

BADANIA FRAKCJI TRUDNO-ZBYWALNEJ Z BIEŻĄCEJ PRODUKCJI W KOPALNI GNEJSU DOBOSZOWICE, POD KĄTEM POTENCJAŁU NA WYTWORZENIE PRODUKTU SKALENIOWO-KWARCOWEGO DLA BRANŻY CERAMIKI BUDOWLANEJ

STUDIES ON THE LOW-DEMAND FRACTION FROM THE CURRENT PRODUCTION AT THE DOBOSZOWICE GNEISS MINE, IN TERMS OF ITS POTENTIAL FOR PRODUCING FELDSPAR-QUARTZ PRODUCT FOR THE BUILDING CERAMICS INDUSTRY

Natasza Markiewicz, Michał Maciak - Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Wrocławski
Makary Musiałek - „Poltegor-Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

DOI:10.5604/01.3001.0055.5142

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością zagospodarowania frakcji trudno-zbywalnej, drobnoziarnistego gnejsu w kopalni Doboszowice. Celem głównym była ocena przydatności tego materiału do uzyskania koncentratu skaleniuowo-kwarcowego, który miałby spełniać wymagania przemysłu ceramicznego. Analizy petrograficzne i chemiczne wykazały istotny udział biotytu oraz innych mineralów żelazonośnych, podwyższających zawartość Fe_2O_3 powyżej dopuszczalnych wartości ($<0,5\%$). W badaniach porównano dwa warianty przygotowania próbek (bez kruszenia oraz z dodatkowym kruszeniem frakcji $>2\text{ mm}$) oraz przeprowadzono testy separacji magnetycznej na sucho w centrum testowym firmy STEINERT. Wyniki wskazały, że dodatkowe kruszenie sprzyjało lepszemu uwolnieniu mineralów zrostowych i korzystniejszemu rozdziałowi frakcji, jednak zawartość Fe_2O_3 w koncentratkach nadal przekraczała wartości graniczne. Na tej podstawie stwierdzono, że konieczne są próby zastosowania separacji magnetycznej wysokogradientowej na mokro (WHIMS), która – zgodnie z danymi literaturowymi – pozwala skuteczniej usuwać drobno rozproszony biotyt i tlenki żelaza.

Słowa kluczowe: gnejs, separacja magnetyczna, Doboszowice, biotyt, skalenie, kwarc, gospodarka o obiegu zamkniętym, GOZ

Abstract

The article presents the results of research on the possibility of managing fine-grained, low-demand fractions of gneiss from the Doboszowice quarry. The main objective was to assess the suitability of this material for obtaining a feldspar-quartz concentrate that meets the requirements of the ceramic industry. Petrographic and chemical analyses revealed a significant presence of biotite and other iron-bearing minerals, which increase the Fe_2O_3 content above the permissible values ($<0.5\%$). The study compared two sample preparation variants (without crushing and with additional crushing of the $>2\text{ mm}$ fraction) and included dry magnetic separation tests carried out at STEINERT'S test center. The results indicated that additional crushing improved the liberation of intergrowth minerals and led to a more favorable separation of fractions; however, the Fe_2O_3 content in the concentrates still exceeded the threshold values. Based on this, it was concluded that high-gradient wet magnetic separation (WHIMS) tests are necessary, as it has been shown in the literature to more effectively remove finely disseminated biotite and iron oxides.

Keywords: gneiss, magnetic separation, Doboszowice, biotite, feldspar, quartz, circular economy, CE

Wstęp

W ramach prac przedstawiono część analiz geologicznych i eksperymentów wykonanych na potrzeby realizacji projektu wewnętrznego IGO pn. „Badanie przydatności frakcji trudno-zbywalnej z kopalni Doboszowice do produkcji produktu skaleniowo-kwarcowego poprzez separację magnetyczną oraz analizę potencjału złożowego składowisk”. Zadanie to było prowadzone we współpracy pomiędzy „Poltegor-Instytut” – Instytutem Górnictwa Odkrywkowego we Wrocławiu, pełniącym rolę jednostki badawczej, a Towarzystwem Eksploatacji Surowców Mineralnych TESM Sp. z o.o. sp. k. z siedzibą w Doboszowicach, działającym jako partner przemysłowy. Dodatkowo w realizację projektu zaangażowana była również niemiecka firma STEINERT GmbH, odpowiedzialna za przeprowadzenie testów separacji magnetycznej na urządzeniach przemysłowych.

Projekt koncentruje się na opracowaniu metody umożliwiającej pełne wykorzystanie frakcji trudno-zbywalnej powstającej podczas kruszenia kruszywa gnejsowego w kopalni Doboszowice. Materiał trudno-zbywalny, po odpowiednim przetworzeniu, mógłby znaleźć zastosowanie m.in. jako surowiec skaleniowy lub dodatek poprawiający właściwości gleb.

