



Jacek FELIKS¹, Beata KLOJZY-KARCZMARCZYK², Marek WIENCEK³

Granulowanie mułów węglowych i ich mieszanek w celu poprawy właściwości transportowych

Streszczenie: W trakcie procesów wzbogacania węgla w zakładach przeróbki mechanicznej kopalń węgla kamiennego powstają znaczne ilości mułów węglowych (grupa odpadów 01). Są to najdrobniejsze frakcje ziarnowe poniżej 1 mm, w których ziarna poniżej 0,035 mm stanowią do 60% ich składu, a ciepło spalania kształtuje się na poziomie 10 MJ/kg. Charakterystyczną cechą mułów jest ich duża wilgotność, która po procesie odwodnienia na prasach filtracyjnych osiąga wartość od 16–28% (W_{tot}) (materiały archiwalne PG SILESIA). Drobnoziarnistość i wysoka wilgotność materiału powodują duże trudności na etapie transportu, załadunku i wyładunku materiału. W pracy przedstawiono wyniki badań grudkowania (granulowania) mułów węglowych samodzielnie oraz grudkowania mułów węglowych z materiałem dodatkowym, który ma za zadanie poprawić właściwości energetyczne mułów. Sam proces grudkowania ma przede wszystkim poprawić możliwości transportowe. Podjęto wstępne badania pozwalające na wykazanie zmian parametrów poprzez sporządzanie mieszanek mułów węglowych (PG SILESIA) z pyłami węglowymi z węgla brunatnego (LEAG). Przeprowadzono proces grudkowania mułów oraz ich mieszanek na laboratoryjnym grudkowniku wibracyjnym konstrukcji AGH. W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wszystkie mieszanki są podatne na proces grudkowania (granulowania). Proces ten poszerza niewątpliwie możliwości transportowe materiału. Skład ziarnowy uzyskanego materiału po grudkowaniu jest zadawalający. Grudki o wymiarze 2–20 mm stanowią 90–95% masy produktu. Wytrzymałość (odporność) na zrzuty grudek świeżych jest zadawalająca i porównywalna dla wszystkich mieszanek. Świeże grudki poddane próbie na zrzuty z wysokości 700 mm wytrzymują od 7 do 14 zrzutów. Odporność na zrzuty grudek materiału po dłuższym sezonowaniu, z wysokości 500 mm wykazuje wartości odmienne dla analizowanych próbek. Wartości uzyskane dla mułów węglowych oraz ich mieszanek z pyłami węglowymi z węgla brunatnego kształtują się na poziomie 4–5 zrzutów. Uzyskana wytrzymałość jest wystarczająca dla stwierdzenia możliwości ich transportu. Na tym etapie pracy można stwierdzić, że dodatek pyłów węglowych z węgla brunatnego nie powoduje pogorszenia wytrzymałości materiału w odniesieniu do czystych mułów węglowych. Nie ma zatem negatywnego wpływu na możliwości transportu materiału zgranulowanego. W wyniku mieszania z pyłami węglowymi można natomiast podnieść ich wartość energetyczną (Klojzy-Karczmarczyk i in. 2018). Nie prowadzono analizy kosztowej analizowanego przedsięwzięcia.

Słowa kluczowe: górnictwo węgla kamiennego, granulacja, grudkowanie, odpady wydobywcze, muły węglowe, pyły węglowe z węgla brunatnego

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: feliks@agh.edu.pl

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: beatakk@min-pan.krakow.pl

³ EP Coal Trading Polska SA, Czechowice-Dziedzice; e-mail: marek.wiencek@epcoaltrading.pl

Granulating coal sludge and their mixtures to improve transport properties

Abstract: Significant quantities of coal sludge are created during the coal enrichment processes in the mechanical processing plants of hard coal mines (waste group 01). These are the smallest grain classes with a grain size below 1 mm, in which the classes below 0.035 mm constitute up to 60% of their composition and the heat of combustion is at the level of 10 MJ/kg. The high moisture of coal sludge is characteristic, which after dewatering on filter presses reaches the value of 16–28% (W_{tot}) (archival paper PG SILESIA). The fine-grained nature and high moisture of the material cause great difficulties at the stage of transport, loading and unloading of the material. The paper presents the results of pelletizing (granulating) grinding of coal sludge by itself and the piling of coal sludge with additional material, which is to improve the sludge energy properties. The piling process itself is primarily intended to improve transport possibilities. Initial tests have been undertaken to show changes in parameters by preparing coal sludge mixtures (PG SILESIA) with lignite coal dusts (LEAG). The process of piling sludge and their mixtures on an AGH laboratory vibratory grinder construction was carried out. As a result of the tests, it can be concluded that all mixtures are susceptible to granulation. This process undoubtedly broadens the transport possibilities of the material. The grain composition of the obtained material after granulation is satisfactory. Up to 2 to 20 mm granules make up 90–95% of the product weight. The strength of the fresh pellets is satisfactory and comparable for all mixtures. Fresh lumps subjected to a test for discharges from a height of 700 mm can withstand from 7 to 14 discharges. The strength of the pellets after longer seasoning, from the height of 500 mm, shows different values for the analyzed samples. The values obtained for hard coal sludge and their blends with brown coal dust are at the level from 4 to 5 discharges. The strength obtained is sufficient to determine the possibility of their transport. At this stage of the work it can be stated that the addition of coal dust from lignite does not cause the deterioration of the material's strength with respect to clean coal sludge. Therefore, there is no negative impact on the transportability of the granulated material. As a result of mixing with coal dusts, it is possible to increase their energy value (Klojzy-Karczmarczyk *et al.* 2018). The cost analysis of the analyzed project was not carried out.

