**Charakterystyka mineralogiczno-petrograficzna odpadów wydobywczych z wybranych kopalń węgla kamiennego w aspekcie ich wykorzystania do produkcji kruszyw mineralnych**

# Streszczenie

Rozprawa doktorska miała na celu charakterystykę mineralogiczno-petrograficzną reprezentatywnych prób odpadów wydobywczych (przeróbczych) o uziarnieniu 20-200 mm, pochodzących z dwóch wytypowanych kopalń węgla kamiennego ze wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego – KWK Wesoła oraz KWK Ziemowit – w kontekście określenia ich przydatności do produkcji kruszyw mineralnych. W kopalniach tych do tej pory nie była prowadzona produkcja certyfikowanych kruszyw mineralnych i fakt ten był jedną z głównych przesłanek podjęcia badań nad odpadami wydobywczymi właśnie z tych dwóch kopalń we wschodniej części GZW.

Charakterystykę mineralogiczno-petrograficzną skał wchodzących w skład badanych odpadów rozpoczęto od ich opisu makroskopowego. Pozwoliło to na wydzielenie głównych typów litologicznych. W przypadku KWK Wesoła są to: trzy rodzaje piaskowców (ok. 15% ogólnej masy pobranych odpadów); trzy odmiany skał aleurytowo-pelitowych (ok. 65%, oraz jedna odmiana łupka węglowego (ok. 20%). W przypadku KWK Ziemowit jest to: sześć rodzajów piaskowców (ok. 40% ogólnej masy pobranych odpadów), jedna odmiana skał aleurytowo-pelitowych (ok. 60%) oraz incydentalnie występujący tonstein. Piaskowce na ogół cechują się zwięzłością, choć odmiany gruboziarniste były mniej spoiste. Skały te posiadają barwę jasnoszarą i/lub szarą, strukturę drobnoziarnistą, zróżnicowane wysortowanie materiału ziarnowego, zmienny stopień obtoczenia ziaren, makroskopową teksturę z reguły bezładną. Szkielet ziarnowy złożony jest z kwarcu, skaleni oraz łyszczyków, przy spoiwie krzemionkowym lub krzemionkowo-ilastym. Mułowce są zwięzłymi skałami o strukturze aleurytowo-pelitowej, teksturze kierunkowej, a ciemniejsze laminy wzbogacone są w substancję uwęgloną. W materiale pochodzącym z kopalni Wesoła mułowce są samodzielnymi skałami, a te z kopalni Ziemowit tworzą głównie przewarstwienia w piaskowcach. Iłowce są zwartymi, z reguły twardymi skałami o strukturze pelitowej, miejscami aleurytowo-pelitowej, teksturze bezładnej, a także (zwłaszcza w tych z kopalni Wesoła) z bezładnie rozmieszczonymi uwęglonymi fragmentami roślin oraz incydentalnym okruszcowaniem pirytem. Łupki węglowe (stwierdzone tylko w kopalni Wesoła) posiadają strukturę pelitową, teksturę kierunkową, z około 50% udziałem warstw węgla kamiennego błyszczącego (witrynu) o grubości 2-15 mm. Są to skały twarde i zwięzłe.