Wpisuje się to w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), która ma na celu maksymalne ograniczenie ilości odpadów (w tym wypadku trudno-zbywalnego produktu składowanego w dużej ilości) poprzez ich optymalne wykorzystanie jako pełnowartościowych surowców lub produktów. W kopalni Doboszowice mamy do czynienia z materiałem nie będącym odpadem, lecz kruszywem składowanym w ogromnych ilościach z uwagi na niemożność jego skutecznej sprzedaży. W tym ujęciu frakcje uznawane dotąd za trudno-zbywalne mogą stać się nowym cennym produktem, na przykład w branży ceramicznej. Podejście to sprzyja nie tylko zminimalizowaniu negatywnego oddziaływania górnictwa na środowisko, lecz także pozwala zwiększyć efektywność ekonomiczną eksploatacji złoża, zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju.

Lokalizacja i charakterystyka obszaru badań

Kopalnia gnejsu Doboszowice (złoże „Doboszowice 1”) położona jest w województwie dolnośląskim, powiecie ząbkowickim, w miejscowości Doboszowice, w pobliżu Kamieńca Ząbkowickiego i Paczkowa. Zakład zlokalizowany jest w pobliżu drogi wojewódzkiej nr 382 [8].

Wydobycie prowadzone jest od 2007 r. przez Towarzystwo Eksploatacji Surowców Mineralnych sp. z o.o. sp.k. (TESM). Profil produkcji obejmuje szeroką gamę kruszyw ozdobnych: : korę kamienną, kamienie gabionowe, płytki łupane, głązy i szpilki ogrodowe. Zakład również oferuje kruszywa budowlane, w tym: drogowe i kolejowe, hydrotechniczne, kruszywa do betonu oraz kruszywa do mieszanek bitumicznych.

Szacowane zasoby przemysłowe złoża „Doboszowice 1” wynoszą około 203 mln ton gnejsu [8]. Eksploatacja prowadzona jest metodą odkrywkową, z wykorzystaniem robót strzałowych i ładowarek kołowych, przeróbka kopaliny natomiast przy pomocy kruszarek szczękowych i stożkowych [5]. W procesie przeróbki powstają także znaczne ilości

frakcji drobnoziarnistych (0–22 mm), zawierających głównie skalenie i kwarc, ale także minerały ciemne, przede wszystkim biotyt, które podwyższają zawartość Fe_2O_3 powyżej wymagań przemysłu ceramicznego [14].

Skąły te charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością na wietrzenie i walorami dekoracyjnymi, co czyni je surowcem cenionym zarówno w budownictwie, jak i w kamieniarstwie [3, 4].

Obecnie, we współpracy z Instytutem Górnictwa Odkrywkowego „Poltegor Instytut”, prowadzone są badania nad możliwością pełnego zagospodarowania tej frakcji poprzez separację magnetyczną na mokro w celu usunięcia minerałów paramagnetycznych (biotytu, tlenków żelaza) i uzyskania koncentratu skaleniowo-kwarcowego spełniającego kryteria przemysłu ceramicznego ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,5 \%$; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 6,5 \%$) [5, 9, 14].

Geologia

Złoże „Doboszowice 1” położone jest w południowej części Wzgórz Niemczańsko-Strzelińskich, w obrębie metamorfiku Doboszowic, zaliczanego do zachodniego segmentu bloku przedsudeckiego [4]. Jednostka ta zbudowana jest głównie z ortognejsów pochodnych granitoidów dwułuszczkowych, powstałych w wyniku głębokiego przeobrażenia skał magmowych kwaśnych [4]. W obrębie masywu występują liczne wkładki amfibolitów, soczewy ptygmatytów oraz żyły kwarcowo-skaleniowe, a lokalnie także strefy mylonitów i kataklazytów [4].

Historia geologiczna obszaru obejmuje wieloetapowe procesy deformacyjne i metamorfizm, zapoczątkowane w neoproterozoiku–kambrze i silnie odnowione w trakcie orogenezy warwyskiej (ok. 380–320 Ma) [10]. W efekcie powstała mozaikowa budowa litologiczna, z częstymi strefami ścinania i zmiennością skał w obrębie krótkich odcinków.

Nad serią skalną rozwinięta jest pokrywa zwietrzelinowa o zmiennej miąższości – od kilku do ponad 70 m, zbudowana z gleb, glin i rumoszu gnejsowego [4].