Keywords: hard coal mining, granulation, extractive waste, coal sludge, coal dust from lignite

Wprowadzenie

Odpady wydobywcze górnictwa węgla kamiennego, zaklasyfikowane do grupy 01, to przede wszystkim skały nadkładu i przewarstwień usuwane na etapie przygotowania złoża oraz odpady związane z przeróbką i wzbogacaniem surowca. Podstawowy materiał odpadowy wytwarzany w zakładach górniczych to skała płonna i muły węglowe z bieżącej produkcji oraz odpady zdeponowane w osadnikach. Największą część odpadów wydobywczych stanowią odpady przeróbcze, które obejmują materiał skalny wydobyty wraz z urobkiem i oddzielany w procesach wzbogacania kopaliny (w trakcie sortowania, rozdrabniania, płukania, flotacji itp.) i stanowią większościowy udział w ogólnej masie odpadów wytwarzanych w kopalniach (Góralczyk i Baic 2009). Odpady wydobywcze z górnictwa węgla kamiennego tworzą znaczną ilość ogólnej ilości odpadów i stanowią one około 27% wszystkich odpadów przemysłowych. Większość nowo wytwarzanych odpadów wydobywczych zostaje poddana odzyskowi, jednak znaczna ilość zostaje poddana unieszkodliwianiu poprzez składowanie. Skały płonne towarzyszące wydobyciu węgla coraz częściej traktowane są nie jako odpady, ale jako źródło surowców mineralnych przeznaczonych do zagospodarowania w różnych procesach. Istnieje szereg rozwiązań służących zagospodarowaniu materiału odpadowego, głównie w postaci kruszyw czy produktów energetycznych. Możliwym rozwiązaniem jest wykorzystywanie niektórych rodzajów materiałów odpadowych do utwardzania

terenów pod budowę dróg, zbiorników technologicznych, umocnień przeciwpowodziowych, jako podsadzka i materiał uszczelniający oraz do wypełniania rekultywowanych wyrobisk odkrywkowych (m.in. Góralczyk i Baic 2009; Szymkiewicz i in. 2009; Ostrenga i Uberman 2010; Baic i Witkowska-Kita 2011; Góralczyk red. 2011; Rosik-Dulewska 2012; Wróbel i in. 2013; Galos i Szlugaj 2014; Kłojzy-Karczmarczyk i in. 2016; Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2017).

Muły węglowe stosowane są, z powodzeniem, jako surowiec niskoenergetyczny do spalania w elektrowniach (Baic i in. 2010; Baic 2013; Hycnar i in. 2013; Jelonek i in. 2010; 2016). Wymagane jest jednak, aby materiał miał określony wymiar ziaren (grudek, granul, bryłek). Proces, w którym materiałem wejściowym są drobnoziarniste surowce stałe, a efektem są większe ziarna, nazywa się ogólnie aglomeracją. W technice występują dwie odmiany tego procesu realizowanego sposobami mechanicznymi. Aglomeracja ciśnieniowa (Hryniewicz i in. 2015) zachodząca wskutek dużych quasi-statycznych obciążeń zewnętrznych oraz aglomeracja bezciśnieniowej (grudkowania, granulowania) z niewielkimi obciążeniami zewnętrznymi (Obraniak i Gluba 2011; Sidor i Feliks 2015). Należy dodać, że granulki (grudki) pochodzące z aglomeracji bezciśnieniowej są bardziej nieregularne, o mniejszej wytrzymałości mechanicznej. Jednak procesy aglomeracji bezciśnieniowej pochłaniają wielokrotnie mniej energii niż procesy aglomeracji ciśnieniowej. Jedną z metod aglomeracji bezciśnieniowej jest grudkowanie, stosowane na skalę przemysłową od lat pięćdziesiątych XX wieku. Proces ten umożliwia bezpieczniejsze składowanie, magazynowanie, dozowanie i transport materiałów pylistych, które w formie niezgranulowanej powodują zanieczyszczenie atmosfery lub pomieszczeń. Inną niekorzystną cechą luźnych pyłów, mułów jest ich zbrylanie, tworzenie nawisów w zbiornikach i przywieranie materiału do ich ścian, szczególnie w przypadku, gdy odbiorcy zainteresowani są odpadami powstającymi w znacznej odległości od miejsca, w którym są produkowane (Feliks i Kalukiewicz 2014).

Najczęściej stosowaną metodą grudkowania jest aglomeracja poprzez otaczanie w grudkownikach talerzowych i bębnowych, a ostatnio również wibracyjnych. Dotychczasowe prace wyraźnie wskazują na wyższą wytrzymałość aglomeratów uzyskiwanych w urządzeniach wibracyjnych w porównaniu z produktami wytworzonymi w innych typach grudkowników (Feliks 2012, 2017). W pracy zastosowano metodę grudkowania w rynnowym grudkowniku wibracyjnym. Badaniom poddano muły węglowe oraz mieszanki tych mułów z pyłami węglowymi z węgla brunatnego. Ze względu na przewidywane wycofanie mułów węglowych z obrotu na rynku komunalnym, zgodnie z projektem ustawy o zmianie ustawy o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw oraz ustawy o Krajowej Administracji Skarbowej z dnia 19 marca 2018 roku (<http://www.sejm.gov.pl>) i uchwałami sejmikowymi poszczególnych województw (Stala-Szlugaj 2018a, 2018b), oferowana przez kopalnie ilość mułów węglowych dla odbiorcy zawodowego będzie wzrastać. Również spalanie i oferowanie na rynku detalicznym paliwa, jakim jest węgiel brunatny i jego pochodne zostało ograniczone projektem tej ustawy. W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki procesu granulowania mułów węglowych oraz przygotowanych prób ich mieszanek z pyłami z węgla brunatnego w odniesieniu do materiału pierwotnego, jakim są muły węglowe. Granulowanie materiału niewątpliwie wpływa na poprawę możliwości transportowych materiału.