Dzięki badaniom mikroskopowym w świetle przechodzącym doprecyzowano charakterystykę mineralogiczno-petrograficzną badanych skał. Badane piaskowce to waki sublityczne i lityczne (rzadziej zlepieńcowate waki sublityczne i drobnoziarniste waki sublityczne), najczęściej o teksturze kierunkowej, spoiwie niepełnym, stykowym, często również porowym oraz podstawowym typu cement (złożonym głównie z kaolinitu i minerałów węglanowych, rzadziej kwarcu), a także typu matrix (głównie detrytycznym ilasto-kwarcowo-mikowym). Skały te cechują się średnim stopniem wysortowania i obtoczenia materiału ziarnowego. Szkielet ziarnowy jest na ogół zwarty, złożony głównie z: kwarcu, plagioklazów, skaleni alkalicznych, okruchów skał różnego rodzaju, podrzędnie z: chlorytów, minerałów węglanowych, tlenków i wodorotlenków żelaza oraz nielicznie z minerałów ciężkich. Sporadycznie występują w nich żyłki, smugi i soczewki węgla kamiennego. Mułowcesą nierównoziarnistymi i polimiktycznymi skałami o strukturze głównie aleurytowo-pelitowej, teksturze kierunkowej (podkreślonej ułożeniem m.in. materii organicznej), często zaakcentowanej naprzemiennymi laminami różnych frakcji ziarnowych, zbudowanymi głównie z drobnoziarnistego matrix ilastego, z rozproszonymi licznymi, ostrokrawędzistymi ziarnami kwarcu i skaleni, blaszek łyszczyków, czasami litoklastów iłowców. Stopień obtoczenia ziaren jest różny, a spoiwo składa się z mieszaniny pyłu kwarcowego, minerałów ilastych oraz uwęglonej substancji organicznej. W laminach aleurytowo-pelitowych w mułowcach z kopalni Ziemowit agregaty substancji organicznej oraz blaszek mik niekiedy wykazują kierunkowe ułożenie zgodne z laminacją skały. Iłowce są nierównoziarnistymi i polimiktycznymi skałami o strukturze głównie pelitowej, zbudowanymi głównie z bardzo drobnoziarnistego ilastego matrix (illit, kaolinit, chloryt i zwietrzałe miki), w którym rozproszone są ziarna kwarcu, skaleni, łyszczyków oraz litoklasty iłowców. Stwierdza się w nich także silnie rozproszoną, uwęgloną substancję organiczną. W iłowcach z kopalni Wesoła występują powszechnie agregaty bardzo drobnoziarnistych minerałów węglanowych oraz wąskie smugi uwęglonej substancji organicznej, niekiedy z owalnymi skupieniami minerałów rudnych. Łupki węglowe – stwierdzone tylko w kopalni Wesoła – są skałami drobnoziarnistymi, warstwowanymi, o strukturze pelitowej i teksturze kierunkowej (warstewki pelitowe przedzielone były warstewkami węgla kamiennego (witrynu), miejscami okruszcowane pirytem).

Badania rentgenograficzne badanych skał piaskowcowych, jak i ilasto-mułowcowych potwierdziły, że charakteryzują się one zbliżonym składem mineralnym, przy zróżnicowanym udziale głównych faz, jakimi są kwarc, skalenie potasowe (przeważnie ortoklaz), miki (muskowit), illit, kaolinit oraz chloryty (klinochlor). Natomiast wyniki analizy termicznej potwierdziły we wszystkich badanych skałach obecność kaolinitu i illitu (w niektórych próbach z kopalni Wesoła także niewielkich ilości smektytów). Obecność kwarcu potwierdzono tylko w przypadku prób piaskowców z obydwu kopalń. We wszystkich analizowanych skałach stwierdzono również podwójny efekt egzotermiczny (w przedziale 300-500oC) związany ze spalaniem substancji organicznej o stosunkowo wysokim stopniu uwęglenia. Najwyższym udziałem kaolinitu (rzędu 40-50%) charakteryzują się próby skał aleurytowo-pelitowych, w których występuje też illit (około 10%). Udział smektytów z reguły nie przekracza 1%. Udział substancji organicznej w badanych skałach waha się w przedziale 0,5-1,8%.

Analiza chemiczna badanych skał wykazała, że wszystkie badane odmiany piaskowców z kopalni Wesoła cechują się dość zbliżonym składem chemicznym, a w przypadku piaskowców z kopalni Ziemowit istnieje wyraźna różnica między piaskowcami drobnoziarnistymi przewarstwionymi mułowcami (wyższa zawartość Al2O3, MgO, Fe2O3 i TiO2) a pozostałymi odmianami piaskowców. Skały ilasto-mułowcowe charakteryzują się zróżnicowanym składem chemicznym, przy dużej zmienności zawartości SiO2, Al2O3, Fe2O3 i K2O oraz straty prażenia (najwyższą zawartość Al2O3 miały odmiany z kopalni Ziemowit). W przypadku łupka węglowego zanotowano bardzo wysoką wartość straty prażenia – około 87%, ale także sumy CaO i MgO (około 10%).