Petrografia

Badane próbki skał z okolic Doboszowic reprezentują głównie gnejsy o zróżnicowanej strukturze i teksturze, w tym gnejsy biotytowe oraz dwułuszczkowe o teksturach soczewkowych, oczkowych i smużystych, a także amfibolit epidotowy z biotytem [3]. Pod względem mineralnym dominują kwarc, plagioklasy i skalenie alkaliczne, natomiast biotyt stanowi główny minerał ciemny w większości odmian. Jego udział objętościowy jest zmienny, od około 5 % w gnejsach dwułuszczkowych do nawet 19 % w gnejsach oczkowych, osiągając szczególnie wysokie wartości w amfibolicie epidotowym, gdzie wynosi 36,9 % obj. [3].

W gnejsach biotytowych biotyt tworzy niewielkie, często porozciągane agregaty złożone z kilku blaszek, zwykle ułożonych zgodnie z kierunkiem foliacji. W partiach kataklastycznych obserwuje się jego silne pokruszenie i zmielenie, co świadczy o intensywnych deformacjach [3]. W gnejsach dwułuszczkowych o teksturze soczewkowej biotyt występuje w postaci silnie poskręcanych zespołów blaszek, czasem przyjmujących kształty soczewek lub form sigmoidalnych. W odmianach oczkowych i smużystych tworzy

smużycie wykształcone nagromadzenia zgranulowanych fragmentów blaszek, a w strefach silnej kataklazy, formy wachlarzowe lub pierzaste, lokalnie zawierające drobne wprysnięcia tlenków żelaza [3].

W amfibolicie epidotowym biotyt jest obecny zarówno w postaci pojedynczych cienkich blaszek, jak i w większych nagromadzeniach, często współwystępujących z hornblendą zwyczajną i lokalnie przerastających się z jej kryształami [3].

Wcześniejsze prace i podsway wybory metody

W poprzednich latach prowadzony z ramienia Poltegoru-Institutu był projekt „Technologia wykorzystania odpadów wydobywczych przy równoczesnym ograniczeniu ich powstawania na etapie eksploatacji złoża gnejsu Doboszowice 1’’. Prowadzony był on w oparciu o technologię separacji magnetycznej na sucho, gdzie udało się w warunkach laboratoryjnych uzyskać koncentrat skaleniowo-kwarcowy o odpowiednich parametrach chemicznych ($K_2O + Na_2O \geq 6,5\%$, $K_2O/Na_2O > 1$, $Fe_2O_3 \leq 0,5\%$), jednak w skali półtechnicznej zawartość Fe_2O_3 przekraczała wartości dopuszczalne dla przemysłu ceramicznego [5, 9]. Problemem okazało się niewystarczające usunięcie drobnoziarnistego biotyty.

Wyżej wspomniany projekt wykorzystywał separator rolkowy, indukowany magnetycznie (IMR). Technologia ta oparta jest na generowaniu pola magnetycznego przy pomocy elektromagnesów. W badaniach przedstawionych w niniejszej publikacji użyty został separator HGS (High Gradient magnetic Separator) wyposażony w magnes stały.

W literaturze podkreśla się, że biotyt jest minerałem o właściwościach paramagnetycznych, przez co wykazuje niewielką, lecz dodatnią podatność magnetyczną, co umożliwia jego usunięcie w polach magnetycznych wysokiej intensywności [1, 2]. W przypadku skał z Doboszowic biotyt występuje nie tylko w postaci większych blaszek, lecz także – szczególnie w gnejsach drobno- i grubolaminowanych oraz migmatycznych – w formie frakcji drobnoziarnistej, często poniżej 0,1 mm. Jak wskazują obserwacje petrograficzne [7, 8], w partiach silnie kataklastycznych i mylonitycznych minerał ten ulega intensywnemu rozdrobnieniu, tworząc rozproszone, luźno związane agregaty, a wyniki analiz granulometrycznych [9] potwierdzają, że znaczny udział minerałów żelazonośnych mieści się w uziarnieniu $<0,1$ mm. W takich warunkach metoda separacji na mokro (WHIMS) jest szczególnie uzasadniona, gdyż pozwala na efektywne usuwanie cząstek paramagnetycznych o wielkości 1–10 μm oraz minimalizuje pylenie [12, 13].

Przygotowanie materiału do badań

W czerwcu 2025 roku z kopalni w Doboszowicach pobrano 200 kg frakcji trudno-zbywalnej z bieżącej produkcji o uziarnieniu 0–22 mm, reprezentującą typową frakcję generowaną podczas kruszenia. Po rekonesansie i wywiadzie z pracownikami kopalni, zdecydowano się iż całość badań zostanie skupiona na materiale z bieżącej produkcji, składowanym obecnie w centralnej części zakładu górniczego. Zdecydowano się nie skupiać na materiale z innych składowisk i zwałowisk, gdyż cechują się one



Rys. 1. Miejsca składowania materiału z bieżącej produkcji w zakładzie górniczym Doboszowice oraz zwałowisk wykluczonych z badań

większym zróżnicowaniem co do frakcji i niekiedy zmieszane są z odpadem eksploatacyjnym (Rys. 1).

