rysunek 10c: wokół pastylkowego magnesu, przyłożonego od spodu naczynka wypełnionego proszkiem, jest widoczne koliste wyrzucenie.

Stan obu elektrod: katody i anody przed elektrolizą i po elektrolizie pokazują odpowiednio rysunki 11a i 11b.



Rys.11. Elektrody Cu i Fe: a) przed elektrolizą, b) po wykonaniu kilku cykli elektrolizy

Eksperymenty przeprowadzone z drugim rodzajem elektrolitu - wodnym roztworem siarczku żelaza  $FeSO_4$  pozwoliły na uzyskanie proszku o właściwościach magnetycznych, porównywalnych z właściwościami magnetycznymi proszku magnetycznego dostępnego na rynku [13]. Drobinę otrzymanego proszku oraz proszku dostępnego na rynku posiadają średnicę około  $60 \mu m$ , co określono metodami mikroskopowymi. Porównanie reakcji proszku ferromagnetycznego uzyskanego własną metodą z reakcją proszku ferromagnetycznego zakupionego na rynku na przyłożone zewnętrzne pole magnetyczne, prezentują odpowiednio rysunki 12a i 12b (w obu przypadkach proszek „jeży się” w podobny sposób ponad umieszczonym od spodu naczynka magnesem trwałym).



Rys.12. Porównanie reakcji proszku na przyłożone pole magnetyczne wytworzone przez neodymowy magnes pastylkowy: a) proszek ferromagnetyczny wytworzony własną metodą przy użyciu wodnego roztworu siarczku żelaza b) proszek ferromagnetyczny zakupiony na rynku.

### Wnioski

Przeprowadzone eksperymenty w pełni potwierdzają możliwość wytwarzania proszku ferromagnetycznego drogą elektrolizy chemicznej przy użyciu jako elektrolitu wodnego roztworu soli NaCl oraz wodnego roztworu siarczku żelaza  $FeSO_4$ . Uzyskany proszek ferromagnetyczny w reakcji na przyłożone zewnętrzne pole magnetyczne wykazuje podobne właściwości magnetyczne, jak proszek dostępny na rynku.

Możliwość wytwarzania proszku ferromagnetycznego w warunkach laboratoryjnych na małą skalę ma istotny walor badawczy, jak też i walor dydaktyczny. Uzyskany proszek został przez autorów wykorzystany do otrzymania

nowych materiałów magnetycznych takich jak ciecze magnetoreologiczne oraz elastyczne materiały magnetyczne, co zostanie omówione w kolejnym artykule. Badania nad zastosowaniami uzyskanych materiałów są w toku.

Opracowana instalacja jest aktualnie wykorzystywana jako element wyposażenia laboratorium w ramach zajęć z nowoczesnego materiałoznawstwa realizowanego na nowym unikalnym kierunku studiów drugiego stopnia Infotronika prowadzonym na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki.

Pozytywne wyniki przeprowadzonych testów zachęciły autorów do kontynuacji rozpoczętych badań i dalszego doskonalenia technologii wytwarzania proszku ferromagnetycznego w warunkach laboratoryjnych. Przewiduje się, że nowa wersja instalacji zostanie wyposażona w elektrolizer o większej objętości, jak też w aparaturę pomiarową, pozwalającą uchwycić istotne relacje ilościowe, związane z wydajnością stanowiska i sprawnością urządzenia. Będzie też wyposażona w wymienne separatory magnetyczne o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i różnym rozłożeniu przestrzennym magnesów trwałych. Planuje się przeprowadzenie szczegółowych badań właściwości magnetycznych otrzymanych proszków ferromagnetycznych oraz próbek różnych materiałów z proszkami ferromagnetycznymi w aparacie Epsteina.

**Autorzy:** mgr inż. Krzysztof Soltys, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: [krzysztof.soltys@pk.edu.pl](mailto:krzysztof.soltys@pk.edu.pl)

mgr inż. Sebastian Bartel, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: [sebastian.bartel@doktorant.pk.edu.pl](mailto:sebastian.bartel@doktorant.pk.edu.pl)

prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Politechnika Krakowska, Katedra Inżynierii Elektrycznej E-2, ul. Warszawska 24 31-155 Kraków, E-mail: [krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl](mailto:krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl)

## LITERATURA

- [1] Rasoul K., Nekouei F., Rashchi Arsalan R., Copper nanopowder synthesis by electrolysis method in nitrate and sulfate solutions, Journal Article, 2013, 91-96
- [2] Francis H. (Sam) Froes, A historical perspective of titanium powder metallurgy, Titanium Powder Metallurgy, 2015, 1-19
- [3] G.Z.Chen, Forming metal powders by electrolysis, Advances in Powder Metallurgy, 2013, 19-49
- [4] Kołodziej B., Elektrowydzielanie metali – procesy hydroelektrometalurgiczne, Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, 1996, 233 - 247
- [5] <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/elektroliza;3897365.html>, stan z dn. 15.06.2021
- [6] Shripad T.Revankar, Chapter Four - Nuclear Hydrogen Production, Storage and Hybridization of Nuclear Energy, Academic Press, 2019, 49-117
- [7] Ali SHRIFIAN-ESFAHNI, Mohammad Taghi SALEHI, Mojtaba NASR-ESFAHNI, Ehsan EKRAMIAN - Katedra Chemii, Oddział w Nadżafabadzie, Wolny Uniwersytet Islamski (Islamic Azad University), CHEMIK, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015, 69, 1, 19–32”
- [8] Ali SHRIFIAN-ESFAHNI, Mohammad Taghi SALEHI, Mojtaba NASR-ESFAHNI, Ehsan EKRAMIAN, Superparamagnetyczne nanocząstki tlenku żelaza modyfikowane chitozanem: projektowanie, wytwarzanie, opis i działanie przeciwbakteryjne, Katedra Chemii, Oddział w Nadżafabadzie, Wolny Uniwersytet Islamski (Islamic Azad University), Iran, 2015, 69, 1, 19–32
- [9] Dylewski R., Gonet M., Elektrochemia przemysłowa : inżynieria elektrochemiczna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice; 2002
- [10] <https://www.creality3dofficial.com/products/official-creality-ender-3-3d-printer>, stan z dn. 15.06.2021
- [11] <https://www.autodesk.pl/products/fusion-360>, access. 15.06.2021
- [12] <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>, access. 15.06.2021
- [13] <http://selkat.pl/index.html>, access 15.06.2021