1. Przedmiot badań

W pracy podjęto badania procesu granulowania mułów węglowych zmieszanych z innym materiałem odpadowym. Sporządzone mieszaniny zostały wykonane w celu podniesienia parametrów energetycznych, natomiast granulowanie (grudkowanie) ma poprawić ich właściwości transportowe. Zastosowano metodę grudkowania w rynnowym grudkowniku wibracyjnym.

Muły powęglowe są produktem i/lub odpadem powstającym zawsze podczas procesu technologicznego związanego ze wzbogacaniem urobku węgla kamiennego. Muły węglowe to najdrobniejsze frakcje o uziarnieniu poniżej 1 mm, w których ziarna poniżej 0,035 mm stanowią do 60% składu. Mokra metoda wzbogacania węgla kamiennego generuje wytwarzanie mułów powęglowych, które są następnie transportowane rurami i magazynowane w tzw. osadnikach mułowych. Z biegiem czasu w osadnikach mułowych woda częściowo wyparuje, a częściowo przedostaje się do zbiorników wody słonej i gleby; pozostały w ten sposób materiał – muł – może podlegać wydobyciu i wykorzystaniu jako paliwo podstawowe lub pomocnicze w zależności od posiadanych parametrów jakościowych. Po ewentualnym grawitacyjnym jego odwodnieniu, mechanicznym wysuszeniu lub zgranulowaniu stają się paliwem kierowanym bezpośrednio do sprzedaży lub do produkcji jako domieszka do miałów węglowych (0–25 mm, 0–31,5 mm). Muły węglowe są paliwem przeważnie niskoenergetycznym, wysoko zapopielonym i zawierającym duże ilości wody, co utrudnia ich zbyt i transport.

Wśród parametrów jakościowych decydujących o możliwości zbytu mułu i zastosowaniu go jako paliwa samodzielnego lub jako domieszki do miałów decyduje przede wszystkim procentowy udział wody (W^f) oraz wartość opałowa (Q_i^f). Aby zwiększyć wielkość zagospodarowania mułów poprzez ich wykorzystanie jako paliwa, konieczna jest przede wszystkim poprawa ich możliwości transportowych poprzez pozbycie się z nich wody lub jej związanie. Zmiana stanu fizycznego mułów na taki, który umożliwiałby ich wygodniejszy transport (załadunek, magazynowanie, wyładunek) do miejsca spalania i umożliwienie bezproblemowego podawania ich do pieca istniejącymi urządzeniami to, bez wątpienia, ważny problem do rozwiązania. Grawitacyjne odwadnianie i suszenie mułów to nie są metody doskonałe w celu poprawy ich możliwości transportu i zbytu. Coraz częściej stosuje się w zakładach przerobczych kopalń prasy filtracyjne oraz urządzenia pozwalające na granulowanie mułów. Metody te pozwalają, w dużym stopniu, usunąć wodę z materiału i w ten sposób zmniejszyć ich pierwotną objętość.

Muły węglowe, po odwadnianiu na prasach filtracyjnych, nazywane są plackami filtracyjnymi. Materiał, który powstaje w wyniku zastosowania pras filtracyjnych ma wymiary $1800 \times 1800 \times 50$ (60) mm z zawartością wilgoci (W_{tot}^f) od 16 do 28% i wartością opałową (Q_i^f) od 11 do 12 MJ. Wartości wilgoci dla materiału początkowego są zdecydowanie wyższe i wynoszą od 38 do 40%, natomiast wartość opałowa jest niższa i wynosi od 9 do 10,5 MJ ([materiały archiwalne PG SILESIA](#)). Sam proces odwadniania na prasach filtracyjnych podnosi zatem walory energetyczne mułów węglowych. Placki po oddzieleniu od prasy mają konsystencję mokrej, plastycznej gliny, która jednak pod wpływem powietrza i temperatury szybko schnie, łamie się i kruszy (rys. 1).



Rys. 1. Muły węglowe po odwadnianiu na prasach filtracyjnych (placki filtracyjne) zdeponowane na składowiskach kopalni PG SILESIA (lipiec 2018 r.). Fot. M. Wienczek

Fig. 1. Coal sludge after dewatering on filter presses (filter cakes) deposited in the PG SILESIA mine (July 2018)

Granulowanie mułów węglowych to metoda dająca najwięcej możliwości ich zbytu i gwarancji utrzymania pożądanego stanu fizycznego, a co za tym idzie – większej elastyczności transportowej. Proces granulowania polega na ich wcześniejszym (wstępnym) odwodnieniu, dodaniu przeważnie wapna szybko reakcyjnego, czasem lepiszcza oraz mechanicznym zgranulowaniu do średnicy ziaren umożliwiającym ich dosypywanie do miałów węglowych (maksymalna średnica ziaren to 25–30 mm). Istotnym rozwiązaniem może okazać się granulowanie mułów węglowych z jednoczesnym wzbogacaniem, czyli podniesieniem parametrów energetycznych poprzez dodatek materiału wysokoenergetycznego. Podjęto zatem wstępne badania pozwalające na wykazanie zmian parametrów jakościowych poprzez sporządzanie mieszanek mułów węglowych z pyłami węglowymi z węgla brunatnego. Granulowanie natomiast jest szansą na poprawienie możliwości zbytu mułów do różnego rodzaju odbiorców.