Materiał został wysuszony w temperaturze pokojowej. W przeprowadzonych badaniach frakcja gnejsu została przygotowana w dwóch wariantach, co miało na celu ocenę wpływu wstępnego rozdrobnienia na efektywność separacji magnetycznej.

Wprowadzenie dwóch wariantów przygotowania próbek – bez dodatkowego kruszenia (wariant A) oraz z etapem wstępnego rozdrobnienia frakcji powyżej 2 mm (wariant B) – stanowiło nie tylko test technologiczny, ale również wstęp do analiz ekonomicznych. Dodatkowym celem było bowiem określenie, czy dodatkowy proces kruszenia jest uzasadniony z punktu widzenia opłacalności całego przedsięwzięcia. Dalsze rozdrabnianie materiału zwiększa bowiem nakłady energetyczne i koszty operacyjne, jednak z drugiej strony może prowadzić do lepszego uwolnienia minerałów zrostowych, poprawy efektywności separacji i uzyskania koncentratu o wyższej jakości. Porównanie wyników uzyskanych w obu wariantach pozwala więc ocenić, czy potencjalne korzyści jakościowe i technologiczne równoważą zwiększone nakłady ekonomiczne, a tym samym czy proces kruszenia powinien być uwzględniony w docelowym schemacie technologicznym.

W wariantcie A próbki poddano bezpośredniemu przesiewaniu na pięć klas ziarnowych: 0–0,25 mm, 0,25–0,5 mm, 0,5–1 mm, 1–2 mm oraz powyżej 2 mm.

W wariantcie B frakcję powyżej 2 mm wstępnie skruszono w kruszarce w celu uwolnienia minerałów zrostowych i zwiększenia jednorodności ziaren, a następnie przesiano według tego samego schematu.

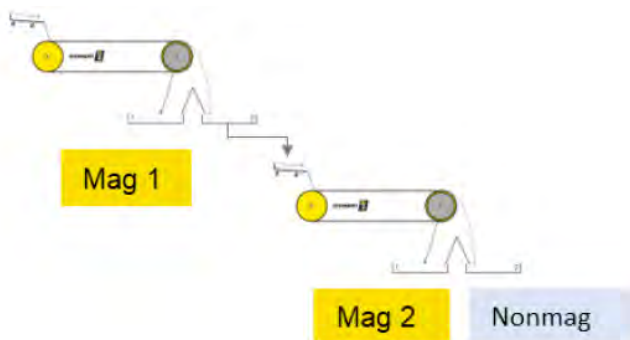
Badania separacji na urządzeniach przemysłowych

Tak przygotowany materiał poddano separacji magnetycznej wysokogradientowej w centrum testowym firmy STEINERT, wykorzystując separator HGS o indukcji magnetycznej do 14 000 Gs, pracujący w układzie dwustopniowym (double roll), co umożliwiało sukcesywne oddzielanie minerałów paramagnetycznych. Prędkość taśmy wynosiła standardowo 1,8 m/s, natomiast dla frakcji 1–2 mm została obniżona do 1,2 m/s, co sprzyjało precyzyjniejszemu rozdziałowi. Pozycję przegrody (splittera) ustawiono

na 2 cm, a sama separacja odbywała się dwustopniowo – uzyskano tym samym trzy produkty: z pierwszego stopnia separacji frakcję silnie magnetyczną (Mag 1) oraz z drugiego stopnia separacji frakcję o słabszych właściwościach magnetycznych (Mag 2), oraz frakcję niemagnetyczną (NonMag) (Rys. 2), stanowiącą oczyszczony koncentrat skalenioowo-kwarcowy będący głównym celem procesu. Tak dobrane parametry technologiczne miały zapewnić maksymalne usunięcie minerałów maficznych (głównie żelazonośnych) przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej zawartości skałeni i kwarcu w produkcie końcowym. Na rysunku 3. przedstawiono produkty Nonmag oraz Mag 2.

