KOMEKO 2023

KOMAG

ISBN 978-83-65593-32-0

ISBN 978-83-65593-32-0

Monografia zbiorowa

KOMEKO

Konferencja Naukowo-Techniczna

Przemysł Przyjazny dla Środowiska

Gliwice 2023

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Redakcja naukowa:

dr hab. inż. Dariusz Prostański, prof. ITG KOMAG
dr inż. Bartosz Polnik

Recenzenci (w kolejności alfabetycznej):

prof. dr hab. inż. Jolanta Biegańska

dr inż. Jacek Korski

dr inż. Daniel Kowol

prof. dr hab. inż. Aleksander Lutyński

prof. dr hab. inż. Marcin Lutyński

dr inż. Piotr Matusiak

dr inż. Zenon Różański

dr hab. inż. Tomasz Suponik, prof. PŚ

prof. dr hab. inż. Barbara Tora

Redaktorzy techniczni:

mgr inż. Marzena Pabian-Macina
mgr inż. Bogna Kolasińska

Wydawca:
Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

Copyright by Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2023

Monografia opublikowana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa - - Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

WPROWADZENIE

Szanowni Państwo,

Z przyjemnością oddajemy Państwu kolejne wydanie monografii pokonferencyjnej KOMEKO, w której zostało omówione całe spektrum zagadnień związanych z czystym pozyskiwaniem kopaliny w wyniku procesu wzbogacania, w tym zastosowanie nowoczesnych maszyn i urządzeń wspierających proces przeróbczy. Innym aspektem jest neutralizacja odpadów pogórniczych z równoczesnym uzyskiwaniem z nich minerałów, paliw i pierwiastków użytecznych dla człowieka, dbając o ochronę środowiska i dążąc do gospodarki obiegu zamkniętego.

Monografia zawiera osiem rozdziałów powiązanych tematycznie.

W pierwszym rozdziale autorzy opisują ewolucje procesów przeróbczych począwszy od sterowanych elektrycznie maszyn i urządzeń do wykorzystania mechatronicznych rozwiązań sterujących procesem przeróbczym, co zaprezentowano na przykładzie flotacji mułów. Nowoczesne systemy mechatroniczne zapewniają stabilizację parametrów flotacji gwarantując prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Zastosowanie nowoczesnych systemów mechatronicznych, automatyki i sterowania pozwala na obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla i poprawę flotacji mułów powęglowych.

Jakość węgla, jakże bardzo istotna przy obecnych, bardzo surowych wymaganiach środowiskowych, może być poprawiana nie tylko przez mechaniczne procesy przeróbcze, ale również przez dodawanie modyfikatorów takich jak haloizyt, jak opisano w rozdziale drugim. Dzięki tej metodzie węgiel z ZG Brzeszcze może być cennym paliwem dla kotłów rusztowych i retortowych.

Uzyskanie zauważalnych korzyści powodowanych procesami przeróbczymi węgla wymaga nie tylko zastosowania nowoczesnych rozwiązań, ale również systemowego podejścia do oczekiwanego efektu końcowego procesu przeróbki (rozdział trzeci). Dlatego też, spółki węglowe, takie jak Tauron Wydobycie S.A. opracowują plany rozwoju swoich zakładów przeróbki węgla wyznaczając nowe kierunki działań modernizacyjnych, doprowadzając do optymalizacji procesów przeróbczych uwzględniających najnowocześniejsze rozwiązania dostępne na rynku. W planach modernizacji uwzględnione zostały aspekty środowiskowe, takie jak ograniczenie emisji gazów i pyłów powstających podczas spalania węgla.

Rozwój procesów przeróbczych i osiąganie lepszych efektów w zakresie jakości, skuteczności oraz kosztów procesów przeróbczych wymaga nieustannego doskonalenia, prowadzenia prac konstrukcyjnych, projektowych oraz badań i prac naukowych. Jednym z takich przykładów jest doskonalenie rozwiązania kruszarki (rozdział piąty) przez pracowników naukowych AGH w Krakowie, gdzie w wyniku badań naukowych osiągnięto bardzo dobre przygotowanie materiału do produkcji granulatów nawozów mineralnych przy niższym, od wszystkich znanych rozwiązań, jednostkowym poborze energii.

Wspomniany już Tauron Wydobycie S.A. efektywnie wykorzystuje odpady powstające w wyniku przeróbki węgla i uzyskuje z nich kruszywa wykorzystywane w geoinżynierii oraz budownictwie, szczególnie drogowym i hydrotechnicznym (rozdział szósty). Mimo, że Spółka zajmuje się produkcją kruszyw od lat, to nadal nie jest to powszechnym procesem w innych spółkach górniczych.

Inną wizję otrzymywania kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórniczych i możliwości produkcji wodoru przedstawili w rozdziale ósmym naukowcy z ITG KOMAG. Przedsięwzięcie jest planowane do realizacji w ramach projektu europejskiego H2GEO. W wyniku projektu przewidziano opracowanie systemu do rozdziału odpadów pogórniczych, opracowanie technologii produkcji kompozytów geopolimerowych oraz produkcji wodoru z wydzielonych frakcji mineralnych i energetycznych. Uniwersalność kompleksowej, opracowanej w ramach projektu, technologii

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

zagospodarowania składowisk odpadów pogórniczych pozwoli na jej wykorzystanie we wszystkich krajach, w których jest wygaszane górnictwo węglowe.

Innym sposobem na wykorzystanie hałd z odpadami powęglowymi jest propozycja ITG KOMAG opisana w rozdziale czwartym w zakresie rekuperacji ciepła z istniejących i budowanych składowisk odpadów pogórniczych w aspekcie profilaktycznym i odzysku energii. Na podstawie analizy dostępnej wiedzy o przyczynach pożarów składowisk odpadów pogórniczych z kopalń węgla przedstawiono koncepcję rozwiązania technicznego łączącego w sobie funkcjonalność w zakresie prewencji pożarowej i możliwości odzysku ciepła z naturalnych procesów powodujących jego wydzielanie.

W rozdziale siódmym dokonano przeglądu literatury (ITG KOMAG) w aspekcie odzysku substancji z odpadów ze zużytych sprzętów elektrycznych i elektronicznych zawierających magnesy. Istniejące rozwiązania techniczne pozwalają odzyskać cenne pierwiastki, takie jak Nd – neodym, Dy – dysproz, Pr – prazeodym. Dokonano zarówno przeglądu potencjału ilości odzyskiwanych substancji, jak i dokonano przeglądu środków technicznych umożliwiających odzysk pierwiastków.

Monografia choć swoim monotematycznym charakterem koncentruje się na zamkniętym obiegu gospodarki w zakresie kopalin i pierwiastków, to również porusza tematy związane z odzyskiem energii.

Oddając Państwu niniejszą książkę, mamy nadzieję, że będzie pomocą we wzbogaceniu doświadczenia inżynierskiego oraz inspiracją do opracowywania nowych rozwiązań oraz stosowania dobrych praktyk opisanych w poszczególnych rozdziałach.

dr hab. inż. Dariusz Prostański, prof. ITG KOMAG
dr inż. Bartosz Polnik

Redaktorzy naukowi monografii

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

SPIS TREŚCI

1. Od maszyny do systemu mechatronicznego na przykładzie flotacji mułów węglowych – przegląd doświadczeń Łukasiewicz-IMN – *K. Szczepaniak, T. Zachariasz, W. Mijał* ……..…. 1

2. Poprawa właściwości użytkowych węgli z Zakładu Górniczego Brzeszcze TAURON Wydobycie S.A. poprzez dodatek modyfikatora w postaci haloizytu – *R. Łaskuda, R. Przystaś, Z. Jagiełło, J. Sołtys* ……. 12

3. Kierunki działań modernizacyjnych w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej Węgla Zakładu Górniczego Janina w TAURON Wydobycie S.A. – *D. Jachimczyk, M. Cholewa* ….…. 25

4. Rekuperacja ciepła z istniejących i budowanych składowisk odpadów pogórniczych w aspekcie profilaktycznym i odzysku energii – *J. Korski* ……..…….…..…. 33

5. Zastosowanie kruszarki wibracyjnej do przygotowania nadawy do procesu granulacji – *M. Mazur, J. Feliks* ……..……...……...…..……..…….. 43

6. Wykorzystanie kopaliny towarzyszącej wydobyciu węgla do produkcji kruszyw w Zakładzie Górniczym Sobieski TAURON Wydobycie S.A. – *Ł. Rzeźniczek* …….…….. 51

7. Przegląd literatury dotyczącej odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE – *P. Friebe* ……..…….....……. 61

8. Nowa technologia wytwarzania wodoru i kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórniczych – *P. Matusiak, D. Kowol* ……...……..…….…..... 68

9. Indeks autorów ……..,…… 80

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.1

Od maszyny do systemu mechatronicznego na przykładzie flotacji mułów węglowych – przegląd doświadczeń Łukasiewicz-IMN

Krzysztof Szczepaniak – Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych

Tomasz Zachariasz – Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych

Waldemar Mijał – Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych

Streszczenie: Flotacja mułów węglowych, oprócz wzbogacania (koncentrat o wysokiej zawartości składnika użytecznego i niskiej zawartości popiołu od 4÷10%), zamyka i oczyszcza obieg wodny kopalni, stanowiąc ważny element ochrony środowiska naturalnego. Duże flotowniki pracujące jako niezależne jednostki produkcyjne wyposażone w układy stabilizacji parametrów technologicznych (system mechatroniczny) gwarantują prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Urządzenia te mogą pracować w warunkach zdalnego sterowania, co stanowi zachętę do prowadzenia modernizacji flotacji w zakładach wzbogacania węgla. Poprawę skuteczności flotacji mułów węglowych i obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla można osiągnąć stosując korzystne zmiany w technologii oraz wprowadzając nowe konstrukcje maszyn flotacyjnych, wyposażone w nowoczesne elementy automatyki i sterowania (sensory, aktuatory, sterowniki PLC) oraz systemy mechatroniczne. Podstawowym celem wzbogacania mułów węglowych jest utrzymanie na stałym (zadanym) poziomie wartości zapopielenia odpadów flotacyjnych, poprzez ciągłe, automatyczne korygowanie wartości istotnych parametrów procesu. System sterowania optymalizującego procesem flotacji może być stosowany zarówno dla wzbogacania węgla, jak i innych surowców mineralnych.

Słowa kluczowe: flotacja, maszyna flotacyjna, system sterowania, system mechatroniczny

From a machine to a mechatronic system on the example of coal sludge flotation - a review of Łukasiewicz-IMN experience

Abstract: Flotation of coal sludge, apart from enrichment (concentrate of a high content of a useful component and a low ash content of 4 - 10%), closes and cleans the mine's water circuit, constituting an important part of environmental protection. Large flotation machines operating as independent production units equipped with stabilization systems for technological parameters (mechatronic system) guarantee the correct process and high quality of products. These devices can operate under remote control conditions, which is an incentive to modernize flotation in coal preparation plants. Improving the effectiveness of coal sludge flotation and reducing the costs of the coal enrichment process can be achieved by applying favorable changes in technology and introducing new designs of flotation machines equipped with state-of-the-art automation and control components (sensors, actuators, PLC controllers) and mechatronic systems. The main purpose of coal sludge enrichment is to maintain the ash content in flotation tailings at a constant (set) level through continuous, automatic correction of the values of important process parameters. The control system optimizing the flotation process can be used both for the enrichment of coal as well as other minerals.

Keywords: flotation, flotation machine, control system, mechatronic system

1. Wprowadzenie – charakterystyka procesu flotacji

W trakcie wzbogacania grawitacyjnego węgli powstaje wodna zawiesina mułu węglowego wymagająca rozdziału na fazę stałą i wodę zawracaną do procesu. Wpływ na przebieg procesów wodno-mułowych mają skały towarzyszące pokładom węgla [1]. Flotacja węgla stanowi bardzo ważne ogniwo tego procesu. Pozwala na wydzielenie z mułów koncentratu o niskiej zawartości popiołu, który zależy między innymi od własności surowca i konstrukcji maszyny. Odzysk substancji palnej kształtuje się na poziomie 90%. Nie ma więc technicznych przeszkód w szerokim stosowaniu flotacji do wzbogacania

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

mułów węglowych. Dla węgli wzbogacanie flotacyjne prowadzi się dla najdrobniejszych klas ziarnowych, głównie poniżej 0,5 mm, korzystnie 0 – 0,2 mm. Zawartość popiołu w mułach węglowych wynosi zwykle od kilkunastu do ok. 40%. Flotacja mułów węglowych, oprócz wzbogacania (koncentrat o wysokiej zawartości składnika użytecznego i niskiej zawartości popiołu od 4÷10%), zamyka i oczyszcza obieg wodny kopalni, stanowiąc ważny element ochrony środowiska naturalnego.

Do wzbogacania mułów węglowych metodą flotacji stosuje się maszyny flotacyjne. Najczęściej stosuje się maszyny pneumo-mechaniczne typu IZ, maszyny „starego" typu oraz typu IF, maszyny „nowego" typu.

Technologia flotacji danego mułu węglowego powinna zapewniać optymalną flotowalność tego mułu w skali przemysłowej, dlatego musi uwzględniać czynniki warunkujące taką flotowalność [2]. Czynniki te to stopień uwęglenia węgla, skład, sposób występowania i oddziaływanie substancji mineralnych na aktywność flotacyjną węgla, stopień rozdrobnienia substancji mineralnej i węglowej, stopień uwolnienia substancji organicznej od mineralnej, skład granulometryczny mułów węglowych, koncentracja części stałych w zawiesinie, jakość, ilość i sposób wprowadzania odczynników flotacyjnych, sposób napowietrzania zawiesiny flotacyjnej, czynniki typu mechanicznego, czas flotacji i inne [2].

2. Maszyny flotacyjne korytowe typu IZ

W 1966 roku opracowano konstrukcję flotownika o pojemności komory 1,1 m^3 – IZ 1, a w drugim etapie o pojemności komory 3,0 m^3 – IZ-3. Zakłady Mechaniczne ZAMET wykonały dokumentację techniczną oraz prototypy przemysłowe tych flotowników, które otrzymały oznaczenie IZ (Instytut – Zamet) [3]. W 1969 r. w Zakładzie opracowano konstrukcję flotownika IZ-5 o pojemności komory 5 m^3. W latach 1973÷1974 opracowano konstrukcję flotownika IZ-12 o pojemności komory 12 m^3 [3]. W latach siedemdziesiątych flotownik IZ-12 znalazł powszechne zastosowanie w modernizowanych i budowanych zakładach wzbogacania węgla w polskim przemyśle górniczym węgla [2]. Maszyny te wyposażano w ręczne systemy sterowania i regulacji poziomu pulpy flotacyjnej (grubości piany) (rys. 1).

Rys. 1. Ręczny system sterowania i regulacji poziomu pulpy flotacyjnej (grubości piany)

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

W toku rozwoju elektromechaniki, pneumatyki rozpoczęto procesy automatyzacji pracy maszyn, regulacji i sterowania pracą maszyn IZ [4] oraz ograniczenia zużycia energii poprzez zastosowanie nowoczesnych aeratorów typu WD [5-9].

3. Maszyny flotacyjne cylindryczne typu IF

Wzrost objętości flotowników wpływa korzystnie na koszty eksploatacji i możliwości zdalnego sterowania procesem. Okrągły kształt komory oraz nowatorska konstrukcja aeratora zapewniają lepsze warunki hydrodynamiczne procesu i wpływają na poprawę podstawowych wskaźników flotacji oraz obniżenie kosztów zużycia energii [10]. Duże flotowniki pracujące jako niezależne jednostki produkcyjne wyposażone w układy stabilizacji parametrów technologicznych gwarantują prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Maszyny te mogą pracować w warunkach zdalnego sterowania, co stanowi zachętę do prowadzenia modernizacji flotacji w zakładach wzbogacania węgla. Dalszym krokiem jest praca w układzie stabilizacji jakości koncentratu i odpadów.

Duże objętości komory wymagały dobrego rozeznania przepływów we flotowniku w celu wykorzystania jego objętości do flotacji, mieszania zawiesiny. Ważnym elementem jest tu spokojna powierzchnia cieczy pod pianą jako elementu płynnego i stabilnego odbioru koncentratu. Innym zagadnieniem dla przemysłu węglowego jest zmiana lokalizacji obiektów flotacyjnych z najwyższego poziomu budynku płuczki do poziomu gruntu, gdzie nie występują ograniczenia budowlane.

Podstawowe cechy konstrukcji wielkogabarytowych cylindrycznych maszyn flotacyjnych typu IF:

- poprawa warunków hydrodynamicznych,
- wysoka efektywność flotacji,
- poprawa aeracji,
- poprawa warunków transportu piany,
- automatyzacja i stabilizacja procesu,
- niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne,
- dostosowanie konstrukcji do potrzeb indywidualnego odbiorcy i specyfiki konkretnego procesu flotacji.

Zmiany konstrukcji maszyny flotacyjnej objęły przede wszystkim nowatorskie opracowanie nowego:

- efektywnego aeratora, wysokiej wydajności mieszania i napowietrzania zawiesiny, pulpy flotacyjnej,
- systemu wprowadzenia nadawy do komory flotacyjnej [11],
- systemu odbioru koncentratu, piany flotacyjnej,
- systemu odprowadzenia odpadów flotacyjnych.