2. Przygotowanie prób i metodyka badań

2.1. Charakterystyka próbek

Badania przeprowadzono w celu określenia możliwości i efektów granulowania mułów węglowych z jednoczesną poprawą ich parametrów energetycznych. Pomysł realizacji tematu jest wynikiem konsultacji z przedstawicielami firmy EP Coal Trading Polska SA, spółki należącej do Grupy Kapitałowej EPH, a.s. Grupa ta posiada w swoich strukturach kopalnie węgla kamiennego (PG SILESIA), skąd pochodzą muły węglowe przeznaczone do badań, kopalnie węgla brunatnego (Niemcy) oraz prowadzi produkcję pyłu węglowego z węgla brunatnego (LEAG – Niemcy), który przeznaczono do wzbogacania energetycznego mułu węglowego dla potrzeb przeprowadzenia badań prezentowanych w pracy. Wyniki badań jakościowych są przedmiotem oddzielnej pracy autorstwa B. Kłojzy-Karczmarczyk, J. Mazurka i M. Wiencka (Kłojzy-Karczmarczyk i in. 2018). Badania wstępne pokazały, że w wyniku mieszania mułów węglowych z pyłem węglowym i ich granulowania jest możliwość uzyskania produktu o odpowiednich parametrach jakościowych i fizycznych z wyraźną poprawą parametrów energetycznych. Można stwierdzić, że dodatek pyłu węglowego

TABELA 1. Zestawienie próbek przeznaczonych do wstępnych badań laboratoryjnych

TABLE 1. List of samples for preliminary laboratory tests

Numer i nazwa próbki	Założony skład procentowy substratów w poszczególnych mieszankach przeznaczonych do granulowania i analizy parametrów jakościowych
Próbka 1 muł + pył	Muł węglowy (50%) + pył węglowy z węgla brunatnego (50%)
Próbka 2 muł + sadza + węglan	Muł węglowy (45%) + sadza (45%) + odsiewka z kruszenia dolomitu (10%)
Próbka 3 muł + pył + węglan	Muł węglowy (45%) + pył węglowy z węgla brunatnego (45%) + + odsiewka z kruszenia dolomitu (10%)
Próbka 4 węglan	Odsiewka z kruszenia dolomitu o wielkości ziaren 0–4 mm
Próbka 5 pył węglowy	Pył węglowy z węgla brunatnego (materiał niebezpieczny)
Próbka 6 muł węglowy	Muł węglowy po przejściu przez prasy filtracyjne z górnictwa węgla kamiennego
Próbka 7 muł + CaO	Muł węglowy (97%) + CaO (3%)

Pochodzenie materiału: muły węglowe – PG SILESIA; pył węglowy z węgla brunatnego – LEAG –Niemcy. Substraty zmieszano w stanie powietrzno-suchym.

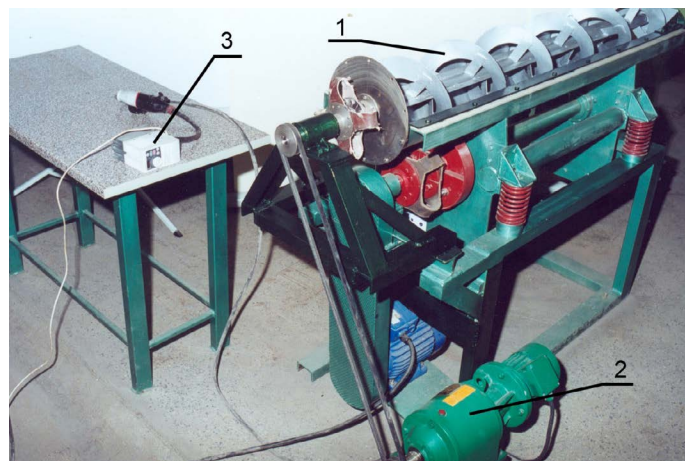
czy węglanów nie ma znaczącego wpływu na całkowitą zawartość poszczególnych pierwiastków. W przypadku przygotowanych mieszanin mułu węglowego z pyłami węgla brunatnego wartość opałowa wzrasta (do wartości 14,0–14,5 MJ/kg w stanie roboczym) i można wnioskować, że przygotowane mieszanki mogą znaleźć zastosowanie w instalacjach spalania paliw stałych z odsiarczaniem spalin o nominalnej mocy cieplnej nie mniejszej niż 1 MW.

Badaniom poddano próbki materiału podstawowego: muły węglowe (PG SILESIA), pył węglowy z węgla brunatnego (LEAG) oraz sporządzone mieszanki tych materiałów z dodatkiem materiału wiążącego. W prowadzonych procesach granulowania próbek stosowanym materiałem wiążącym jest często CaO. Jednak w tym przypadku materiał wiążący został zastąpiony kolejnym materiałem odpadowym, jakim jest rozdrobniony węglan wapnia i magnezu (odsiewka z kruszenia dolomitu o ziarnach 0–4 mm). Dodatkowo dla celów porównawczych sporządzono mieszankę mułów węglowych z sadzą. Próbki przeznaczone do badań wraz z ich opisem zestawiono w tabeli 1. Poszczególne substraty zmieszano w stanie powietrzno-suchym, zgodnie z deklarowanymi w tabeli udziałami procentowymi. Dla próby 4 (węglan wapnia i magnezu) oraz 5 (pył węglowy z węgla brunatnego) nie prowadzono procesu grudkowania, a jedynie badania jakościowe.

2.2. Stanowisko badawcze

Badania granulowania (grudkowania) przeprowadzono na laboratoryjnym rynnowym grudkowniku wibracyjnym konstrukcji AGH (rys. 2 i 3) (Banaszewski i in. 2001; Banaszewski 1994). Głównym elementem grudkownika jest rynna o długości 1500 mm i promieniu 125 mm zakończona kołnierzami służącymi do mocowania dodatkowych rynien lub ograniczników wysokości wysypu. Masa drgająca oparta jest na sprężynach. Silnik napędowy o obrotach znamionowych 1440 obr/min zasilany jest przez przetwornik tyrystorowy i umożliwia pracę z prędkością obrotową od 400 do 1800 obr/min. Obroty z silnika przekazywane są poprzez przekładnię pasową na wałek pośredni, a następnie przez sprzęgło oponowe, na wał wibratora, na którego końcach są zamontowane wymienne masy niewyważone. W wyniku takiego napędu uzyskuje się wzbudzenie rynny do drgań kołowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi rynny. Laboratoryjny rynnowy grudkownik wibracyjny jest urządzeniem nadrezonansowym, w którym drgania wywołane są przez jednomasowy wibrator bezwładnościowy. Konstrukcja wibratora bezwładnościowego pozwala na zmianę mas niewyważonych, co wpływa na amplitudę drgań. Stanowisko pozwala na regulację amplitudy drgań od 2,2 do 5,6 mm. Zmiana prędkości obrotowej i amplitudy drgań pozwala na pracę przy wskaźnikach dynamicznych od 0,4 do 8 – przy najniższej amplitudzie i od 1 do 20 – przy amplitudzie 5,6 mm.