Badania laboratoryjne i uzyskane wyniki

Analizy składu chemicznego produktów separacji wykonano metodą fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii (EDX-RF) przy użyciu spektrometru EDX-7000 firmy Shimadzu (dalej w tekście - EDX), wyposażonego w płuczkę helową. Pomiar prowadzono w celu określenia zawartości głównych tlenków w produktach separacji (Nonmag). Przed pomiarem próbki zostały przygotowane z zachowaniem zasad reprezentatywności – za pomocą metody kwatrowania. Z wybranych porcji przygotowano pastylki do dalszych badań. W celu uzyskania jednorodnej frakcji proszkowej materiał <1 mm ręcznie rozdrobniono w moździerzu agatowym, co pozwoliło zminimalizować efekt niejednorodności i obecności wtrąceń ziarnowych. Do przygotowania pastylek odmierzano 2,25 g proszku próbki oraz 0,75 g kwasu borowego (H_3BO_3), pełniącego rolę lepiszcza i warstwy ochronnej, ułatwiającego zagęszczenie oraz stabilizującego krawędzie pastylek. Składniki dokładnie mieszano w moździerzu do uzyskania jednorodnej mieszaniny, którą następnie wsypywano do stalowej matrycy. Kompaktowanie wykonywano w małej, stołowej prasie ręcznej (dźwigniowej), generując docisk manualnie zgodnie z rutyną laboratoryjną. Uzyskane pastylki charakteryzowały się zwartą strukturą i gładką powierzchnią, co miało kluczowe znaczenie dla stabilności wiązki oraz powtarzalności odpowiedzi widmowej w analizie EDX. Gotowe pastylki wyjmowano z matrycy, znakowano i odkładano w oznakowane miejsca (Rys. 4). Wyniki zawartości poszczególnych tlenków w analizowanych



Rys. 2. HGS, schemat separacji. Źródło: [7] Becker K.H., Semeczko P. 2025



Rys. 3. Produkty separacji dla frakcji 0,5 - 1,0 mm; frakcja niemagnetyczna (lewo) i silnie magnetyczna (prawo). Źródło: [7] Becker K.H., Semeczko P. 2025

Tab. 1. Średnie zawartości głównych tlenków w produkcie Nonmag, po separacji magnetycznej (Wariant A i B) wraz z oceną spełnienia kryteriów jakościowych

Nadawa Wariant A								
Frakcja	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O+Na ₂ O (%)	K ₂ O/Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
0.00–0.25 mm	60,708	21,913	5,748	4,943	1,026	5,969	4,817	5,748
0.25–0.50 mm	58,829	22,917	7,271	5,345	0,000	5,345	-	7,271
0.50–1.00 mm	60,891	21,583	6,197	4,883	1,080	5,963	4,521	6,197
1.00–2.00 mm	63,269	19,775	4,645	4,461	3,016	7,477	1,479	4,645
Nadawa Wariant B								
Frakcja	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O+Na ₂ O (%)	K ₂ O/Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
0.00–0.25 mm	64,376	18,520	4,604	4,931	3,009	7,941	1,639	4,604
0.25–0.50 mm	62,848	18,959	4,933	5,733	2,829	8,561	2,027	4,933
0.50–1.00 mm	66,560	17,398	3,441	5,241	3,183	8,423	1,647	3,441
1.00–2.00 mm	70,440	16,163	1,459	5,861	3,397	9,258	1,725	1,459
Wariant A								
Frakcja	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O+Na ₂ O (%)	K ₂ O/Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
0.00–0.25 mm	62,096	21,111	4,265	4,649	2,491	7,140	1,866	4,265
0.25–0.50 mm	58,677	23,239	6,867	5,068	0,788	5,856	6,431	6,867
0.50–1.00 mm	61,263	21,721	5,191	4,584	2,519	7,103	1,820	5,191
1.00–2.00 mm	61,577	21,628	5,688	4,75	1,409	6,159	3,371	5,688
Wariant B								
Frakcja	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O+Na ₂ O (%)	K ₂ O/Na ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
0.00–0.25 mm	69,187	17,26	1,813	4,236	3,435	7,671	1,233	1,813
0.25–0.50 mm	67,152	18,37	2,665	4,559	3,409	7,968	1,337	2,665
0.50–1.00 mm	70,504	16,44	1,783	4,852	3,587	8,439	1,353	1,783
1.00–2.00 mm	69,646	16,591	1,892	5,226	3,562	8,788	1,467	1,892

produktach separacji (Nonmag) oraz nadawy przedstawiono w tabeli 1. Uzyskane wyniki dodatkowo poddane zostały analizom statystycznym, które pozwoliły na uzyskanie obrazu zależności między występowaniem poszczególnych tlenków.

Separacja na sucho w skali pół-technicznej dostarczyła istotnych informacji o składzie frakcji, ale sama w sobie nie przesądza o opłacalności wdrożenia technologii w skali przemysłowej. W wszystkich frakcjach NonMag zawartość Fe₂O₃ nadal przekraczała wartość 0,5 %, co nie pozwala na ich wykorzystanie w ceramice.