Przykład nowoczesnej wielkogabarytowej jednokomorowej maszyny flotacyjnej typu IF [12, 13] przedstawiono na rysunku 2.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 2. Największa maszyna flotacyjna w Polsce, IF-100W

Wyposażenie flotowników typu IF:

- system automatycznej kontroli i regulacji poziomu pulpy,
- system automatycznego pomiaru i regulacji ilości powietrza technologicznego,
- przepływomierz indukcyjny nadawy flotacyjnej,
- system automatycznego dozowania odczynników flotacyjnych,
- system automatycznej regulacji stopnia zapopielenia odpadów dla flotacji węgla.

4. Elementy elektroniki, automatyki, kontroli, sterowania

Poprawę skuteczności flotacji mułów węglowych i obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla można osiągnąć stosując korzystne zmiany w technologii oraz wprowadzając nowe konstrukcje maszyn flotacyjnych wyposażone w nowoczesne elementy automatyki i sterowania, systemy mechatroniczne [14, 15]. Przykładem takiego rozwiązania był flotownik pracujący w KWK Jas-Mos (zdjęcie na rysunku 2 dowodzi, że takie rozwiązanie znalazło zastosowanie w praktyce).

4.1. Sensory

Do pomiaru nadawy kierowanej do flotacji stosuje się przepływomierze elektromagnetyczne oraz gęstościomierze izotopowe [16]. Instalowane są one na rurociągu nadawczym w rozmiarze odpowiednim do instalacji (np. DN 250). Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe urządzenia pomiarowe.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 3. Przepływomierz elektromagnetyczny i gęstościomierz izotopowy [17]

Układ pomiaru poziomu z czujnikiem ultradźwiękowym kontroluje grubość piany flotacyjnej [18]. Odpowiednio skalibrowany pomiar odległości informuje o chwilowej grubości piany, czyli wymiarze od poziomu cieczy w komorze maszyny do krawędzi komory, którą mogłaby się przelewać do rynny odbioru flotokoncentratu. Czujnik ultradźwiękowy zabudowany jest na szczycie rury pływaka. Układ przedstawiono na rysunku 4.

Rys. 4. Czujnik ultradźwiękowy odległości z rurą pływaka

Przepływomierz powietrza technologicznego kontroluje, mierzy ilość dozowanego powietrza do procesu [18]. Pomiar przepływu metodą wirową wykorzystywany jest w wielu branżach przemysłu do przepływu objętościowego cieczy, gazów i par. Przepływomierze wirowe charakteryzują się bardzo dobrą liniowością wskazań, są nieczułe na zmiany temperatury i ciśnienia, posiadają wyjście analogowe 4÷20 mA i cyfrowe (nie wymaga przetwarzania sygnału). Przepływomierz przedstawiono na rysunku 5.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 5. Przepływomierz wirowy powietrza technologicznego

Kolejnym sensorem zastosowanym do kontroli procesu technologicznego jest popiołomierz optyczny [16]. Jest przeznaczony do ciągłego pomiaru zawartości popiołu w produktach flotacji węgla kamiennego. Pomiary mogą być realizowane bezpośrednio na przelewach koncentratów, jak i korytach odpadów w maszynach flotacyjnych. Wyniki pomiaru mogą być bezpośrednio wykorzystane do celów automatycznej regulacji procesu flotacji. Przykładowy popiołomierz przedstawiono poniżej (rys. 6).

Rys. 6. Popiołomierz optyczny MPOF2 [19]

W systemie zastosowano również czujnik ciśnienia powietrza technologicznego zabudowany na kolektorze dolotowym. Informuje on o pracy dmuchawy i wymaganym sprężu powietrza dozowanego do procesu [18]. Przykładowy czujnik do pomiaru ciśnienia powietrza w kolektorze przedstawiono na rysunku 7.

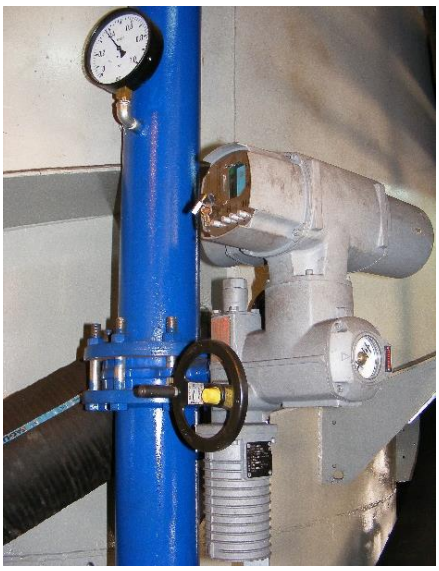
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 7. Czujnik ciśnienia powietrza [20]

4.2. Aktuatory

Rolę aktuatorów w instalacji zautomatyzowanej maszyny do flotacji pełnią przepustnice z napędami „auma" oraz przemiennik częstotliwości (falownik) [19] z silnikiem elektrycznym napędu wirnika aeratora. Przepustnice sterowane poprzez sterownik PLC zmieniają stopień otwarcia, przez co wpływają bezpośrednio na przepływ medium, jakim są powietrze technologiczne oraz odpad flotacyjny. Przepustnica powietrza zainstalowana jest na kolektorze pionowym doprowadzającym powietrze do pulpy flotacyjnej poprzez wał i wirnik aeratora. Przepustnica odpadu zabudowana jest pod dnem maszyny na rurociągu odpadu, którym z centralnej części komory wypływa odpad w wyniku ciśnienia słupa pulpy flotacyjnej wypełniającej komorę maszyny. Przykład przepustnicy przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Przepustnica z napędem [19]

Falownik sterujący obrotami silnika poprzez zmianę częstotliwości napięcia zabudowany jest w szafie AKPiA (Aparatury Kontrolno-Pomiarowej i Automatyki). Steruje prędkością obrotową odpowiednio do sygnału ze sterownika PLC, zgodnie z zaimplementowanym modelem sterowania.

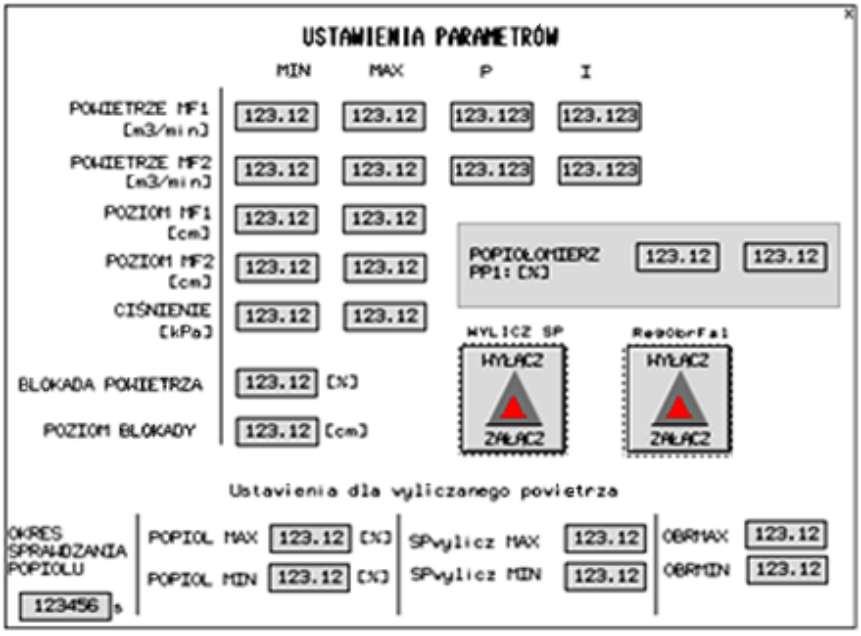
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

5. System mechatroniczny – czyli optymalizacja flotacji mułów węglowych

Celem systemu mechatronicznego we flotacji mułów węglowych jest optymalne sterowanie maszyną dla osiągania optymalnych, korzystnych efektów ekonomiczno-technologicznych. Do realizacji tego celu wykorzystano nowoczesną maszynę flotacyjną wyposażoną w napędy mechaniczne (np. silnik-przekładnia pasowa, wał), szereg sensorów, aktuatorów oraz sterownik PLC, do którego zaimplementowano specjalistyczne oprogramowanie [20, 21]. Sterownik PLC to komputer przemysłowy z modułowymi komponentami zaprojektowanymi do automatyzacji niestandardowych procesów sterowania. Używany do sterowania silnikami, napędami, wyłącznikami automatycznymi i innymi maszynami. Sterownik, do którego podpięte są wszystkie sygnały z sensorów i aktuatorów realizuje wszystkie funkcje, modele sterowania maszyną, procesem.

Opracowany system optymalizacji procesu flotacji mułów węglowych polega na dostosowaniu bieżących wartości parametrów flotacji do zmieniających się warunków wejściowych procesu. Podstawowym celem wzbogacania mułów węglowych jest utrzymanie na stałym (zadanym) poziomie zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych, poprzez ciągłe, automatyczne korygowanie wartości istotnych parametrów procesu. Na stopień zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych najintensywniej wpływają zmiany ilości powietrza technologicznego dostarczanego do procesu oraz prędkości obwodowej wirnika aeratora. Opracowano układ regulacji nadążnej, w którym wartość zadana powietrza jest optymalizowana w celu uzyskania żądanej zawartości popiołu w odpadach. W układzie tym powietrze jest główną wartością regulującą „popiół", natomiast obroty są wartością pomocniczą i ich zmiana następuje w przypadku, gdy zmiany powietrza w zadanym zakresie nie przynoszą pożądanego wpływu na wielkość zawartości popiołu w odpadach. Algorytm realizuje funkcję zwiększania lub zmniejszania wartości zadanej powietrza w określonych granicach, natomiast poza tymi granicami zwiększa lub zmniejsza zadaną wartość obrotów silnika. W celu swobodnej ingerencji w nastawy algorytmu opracowany został panel ustawień parametrów programu (rys. 9).



Rys. 9. Teoretyczny widok panelu ustawień parametrów programu [20, 21]

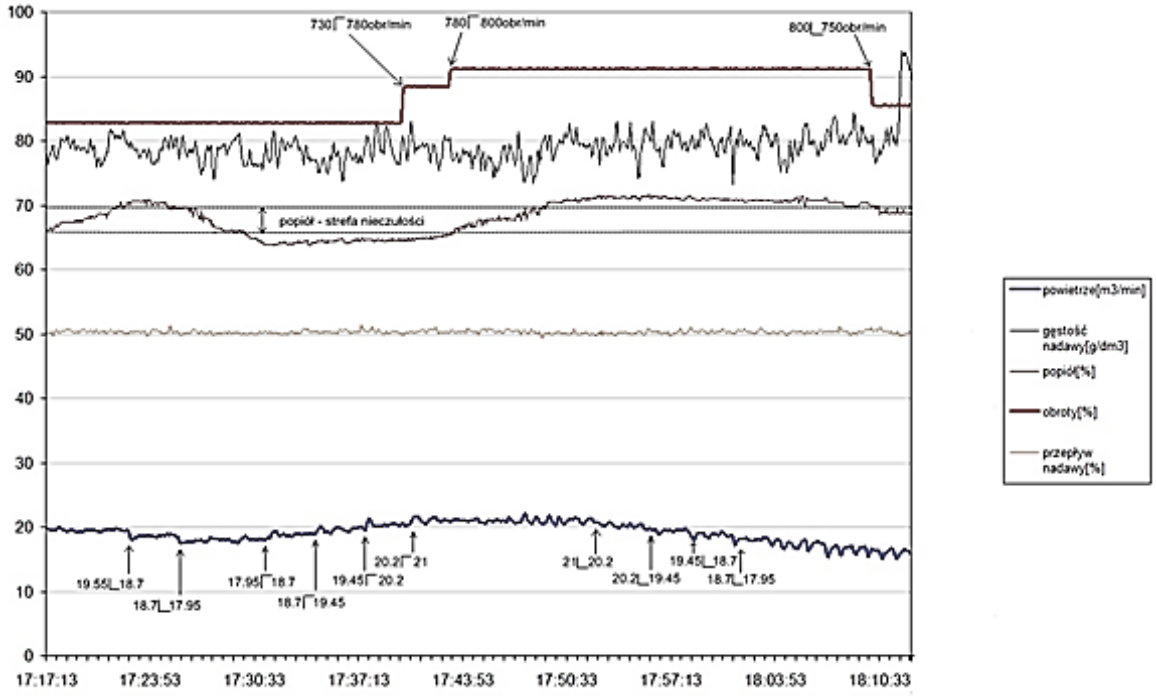
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Z pulpitu możliwa jest ingerencja w następujące parametry algorytmu:

- Ts – okres sprawdzania wartości popiołu w odpadach,
- PTG – POPIOL MAX – wartość górnego progu tolerancji,
- PTD – POPIOL MIN – wartość dolnego progu tolerancji,
- SPwyliczMAX – wartość maksymalna dodawanego powietrza,
- SPwyliczMIN – wartość minimalna odejmowanego powietrza,
- OBRMAX – wartość maksymalna dodawanych obrotów,
- OBRMIN – wartość minimalna odejmowanych obrotów.

Zaimplementowany w sterowniku PLC układ regulacji jest uaktywniany za pomocą przycisków, które umożliwiają włączenie i wyłączenie układu regulacji nadążnej lub włączenie funkcji sterowania każdą z wartości zadanych (powietrze, obroty) z osobna. Graficzną rejestrację pracy systemu mechatronicznego, sterowania procesem technologicznym poprzez sterowanie maszyną flotacyjną przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Teoretyczny widok panelu ustawień parametrów programu [20, 21]

System mechatroniczny, czyli maszyna, sensory, aktuatory, sterownik PLC z oprogramowaniem dąży do takiego stanu, aby zawartość popiołu w odpadach mieściła się w granicach między dolnym i górnym progiem zadanej tolerancji popiołu. System realizuje zadane funkcje optymalizujące proces technologiczny, a w sytuacji zidentyfikowanych przekroczeń reaguje zmianą parametrów i/lub sygnalizacją stanów alarmowych.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

6. Podsumowanie

Flotacja mułów węglowych, oprócz wzbogacania (koncentrat o wysokiej zawartości składnika użytecznego i niskiej zawartości popiołu od 4÷10%), zamyka i oczyszcza obieg wodny kopalni, stanowiąc ważny element ochrony środowiska naturalnego.

Duże flotowniki pracujące jako niezależne jednostki produkcyjne wyposażone w układy stabilizacji parametrów technologicznych (system mechatroniczny), gwarantują prawidłowy przebieg procesu, jak i wysoką jakość produktów. Urządzenia te mogą pracować w warunkach zdalnego sterowania, co stanowi zachętę do prowadzenia modernizacji flotacji w zakładach wzbogacania węgla.

Poprawę skuteczności flotacji mułów węglowych i obniżenie kosztów procesu wzbogacania węgla można osiągnąć stosując korzystne zmiany w technologii oraz wprowadzając nowe konstrukcje maszyn flotacyjnych wyposażone w nowoczesne elementy automatyki i sterowania (sensory, aktuatory, sterowniki PLC) systemy mechatroniczne.

Podstawowym celem wzbogacania mułów węglowych jest utrzymanie na stałym (zadanym) poziomie zawartości popiołu w odpadach flotacyjnych, poprzez ciągłe, automatyczne korygowanie wartości istotnych parametrów procesu.

System sterowania optymalizującego proces flotacji może być stosowany zarówno dla wzbogacania węgla, jak i może być podstawą systemu wzbogacania innych surowców mineralnych.