W celu wyeliminowania niekorzystnych zjawisk zachodzących w trakcie granulowania zamontowano wewnątrz rynny ślimak pełniący rolę elementu transportującego i oczyszczającego rynnę (Banaszewski i in. 2001). Wał ślimaka (1 – rys. 2) zamocowany została bezpośrednio do rynny na jej wlocie i wylocie, w ten sposób, że po stronie wylotu pozostawiono szeroką szczelinę pozwalającą na swobodne wypadanie grudkowanego materiału. Do napędu



Rys. 2. Stanowisko rynnowego grudkownika wibracyjnego. Fot. J. Feliks

Fig. 2. The test stand of the pipe vibratory granulator

ślimaka użyto motoreduktora (2 – rys. 2). Ruch obrotowy ślimaka zapewnia czyszczenie rynny, jak również ciągły ruch grudkowanego materiału. Czas pozostawania materiału w grudkowniku może być płynnie regulowany w granicach 20–300 s dzięki zastosowaniu tyrystorowego przetwornika częstotliwości (3 – rys. 2). W trakcie badań, po krótkim czasie, pomiędzy ślimakiem a rynną wytworzona zostaje kilkumilimetrowa gładka warstwa nalepy z grudkowanego materiału. Jest to zjawisko pozytywne w procesie grudkowania, gdyż zapobiega ślizganiu się materiału grudkowanego, a tym samym ułatwia tworzenie grudek.

2.3. Sposób przeprowadzenie badań

Z dostarczonego mułu węglowego i przygotowanych mieszanek wydzielono próbki o masie 1 kg. Wszystkie próbki rozdrobiono mechanicznie, a następnie do próbek dodawano odpowiednią ilość wody. Tak przygotowaną mieszankę dostarczano do rynny grudkownika wibracyjnego (rys. 3). Parametry pracy granulatora ustalono na podstawie wcześniejszych doświadczeń (Feliks 2009).

W trakcie grudkowania korygowano ilość dostarczanej wody. W chwili uzyskania zadawalających efektów grudkowania (ok. 50–100 s) uruchamiano ślimak czyszczący, który transportował materiał do kuwety (rys. 4). Następnie pobierano kilka grudek o średnicy około 15 mm do badań wytrzymałości (Feliks 2017). Dla celów tego badania wybrano metodę wytrzymałości (odporności) na zrzuty. Badania przeprowadzono bezpośrednio po grudkowaniu, a zrzuty wykonywano z wysokości 700 mm. Kolejnym etapem badań było określenie składu ziarnowego, które wykonywano po sezonowaniu trwającym około 24 godziny (rys. 10). Po dłuższym okresie czasu przeprowadzono powtórne badania wytrzymałości na zrzuty (tab. 2), tym razem z wysokości 500 mm.



Rys. 3. Rynnowy grudkownik wibracyjny w trakcie pracy. Fot. J. Feliks

Fig. 3. The pipe vibratory granulator during work



Rys. 4. Odbiór materiału. Fot. J. Feliks

Fig. 4. Receipt of material

3. Wyniki badań i ich analiza

Jako pierwszy eksperyment, w celach porównawczych, przeprowadzono proces granulowania próbki mułu węglowego bez użycia czynnika wiążącego (próbka 6). Grudki otrzymane w tej próbie przedstawione na rysunku 5 charakteryzują się dużą jednorodnością (grudki



Rys. 5. Muły węglowe (PG SILESIA) (próbka 6). Fot. J. Feliks

Fig. 5. Coal sludge (PG SILESIA) (sample 6)

o wymiarze 2–20 mm stanowią 92% masy materiału). Świeże grudki poddane próbie odporności na zrzuty wytrzymały od 7 do 14 zrzutów.

Następnie przeprowadzono próby grudkowania mułów węglowych z dodatkiem 3% wapna palonego (CaO) (próbka 7) mającego na celu obniżenia wilgotności mułu węglowego i podniesienia wytrzymałości grudek (rys. 6). W tej próbie grudki o wymiarze 2–20 mm stanowią 75% masy materiału, nie występowały grudki o wymiarach poniżej 2 mm, a grudki o wielkości powyżej 20 mm stanowiły 25% masy produktu. Zwiększenie wymiaru grudek związane było z odmienną (większą) ilością dodawanej wody, która ma znaczący wpływ

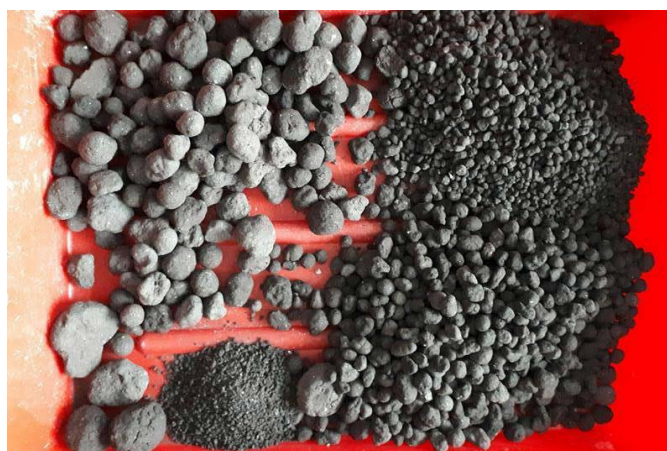


Rys. 6. Muły węglowe (PG SILESIA) i CaO (próbka 7). Fot. J. Feliks

Fig. 6. Coal sludge (PG SILESIA) with CaO (sample 7)

na rozmiar produktu. Świeże grudki poddane próbie na zrzuty wytrzymały od 7 do 14 zrzutów, podobnie jak dla mułów bez materiału wiążącego.