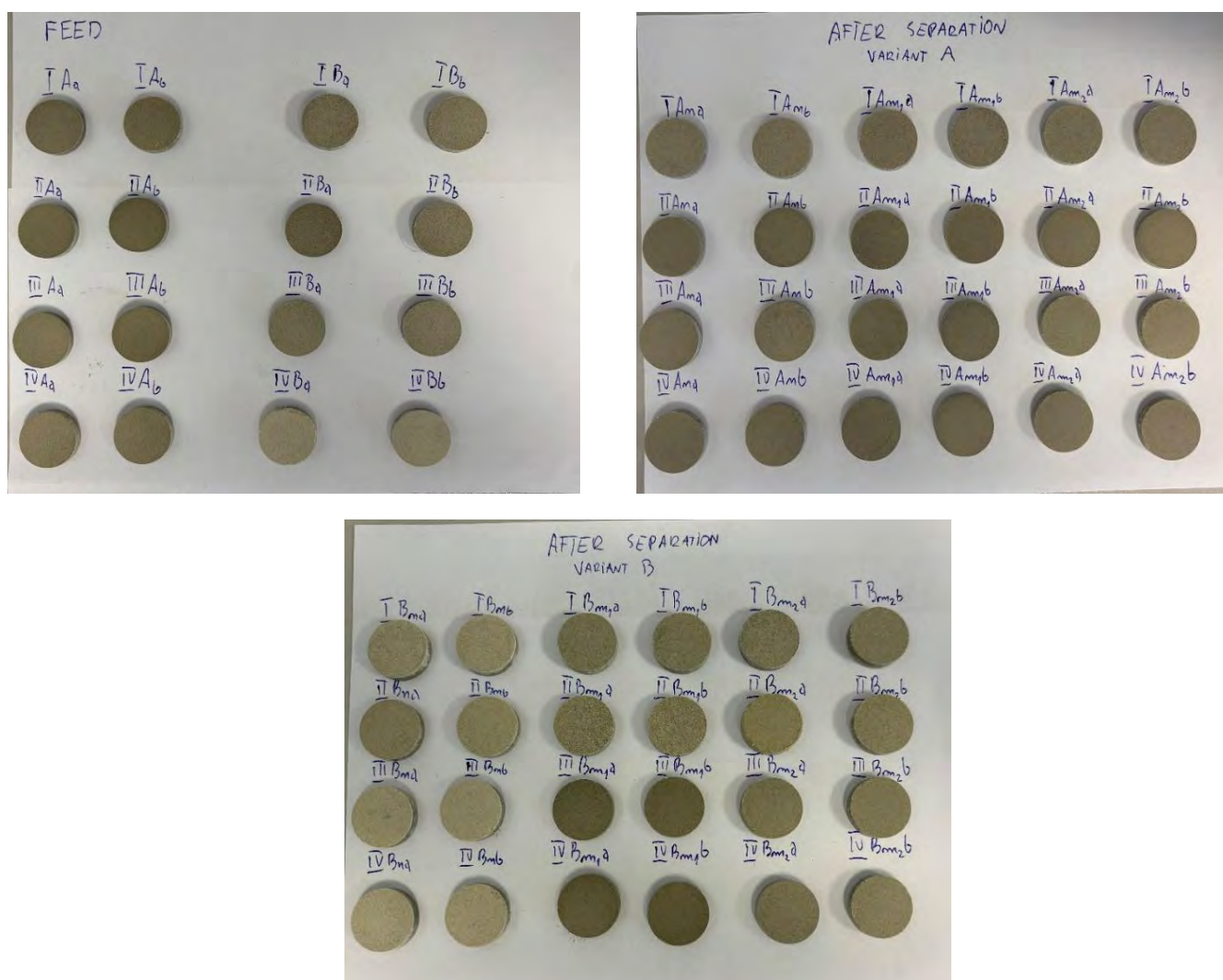
Dlatego jako dalszy krok zaplanowano próby separacji na mokro, które według badań literaturowych, mogą skuteczniej usuwać drobno rozproszony biotyt i tlenki żelaza, szczególnie w frakcjach pylistych [12, 13].

Wnioski

W przeprowadzonych badaniach wykazano, że separacja magnetyczna na sucho, w obecnie stosowanej konfiguracji, nie pozwala na uzyskanie koncentratu o parametrach wymaganych przez przemysł ceramiczny, tylko pod względem zawartości Fe₂O₃, która powinna być niższa niż 0,5 % [14].

Przeprowadzone badania frakcji trudno-zbywalnych z kopalni gnejsu w Doboszowicach pozwalają określić dalszy kierunek badań w kontekście pozyskania materiału spełniającego kryteria jakościowe i ekonomicznej opłacalności dla wykorzystania w przemyśle. Analizy EDX wykazały wyraźne zróżnicowanie zawartości głównych tlenków pomiędzy poszczególnymi frakcjami oraz pomiędzy wariantami przygotowania próbek A, B. Szczególnie istotna okazała się zmienność zawartości Fe₂O₃, będącego kluczowym parametrem ograniczającym możliwość wykorzystania surowca w ceramice.