Literatura

1. Nowak Z.: Gospodarka wodno-mułowa w zakładach przeróbki mechanicznej węgla. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1982
2. Sablik J.: Flotacja węgli kamiennych, Wydawnictwo GiG, Katowice 1998
3. Wieniewski A., Myczkowski Z.: Osiągnięcia i udział w rozwoju przeróbki surowców mineralnych i odpadów Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach, Inżynieria Mineralna, Z. 2(40), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przeróbki Kopalin, Kraków, 2017, s. 15-24
4. Blaschke S., Blaschke W.: Technika wzbogacania węgla, AGH skrypty uczelniane 1048, wydanie drugie zmienione, Kraków 1986
5. Zachariasz T., Łuczak R., Szczerba E.: Możliwość zastosowania aeratorów typu WD w maszynach flotacyjnych serii IZ na przykładzie flotacji mułów węglowych w KWK Pniówek. Sprawozdanie IMN nr 6939/2011
6. Gramała J., Łuczak R., Szczerba E., Zachariasz T.: Badania wpływu konstrukcji aeratora na flotację grubych ziaren węgla we flotownikach typu IF. Sprawozdanie IMN nr 6740/09
7. Zachariasz T., Szczepaniak K., Łuczak R., Śmieszek J.: Możliwość modernizacji maszyn flotacyjnych IZ-12 w oparciu o aeratory WD-560 we flotacji mułów węglowych. Sprawozdanie IMN nr 7166/13
8. Szczerba E., Zachariasz T., Rudnicka B., Cichy K.: Badania wpływu konstrukcji wirnika maszyny flotacyjnej na parametry rozkładu współczynnika prędkości flotacji. Sprawozdanie IMN nr 6661/09
9. Wieniewski A., Zachariasz T., Szczepaniak K.: Poprawa efektywności flotacji mułów węglowych poprzez zastosowanie nowej konstrukcji aeratora maszyny flotacyjnej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 6 (520)/2014, str. 50-55

Open Access (CC BY-NC 4.0)

10. Wieniewski A., Zachariasz T.: Optimalization of coal slurry flotation in polish large size flotation machines of the IF type. Materiały na konferencję: International Mining Conference „Advanced Mining for Sustainable Development", Ha Long, 23-25 września 2010, Wietnam, s. 665-672
11. Zachariasz T., Gramała J., Szczerba E.: Określenie przydatności maszyn o przeciwprądowym przepływie dla flotacji mułów węglowych różnego pochodzenia. Nowoczesne technologie oraz zaawansowane materiały i wyroby w zrównoważonym rozwoju przemysłu metali nieżelaznych. Monografia PBZ-MNiSW-3/3/2006, IMN Gliwice 2010, str. 37-47
12. Wieniewski A., Zachariasz T., Bartoniek W., Yang R.: Doświadczenia z wdrażania wielkogabarytowych maszyn flotacyjnych do flotacji węgla. China Coal Engineering, Beijing 10/2009, str. 100-103
13. Zachariasz T.: Optymalizacja flotacji mułów węglowych w maszynach flotacyjnych typu IF, XVIII Konferencja „40 lat ZPMW KWK Jas-Mos 1969-2009" organizowana przez JSW S.A. i SITG, Wisła 2010
14. Olszewski M.: Urządzenia i systemy mechatroniczne. Podręcznik. Część 1. Wydawnictwo WSiP 2020
15. Olszewski M. i inni: Urządzenia i systemy mechatroniczne. Podręcznik. Część 2. Wydawnictwo REA s.j. 2009
16. https://www.cttemag.pl [dostęp 04 czerwca 2023]
17. http://enko.pl/pl/index.html [dostęp 04 czerwca 2023]
18. https://aplisens.pl/ [dostęp 04 czerwca 2023]
19. https://www.auma.com/pl/ [dostęp 04 czerwca 2023]
20. Steczkowski J., Zjawin T., Zachariasz T., Szczerba E., Gramała J.: Opracowanie systemu sterowania procesem flotacji w wielkogabarytowej maszynie flotacyjnej typu IF w KWK „Jas-Mos" I etap. Sprawozdanie IMN nr 6582/2008 jakości produktu końcowego
21. Woch M., Tomaka W., Zachariasz T., Łuczak R., Szczerba E.: Opracowanie systemu sterowania procesem flotacji w wielkogabarytowej maszynie flotacyjnej typu IF w KWK „Jas-Mos" II etap. Sprawozdanie IMN nr 6739/2009

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.2

Poprawa właściwości użytkowych węgli z Zakładu Górniczego Brzeszcze TAURON Wydobycie S.A. poprzez dodatek modyfikatora w postaci haloizytu

Robert Łaskuda – TAURON Wydobycie S.A.

Rafał Przystaś – TAURON Wydobycie S.A.

Zbigniew Jagiełło – TAURON Wydobycie S.A.

Józef Sołtys – Przedsiębiorstwo Techniczno-Handlowe INTERMARK

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono możliwości poprawy właściwości użytkowych węgli poprzez dodatek haloizytu ze złoża Dunino jako modyfikatora. Przedstawiono przebieg procesu spalania węgli różnych typów w kotłach z dodatkiem haloizytu lub bez dodatku, zmianę parametrów procesu spalania oraz analizę porównawczą spalin i popiołu. Opisano technologie sporządzania mieszanin węgla z haloizytem.

Słowa kluczowe: węgiel, groszek plus, spalanie, haloizyt

Improvement of the usable properties of hard coal from Zakład Górniczy Brzeszcze TAURON Wydobycie S.A. by adding a modifier in the form of halloysite

Abstract: The chapter presents the possibilities of improving of the usable properties of coals by adding halloysite from the Dunino deposit as a modifier. The course of the combustion process of various types of coals, which takes place in boilers with or without the addition of halloysite, change of combustion process parameters and comparative analysis of flue gas and ash were presented. Technologies for preparing mixtures of coal and halloysite were described.

Keywords: coal, groszek plus, combustion, halloysite

1. Wprowadzenie

TAURON Wydobycie S.A. jest jednym z kluczowych producentów węgla energetycznego w Polsce [1]. Skupia trzy zakłady górnicze w zachodniej Małopolsce oraz wschodniej części województwa śląskiego: ZG Brzeszcze w Brzeszczach, ZG Janina w Libiążu oraz ZG Sobieski w Jaworznie. W zakładach górniczych Sobieski i Janina wydobywany jest węgiel energetyczny typu 31.2 (węgiel płomienny). Węgiel wydobywany w Zakładzie Górniczym Brzeszcze jest klasyfikowany jako węgiel typu 33 i 34.1, czyli należy do węgli gazowych i gazowo-koksowych.

Głównymi odbiorcami węgla (około 80% produkcji) z zakładów górniczych TAURON Wydobycie S.A. jest energetyka zawodowa i ciepłownictwo.

Pozostała część to w większości sektor gospodarstw domowych, który w ostatnim czasie uległ znaczącej transformacji i dla tej grupy odbiorców TAURON Wydobycie S.A. realizował opisany w niniejszym rozdziale projekt poprawy własności użytkowych węgla.

Węgiel dla odbiorców indywidualnych produkowany jest w Spółce w trzech podstawowych sortymentach:

- **Kostka**
  63÷200 [mm], 22,0÷24,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Sobieski i ZG Janina.
- **Kostka II**
  63÷130 [mm], 22,0÷24,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Sobieski.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

- **Orzech**
  25÷80 [mm], 22,0÷24,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Sobieski i ZG Janina.
  25÷80 [mm], 28,0÷32,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Brzeszcze.
- **Groszek**
  5÷40 [mm], 22,0÷24,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Sobieski i ZG Janina.
  5÷40 [mm], 28,0÷32,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Brzeszcze.
- **Groszek II**
  5÷25 [mm], 22,0÷24,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Sobieski i ZG Janina.
  5÷25 [mm], 28,0÷32,0 [MJ/kg] - produkcja w ZG Brzeszcze.

Stosowane przez lata do ogrzewania w gospodarstwach domowych węgle o sortymentach grubych (kostka, orzech) w ostatnim czasie w dużym stopniu wyparte zostały przez węgle o drobniejszym ziarnie (groszki 0÷40 mm) lub wysokojakościowe odpowiednio przygotowane – groszki plus (6÷25 mm). Dzieje się tak, między innymi, za sprawą wzrostu świadomości ekologicznej społeczeństwa oraz Rządowego programu „Czyste powietrze" pozwalającego na sukcesywną wymianę w gospodarstwach domowych węglowych źródeł ciepła na bardziej wydajne i ekologiczne. Stare, „kopcące" kotły węglowe, które umożliwiają spalanie wszystkich rodzajów paliw, wymienia się na nowoczesne, w których proces i technika spalania jest prowadzona w sposób znacznie ograniczający wpływ na środowisko.

Tendencja zamiany tradycyjnych paliw węglowych na „groszki plus" będzie postępowała, na co dowodem może być system zachęt przygotowany przez Rząd (dopłaty nawet do 80% kosztów przy wymianie kotłów). Można zatem założyć, że w perspektywie kilku kolejnych lat zastaniemy sytuację, że segment klientów indywidualnych, którzy obecnie stosują tradycyjne sortymenty węglowe, będzie zastąpiony segmentem klientów na groszki plus.

Dostosowując się do zachodzących w tym sektorze zmian, w sierpniu 2017 roku TAURON Wydobycie S.A. uruchomił produkcję wysokojakościowych konfekcjonowanych paliw węglowych - **TAURON Ekogroszek oraz JARET Plus** (nazwa handlowa). Ze względu na konieczność uzyskania odpowiednich parametrów jakościowych paliwo przygotowywane jest z mieszanki wyselekcjonowanych wysokokalorycznych węgli z Zakładu Górniczego Brzeszcze oraz Zakładu Górniczego Sobieski [2]. W tym przypadku dużym ograniczeniem przy produkcji groszków plus o wysokich parametrach jakościowych (przede wszystkim wysokiej kaloryczności) jest spiekalność węgla pochodzącego z ZG Brzeszcze wyrażona wskaźnikiem RI na poziomie około 50.

Analizując możliwości poprawy parametrów jakościowych węgli produkowanych w ZG Brzeszcze przy zastosowaniu dostępnych modyfikatorów ustalono kilka potencjalnych kierunków prowadzenia prac. Najbardziej optymalnym rozwiązaniem było zastosowanie do tego celu szeroko rozpowszechnionego minerału ilastego - haloizytu.

Aby sprawdzić i potwierdzić właściwości haloizytu jako modyfikatora polepszającego parametry jakościowe węgli z ZG Brzeszcze, należało przeprowadzić szereg badań i testów. W tym celu TAURON Wydobycie S.A. podjął współpracę z firmą Przedsiębiorstwo Techniczno-Handlowe Intermark, właściciela kopalni haloizytu w Duninie, z którą od 2019 r. zrealizował pracę badawczo – rozwojową pn: *„Poprawa właściwości użytkowych ekogroszków produkowanych przez TAURON Wydobycie S.A."*

Głównym celem pracy było wykonanie prób spalania zmodyfikowanego węgla w poszczególnych fazach procesu na kotłach retortowych m.in. klasy Ecodesign oraz przeprowadzenie szczegółowych badań produktów spalania (popiołu i spalin) [3, 4].

Open Access (CC BY-NC 4.0)

W założeniach do przeprowadzonego projektu modyfikacji węgli przyjęto, że dzięki zastosowaniu haloizytu będzie można obniżyć spiekalność Groszku II z ZG Brzeszcze i zaoferować tak przygotowane paliwa użytkownikom nowoczesnych kotłów V generacji. Dodatkowo zmniejszając indeks Rogi w węglach z ZG Brzeszcze można będzie zwiększyć kaloryczność produkowanych w ZG Sobieski groszków plus uzyskując lepsze i wydajniejsze paliwo.

Ze względu na swoje właściwości fizyko-chemiczne dodatek haloizytu ma wpłynąć również na poprawę innych parametrów spalania, istotnych z punktu widzenia ekonomicznego i ekologicznego, w tym między innymi na:

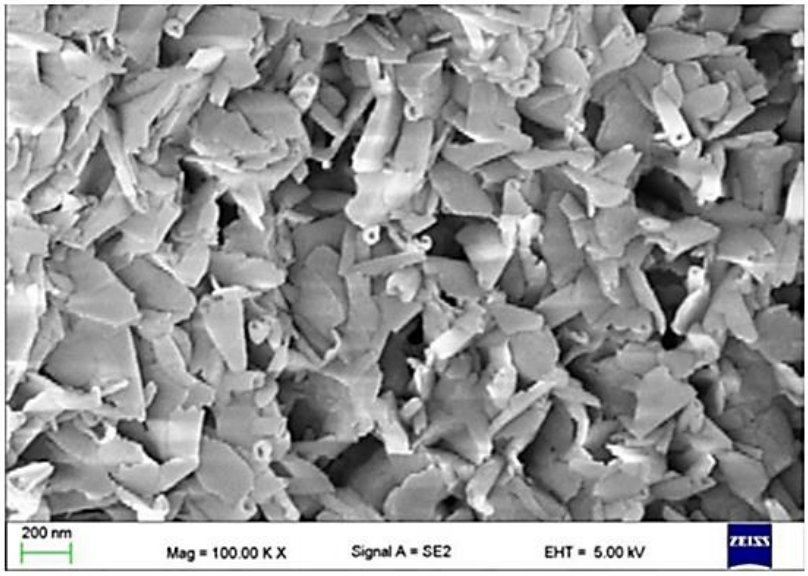
- wzrost sprawności spalania (mniejsza zawartość części palnych w popiele),
- redukcję emisji zanieczyszczeń do atmosfery,
- redukcję emisji szkodliwych gazów.

1.1. Charakterystyka haloizytu ze złoża Dunino

Haloizyt jest minerałem z grupy minerałów warstwowych. W Polsce jest on wydobywany przez Kopalnię Haloizytu Dunino w miejscowości o tej samej nazwie leżącej pod Legnicą. Polski haloizyt składa się z mieszaniny nanorurek i nanopłytek, luźno połączonych ze sobą przestrzennie (rys. 1). Haloizyt jest minerałem nieposiadającym wartości opałowej [3].

Haloizyt ze złoża Dunino odznacza się następującymi właściwościami:

- duża powierzchnia właściwa (surowy – 60÷70 m^2/g, aktywowany do 500 m^2/g),
- duża porowatość wynikająca z luźno aglomerowanej struktury,
- zdolność absorpcji metali ciężkich (m.in. rtęci) i szkodliwych gazów,
- duża ilość aktywnych centrów odgrywających sorpcyjną i katalityczną rolę,
- zachowanie struktury do temperatury ok. 1500°C.



Rys. 1. Mikroskopowy widok SEM haloizytu Dunino
(widoczna luźna przestrzennie mieszanina nanorurek i nanopłytek o dużej porowatości) [3]

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Haloizyt testowany był również w energetyce jako dodatek do spalania węgla, biomasy i RDF. Po przeprowadzonych próbach wykazano jego przydatność poprzez następujące działania:

- redukcja szlakowania i zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych kotłów,
- redukcja emisji pyłów, metali ciężkich (w tym rtęci) i gazów szkodliwych (NO_x, Cl, HCl),
- efektywne spalanie paliw uważanych za jakościowo gorsze, takich jak węgle o podwyższonej zawartości rtęci i chloru, RDF, biomasa typu AGRO,
- katalityczne działanie na proces spalania węglowodorów aromatycznych i alifatycznych.

1.2. Charakterystyka węgla z ZG Brzeszcze

Ze względu na duże skłonności do spiekania się w czasie spalania i tworzenia spieków koksowych, węgiel z ZG Brzeszcze nie znajduje szerokiego zastosowania w kotłach energetycznych (tabela 1). Wysoka liczba Rogi (40÷60) i wskaźnik wolnego wydymania (3) sprawiają, że przy wzroście temperatury w czasie procesu spalania ziarna tego węgla zwiększają swoją objętość nawet 2÷3 krotnie, a wydzielające się przy wzroście temperatury plastyczne związki smoliste powodują powstawanie dużych aglomeratów ziarnowych, których spalanie wymaga długiego czasu.

Głównym celem stosowania haloizytu jako dodatku do węgla jest redukcja spiekalności w procesie spalania w kotłach retortowych i rusztowych.

Charakterystyka węgli z TAURON Wydobycie S.A. sortyment groszek i groszek II

Tabela 1

	Brzeszcze		**Sobieski**		**Janina**	
	średnie	oferta	średnie	oferta	średnie	oferta
typ węgla	33.0-34.1		31.2		31.2	
sortyment	Groszek		Groszek II		Groszek II	
wartość opałowa [kJ/kg]	29 000	28 000 - 32 000	23 000	22 000 - 24 000	23 000	22 000 - 24 000
zawartość popiołu AR [%]	6-9		5-9		5-9	
zawartość wilgoci Wtr [%]	4-7		16-20		16-20	
zawartość siarki Sr [%]	0,3-0,6		0,9-1,4		0,7-1,4	
zawartość części lotnych V daf [%]	30,9		32,13		30,63	
spiekalność (RI)	**40-65**		**0-5**		**0-5**	
wskaźnik wolnego wydymania (FSI)	3,0		0		0	
dylatacja b [%]	-19		-		-	
zawartość fosforu [%]	<0,05		<0,05		<0,05	
zawartość chloru [%]	<0,2		<0,1		<0,7	

Open Access (CC BY-NC 4.0)

2. Proces spalania węgla z ZG Brzeszcze

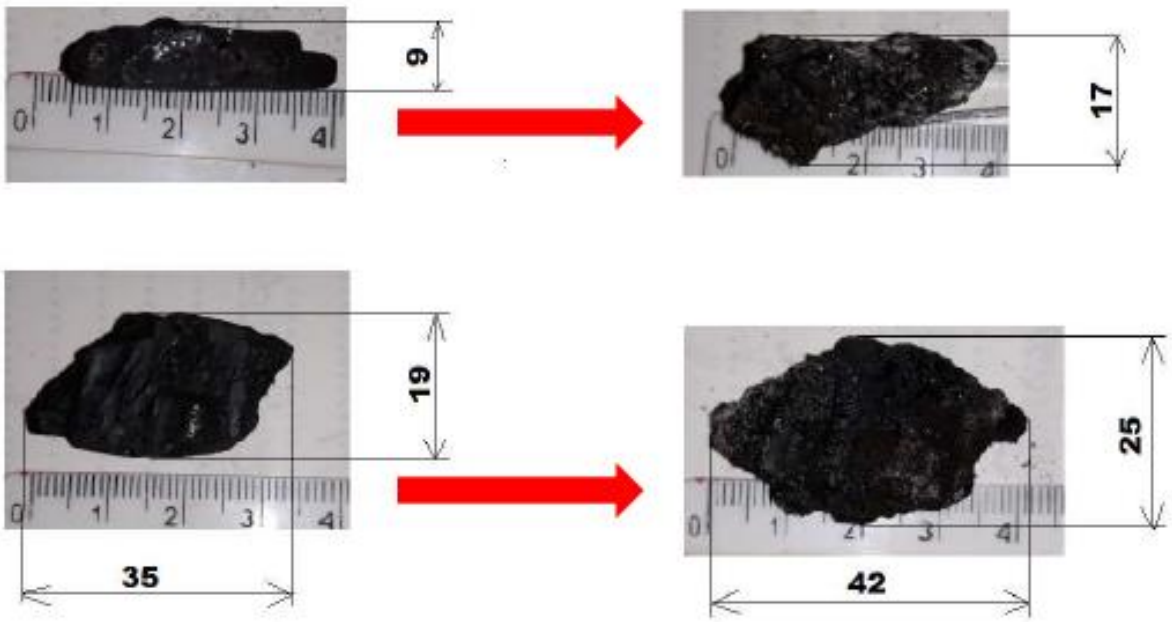
Do temperatury około 350°C w ogrzewanym węglu nie zachodzą żadne większe makroskopowo dostrzegalne zmiany. Początkowo wydziela się woda i następnie CO_2 i H_2S, a na końcu niewielkie ilości gazów palnych i smoły. Ilość tych produktów zależy od typu węgla i szybkości jego nagrzewania.