Zasadniczymi badaniami było określenie możliwości grudkowania mieszanek mułu węglowego z dodatkami, czyli pyłami węglowymi z węgla brunatnego oraz sadzą (próbki 1, 2, 3). W miejsce materiału wiążącego zastosowano odsiewkę z kruszenia dolomitu o ziarnach 0–4 mm. Efekty grudkowania pokazano na zdjęciach (rys. 7, 8, 9) a ich składy ziarnowe wykonane po trwającym około 24 godziny sezonowaniu pokazano na wykresie (rys. 10). W każdym przypadku świeże grudki otrzymane z mieszanek wytrzymały około 10 zrzutów i nie można było zauważyć znaczących różnic w odniesieniu do tego parametru.



Rys. 7. Muły węglowe (PG SILESIA) i pył węglowy (LEAG) (próbka 1). Fot. J. Feliks

Fig. 7. Coal sludge (PG SILESIA) with coal dusts from lignite (LEAG) (sample 1)



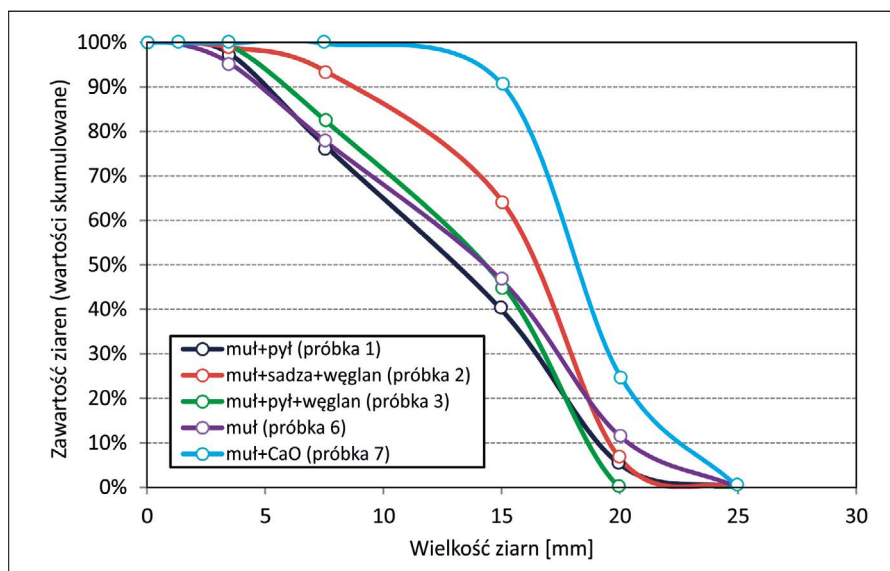
Rys. 8. Muły węglowe (PG SILESIA), sadza, dolomit (próbka 2). Fot. J. Feliks

Fig. 8. Coal sludge (PG SILESIA), soot and dolomite (sample 2)



Rys. 9. Muły węglowe (PG SILESIA), pył węglowy (LEAG), dolomit (próbka 3). Fot. J. Feliks

Fig. 9. Coal sludge (PG SILESIA) with coal dusts from lignite (LEAG) and dolomite (sample 3)



Rys. 10. Składy ziarnowe próbek mułów i ich mieszanin po granulowaniu na rynnowym grudkowniku wibracyjnym

Fig. 10. Grain size compositions of samples of coal sludge and their mixtures after granulation on a pipe vibrating granulator

Grudki otrzymane z wszystkich mieszanek charakteryzują się podobnymi składami ziarnowymi (przy porównywalnych ilościach dodawanej wody). Grudki o wymiarze 2–20 mm stanowią 90–95% masy produktu. Uważa się, że taki rozmiar ziaren umożliwia ich zastosowanie jako paliwa samodzielnego lub jako dosypki do mialu węglowego (maksymalna średnica ziaren to 25–30 mm – [materiały archiwalne PG SILESIA](#)) i stosowanie ich w energetyce zawodowej.

Po dłuższym okresie czasu, przeprowadzono powtórne badania wytrzymałości (odporności) na zrzuty produktów grudkowania. Dla mieszanek mułów z pyłami i sadzą badania przeprowadzono po około 2 miesiącach sezonowania, natomiast dla mułów bez dodatku materiału obcego badania przeprowadzono po 3 tygodniach sezonowania. W tym przypadku zrzutów dokonywano z wysokości 500 mm. Wyniki tych badań pokazano w tabeli 2.

TABELA 2. Odporność zgranulowanych próbek na zrzuty po dłuższym sezonowaniu

TABLE 2. Strength of granulated samples for discharges after prolonged seasoning

Numer i nazwa próbki	Liczba zrzutów z wysokości 500 mm					Średnia arytmetyczna liczby zrzutów
Próbka 1 (muł + pył)	4	6	5	4	2	4,8
Próbka 2 (muł + sadza + węglan)	3	2	3	3	2	2,6
Próbka 3 (muł + pył + węglan)	4	4	4	5	4	4,2
Próbka 6 (muł węglowy)	5	9	5	4	4	4,5
Próbka 7 (muł + CaO)	6	2	7	6	6	6,2

Badania te miały wykazać, czy zastosowany materiał w postaci węglanu wapnia i magnezu (odsiewka z kruszenia dolomitu o wymiarach ziaren 0–4 mm) wykazuje właściwości wiążące oraz czy dodatek pyłu węglowego ma wpływ na wytrzymałość materiału, gdzie podstawowym materiałem są muły węglowe. Doświadczenia własne pokazują, że zastosowany czas sezonowania próbek jest wystarczający dla obserwacji procesów wiążących ([Klojzy-Karczmarczyk 2003](#)).