Analiza właściwości fizyczno-mechanicznych poszczególnych odmian skał wydzielonych w odpadach pozwoliła stwierdzić, że zasadniczo wszystkie odmiany skał z kopalni Wesoła wykazują większą gęstość objętościową oraz niższą nasiąkliwość wagową i nasiąkliwość objętościową niż analogiczne odmiany skał z kopalni Ziemowit. Wyniki tej analizy pozwoliły już wstępnie założyć, że kruszywa powstałe z odpadów z kopalni Wesoła mogą posiadać korzystniejsze wartości parametrów fizyczno-mechanicznych niż kruszywa wytworzone z odpadów z kopalni Ziemowit.

Kruszywa mineralne o uziarnieniu 4-31,5 mm uzyskane z odpadów z kopalń Wesoła i Ziemowit poddano analizie uziarnienia, oznaczeniu właściwości fizyczno-mechanicznych oraz składu chemicznego i wymywalności. Pomimo korzystnego składu ziarnowego, *kruszywo z kopalni Wesoła* wykazuje stosunkowo słabe parametry jakościowe (szczególnie w przypadku mrozoodporności i odporności na ścieranie w bębnie micro-Deval, w mniejszym stopniu nasiąkliwości wagowej), co wpływa na ograniczone możliwości jego stosowania. Choć wyniki te są porównywalne do dostępnych na rynku kruszyw z odpadów powęglowych, to jednak brak jest możliwości zastosowania tego kruszywa do wytwarzania betonu, a także do budownictwa drogowego w warunkach przemarzania i innego bezpośredniego oddziaływania czynników atmosferycznych. Dzięki jednorodnemu i ciągłemu składowi ziarnowemu oraz podatności na rozkruszanie, a także ostrym kształcie ziaren kruszywa, może być zastosowane poniżej strefy przemarzania przy formowaniu nasypów i warstw konstrukcji drogowej, do niwelacji terenu stanowiącego podłoże budowlane (pod warunkiem dobrego zagęszczenia materiału), do wymiany i wzmocnienia gruntów, a także do budowy szeregu obiektów inżynieryjnych. W procesie przeróbczym istotnemu zmniejszeniu uległa zawartość węgla całkowitego względem nadawy: z 18,6% do 6,0%. Ta wciąż dość wysoka zawartość węgla w uzyskanym kruszywie najprawdopodobniej wynika z dość wysokiego udziału łupka węglowego w nadawie (około 20%). Ten sam czynnik powoduje, że zawartość SiO2 i Al2O3 w uzyskanym kruszywie jest znacznie niższa, a wartość straty prażenia znacznie wyższa niż w większości badanych odmian piaskowców, mułowców i iłowców w odpadach z tej kopalni. Wyciągi wodne z otrzymanego kruszywa charakteryzują się lekko zasadowym odczynem (pH 7,8), a wymywalność najważniejszych składników jest niższa niż wartości dopuszczalne dla ścieków wprowadzanych do wód lub do ziemi.