W zakresie 350÷500ºC (odgazowanie pierwotne) rozpoczyna się właściwy rozkład organicznej substancji węglowej, któremu towarzyszy intensywne wydzielanie się smoły, wody rozkładowej i gazu. Ilość tych substancji zależy głównie od stopnia uwęglenia węgla. Paliwa z grupy węgli koksujących (węgle z ZG Brzeszcze) przechodzą w stan plastyczny, którego istotą jest topnienie (mięknienie) składników bitumicznych tworzących z nietopliwymi składnikami huminowymi półpłynną masę plastyczną.

W temperaturze około 500°C zachodzi zjawisko resolidacji, czyli zestalenia się masy plastycznej i powstaje nietopliwy w wyższych temperaturach tzw. półkoks.

Na rysunku 2 pokazano zmianę objętości ziarna węgla z ZG Brzeszcze w zakresie temperatur 400÷500°C, czyli w początkowej fazie procesu spalania. Objętość ziarna wzrosła prawie 3-krotnie. Dodatkowym niekorzystnym czynnikiem jest wysoka zawartość w tym węglu inertynitu (ok. 40%).

Ten składnik węgla do spalania potrzebuje wysokiej temperatury i dużej ilości tlenu przy jego powierzchni.

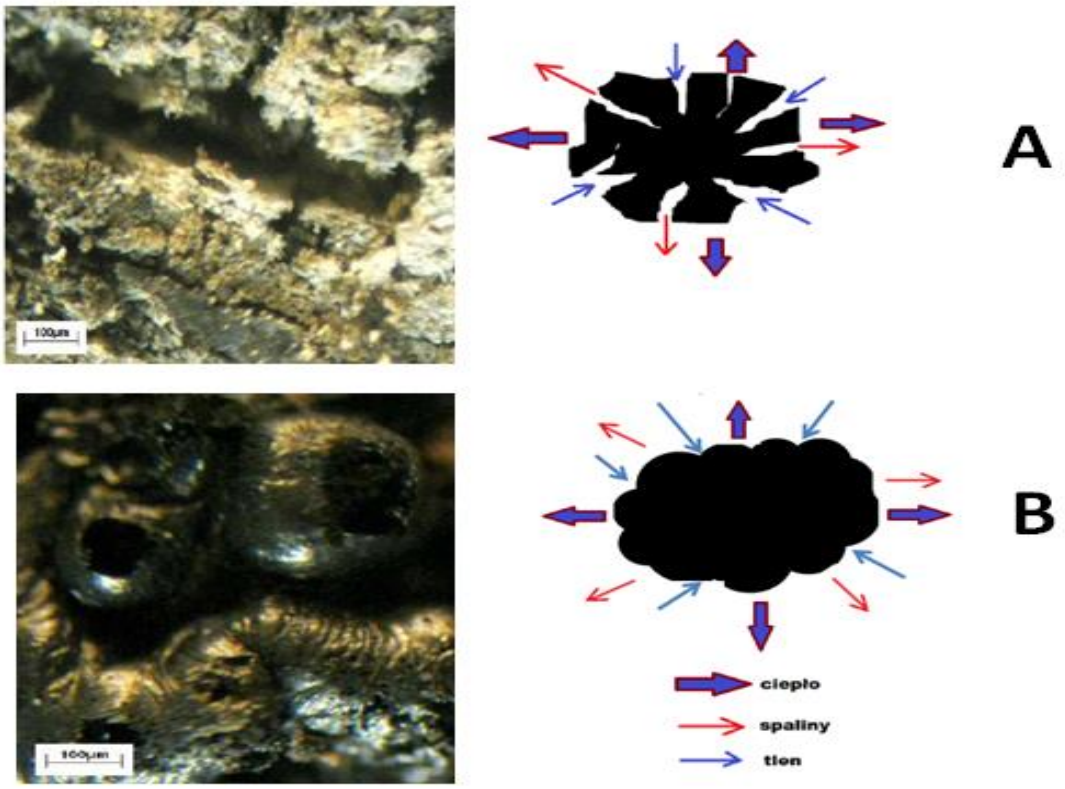


Rys. 2. Wzrost objętości ziarna węgla z ZG Brzeszcze w temperaturze ok. 400-500ºC [2]

Różnicę w procesie spalania węgla gazowego i gazowo-koksowego typu 33 i 34.1 (węgiel z ZG Brzeszcze) oraz węgla płomiennego typu 31.2 (węgiel z ZG Sobieski i ZG Janina) przedstawia rysunek 3.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 3. Różnica spalania ziaren węgla klasy 31/32 (A) i węgla klasy 33/34 (B) [2]

Węgiel gazowy i gazowo-płomienny spala się w sposób objętościowy (rys. 3A). Powstające w czasie odgazowania w stanie plastycznym (350÷500°C) szczeliny ułatwiają dopływ tlenu i odpływ spalin nie tylko z powierzchni, ale także z licznych szczelin powstających w całej objętości ziarna. Dzięki temu spalanie takiego ziarna przebiega dość szybko i jest ono determinowane praktycznie tylko przez ilość tlenu w pobliżu ziarna.

Zupełnie inaczej przebiega spalanie ziarna węgli gazowych i gazowo-koksowych (rys. 3B). W zakresie temperatury 350÷500°C z węgla wydziela się nie tylko gaz, ale powstaje także plastyczna masa, którą gaz wypycha na zewnątrz ziarna, pokrywając szybko jego powierzchnię. Część gazu uwalnia się tworząc kuliste bąble widoczne na dolnym zdjęciu mikroskopowym. Jeśli w pobliżu powierzchni znajduje się tlen, to następuje zapłon i spalanie gazu oraz części węgla z powierzchni ziarna.

Masa plastyczna na powierzchni jednego ziarna przy wzroście jego objętości łatwo tworzy aglomeraty z ziarnami sąsiednimi. Przykład takiego aglomeratu ilustruje rysunek 4. Spalanie tak dużego aglomeratu wymaga znacznie dłuższego czasu niż pojedynczych oddzielnych tworzących go ziaren.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

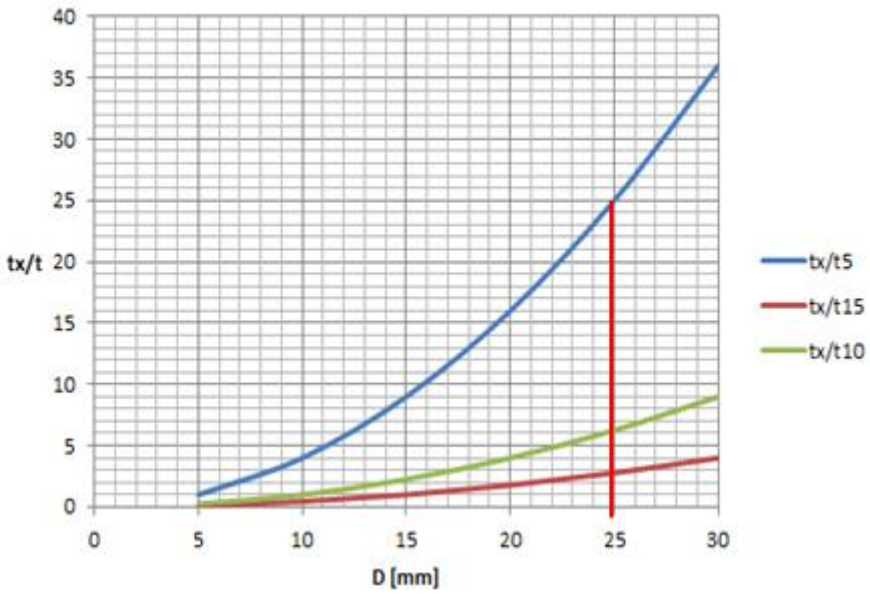
 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 4. Aglomerat koksowy ziaren węgla z ZG Brzeszcze utworzony w czasie procesu spalania [2]

Powierzchnia spalania tego węgla jest znacznie mniejsza niż węgla gazowego o porównywalnej wielkości i czas spalania takiego ziarna jest kilkakrotnie dłuższy w porównaniu z węglem gazowym. Mniejszy jest też strumień wydzielanego ciepła. Ponieważ czas przebywania węgla w komorze spalania kotła jest ograniczony, zatem taki spiek opuszcza komorę w dużym stopniu nie spalony powiększając stratę spalania.

Z kolei brak tlenu przy powierzchni ziarna powoduje wydzielanie się dużych ilości związków smolistych pokrywających powierzchnie ogrzewalne kotłów i zwiększających ilość związków organicznych w spalinach.

Istotny wpływ wymiaru ziarna na czas spalania ilustruje rysunek 5.



Rys. 5. Wpływ wielkości ziarna węgla na czas jego spalania

(tx/t5; tx/t10; tx/t15 – stosunek czasu spalania ziarna o średnicy D do czasu spalania ziarna o średnicy odpowiednio 5, 10 i 15 mm)

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Bardzo istotnym czynnikiem w procesie spalania jest także wielkość ziaren węgla, która ma bezpośredni wpływ na czas spalania. Obliczenia porównawcze wykonano dla ziaren o wymiarach 5, 10, 15 i 25 mm. Na przykład ziarno o wielkości D=25 mm będzie się spalać 25 razy dłużej niż ziarno o wielkości 5 mm, 6 razy dłużej niż ziarno o wielkości D=10 mm i 3 razy dłużej niż ziarno o wielkości 15 mm.

3. Możliwość poprawy procesu spalania węgla z ZG Brzeszcze

Powyżej opisane zjawisko tworzenia aglomeratów ziaren blokujących dopływ powietrza do ich wnętrza można w dużym stopniu zredukować poprzez uniemożliwienie tworzenia się aglomeratów, tak aby cała powierzchnia ziarna była powierzchnią swobodnej wymiany gazów i dopływu tlenu (lub dwutlenku węgla).

Można to uzyskać w następujący sposób:

- spalać węgle koksujące wraz z dodatkiem węgli klasy 31 i 32 niewykazujących zdolności koksowania,
- pokrywać powierzchnię węgla koksującego warstwą izolacyjną zapobiegającą tworzeniu się mostków międzyziarnowych przez plastyczną warstwę bitumiczną, przy czym warstwa ta powinna umożliwiać wymianę gazów pomiędzy wnętrzem ziarna a jego otoczeniem,
- stosować obie metody łącznie.

W ramach realizowanej w TAURON Wydobycie S.A. poprawy własności użytkowych węgli z Zakładów Górniczych Spółki, przeprowadzono szereg testów z różnego rodzaju dodatkami mającymi za zadanie w szczególności poprawić proces spalania węgli z ZG Brzeszcze.

Przeprowadzone próby wykazały, że przy zastosowaniu dodatku haloizytu jako modyfikatora zostaje uzyskany pożądany efekt obniżenia spiekalności.

Zastosowany w testach haloizyt zachował swe właściwości do temperatury ok. 1500°C, a więc znacznie powyżej temperatury spalania węgla w piecach i kotłach. Podczas prób wykazano między innymi, że dodany haloizyt zmodyfikował strukturę ziaren węgli z ZG Brzeszcze i podczas spalania miał znaczącą rolę na cały proces poprzez:

- utworzenie na powierzchni ziaren węgla warstwy izolacyjnej zapobiegającej tworzeniu się aglomeratów,
- utworzenie kanałów przepływu powietrza i spalin między ziarnami węgla,
- utworzenie filtru zatrzymującego w porowatej powierzchni warstewki i haloizytu na ziarnie węglowym emisji metali ciężkich (w tym także rtęci) i pyłu,
- zredukowanie ilości szkodliwych gazów w spalinach oraz zwiększenie sprawności spalania, na skutek redukcji ilości niespalonego węgla w popiele.

Powyższe pozytywne efekty uzyskano jednak przy dokładnym pokryciu powierzchni ziaren węgla odpowiednio cienką warstwą haloizytu oraz przy odpowiednich ustawieniach pracy kotłów.

Najlepszym sposobem pokrywania ziaren węgla haloizytem okazało się mieszanie go z węglem w postaci emulsji wodnej, przy czym ilość haloizytu zawiera się w granicach 1÷2% w stosunku do masy węgla.

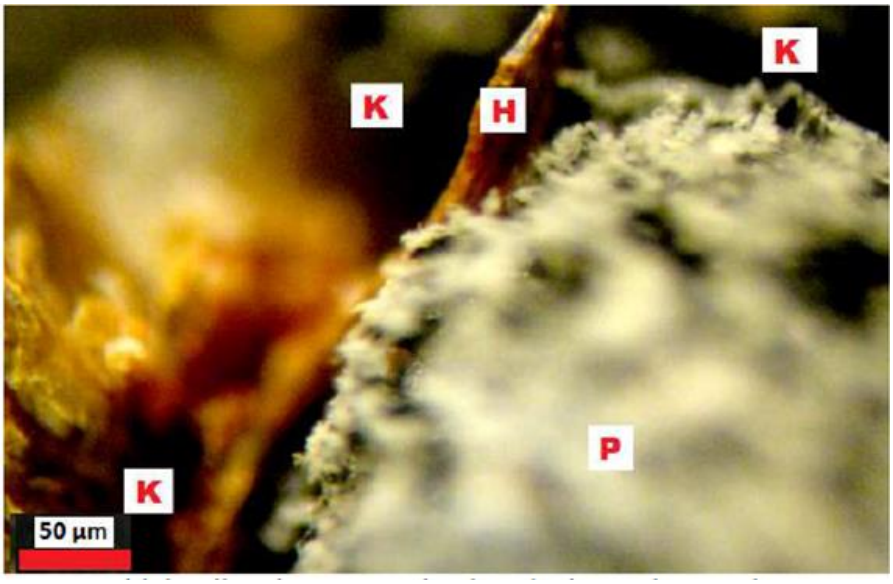
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

4. Wpływ haloizytu na proces spalania węgla klasy 33/34.1 z ZG Brzeszcze

4.1. Proces spalania

Rozpatrując przebieg procesu spalania w różnych kotłach dopuszczonych do eksploatacji, należy stwierdzić, że stosunkowo najgorsze warunki istnieją w przypadku kotłów typu retortowego. Przyczyną tego jest relatywnie krótki czas spalania węgla. Kontakt ziarna węgla z tlenem trwa zwykle kilka minut. Jeśli w tym czasie nie nastąpi całkowite i zupełne spalenie ziarna, to zwiększa to stratę niedopału zarówno w popiele, jak i w spalinach (np. sadza). Sytuację wyjątkowo pogarsza obecność spieków przechodzących do popiołu z dużą ilością niespalonego węgla. Kocioł nie otrzymuje wymaganej ilości ciepła i nie osiąga wymaganych parametrów. W przypadku węgla klasy 33/34.1 haloizyt radykalnie zmienia tę sytuację, co obrazują rysunki 6, 7, 8.



Rys. 6. Widok mikroskopowy SEM sąsiednich ziaren węgla 33/34.1 po procesie spalania
(H- płytka haloizytowa między ziarnami węgla, P-popiół, K- kanały przepływu powietrza i spalin)

Rys. 7. Widok spalonego ziarna węgla 33/34.1 z barierą haloizytową (brązowy kolor)
(zarówno pod powierzchnią warstwy haloizytu (A), jak i w środku ziarna (B) jest tylko popiół z całkowicie spalonego węgla)

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 8. Porównanie spalania w kotle retortowym węgla klasy 33/34.1 w stanie naturalnym (A) oraz tego samego węgla pokrytego haloizytem (B) (z prawej strony widoczny popiół z obu prób; jasny kolor komory spalania (B) wskazuje na prawidłowy przebieg procesu spalania w przeciwieństwie do pokrytej sadzą komory (A)) [2]

Rysunki pokazują, że haloizyt ma następujący wpływ na spalanie tego węgla:

1. Zapobieganie tworzeniu się spieków koksowych sąsiadujących ze sobą ziaren węgla dzięki tworzeniu barier międzyziarnowych. Warstewka haloizytu uniemożliwiając tworzenie się spieków sprzyja jednocześnie tworzeniu się kanałów międzyziarnowych, umożliwiających dopływ tlenu do powierzchni ziarna i odpływ spalin (rys. 6).
2. Umożliwienie całkowitego i zupełnego spalania węgla dzięki porowatej strukturze warstewki haloizytu, umożliwiającej wymianę gazów z otoczeniem ziarna węgla (rys. 7).
3. Przy spalaniu w retorcie naturalnego węgla 33/34.1 tworzą się aglomeraty ziarnowe, które nie są w stanie się spalić w czasie przebywania w strefie spalania i zostają przerzucane do popiołu, zawierając dużą ilość niespalonego węgla, zwiększając znacząco stratę spalania (rys. 8A). Ziarna pokryte haloizytem spala się całkowicie, tworząc sypki popiół z niewielką stratą spalania (rys. 8B).