Zrzutów dokonywano dla pięciu grudek, a następnie wyliczono średnią arytmetyczną liczby zrzutów. W obliczeniach pominięto próby znacząco odbiegające od średniej wartości. Największą wytrzymałość na zrzuty posiadają grudki wykonane z mułu węglowego z dodatkiem wapna palonego (6 zrzutów), najniższą natomiast produkt otrzymany w wyniku mieszania mułów węglowych z sadzą (poniżej 3 zrzutów). Pozostałe trzy próby wytrzymały po 4–5 zrzutów, co jest ilością wystarczającą dla stwierdzenia możliwości ich transportu. Nie obserwuje się różnic w wynikach uzyskanych dla próbek z dodatkiem węglanu wapnia i magnezu oraz bez tego materiału. Na tym etapie pracy, można zatem odrzucić ten materiał, jako perspektywiczny materiał wiążący.

Wnioski

Celem pracy było przeprowadzenie badań dla znalezienia sposobu zwiększenia atrakcyjności mułów węglowych jako paliwa dla odbiorców zawodowych, poprzez poprawę ich właściwości transportowych z jednoczesnym wzbogaceniem dla podniesienia wartości energetycznej. Podjęto wstępne badania pozwalające na wykazanie zmian parametrów poprzez sporządzanie mieszanek mułów węglowych (PG SILESIA) z pyłami węglowymi z węgla brunatnego (LEAG) w odniesieniu do materiału pierwotnego, jakim są muły węglowe.

Zasadniczymi badaniami objęto sporządzone mieszanki mułu węglowego z dodatkami i określono możliwości ich grudkowania na laboratoryjnym rynnowym grudkowniku wibracyjnym konstrukcji AGH. Można stwierdzić, że wszystkie mieszanki są podatne na proces grudkowania (granulowania). Sam proces grudkowania poszerza niewątpliwie możliwości transportowe samych mułów węglowych, jak też ich mieszanek.

Skład ziarnowy uzyskanego materiału jest zadawalający. Grudki o wymiarze 2–20 mm stanowią 90–95% masy produktu. Można sądzić, że istnieje możliwość zastosowania takiego materiału jako paliwa samodzielnego albo jako dosypki do innego paliwa. Istnieje możliwość regulacji wielkości ziaren poprzez dodawanie odpowiedniej ilości wody.

Odporność na zrzuty grudek świeżych jest zadawalająca i porównywalna dla wszystkich mieszanek. Świeże grudki mułów poddane próbie na zrzuty z wysokości 700 mm wytrzymały od 7 do 14 zrzutów. Dla świeżych mieszanek mułów z pyłami węglowymi ilość obserwowanych zrzutów jest na poziomie 10 i nie obserwuje się znaczących różnic dla poszczególnych próbek.

Odporność na zrzuty, z wysokości 500 mm, po dłuższym sezonowaniu wykazuje wartości odmienne dla analizowanych próbek. Największą wytrzymałość na zrzuty posiadają grudki wykonane z mułu z dodatkiem wapna palonego, natomiast najniższą produkt otrzymany w wyniku mieszania mułów węglowych z sadzą. Próbkę mułów bez materiału wiążącego oraz mieszanek mułów z pyłami węglowymi z węgla brunatnego charakteryzują się podobną wytrzymałością na zrzuty. Wartości dla nich uzyskane na poziomie 4–5 zrzutów wskazują, że uzyskana wytrzymałość jest wystarczająca dla stwierdzenia możliwości ich transportu. Dodatek węgla wapnia i magnezu nie powoduje wzrostu parametrów wytrzymałościowych mieszanek.

Na tym etapie pracy można stwierdzić, że dodatek pyłów węglowych z węgla brunatnego nie powoduje pogorszenia wytrzymałości materiału w odniesieniu do czystych mułów węglowych. Nie ma zatem negatywnego wpływu na możliwości transportu materiału zgranulowanego. Analogiczne wnioski, ale dotyczące jakości mieszanek i wpływu pyłów węglowych wyciągnięto w pracy Kłojzy-Karczmarczyk i in. (2018). Obserwuje się natomiast wyraźną poprawę parametrów energetycznych.

Nie prowadzono analizy kosztowej analizowanego przedsięwzięcia. Z przeprowadzonych badań wstępnych można wnioskować, że podjęty temat jest obiecujący i istnieją przesłanki do jego kontynuowania. Istotnym zagadnieniem będzie zmiana substratów, zmiana warunków prowadzenia badań oraz ustalenie optymalnych udziałów poszczególnych składników perspektywnego produktu.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk oraz w ramach pracy statutowej Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie.