W obu wariantach stwierdzono silną ujemną korelację pomiędzy zawartością Fe₂O₃ a K₂O i SiO₂. Oznacza to, że w miarę wzrostu udziału żelaza malała zawartość faz skaleniowych i kwarcowych, co wprost przekłada się na obniżenie wartości technologicznej frakcji dla przemysłu ceramicznego. Zależność ta była szczególnie wyraźna w wariantcie B, gdzie korelacje przyjęły wartości bliskie idealnym (K₂O –0,97; SiO₂ –0,89). Z kolei w wariantcie A trend był widoczny, lecz znacznie słabszy, co sugeruje, że dodatkowy etap kruszenia sprzyja bardziej jednoznacznemu rozdziałowi minerałów i lepszemu uwolnieniu zrostów.



Rys. 4. Zdjęcia pastylek analizowanych za pomocą EDX na potrzeby projektu. Wariant A i B bez separacji magnetycznej, Wariant A po separacji magnetycznej (prawo) wariant B po separacji magnetycznej(dół)

Korelacje dodatnie odnotowano pomiędzy Fe_2O_3 a TiO_2 oraz MgO . Wskazuje to na współwystępowanie tlenków żelaza z tlenkiem tytanu, chlorytem czy biotytem, co potwierdzają obserwacje mineralogiczne z wcześniejszych prac. Wariant B cechował się znacznie wyższą jednoznacznością tych zależności ($\text{TiO}_2 + 0,99$; $\text{MgO} + 0,71$), co z kolei wskazuje, że próbki po kruszeniu lepiej odzwierciedlają rzeczywisty charakter mineralogiczny surowca.

Separacja magnetyczna przeprowadzona w centrum testowym STEINERT pozwoliła uzyskać znaczące zróżnicowanie pomiędzy produktami magnetycznymi a niemagnetycznymi. Największy udział frakcji NonMag uzyskano dla frakcji grubych (1–2 mm), gdzie w wariantie B osiągnięto nawet 95,4% produktu niemagnetycznego. Jest to wynik obiecujący, wskazujący na możliwość efektywnego oczyszczania surowca w tym zakresie uziarnienia. Jednocześnie frakcje najdrobniejsze (<0,25 mm) cechowały się wyraźnie podwyższoną zawartością Fe_2O_3 i największym udziałem frakcji magnetycznych, co czyni je najmniej przydatnymi technologicznie.

Porównanie wyników dla wariantów A i B wskazuje, że dodatkowy etap kruszenia nie zwiększył zawartości żelaza w materiale, a wręcz sprzyjał korzystniejszemu rozkładowi frakcji i bardziej jednoznacznym wynikom separacji. Potwierdza to również obserwacje barwne pastylek – próbki

wariantu B były jaśniejsze, co wskazuje na lepsze wzbogacenie w fazy kwarcowo-skalieniowe. Dodatkowo w wariantie B stwierdzono wyższe wartości Na_2O oraz korzystny stosunek $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$, spełniający jedno z kryteriów przemysłu ceramicznego.

Dalsze etapy badań powinny uwzględniać nie tylko analizę chemiczną, ale również szczegółową ocenę mineralogiczną i optyczną koncentratu, co pozwoli uzyskać pełny obraz jego jakości i przydatności technologicznej.

Mimo tych pozytywnych rezultatów, zawartość Fe_2O_3 w większości frakcji po separacji na sucho nadal przekraczała 0,5%, co uniemożliwia ich bezpośrednie zastosowanie w przemyśle ceramicznym. Wskazuje to na konieczność zastosowania separacji magnetycznej na mokro (WHIMS), która – jak wynika z literatury i wcześniejszych badań – jest bardziej efektywna w usuwaniu drobno rozproszonych minerałów zawierających żelazo, zwłaszcza biotyty. Zastosowanie WHIMS może pozwolić na dalsze obniżenie zawartości żelaza do poziomu akceptowalnego, a jednocześnie ogranicza pylenie i sprzyja zachowaniu równomiernej dystrybucji cząstek. Z drugiej jednak strony proces ten jest bardziej kosztowny, gdyż wymaga dostarczenia wody do układu, co może wpłynąć na kryterium ekonomicznej opłacalności. Ostateczna ocena efektywności WHIMS oraz jej wpływu na uzyskane parametry koncentratu będzie kluczowa

dla określenia ekonomicznej opłacalności wdrożenia tej technologii w warunkach przemysłowych.

Przeprowadzone analizy wskazują, że frakcje $\geq 0,5$ mm w wariacie B są najbardziej perspektywiczne dla zastosowań przemysłowych. Wykazują one niską zawartość Fe_2O_3 (ok. 1,8–2,0%), wysokie stężenia $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (7–9%) oraz korzystny stosunek $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Wyniki te pozwalają uznać, że po dalszym (lub alternatywnym) oczyszczeniu metodą WHIMS możliwe będzie uzyskanie koncentratu skaleniowo-kwarcowego spełniającego wymagania przemysłu ceramicznego.