Pomimo korzystnego składu ziarnowego, zbliżonego do produktu z kopalni Wesoła, *kruszywo z kopalni Ziemowit* wykazuje znacznie gorsze parametry jakościowe (szczególnie w odniesieniu do: nasiąkliwości, mrozoodporności i odporności na ścieranie w bębnie micro‑Deval, w mniejszym stopniu także odporności na rozdrabnianie w bębnie Los Angeles), przez co zakres potencjalnego jego zastosowania jest jeszcze bardziej ograniczony niż kruszyw uzyskanych z odpadu z kopalni Wesoła. W zakresie większości parametrów jest wyraźnie gorsze od kilku dostępnych na rynku kruszyw wytworzonych z odpadów powęglowych. Całkowicie brak jest możliwości jego zastosowania do wytwarzania betonu, a także do budownictwa drogowego w warunkach przemarzania i innego bezpośredniego oddziaływania czynników atmosferycznych. Podobnie jak w przypadku kruszywa z kopalni Wesoła może być zastosowane poniżej strefy przemarzania przy formowaniu nasypów i warstw konstrukcji drogowej, choć w znacznie bardziej ograniczonym zakresie. Można je zastosować do niwelacji terenu stanowiącego podłoże budowlane, wymiany i wzmocnienia gruntów, a także budowy szeregu obiektów inżynieryjnych. Względem nadawy w procesie przeróbczym zawartość węgla całkowitego praktycznie nie uległa tu zmniejszeniu (z 1,9% do 1,8%), ale należy podkreślić, że już w nadawie była ona stosunkowo niska. Zawartości SiO2 i Al2O3 w tym kruszywie wykazują wartości pośrednie między ich zawartościami w skałach piaskowcowych a skałach ilasto-mułowcowych, wyciągi wodne charakteryzują się odczynem zasadowym (pH 9,6; wartość ta nieznacznie przekracza wartości dopuszczalne dla ścieków wprowadzanych do wód lub do ziemi), a wymywalność najważniejszych składników jest niższa niż wartości dopuszczalne dla ścieków wprowadzanych do wód lub do ziemi.

Kruszywa 4-31,5 mm wytworzone z odpadów 20-200 mm pochodzących z dwóch kopalń węgla kamiennego Wesoła i Ziemowit istotnie różnią się od siebie pod względem najważniejszych parametrów fizyczno-mechanicznych takich jak: nasiąkliwość, mrozoodporność, wytrzymałość na ścieranie czy wytrzymałość na rozdrabnianie, co ma ścisły związek z litologią badanych odpadów. Szczególne znaczenie mają w tym przypadku takie cechy litologiczne jak forma występowania substancji węglowej, rodzaj spoiwa w badanych skałach (zwłaszcza w piaskowcach) oraz stopień zwięzłości tych skał. W przypadku *odpadów z kopalni Wesoła* udział piaskowców jest niewielki (tylko 15%; głównie piaskowce drobnoziarniste zbite, ze spoiwem głównie krzemionkowo-ilastym lub węglanowo-ilastym), większość (około 65%) stanowią silnie zbite iłowce i mułowce z matrix ilasto-kwarcowym lub ilastym oraz z substancję węglową w formie smug lub rozproszoną, a około 20% – łupek węglowy z około 50% udziałem lamin węgla. Zestaw tych cech litologicznych skutkuje wysoką średnią zawartością węgla w tych odpadach, ale też wysokim stopniem separacji węgla do produktu drobnego 0-4 mm (przy znacznym obniżeniu jego udziału w kruszywie 4-31,5 mm). W przypadku *odpadów z kopalni Ziemowit* piaskowce stanowią około 40% (charakteryzowały się zróżnicowanym uziarnieniem oraz zwięzłością, co ma związek z podwyższoną ich porowatością oraz rodzajem spoiwa, głównie krzemionkowo-ilastym lub ilasto-mikowym; duże znaczenie miały też drobnoziarniste piaskowce z przewarstwieniami mułowcowymi), około 60% stanowią skały iłowcowo-mułowcowe, których cechy litologiczne są podobne do tych z odpadów z kopalni Wesoła, choć często są one mniej zwięzłe, a udział substancji węglowej jest znacznie niższy (w postaci rozproszonej występuje w tych piaskowcach i skałach iłowcowo-mułowcowych). Wyraźnie słabsze parametry jakościowe kruszywa z kopalni Ziemowit korespondują z wynikami badań gęstości objętościowej i nasiąkliwości poszczególnych rodzajów skał wchodzących w skład odpadów (w stosunku do kruszywa z kopalni Wesoła: wyższe wartości oznaczonej nasiąkliwości oraz iłowce stanowiące ok. 60% całej masy badanych odpadów z tej kopalni, które w trakcie badań nad nasiąkliwością uległy dezintegracji).