Dzięki zastosowaniu haloizytu proces spalania węgla z ZG Brzeszcze praktycznie nie różni się od spalania węgli typu 31.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

Należy też podkreślić, że parametry węgla z ZG Brzeszcze wymagają zmiany ustawień parametrów pracy kotła w porównaniu z innymi węglami handlowymi. Ta sama ilość węgla z ZG Brzeszcze jest źródłem znacznie większej ilości energii cieplnej i wymaga większej ilości tlenu do spalania. Z tego też powodu należy zmienić czas podawania węgla, a także czas przerwy w podawaniu i wydajność dmuchawy. Badania wykazały, że ustawienia tych parametrów należy dobierać indywidualnie dla każdego kotła, ponieważ zwykle różnią się one wydajnością dmuchawy, ilością podawanego w czasie węgla, wymiarami retorty i sposobem podawania powietrza do strefy spalania. W czasie testów stwierdzono m.in., że zasypanie węgla 33/34.1 do kotła dotychczas spalającego węgiel 31/32 bez zmiany ustawień nie prowadziło do uzyskania dotychczasowych parametrów pracy kotła i dopiero zmiana ustawień dawała zadowalające rezultaty.

Ten warunek powinien być znany użytkownikom zmodyfikowanego węgla 33/24.1 w celu uniknięcia błędnych wniosków przy zmianie paliwa.

4.2. Wpływ haloizytu na produkty spalania

Pomiary temperatur charakterystycznych popiołu wykonano dla próbki węgla bez dodatku i z dodatkiem. Wyniki pomiarów zawiera tabela 2.

Charakterystyczne temperatury topliwości popiołu

Tabela 2

Parametr	33/34.1 naturalny	33/34.1 z haloizytem
temperatura spiekania	910°C	920°C
temperatura mięknienia	1240°C	1380°C
temperatura topnienia	1350°C	1490°C
temperatura płynięcia	1400°C	1500°C

Pomiar temperatur charakterystycznych popiołu, podobnie jak liczby Rogi, wykonuje się na próbce zmielonej, co nie odzwierciedla warunków spalania węgla pokrytego haloizytem (może to mieć znaczenie przy spalaniu tego węgla w kotłach fluidalnych i pyłowych).

Mimo tego stwierdzono, że dodatek podnosi wszystkie temperatury charakterystyczne popiołu, zwłaszcza temperaturę mięknienia i topnienia odpowiedzialne za tworzenie spieków żużlowych.

W czasie testów przy spalaniu węgla 33/34.1 z haloizytem nie zaobserwowano tworzenia się tych spieków, natomiast duża ilość spieków koksowych przy spalaniu węgla bez dodatku praktycznie uniemożliwiła stwierdzenie występowania spieków żużlowych przy tym paliwie [5].

4.3. Zawartość pyłów w spalinach

Dane z pomiarów zawartości pyłów w spalinach zostały przeliczone zgodnie z normą Ecodesign do stężenia 10% O_2.

Pomiary wykonywano na spalinach tuż za kotłem przed urządzeniami oczyszczania spalin. Wyniki wskazują na znaczący wpływ haloizytu na redukcję emisji pyłów (tabela 3). Redukcja ta jest w dużym stopniu wynikiem działania warstewki haloizytu na powierzchni ziarna jako filtra powierzchniowego, a także jako katalizatora spalania sadzy i innych węglowodorów.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

Zawartość pyłów w spalinach

Tabela 3

Parametr	33/34.1 naturalny	33/34.1 z haloizytem
pył całkowity [mg/Nm^3]	105,5	52,4
pył PM 10 [mg/Nm^3]	73,4	36,7
pył PM 2,5 [mg/Nm^3]	32,1	15,7

4.4. Wyniki pozostałych badań

Przedstawione powyżej wyniki badań w zakresie wykorzystania haloizytu Dunino są jednymi z wielu wyników badań prowadzonych od ponad 10 lat na różnych kotłach i z zastosowaniem różnych paliw. Potwierdzają one możliwość szerokiego wykorzystania tego dodatku w energetyce, zwłaszcza w okresie zaostrzających się przepisów emisyjnych. W trakcie dotychczasowych badań zaobserwowano wpływ haloizytu na:

1) **Emisję chloru** - w spalinach była mniejsza przy zastosowaniu haloizytu, który spowodował związanie tego pierwiastka w popiele. Związanie chloru przez haloizyt oznacza nie tylko jego mniejszą zawartość w spalinach, ale także mniejszą ilość KCl w popiele lotnym, który jest jednym z czynników powodujących zwiększenie skali korozji wysokotemperaturowej.
2) **Emisję rtęci i metali ciężkich** - dodatek haloizytu powodował wzrost zawartości rtęci w popiele lotnym, co oznacza zmniejszenie zawartości tego pierwiastka w spalinach.
3) **Ilość osadów na powierzchniach ogrzewalnych kotła** - zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła pogarszają sprawność kotła i zmniejszają jego moc. Przy spalaniu paliw (węgla, biomasy) z dodatkiem haloizytu zaobserwowano spadek ilości zanieczyszczeń o około 20%.
4) **Emisję NO_x i pyłu** - zaobserwowano znaczące zmniejszenie emisji pyłu i NO_x. Przy czym należy podkreślić, że parametry te nie były przedmiotem optymalizacji, a pomiary wykonano przy okazji innych badań.
5) **Redukcję emisji NO_x w spalinach** – specjaliści z Politechniki Śląskiej opracowali tzw. suchą metodę SNCR [6]. Polega ona na wdmuchiwaniu do kotła pyłu haloizytowego zawierającego suchy mocznik. Metoda jest prosta w stosowaniu i bezpieczna dla środowiska. Jej zaletą jest nie tylko redukcja NO_x w spalinach, ale także działanie uboczne haloizytu w zakresie redukcji emisji pyłów, metali ciężkich, skali zjawiska korozji wysokotemperaturowej oraz spiekania się złoża i popiołu. W badaniach uzyskano 52% redukcji NO_x.

5. Podsumowanie

Przedstawione w rozdziale wyniki badań w zakresie wykorzystania haloizytu Dunino potwierdzają, że węgiel z ZG Brzeszcze może być cennym paliwem dla kotłów rusztowych i retortowych.

Zalety haloizytu przedstawione w przytoczonych wynikach badań są podstawą do rozszerzenia prób o zastosowania tego typu zmodyfikowanego węgla także w ciepłowniach i elektrociepłowniach.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

Warunkiem uzyskania dobrych wyników w zakresie mocy, wysokiej sprawności spalania i niskiej emisji szkodliwych związków jest odpowiednie przygotowanie paliwa i dostosowanie parametrów pracy kotła do jego cech.

Dodatek haloizytu do węgla i innych paliw daje następujące rezultaty:

1) radykalna redukcja zjawiska tworzenia się spieków koksowych i żużlowych,
2) redukcja szlakowania i zanieczyszczania powierzchniowo ogrzewalnych kotłów,
3) redukcja emisji pyłów, metali ciężkich i szkodliwych gazów,
4) katalityczny wpływ na proces spalania węgla, RDF i biomasy,
5) poszerzenie możliwości gospodarczego wykorzystania popiołów (komponenty nawozów i materiałów budowlanych).

Modyfikator w postaci haloizytu jest minerałem łatwo dostępnym w kraju, a jego zasoby w złożu Dunino mogą zapewnić dostawy na dziesięciolecia.

Literatura

1. https://www.tauron-wydobycie.pl [dostęp 20 lutego 2023]
2. Raport z pracy badawczej: Poprawa właściwości użytkowych ekogroszków produkowanych przez TAURON Wydobycie S.A., Przedsiębiorstwo Techniczno-Handlowe Intermark, Gliwice 2020, Materiały niepublikowane
3. www.intermark.pl [dostęp 20 lutego 2023]
4. Raport z pracy badawczej: Advanced pretreatment and characterization of Biomass for Efficient Generation of heat and power, Politechnika Śląska, Uniwersytet w Stuttgarcie, Przedsiębiorstwo Techniczno-Handlowe Intermark, Heat and Power Engennering GmbH, BioEffGen 2018
5. Raport z pracy badawczej: Ocena wpływu dodatku haloizytu na proces żużlowania powierzchni ogrzewalnych kotła k4 op650 w el. RYBNIK, Politechnika Śląska, Gliwice 2011, Materiały niepublikowane
6. Wejkowski R. i in.: Full-Scale Investigation of Dry Sorbent Injection for NOx Emission Control and Mercury Retention, 2021 November, Energies, MDPI, vol. 14(22), pages 1-13. doi.org/10.3390/en14227787

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.3

Kierunki działań modernizacyjnych w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej Węgla Zakładu Górniczego Janina w TAURON Wydobycie S.A.

Dariusz Jachimczyk - TAURON Wydobycie S.A.

Mirosław Cholewa - TAURON Wydobycie S.A.

Streszczenie: Troska o ochronę środowiska stała się w tej chwili działaniem priorytetowym dla producentów energii. Coraz wyższe normy ekologiczne powodują, że zarówno kotły, w których dochodzi do spalania węgla, jak i sam węgiel muszą posiadać coraz lepsze parametry. W sytuacji politycznej, w której znalazła się Europa w najbliższym czasie nie ma możliwości w znaczny sposób ograniczyć pozyskiwania energii z węgla, dlatego też w ZG Janina podjęto działania mające na celu optymalizację procesów technologicznych wzbogacania węgla, poprzez ich modernizację i rozbudowę. Wprowadzenie w życie powyższych celów pozwoli na zmniejszenie wpływu zanieczyszczeń na środowisko poprzez ograniczenie emisji gazów i pyłów powstających podczas spalania węgla.

Słowa kluczowe: proces wzbogacania, osadzarka, wirówka, węgiel kamienny

Modernization actions in the Mechanical Processing Plant at the Janina Mining Plant in TAURON Wydobycie S.A.

Abstract: Concern for environmental protection has now become a priority for energy producers. Increasingly higher ecological standards mean that both the furnaces in which coal is burned, as well as the coal itself, must have possibly the best parameters. Considering the political situation of Europe in the near future, it is not possible to significantly reduce the production of energy from other sources than coal. This is why the Janina mine has taken measures to optimize technological processes through their modernization and expansion. The implementation of the above objectives will allow for reduce the impact of pollutants on the environment by limiting gas and dust emissions generated during coal combustion.

Keywords: separation process, jig, centrifuge, hard coal

1. Wprowadzenie

Działania modernizacyjne w zakładzie przeróbczym ZG Janina mają na celu zwiększenie potencjału technicznego oraz podniesienie konkurencyjności Spółki TAURON Wydobycie S.A. na rynku handlu węglem energetycznym, a także zachowanie ciągłości wydobycia i zabezpieczenie sprzedaży z Zakładu Górniczego Janina.

Powyższy cel zamierza się osiągnąć poprzez:

- modernizację i rozbudowę instalacji granulowania mułów, dzięki której będzie bezpośredni załadunek granulatu na wagony, a spodziewanym efektem będzie zwiększenie sprzedaży produktów w odpowiedniej klasie handlowej i zwiększenie przychodów z pozyskiwanych produktów,
- modernizację układu wzbogacania i odwadniania węgla w klasie ziarnowej 2-0 mm, której efektem będzie: wymiana spiral wzbogacających, zwiększenie skuteczności odwadniania miałów węglowych w klasie 2,0-0,0 mm oraz polepszenie kaloryczności produktów,

Open Access (CC By-NC 4.0)

- zabudowę nadtaśmowego separatora elektromagnetycznego, pozwalającą na całkowite wyeliminowanie części metalowych z urobku,
- zabudowę wag taśmowych na przenośnikach U-P1, U-291 oraz Bogda 1200J, kompatybilnych z systemem raportowania produkcji ERP SAP,
- wymianę przesiewaczy wibracyjnych.

Przed zakładem przeróbczym postawiono następujące ogólne cele i zadania, które są obecnie realizowane [1]:

- odbiór urobku z Upadowej „Janeczka" oraz wyciągu skipowego z szybu Janina III,
- klasyfikacja i transport urobku do Zakładu Wzbogacania i Odsiarczania Węgla,
- odbiór produktów wzbogacania węgla,
- załadunek produktów na środki transportowe,
- utrzymanie i gospodarka zwałami urobku surowego i produktów handlowych,
- załadunki węgla sortymentowego i miałów na samochody,
- ważenie załadowanych węglem jednostek transportowych - wagony i samochody,
- obsługa urządzeń transportu międzyoperacyjnego, urządzeń klasyfikujących, rozdrabniających i pomocniczych, systemu zbiorników produktów.

Szczegółowe przedstawienie obecnie realizowanych procesów i działań:

- rozdzielenie na mokro klasy 200-0 mm na klasy 200-20 mm i 20-0 mm na zabudowanych posobnie przesiewaczach wibracyjnych typu PWK1-2,4x6,3 i PWP1-2,6x4-5 z natryskami oddzielnie w systemie I i II,
- wzbogacanie w cieczy ciężkiej klasy 200÷20 mm,
- klasyfikację miału surowego 20-0 mm na klasy ziarnowe 20-2 mm i 2-0 mm na zabudowanych przesiewaczach wibracyjnych typu WZ1P-2,6x6,0 x 2 szt.,
- trójproduktowe wzbogacanie klasy ziarnowej 20-2 mm w osadzarce miałowej OM 2,5x7,5P/L,
- klasyfikację miału surowego 2-0 mm, na klasy ziarnowe 2-0,063 mm oraz 0,063-0 mm, w bateriach hydrocyklonowych Krebs,
- trójproduktowe wzbogacanie klasy ziarnowej 2-0,063 mm na wzbogacalnikach zwojowych Reinhardt'a,
- odwadnianie produktów wzbogacania na przesiewaczach wibracyjnych PWE1-2,0x5,0 x 4 szt.,
- oczyszczenie wód i zagęszczanie mułów w klasie 0,063-0 mm w osadnikach Dorr'a DN=40 m oraz osadniku z płytami pochylonymi LTE 1140-12/6-F16,
- odwadnianie mułów w klasie 0,063-0 mm na komorowych prasach filtracyjnych ROW-570 x 6 szt. i RZN-1500x2000 x 5 szt.,
- obsługa urządzeń transportu międzyoperacyjnego, urządzeń wzbogacających, klasyfikujących, kruszących i innych dodatkowych - obiegu wodno-mułowego, urządzeń filtrujących muły itp.,
- transport i załadunek produktów pochodzących ze wzbogacania węgla,

Open Access (CC By-NC 4.0)

- odbiór i załadunek kamienia z robót przygotowawczych z szybu Janina IV,
- zagospodarowanie odpadów pochodzących ze wzbogacania węgla (kamień i muły),
- produkcja mieszanek kruszywowo-spoiwowych na mobilnej instalacji do produkcji mieszanek kruszywowo-spoiwowych,
- produkcja granulatu z mułów węglowych na instalacji do granulowania mułów węglowych,
- wysyłka produktów wzbogacania,
- obsługa urządzeń ważących - wagi taśmowe, samochodowe, kolejowe.

2. Działania modernizacyjne w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej Zakładu Górniczego Janina

2.1. Modernizacja instalacji do granulowania mułów dla TAURON Wydobycie S.A. - ZG Janina

Planowana modernizacja instalacji do granulowania mułów obejmuje: budowę układu transportu granulatu z instalacji granulowania do stacji przygotowania z załadownią wraz z układem jego kontrolowanego dozowania do produktu handlowego. Efektem zrealizowania zadania będzie zwiększenie sprzedaży węgla w dedykowanej dla odbiorców klasie handlowej.