Literatura

- [Online] <http://www.sejm.gov.pl> – Rządowy projekt ustawy o zmianie ustawy o systemie monitorowania i kontrolowania jakości paliw oraz ustawy o Krajowej Administracji Skarbowej z dnia 19 marca 2018, druk 2377 [Dostęp 23.07.2018].
- Baic i in. 2010 – Baic, I., Blaschke, W. i Szafarczyk, J. 2010. Depozyty mułów węglowych źródłem paliwa energetycznego – informacja o projekcie rozwojowym. *Przegląd Górniczy* nr 1–2, s. 73.
- Baic, I. 2013. Analiza parametrów chemicznych, fizycznych i energetycznych depozytów mułów węglowych zinventaryzowanych na terenie województwa śląskiego. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* t. 15, s. 1511–1524.
- Baic, I. i Witkowska-Kita, B. 2011. Technologie zagospodarowania odpadów z górnictwa węgla kamiennego – diagnoza stanu aktualnego, ocena innowacyjności i analiza SWOT. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set The Environment Protection)* t. 13, s. 1315–1326.
- Banaszewski i in. 2001 – Banaszewski, T., Kobiąka, R., Baran, J., Filipowicz, A. i Feliks, J. 2001. *Wibracyjny grudkownik rynnowy*. PL 350979 Polska, 30.11.2001.
- Banaszewski, T. 1994. *Grudkownik wibracyjny*. Patent PL nr 173892 Polska, 2.11.1994.
- Feliks, J. 2009. Badania symulacyjne ruchu grudek w rynnowym grudkowniku wibracyjnym dla różnych średnic rynny. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* R. 48, nr 4, s. 38–39.
- Feliks, J. 2012. Performance tests of waste coal sludge granulation. *Polish Journal of Environmental Studies* vol. 21, no. 5A, s. 69–72.
- Feliks, J. 2017. *Badania i modelowanie wibracyjnych grudkowników rynnowych*. Kraków: Wyd. AGH.
- Feliks, J. i Kalukiewicz, A. 2014. Badania grudkowania odpadowych mułów węglowych. *Napędy i Sterowanie* R. 16, nr 7/8, s.114–117.
- Galos K. i Sługaj J., 2014. Management of hard coal mining and processing wastes in Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 30, z. 4, s. 51–61.
- Góralczyk S. i Baic, I. 2009. Odpady z górnictwa węgla kamiennego i możliwości ich gospodarczego wykorzystania. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 12, z. 2/2, s. 145–157.
- Góralczyk S. red. 2011. Gospodarka surowcami odpadowymi z węgla kamiennego. IMBiGS Warszawa, 327 s.
- Hryniewicz i in. 2015 – Hryniewicz, M., Bembenek, M., Janewicz, A. i Kosturkiewicz, B. 2015. Brykietowanie materiałów droбноziarnistych w prasach walcowych z niesymetrycznym układem zagęszczania. *Przemysł Chemiczny* t. 94, 12, s. 2223–2226.
- Hycnar i in. 2013 – Hycnar, J.J., Fraś, A., Przysaś, R. i Foltyn, R. 2013. Stan i perspektywy podwyższenia jakości mułów węglowych dla energetyki. *Mat. XXVII Konf. z cyklu Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej*, s. 61–74.
- Jelonek i in. 2010 – Jelonek, I., Mirkowski, Z. i Iwanek, P. 2010. Analiza własności fizykochemicznych i petrograficznych mułów węglowych w aspekcie ich wykorzystania jako paliwa na przykładzie wybranego obiektu PKE S.A. *Przegląd Górniczy* 66, 10, s. 156–160.
- Jelonek i in. 2016 – Jelonek, I., Mirkowski, Z. i Jelonek, Z. 2016. Cechy flotokonzentratów oraz mułów węglowych stosowanych w piecach centralnego ogrzewania oraz charakterystyka produktów ubocznych powstałych w wyniku ich spalania. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 96, s. 91–104.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. 2003. Zastosowanie odpadów energetycznych w ograniczaniu transportu zanieczyszczeń ze składowisk odpadów górniczych. *Studia Rozprawy Monografie* 117. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2017. Propozycje rozszerzenia działań celem zagospodarowania materiałów odpadowych z górnictwa węgla kamiennego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 98, s. 151–165.
- Klojzy-Karczmarczyk i in. 2016 – Klojzy-Karczmarczyk, B., Mazurek, J. i Paw, K. 2016. Możliwości zagospodarowania kruszyw i odpadów wydobywczych górnictwa węgla kamiennego ZG Janina w procesach rekultywacji wyrobisk odkrywkowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 32, z. 3, s. 111–134.

- Klojzy-Karczmarczyk i in. 2018 – Klojzy-Karczmarczyk, B., Mazurek, J. i Wienczek, M. 2018. Coal sludge and their mixtures as prospective energy resources. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 21, z. 3, s. 137–150.
- Materiały archiwalne PG SILESIA (Archival paper PG SILESIA).
- Obraniak, A. i Głuba, T. 2011. A model of granule porosity changes during drum granulation. *Physicochem. Probl. Miner. Process* 46, s. 219–228.
- Ostręga, A. i Uberman, R. 2010. Kierunki rekultywacji i zagospodarowania – sposoby wyboru, klasyfikacja i przykłady. *Górnictwo i Geoinżynieria* 34(4), s. 445–461.
- Rosik-Dulewska, C. 2012. Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. V, Wydawnictwo Naukowe PWN, 379 s.
- Sidor, J., Feliks, J. 2015. Granulatory wibracyjne. *Przemysł Chemiczny* t. 94, nr 5, s.767–770.
- Stala-Szlugaj, K. 2018a. Uchwały antysmogowe w Polsce a ich oddziaływanie na zużycie węgla kamiennego w gospodarstwach domowych. *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society* Nr 2; w druku.
- Stala-Szlugaj, K. 2018b. Hard coal demand for households in Poland vs. Anti-smog law. *Archives of Mining Sciences* vol. 63, is. 3, s. 701–711.
- Szymkiewicz i in. 2009 – Szymkiewicz, A., Fraś, A. i Przysaś, R. 2009. Kierunki zagospodarowania odpadów wydobywczych w Południowym Koncernie Węglowym S.A. *Wiadomości Górnicze* 7–8, s. 435–441.
- Wróbel i in. 2013 – Wróbel, J., Fraś, A., Przysaś, R. i Hycnar, J.J. 2013. Gospodarka odpadami poprodukcyjnymi w kopalniach Południowego Koncernu Węglowego SA [W:] *Konferencja Naukowo-Techniczna XXII Szkoła Eksploatacji Podziemnej* Kraków 18–22.02.2003.