Dyskusja

Należy zaznaczyć, że uzyskane wyniki analiz EDX mają charakter półilościowy. Oznacza to, że wartości zawartości tlenków należy traktować jako przybliżone, służące głównie do porównań względnych pomiędzy poszczególnymi próbkami i wariantami przygotowania materiału. Technika ta pozwala na szybkie określenie składu chemicznego badanych frakcji, lecz jej dokładność jest ograniczona m.in. przez przygotowanie pastylek, efekt matrycowy czy zróżnicowaną wielkość i rozmieszczenie ziaren mineralnych w badanym materiale. W konsekwencji uzyskane dane nie mogą stanowić jedynej podstawy do oceny jakości koncentratów.

Ocena jakości koncentratów wymaga nie tylko analizy chemicznej, ale też parametrów optycznych i mineralogicznych. Oprócz EDX należy wykonać:

- analizy XRD i mikroskopowe w świetle spolaryzowanym,
- pomiary barwy i bieli (np. w przestrzeni CIE $L^*a^*b^*$ – układ barw opisujący jasność L^* , składową zielono–czerwoną a^* i żółto–niebieską b^*).
- Przeprowadzenie wypałów z uzyskiwanych produktów skaleniowych.

Planowane dalsze prace obejmują testy separacji magnetycznej na mokro w skali laboratoryjnej oraz testy WHIMS w skali półtechnicznej, optymalizację parametrów procesu i ocenę wpływu koncentratu na barwę mas ceramicznych w warunkach przemysłowych. „Poltegor-Institut” IGO wraz z TESM będzie starał się o zdobycie dodatkowych środków na prace B+R oraz potencjalne wdrożenie technologii w kopalni Doboszowice.

Konieczne są także dalsze badania nad optymalizacją procesu przerobczego, ze szczególnym uwzględnieniem bilansu pomiędzy zużyciem energii a skutecznością separacji. Wymaga to analizy m.in. stopnia rozdrobnienia surowca, doboru frakcji kierowanych na początkowe etapy procesu oraz właściwej kolejności zastosowanych operacji technologicznych. Tylko takie podejście pozwoli określić najbardziej efektywne i ekonomicznie uzasadnione rozwiązania.

Ponadto, w Instytucie równolegle toczą się badania nad zagospodarowaniem frakcji trudno-zbywalnej z kopalni Doboszowice jako środka wspomagającego uprawę roślin, tzw. „polepszasz glebowy”.

Literatura

- [1] Drzymała, J., 2009. Podstawy mineralurgii. Wyd. II zmienione. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 514 s.
- [2] O'Reilly, W., 1984. *Rock and Mineral Magnetism*. Chapman and Hall, London, 220 s.; Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 1997. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge, 573 s.
- [3] Gunia, P., 2020. *Charakterystyka petrograficzna gnejsów i amfibolitu z okolic Doboszowic i Pomianowa na Bloku Przedśudeckim*. Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych.
- [4] Kania, M., et al., 2021. Budowa geologiczna metamorfiku Doboszowic.
- [5] Sprawozdanie_1 Doboszowice – lipiec 2025. Dokumentacja wewnętrzna Poltegor-Institut, Wrocław.
- [7] Becker K.H., Semeczko P. 2025. Test work report: Magnetic Sorting of gneiss sand. Steinert Test Centre, Pulheim, Germany.
- [8] Szuflicki, Marcin, Agnieszka Malon, i Marcin Tyimiński, red. 2025. *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2024 r.* Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
- [9] Raport Doboszowice STEINERT [wersja do edycji], 2025. Dokumentacja wewnętrzna Poltegor-Institut, Wrocław.
- [10] Mazur, S., 2010. Tektonika i ewolucja metamorficznych kompleksów Dolnego Śląska. *Przegląd Geologiczny*, 58(7), 643–655.
- [11] Saisinchai, S., Boonpramote, T., Meechumna, P., 2015. Upgrading Feldspar by WHIMS and Flotation Techniques. *Engineering Journal*, 19(4), 83–94.
- [12] Moura, S., et al., 2019. Innovative Processing Techniques for the Production of a Clean Quartz and Feldspar Concentrate from Weathered Granite. *Minerals*, 9(7), 1–14.
- [13] Yassin, A., et al., 2023. Removing Iron Minerals from Feldspar by Magnetic Separation.
- [14] Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Kruszyw Budowlanych. 1983. *BN-83/6714-01. Kruszywa i wypełniacze. Surowce mineralne Skalenie; Grys i mączka skaleniowa i skaleniowo kwarcowa* Warszawa: Wydawnictwa Normalizacyjne „Alfa”.