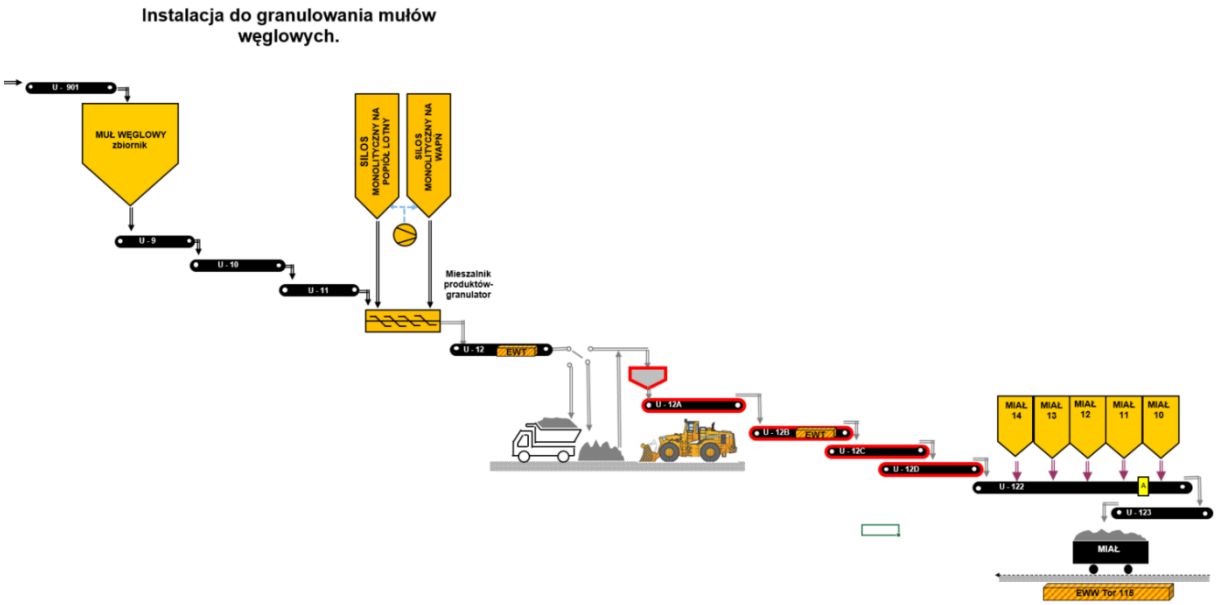
Rozbudowa instalacji granulowania mułów wiąże się bezpośrednio z dostosowaniem istniejącej infrastruktury ZPMW do zabudowy nowych maszyn i urządzeń oraz zabudowę maszyn i urządzeń w nowych obiektach (rys. 1).

Planowana modernizacja obejmować będzie:

- aparaturę kontrolno-pomiarową, która zostanie włączona w istniejące układy sterowania i wizualizacji,
- sterowanie urządzeniami technologicznymi w różnych trybach m.in. zdalnym i lokalnym,
- wyposażenie projektowanego przenośnika U-12B w wagę technologiczną, czujniki pomiarowe i pozostałą aparaturę wyposażenia wagi,
- nadzór nad procesem przy wykorzystaniu kamer CCTV i oparcie telewizji przemysłowej o system CCTV IP.

Open Access (CC By-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 1. Schemat techniczno–maszynowy modernizacji instalacji do granulowania mułów w ZG Janina [2]

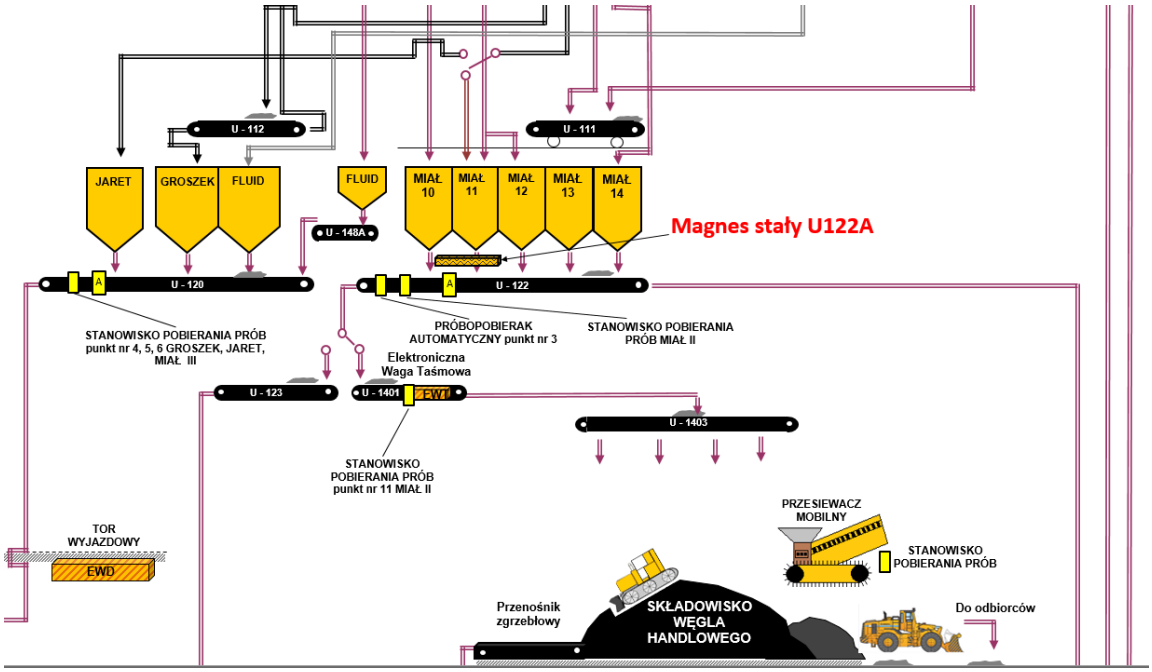
2.2. Planowana zabudowa separatora elektromagnetycznego taśmowego dla TAURON Wydobycie S.A. - ZG Janina

Planowana realizacja zabudowy separatora elektromagnetycznego taśmowego związana jest z dostosowaniem parametrów jakościowych produkowanego węgla handlowego do wymagań odbiorców. Realizacja ta pozwoli w sposób całkowity wyeliminować zanieczyszczenia obce występujące w węglu o charakterze ferromagnetycznym.

Obecnie Zakład Przeróbki Mechanicznej Węgla w ZG Janina posiada zainstalowane dwa separatory elektromagnetyczne typu EDOP-13 i SNK 140-150 zabudowane na początku ciągu technologicznego tj. na nadawie kierowanej z dołu na zakład przeróbczy oraz jeden magnes stały typu PMT 120-150G zabudowany nad przenośnikiem taśmowym U-122 (rys. 2), którym transportowany jest produkt handlowy (miał węglowy) do wagonów. Separacja metali ze względu na wielkość ziaren, grubość i konsystencję warstwy na tym przenośniku taśmowym przebiega w sposób prawidłowy, a zabudowa nowego separatora magnetycznego, który będzie również zabudowany nad przenośnikiem taśmowym U-122, pozwoli w sposób jeszcze bardziej dokładny na odseparowanie najdrobniejszych zanieczyszczeń typu stalowego.

Open Access (CC By-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 2. Schemat zabudowy magnesu stałego typu PMT 120-150G nad przenośnikiem taśmowym U-122

2.3. Realizowana modernizacja układu wzbogacania i odwadniania węgla w klasie ziarnowej 2-0 mm w ZG Janina

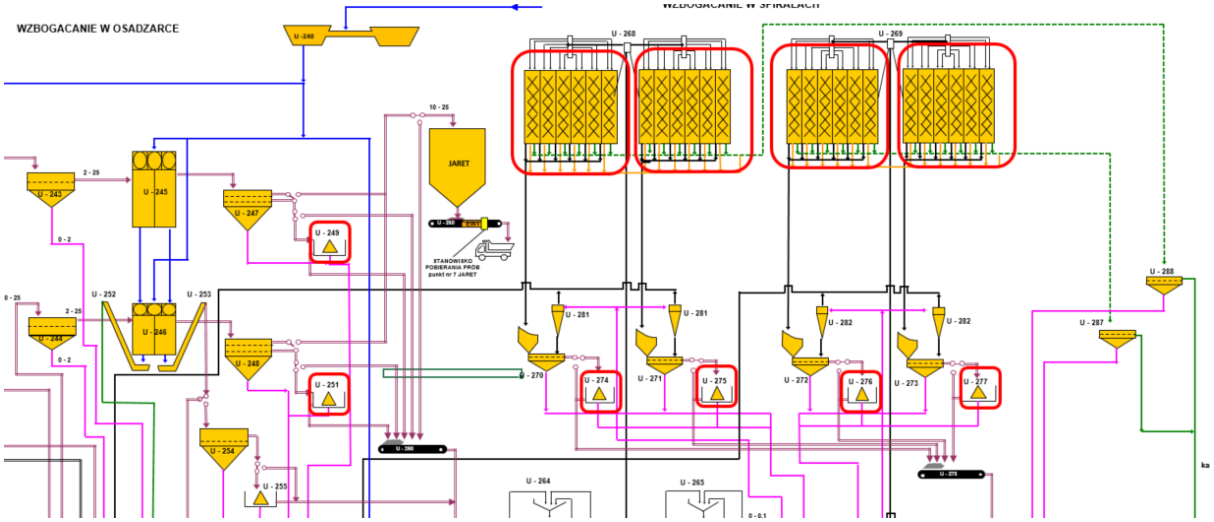
Realizowana modernizacja obejmuje (rys. 3):

- wykonanie projektu budowlanego wielobranżowego przebudowy węzła wzbogacania węgla w klasie ziarnowej 2-0 mm w obiekcie kompleksowym Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla,
- uzyskanie wymaganych decyzji administracyjnych właściwego organu nadzoru budowlanego,
- wykonanie niezbędnych robót budowlanych, elektrycznych i instalacyjnych,
- dostawę i zabudowę baterii spiral typu Krebs GPX2/12; U-268 i U-269 wraz z instalacjami nadawczymi,
- dostawę i zabudowę wirówek EBW-48 do odwadniania koncentratu 0,0-2,0 mm o większej wydajności i skuteczności odwadniania względem obecnie eksploatowanych wirówek odwadniających typu HTS-40,
- dostawę i zabudowę wirówek odwadniających WOW 1.3 ze zmodyfikowanym systemem wibratorów,
- wykonanie instalacji odbioru koncentratu ze spiral U-268 i U-269 celem skierowania go do odwadniania na sitach łukowych i przesiewaczach PWE1-2,0x5,0 x 4 szt.,
- wykonanie układu zsuwni z przesiewaczy U-270, U-271 i U-272, U-273 na wirówki U-274, U-275, U-276 i U-277 lub na przenośnik taśmowy nr U-278,

Open Access (CC By-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

- wykonanie instalacji odbioru odpadów ze spiral U-268 i U-269 celem skierowania do odwadniania na przesiewaczach PWE1-1,4x4,0 x 2 szt.,
- wykonanie zsuwni z wirówek U-274, U-275, U-276 i U-277 na przenośnik taśmowy U-278, zsuwni z wirówki U-249 i U-251 na przenośnik taśmowy U-260 oraz zsuwni nadawy z przesiewaczy U-247 i U-248 do wirówek U-249 i U-251.



Rys. 3. Schemat techniczno–maszynowy modernizacji układu wzbogacania i odwadniania węgla w klasie ziarnowej 2-0 mm w ZG Janina [3]

2.4. Planowana zabudowa wag taśmowych dla TAURON Wydobycie S.A. - ZG Janina

Planowana zabudowa wag technologicznych na przenośnikach taśmowych U-P1, U-291 oraz na przenośniku Bogda 1200J ma za zadanie usprawnienie systemu raportowania i bilansowania produkcji w systemie ERP SAP.

2.5. Planowana wymiana przesiewaczy wibracyjnych dla TAURON Wydobycie S.A. - ZG Janina

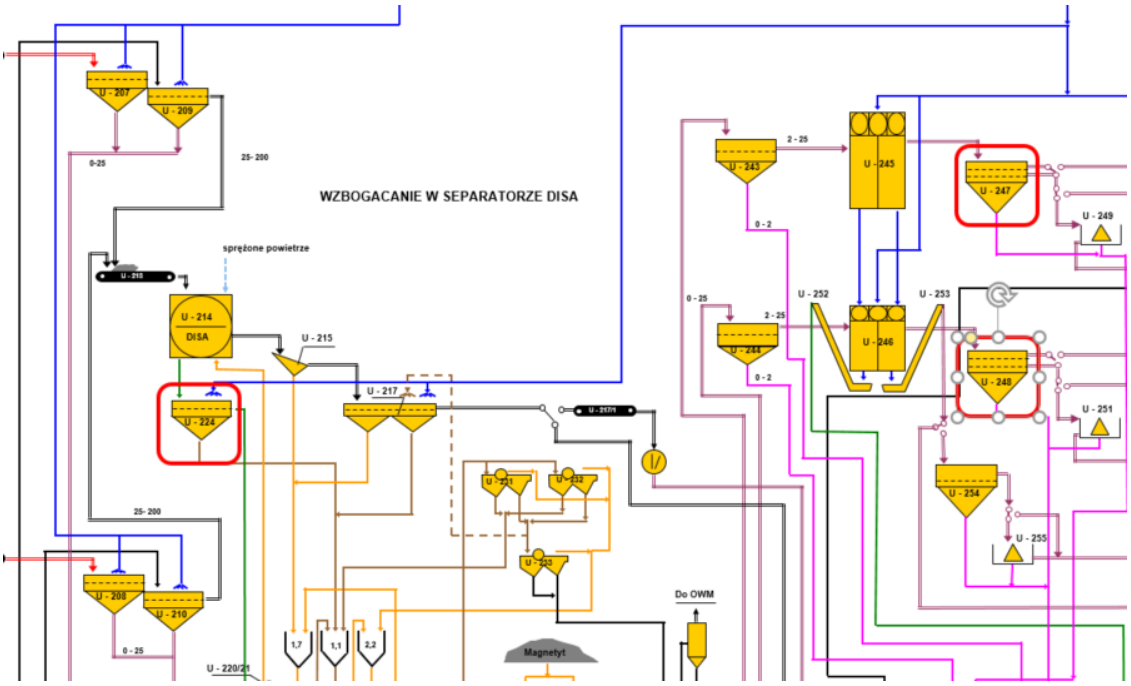
Planowana dostawa wraz z wymianą przesiewaczy wibracyjnych obejmować będzie:

- jednopokładowy przesiewacz wibracyjny PWP1-2,2x5,25 przeznaczony do odwadniania odpadu kamiennego w klasie 25-200 mm na stanowisku pracy U-224 (rys. 4),
- dwupokładowy przesiewacz wibracyjny PWE2-2,4x4,8 przeznaczony do odwadniania węgla wzbogaconego w klasie 0-25 mm na stanowiskach pracy U-247 i U-248 (rys. 4),
- jednopokładowy przesiewacz wibracyjny PWE1-2,0x5,0 oraz zespół sita łukowego przeznaczone do odwadniania węgla wzbogaconego w klasie 0,3-2,0 mm na stanowiskach pracy U-270, U-271, U-272 i U-273 (rys. 5).

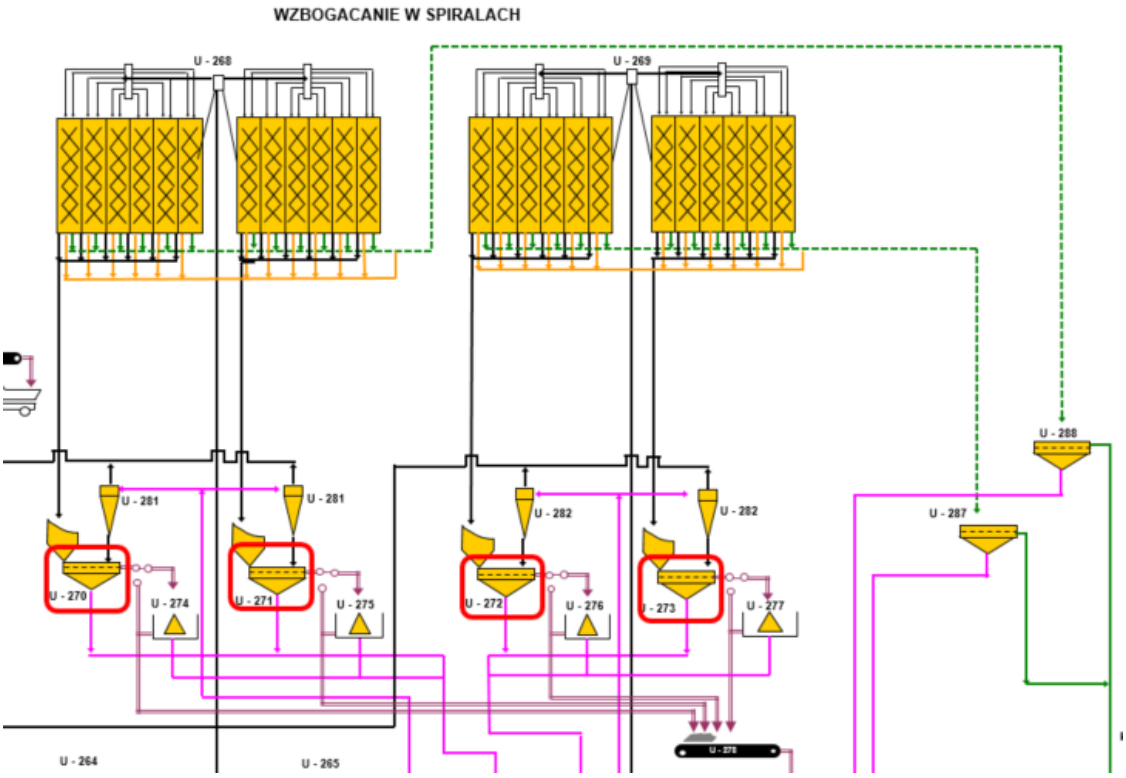
Zakup nowych przesiewaczy wibracyjnych, umożliwi zwiększenie bezpieczeństwa utrzymania ruchu zakładu oraz podniesienie klasy produktu końcowego.