Otrzymane ubocznie produkty o uziarnieniu 0-4 mm poddano analizie pod kątem ich przydatności jako potencjalnych produktów niskoenergetycznych do mieszanek paliwowych. Wstępnie zakładano, że w trakcie przeróbki mechanicznej okruchy skał zawierające węgiel kamienny będą wykazywały niższą odporność na rozdrabnianie, a powstający materiał drobnoziarnisty będzie wzbogacony w substancję węglową i będzie mógł być traktowany jako materiał niskoenergetyczny. Hipoteza ta okazała się prawdziwa w przypadku produktu 0-4 mm z kopalni Wesoła, który charakteryzuje się wysoką (29%) zawartością węgla całkowitego, wysoką (9,4 MJ/kg) wartością opałową oraz niską (0,7%) zawartością siarki. Produkt ten może być traktowany jako potencjalny produkt niskoenergetyczny przydatny do przygotowywania mieszanek paliwowych wraz z wyżej energetycznym miałem węglowym, do spalania w tradycyjnych elektrowniach i elektrociepłowniach węglowych. Natomiast hipoteza ta nie potwierdziła się w przypadku produktu 0-4 mm z kopalni Ziemowit, który charakteryzuje się bardzo niską (1,5%) zawartością węgla całkowitego, oraz bardzo niską (0,5 MJ/kg) wartością opałową, przez co nie może być traktowany jako materiał przydatny do przygotowywania mieszanek paliwowych.Należy jednak zauważyć, że obydwa analizowane produkty drobnoziarniste bez wątpienia mogą być w pełni przydatnymi surowcami dla przemysłu cementowego, jako tzw. surowiec niski, glinonośny i krzemonośny, który poprzez obecność w nim węgla wpłynie na obniżenie zużycia paliwa w procesie wypału klinkieru cementu portlandzkiego w piecach obrotowych.

Na podstawie wyników przeprowadzonych przez autora rozprawy doktorskiej badań odpadów powęglowych z KWK Wesoła i KWK Ziemowit oraz pozyskanych z nich kruszyw o uziarnieniu 4-31,5 mm można stwierdzić, że odpady te mogą być wykorzystane do produkcji kruszyw mineralnych, które mogą znaleźć zastosowanie przede wszystkim do: (i) budowy nasypów komunikacyjnych; (ii) robót ziemnych, w tym niwelacyjnych (poniżej strefy przemarzania gruntu); (iii) wymiany i wzmacniania gruntu (dostateczna nośność umożliwia przeniesienie obciążeń od działania sił pionowych bez wystąpienia nadmiernych odkształceń); (iv) budownictwa kubaturowego (w ograniczonym stopniu jako zasypki, podsypki, wypełnienia inżynierskie poniżej strefy przemarzania); (v) budownictwa hydrotechnicznego (w budowie nasypów oraz obwałowań zbiorników wodnych i osadników); (vi) rekultywacji technologicznej i biologicznej, głównie terenów zdegradowanych działalnością górniczą (np. stref osiadań) oraz przemysłową, ale także wyrobisk zamkniętych kopalń odkrywkowych oraz składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. Z drugiej strony kruszywa 4-31,5 mm z kopalń Wesoła i Ziemowit ze względu na słabe parametry fizyczno-mechaniczne zdecydowanie nie mogą być stosowane do produkcji betonu towarowego i prefabrykatów betonowych, w konstrukcjach drogowych w warunkach przemarzania i innego bezpośredniego oddziaływania czynników atmosferycznych, a także do wykonywania nawierzchni drogowych.

Tym samym udowodniona została, choć tylko częściowo, teza niniejszej rozprawy doktorskiej: „Odpady wydobywcze z wybranych kopalń wschodniej części GZW są mineralnymi surowcami odpadowymi, na bazie których możliwa jest produkcja kruszyw mineralnych spełniających wymagania jakościowe stawiane takim materiałom budowlanym w określonych zastosowaniach gospodarczych”. Wyniki badań potwierdzają także wstępne założenie pracy, iż właściwości otrzymanych kruszyw mają ścisły związek z litologią wykorzystanych do ich produkcji odpadów.