Open Access (CC By-NC 4.0)

ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 4. Schemat zabudowy przesiewaczy wibracyjnych na stanowiskach pracy U-224, U-247 i U-248



Rys. 5. Schemat zabudowy przesiewaczy wibracyjnych na stanowiskach pracy U-270, U-271, U-272 i U-273

Open Access (CC By-NC 4.0)

3. Podsumowanie

Wymienione w tym zakresie modernizacje, są podstawą funkcjonowania ZG Janina w najbliższych latach. Podejmowane działania przyczynią się do usprawnienia procesu produkcji i optymalizacji kosztów. W procesie przeróbki węgla, ZG Janina dąży do poprawy wydajności procesów i minimalizuje ilości powstawania odpadów, stąd wyznaczone cele są niezbędne dla poprawy jakości produktu końcowego oraz płynności ruchu Zakładu Górniczego Janina. Powyższe działania modernizacyjne przeprowadzane w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej spowodują otrzymanie węgla handlowego na wyższych standardach jakościowych. Wzbogacanie frakcji ziarnowej w przedziale 2-0 mm oraz od 20-2 mm przyczyni się do zwiększenia wartości opałowej i spadku wilgoci całkowitej, wpłynie również korzystnie na zmniejszenie zawartości popiołu [4].

Literatura

1. Blaschke S.: Przeróbka mechaniczna kopalin, Wyd. Śląsk, 1972
2. Program funkcjonalno-użytkowy pn. „Rozbudowa instalacji do granulowania mułów w TAURON Wydobycie S.A. - ZG Janina” wykonany przez Biuro Projektowo-Inwestycyjne PROINVEST, 44-207 Rybnik, ul. Podmiejska 95 (materiały niepublikowane)
3. Program funkcjonalno-użytkowy pn. „Przebudowa węzła wzbogacania węgla w klasie ziarnowej 2-0 mm w TAURON Wydobycie S.A.” wykonany przez PKiMSA CARBOAUTOMATYKA S.A., 43-100 Tychy, ul. Budowlanych 168 (materiały niepublikowane)
4. Blaschke W.: Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne, Wyd. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2009

Open Access (CC By-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.4

Rekuperacja ciepła z istniejących i budowanych składowisk odpadów pogórniczych w aspekcie profilaktycznym i odzysku energii

Jacek Korski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono, w oparciu o dostępne źródła, analizy podstawowych czynników wywołujących pożary składowisk odpadów pogórniczych z kopalń węgla. Na podstawie analizy dostępnej wiedzy o przyczynach pożarów składowisk odpadów pogórniczych z kopalń węgla przedstawiono koncepcję rozwiązania technicznego łączącego w sobie funkcjonalność w zakresie prewencji pożarowej i możliwości odzysku ciepła z naturalnych procesów powodujących jego wydzielanie. Zaproponowane rozwiązanie ma charakter zintegrowany, bowiem obejmuje cykl spójnych w całym cyklu życia składowiska ciąg działań i rozwiązań technicznych, którego efektem ma być najpierw niedopuszczenie do powstania ognisk pożarowych i jednocześnie zapewnienie późniejszej możliwości wykorzystania składowiska jako źródło ciepła do lokalnego wykorzystania.

Słowa kluczowe: składowiska odpadów górniczych, odzysk ciepła, pożary składowisk odpadów, prewencja pożarowa

Heat recovery from old and under construction coal waste dumps in terms of prevention and energy recovery

Abstract: In chapter were analyzed, basing on available sources a literature and practical experiences main factors of coal mining waste dumps. O this knowledge is presented new idea of technical solution integrating functionality in waste dumps fire prevention and heat recovery from this dump in full life cycle. As first proposed solution ought to be a fire prevention and to give availability for heat recover for local use.

Keywords: coal waste dumps, heat recovery, waste dump fires, fire prevention

1. Wprowadzenie

Składowiska odpadów pogórniczych z operacji podziemnych i procesów wzbogacania (oczyszczania) węgla stanowią w wielu zagłębiach węglowych nieodłączny element krajobrazu. Jednak wraz z upływem czasu i rozwojem społecznym dostrzegać zaczęto wady związane z takim sposobem zagospodarowania tej grupy odpadów. Jedną z wad są występujące często pożary takich składowisk związane z obecnością w nich substancji węglowej. Pożary te są czasami źródłem emisji niebezpiecznych gazów i par oraz uciążliwości zapachowej [1, 2].

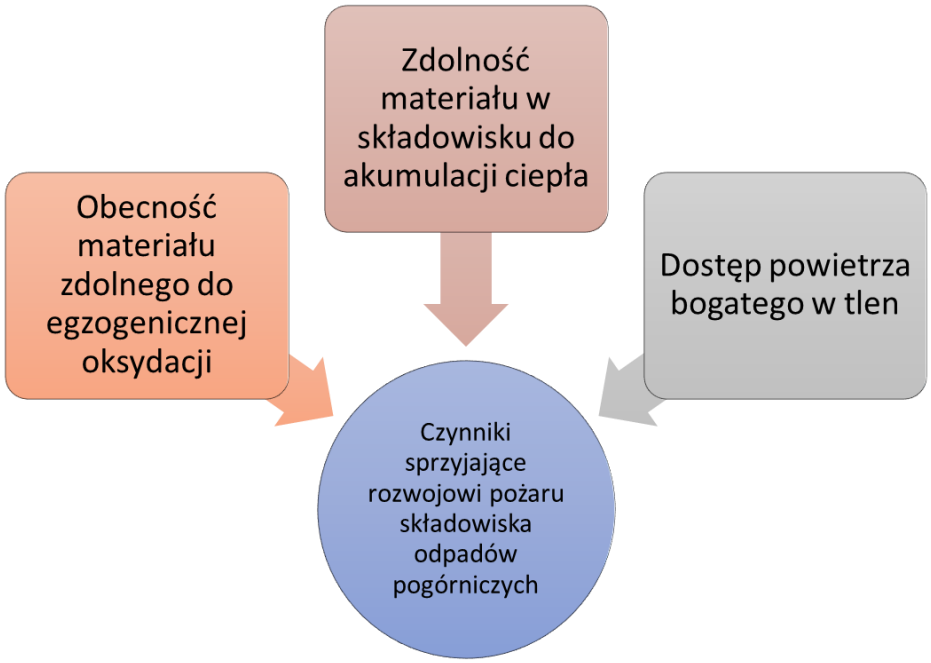
2. Pożary składowisk odpadów pogórniczych z kopalń węgla – przyczyny

W materiale odpadowym z robót górniczych i procesów wzbogacania często występuje substancja węglowa, której udział objętościowy może przekraczać nawet 15%. Bardzo często ta substancja węglowa ma skłonność do endotermicznego utleniania się. W sprzyjających warunkach wydzielające się w procesie samoistnego utleniania węgla ciepło jest gromadzone w składowisku i może doprowadzić do osiągnięcia temperatur powodujących jego zapalenia. Na rysunku 1 pokazano podstawowe czynniki, które mogą doprowadzić do samozapalenia węgla w składowisku odpadów. Prowadzono wiele badań na temat warunków i genezy tego procesu z zastosowaniem, między innymi Oksyreaktywnej Analizy Termalnej (OTA) [3, 4, 5]. Pomocne w ocenie skłonności materiału zgromadzonego na składowiskach odpadów z kopalń węgla (kamiennego i brunatnego) mogą być także badania związane z oceną

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

skłonności tych węgli do samozapalenia metodami stosowanymi w prewencji pożarowej w kopalniach podziemnych [6], choć OTA wydaje się metodą bardziej wiarygodną. Dla zaistnienia pożaru składowiska odpadów górniczych z kopalń węgla kamiennego konieczne jest łączne wystąpienie pokazanych na rysunku 1 czynników. Należy przy tym zauważyć, że skłonności takich odpadów do samozagrzewania nie da się wyeliminować w już zdeponowanym materiale. Konieczne jest zatem wyeliminowanie przynajmniej jednego z pozostałych czynników sprzyjających powstaniu i rozwojowi pożaru składowiska odpadów pogórniczych z kopalń węgla (kamiennego lub brunatnego). Zagadnienie to jest bardzo trudne do zrealizowania zwłaszcza w przypadku składowisk o bardzo dużych objętościach.



Rys. 1. Główne czynniki sprzyjające pożarowi składowiska odpadów z kopalń węgla

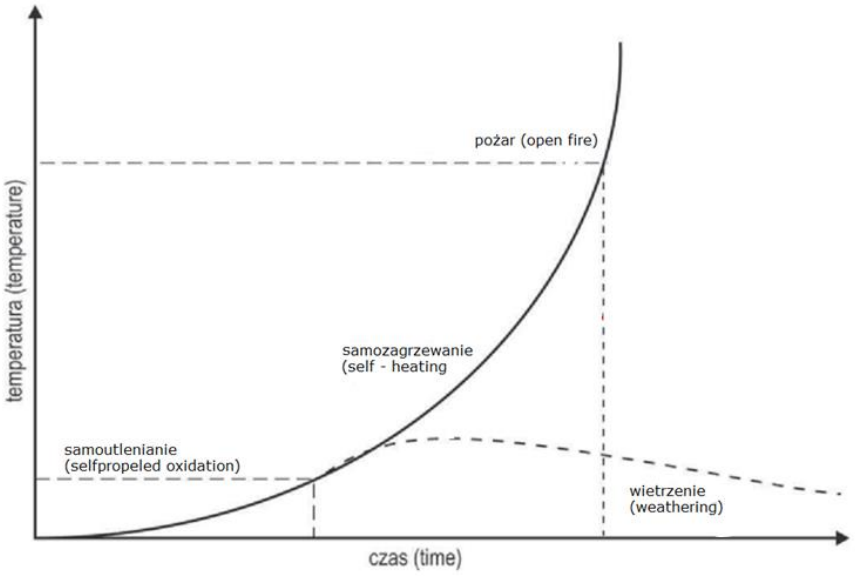
W związku z faktem, iż pożary składowisk odpadów pogórniczych z kopalń węgla występują od bardzo dawna zagadnienie to jest bogate w obserwacje [7, 8].

2.1. Obecność w masie składowanych materiałów substancji węglowej skłonnej do samoutleniania

Odpady z procesów oczyszczania (wzbogacania) urobku węglowego oraz czasami urobek z robót udostępniających i przygotowawczych trafiają na składowiska odpadów. Zawierają one z różnym udziałem masowym substancję węglową, której materiał często jest skłonny do samoutleniania się w kontakcie z powietrzem atmosferycznym. Proces ten ma charakter procesu endogenicznego i w pewnych sytuacjach materiał składowiska zaczyna się samozagrzewać, doprowadzając czasami do powstania ogniska pożarowego. Przebieg takiego procesu pokazano na rysunku 2 [9].

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 2. Przebieg procesu powstania pożaru składowiska odpadów pogórniczych z kopalń węgla kamiennego [9]

Proces samoutleniania materiału węglowego bez samozagrzewania tego materiału prowadzi do jego naturalnego wietrzenia. Nie wszystkie węgle kopalne mają jednakową skłonność do samoutleniania [3].

2.2. Zdolność materiału zgromadzonego w składowisku do akumulowania ciepła

W materiale deponowanym w składowisku, oprócz węgla, występuje głównie materiał skalny ze skał tworzących otoczenie pokładu węgla lub występujący w pokładzie, czyli tworzące cyklotem węglowy, głównie: iły, łupki ilaste, łupki piaszczyste i piaskowce [10, 11, 12], które mają dobre własności izolacyjne. Sprzyja to akumulowaniu ciepła wydzielającego się w trakcie samoutleniania substancji węglowej. Dlatego bardzo istotne jest takie prowadzenie procesów wzbogacania (oczyszczania) węgla surowego, aby zawartość węgla w odpadach deponowanych na składowisku była możliwie najmniejsza i możliwie równomiernie rozproszona w składowanym materiale.

2.3. Dostęp powietrza bogatego w tlen

Tlen zawarty w powietrzu atmosferycznym jest koniecznym czynnikiem do uruchomienia procesu samoutleniania węgla występującego w składowanych odpadach. Powietrze dostające się do bryły składowiska dostarcza z jednej strony tlen do procesu samozagrzewania, ale, w większych ilościach może być czynnikiem chłodzącym. Wobec braku możliwości kontroli przepływu powietrza przez bryłę składowiska należy jednak dążyć generalnie do ograniczania dostępu powietrza atmosferycznego do bryły składowiska. Zadanie to jest jednak bardzo trudne, ze względu na trudność w hermetyzacji bryły składowiska i możliwe sposoby napowietrzania (aeracji) jego bryły pod wpływem różnych czynników.

Do podstawowych czynników powodujących napowietrzanie składowiska odpadów pogórniczych należą czynniki atmosferyczne i struktura materiału w bryle składowiska (rys. 3).

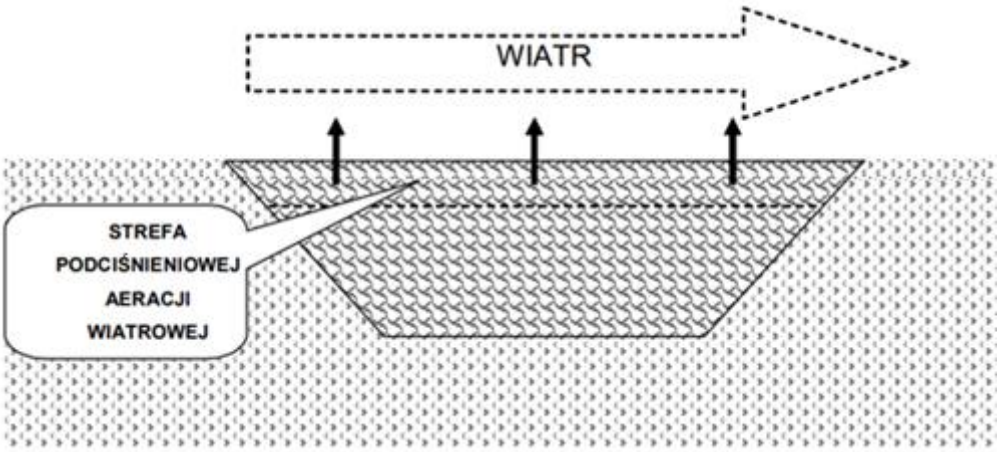
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 3. Źródła pochodzenia tlenu atmosferycznego do bryły składowiska odpadów pogórniczych

Aerację baryczną powodują zmiany ciśnienia atmosferycznego, które mogą osiągać nawet do 100 Pa w ciągu doby, powodując „oddychanie" bryły składowiska. W sytuacji wymienionej wcześniej, przy zmianach ciśnienia atmosferycznego, głębokość aeracji może sięgać do ok. 2,0÷2,5 m od jego powierzchni. Na większych głębokościach samoutleniający się materiał wobec braku tlenu przestaje się utleniać, ale w warunkach np. otwarcia (wykop) bryły proces samoutleniania może ulec wznowieniu.

Napowietrzanie bryły składowiska odpadów pogórniczych z kopalń węgla pod wpływem wiatru (**aeracja wiatrowa**) powoduje zarówno dynamiczne oddziaływanie wiatru na powierzchnię składowiska, jak i zmiany ciśnienia statycznego wywołane przez dopływ powietrza równolegle do jego powierzchni (zgodnie z prawem Bernoulliego), co pokazano na rysunku 4.

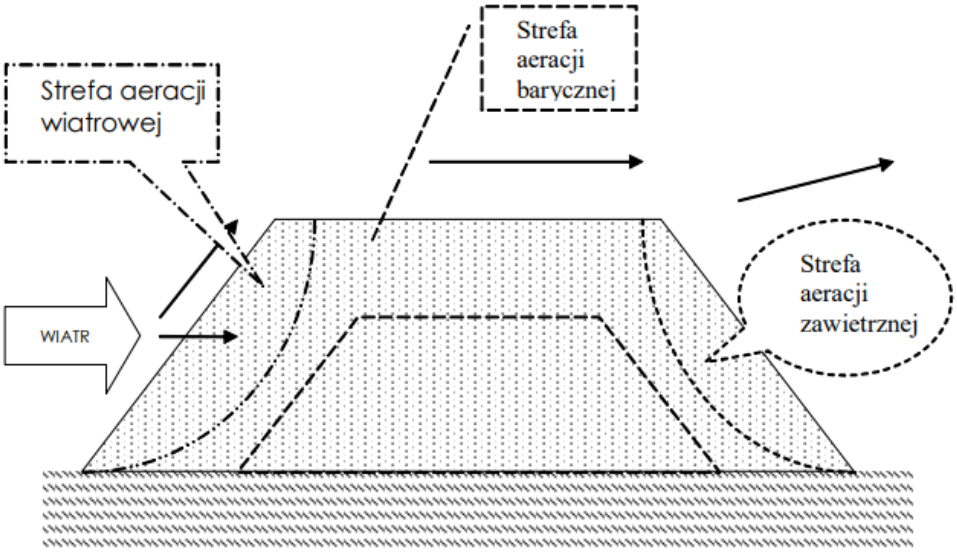


Rys. 4. Napowietrzanie bryły składowiska podpoziomowego wskutek zmian ciśnienia statycznego wywołanego wiatrem

Z obserwacji prowadzonych w przeszłości wynika, że odnotowywano intensyfikację ognisk pożarowych w nadpoziomowych składowiskach także po stronie zawietrznej w stosunku do dominującego kierunku wiatru – wskazuje to na zmiany ciśnienia przy takich powierzchniach bryły składowiska wywołanych zawirowaniami powietrza. Wszystkie te czynniki napowietrzające składowisko nadpoziomowe pokazano schematycznie na rysunku 5.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 5. Czynniki napowietrzania bryły nadpoziomowego składowiska odpadów pogórniczych

Przy słabo zgęszczonym materiale składowiska i występowaniu zjawiska samozagrzewania materiału może występować przepływ powietrza wywołany konwekcją (**aeracja konwekcyjna**). Taki przepływ powietrza może być wywoływany także przez już powstałe ogniska pożarowe, a przepływ gorących gazów pożarowych może dodatkowo inicjować powstanie kolejnych ognisk pożarowych [13].

2.4. Możliwości ograniczenia prawdopodobieństwa wystąpienia ognisk pożarowych w składowisku

Podstawowe kierunki działań związanych z prewencją pożarową składowisk odpadów pogórniczych z kopalń węgla, to ograniczanie możliwości oddziaływania czynników ułatwiających samoutlenianie i samozagrzewanie zgromadzonego na składowisku materiału. Można to realizować poprzez:

- Doskonalenie procesu wzbogacania węgla surowego celem zmniejszania udziału substancji węglowej w masie odpadów lub ich mieszanie z innymi niepalnymi i/lub hermetyzującymi odpadami.
- Ograniczenie możliwości napowietrzania bryły składowiska przez odpowiednie kształtowanie jego bryły, skuteczne zagęszczanie materiału w procesie budowy składowiska czy tworzenie tzw. sarkofagów. Należy zwrócić uwagę, że próby izolacji (hermetyzacji) bryły składowiska przez pokrywanie np. folią niepalną czy innymi substancjami hermetyzującymi jest kosztowne i uciążliwe w utrzymaniu, a także technologicznie trudne do zastosowania w procesie budowy składowiska.
- Niedopuszczenie do samozagrzania materiału składowiska powyżej temperatury powodujące samopodtrzymywanie się procesu samozagrzewania i samozapalenia np. przez odbiór nagromadzonego ciepła. Działania takie nie były dotychczas podejmowane na szerszą skalę, choć wydają się najbardziej celowym kierunkiem postępowania. Jednym z powodów jest sprzeczność celów użytkowników składowiska, często innych w różnych fazach jego istnienia.

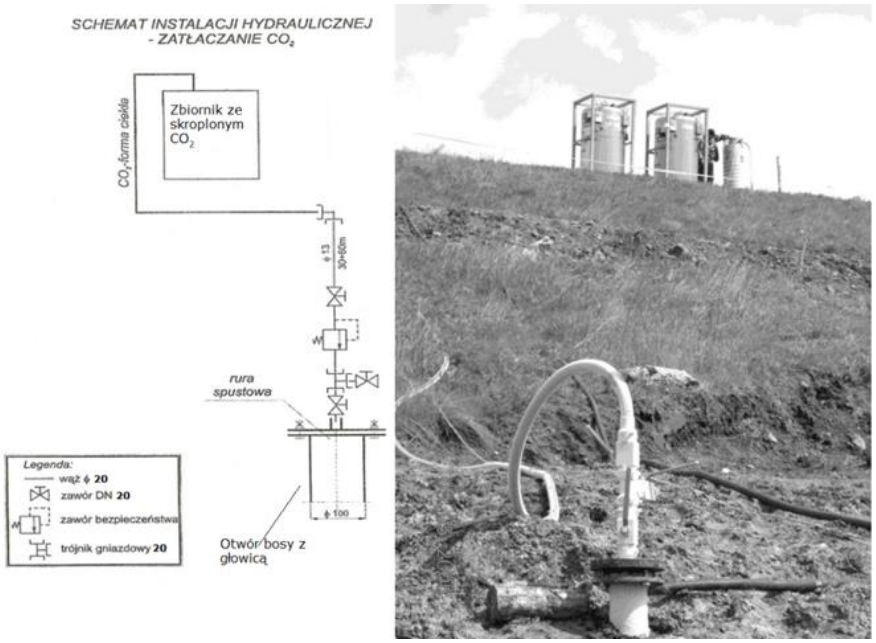
Zmiana podejścia do zagadnień pozyskiwania i wykorzystywania dostępnych w otoczeniu źródeł energii wskazuje na celowość podjęcia prac nad ostatnim wymienionym obszarem działań.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

3. Obniżanie temperatury w bryle zapożarowanego składowiska – przykład

W trakcie budowy składowiska odpadów pogórniczych „Waleska" w Łaziskach Górnych doszło do zjawiska pożaru wywołanego przyczynami zewnętrznymi (pożar egzogeniczny) w wyniku intensywnego pożaru w bezpośrednim sąsiedztwie składowiska. Mimo, że składowisko było budowane w sposób, który ograniczał prawdopodobieństwo samozapalenia składowanego materiału to wskutek wystąpienia czynnika zewnętrznego powstały ogniska pożarowe na niewielkiej przestrzeni. Najprostszym sposobem ich likwidacji mogło być wybranie i usunięcie palącego się materiału, a następnie bezpieczne uzupełnienie bryły zagęszczonym, ubogim w substancje palne materiałem. Było to jednak technicznie niewykonalne i stwarzało ryzyko wystąpienia wtórnych ognisk pożarowych wskutek otwarcia bryły – rozszczelnienia składowiska. Zastosowano więc innowacyjną metodę [14] polegającą na szybkim odbiorze ciepła z bryły składowiska i usunięciu ze strefy zapożarowanej tlenu przez wlewanie do ognisk pożarowych i ich sąsiedztwa ciekłego dwutlenku węgla (CO_2). Istota metody polegała na wywierceniu w strefie zapożarowanej siatki bosych (niezarurowanych na całej długości) otworów wiertniczych o głębokości do około 2,5 m, zacementowaniu w nich krótkich rur z głowicami, a następnie wlewaniu do otworów ciekłego gazu (CO_2) (rys. 6).



Rys. 6. Schemat technologiczny i zdjęcie terenowe wlewni ciekłego CO_2 do bryły składowiska „Waleska"

Podany do bosego otworu ciekły gaz ulegał sublimacji w wyniku rozprężenia (powstawał tzw. suchy lód). Sublimacja dwutlenku węgla powodowała gwałtowne oziębianie otoczenia otworu, a ponadto wszelkie puste przestrzenie wypełniały się obojętną mieszaniną gazów ubogą w tlen. Kilkakrotnie powtórzona operacja wlewania ciekłego dwutlenku węgla doprowadziła do trwałej likwidacji istniejących ognisk pożarowych i zapobiegła powstaniu nowych ognisk. Należy jednak zwrócić uwagę, że metoda ta wiąże się z emisją CO_2 do atmosfery, ale w przypadku działań doraźnych może to być uzasadnione.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

4. Zagadnienie odzysku ciepła ze składowiska odpadów górniczych

Przeprowadzone próby odbierania ciepła ze składowiska odpadów za pomocą pionowych wymienników ciepła tzw. rury Fielda wykazały możliwość wykorzystania tego ciepła ze składowiska z istniejącymi ogniskami pożarowymi [15, 16]. Badania prowadzono m.in. na składowisku odpadów Skalnych w Łaziskach Górnych w czasie, kiedy nie było w Polsce zainteresowania wykorzystaniem takich źródeł ciepła, a ponadto znajdująca się w bezpośrednim sąsiedztwie elektrownia węglowa dysponowała nadmiarem energii cieplnej oddawanej do atmosfery na chłodniach kominowych. Poszukiwanie alternatywnych źródeł energii, w tym cieplnej, stało się trendem rozwojowym z chwilą stwierdzenia zagrożenia spowodowanego globalnym ociepleniem wywołanym działalnością ludzką wskutek rosnącej emisji gazów cieplarnianych. Składowiska odpadów pogórniczych to przeważnie duże objętości, a tym samym masy odpadów, które mogą być rezerwuarem energii cieplnej. Składowiska odpadów z procesów wzbogacania (oczyszczania) węgla surowego i niehandlowego urobku z kopalń węgla zawierające skłonną do samoutlenienia substancję węglową mogą być dodatkowo źródłem ciepła z tych procesów naturalnych. Ciepło to emitowane było dotychczas bezproduktywnie do atmosfery. Obecnie są łatwo dostępne techniki i technologie odbioru ciepła w postaci wymienników poziomych czy pionowych, ale możliwość ich wykorzystania na składowiskach odpadów górniczych w budowie nie może utrudniać procesów technologicznych tam realizowanych. Ponadto stosowane współcześnie wymienniki ciepła są wrażliwe na uszkodzenia.

5. Nowe spojrzenie na prewencję pożarową i korzystanie ze składowiska w cyklu jego życia

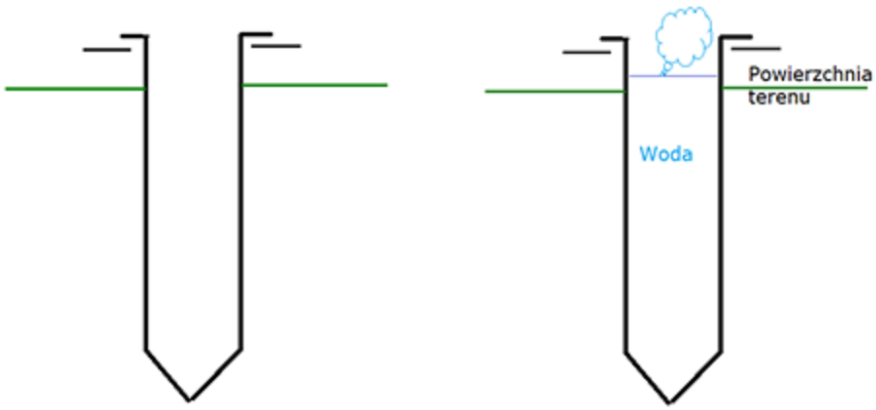
Cykl życia składowiska odpadów pogórniczych składa się z kilku etapów, z których od każdego oczekuje się spełnienia innych funkcji:

- w fazie budowy: wydajny i nieskomplikowany odbiór i składowanie odpadów, umożliwiające prowadzenie procesów wydobycia i wzbogacania (oczyszczania) węgla surowego bez ograniczeń,
- po zakończeniu składowania: minimalnymi nakładami na monitoring i utrzymanie składowiska, a czasami wręcz ich zaniechanie,
- wtórne wykorzystanie składowiska jako terenu lub surowca antropogenicznego.

Konsekwencją takiego stanu rzeczy może być brak możliwości odzyskania terenu składowiska z powodu występowania zjawisk pożarowych, które jednak mogą wystąpić już w trakcie procesu jego budowy (składowania odpadów). Jednocześnie podjęcie już w trakcie budowy działań nakierowanych na niedopuszczenie do zagrzewania się zdeponowanego materiału i zakończenie jego utleniania wietrzeniem może przyśpieszyć odzyskanie terenu składowiska do użytkowania. Poniżej przedstawiono koncepcję metody spełniającej różne funkcje w cyklu życia składowiska. W fazie I obejmującej budowę i przekazywanie składowiska do innego użytkowania istotne jest niedopuszczenie do samopodtrzymującego się zagrzewania substancji węglowej bez utrudniania operacji technologicznych budowy składowiska. W tym celu proponuje się osadzanie w bryle składowiska zaślepionych rur stalowych z kołnierzami na znajdującej się na powierzchni części rury (rys. 7). Rury o długości do około 3 m można osadzać, zależnie od warunków, metodą wbijania lub osadzania w wywierconych wcześniej otworach.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 7. Faza I metody – schemat osadzania rur w bryle składowiska i wypełniania ich wodą

Po osadzeniu rurę należy napełnić wodą. Ciepło dopływające ze składowiska do rury będzie powodowało parowanie wody, więc wodę należy na bieżąco uzupełniać. Należy zwrócić uwagę, że rury ułatwią pomiar temperatury, a intensywne parowanie z rury może świadczyć o rozwoju ognisk pożarowych. Rury należy osadzać na powierzchniach, na których zakończono już operacje technologiczne związane ze składowaniem odpadów (np. na zboczach składowisk nadpoziomowych lub skarpowych). Rury mogą być osadzone pionowo lub ukośnie. Operacja okresowego uzupełniania wody w rurach nie wymaga szczególnych instalacji, zwłaszcza, że bardzo często stosuje się wodę do zwalczania zapylenia w operacjach technologicznych i jest ona dowożona.

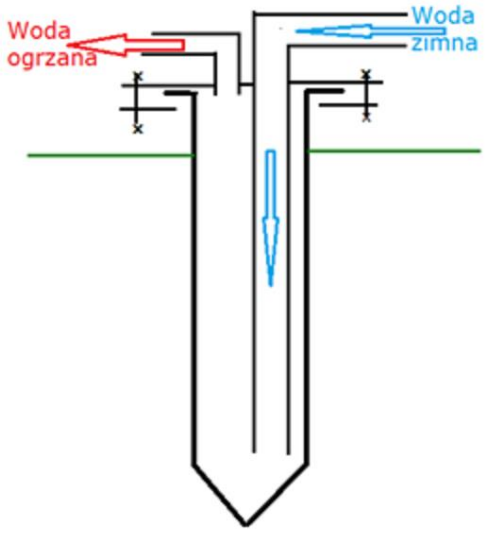
Po zakończeniu prac związanych ze składowaniem odpadów (lub jeżeli istnieją warunki i potrzeby już w trakcie) należy wykorzystać osadzone w składowisku rury (po ich wypłukaniu) do osadzenia w nich pionowych wymienników ciepła; jest to II faza polegająca na odbieraniu ciepła celem jego gospodarczego wykorzystania (rys. 8).

W przypadku stwierdzenia nadmiernej temperatury powrotnej medium transportującego ciepło, co może być sygnałem o wystąpieniu w bryle składowiska ogniska pożarowego, należy wyjąć wymiennik z rury i napełniać ją wodą jak w fazie I.

Kluczowym celem rozwiązania jest prewencja pożarowa w całym cyklu życia składowiska odpadów powęglowych ze stworzeniem od początku podstawowej infrastruktury technicznej dla wykorzystania ciepła z procesów zachodzących w składowisku, w tym jego dużej masy i związanej z rodzajem składowanego materiału dużej pojemności cieplnej. Współcześnie powszechnie stosowane są gruntowe pompy ciepła, dla których system osadzonych w bryle składowiska rur jest pierwszym, ale podstawowym elementem infrastruktury.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 8. Schemat fazy II – wykorzystanie osadzonej w składowisku rury jako wymiennika ciepła

Wszystkie elementy rozwiązania są indywidualnie znane i stosowane.

6. Podsumowanie

Pomimo, że wszystkie elementy rozwiązania są praktycznie stosowane to wymagają one, jako zintegrowana metoda, badań aplikacyjnych celem sprawdzenia jej praktycznej przydatności i ewentualnego dopracowania. Praktycznego ustalenia wymaga m.in. gęstość siatki osadzonych rur.

Literatura

1. Korski J., Fajfer J., Rolka M., Henslok P., Bodynek P., Świąder J., Kubisiak M.: Przekształcenia środowiska geologicznego spowodowane działalnością przemysłową w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym - problematyka składowania odpadów. W: Geologia i zagadnienia ochrony środowiska w regionie Górnośląskim. LXXVI Zjazd Naukowy Polskiego Towarzystwa Geologicznego, Rudy k/Rybnika, 14-16 września 2005. Materiały konferencyjne. Pod red. J. Jureczki, Z. Buły, J. Żaby. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2005, s. 223-232
2. Korski J.: Zarządzanie kryzysowe w sytuacji zagrożenia ekologicznego – pożaru składowiska odpadów górniczych. Materiały Konferencyjne KOMEKO 2007. KOMAG, Gliwice 2007. s.67-76. ISBN 978-83-60708 -03-3
3. Cebulak S., Śmieja-Król B., Tabor A., Misz M., Jelonek I, Jelonek Z.: Oksyreaktywna analiza termiczna (OTA) - dobra i tania metoda oceny samozapalności węgli na składowiskach - wstępne wyniki badań. In: Jureczko J., Buła Z., Żaba J. [red.]: Geologia i zagadnienia ochrony środowiska w regionie górnośląskim. Państwowy Instytut Geologiczny i Polskie Towarzystwo Geologiczne, Warszawa, 2005
4. Cebulak S., Gawęda A., Jernowaja I.: Applocation of the Oxyreactive Thermal Analisys to the investigation of the carbonized substances in rocks. Conference and exhibitition “Modern exploration and improved oil and gas recovery methods”, Kraków 1998
5. Cebulak S., Langier-Kuźniarowa A.: Application of Oxyreactive Thermal Analisys to examination of organic master associated with rocks. Journal of Thermal Analisys nr 50, 1997

Open Access (CC BY-NC 4.0)

6. Maciejasz Z., Kruk F.: Pożary podziemne w kopalniach. Cz. 1. Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1977
7. Korski J., Friede R., Henslok P.: Likwidacja egzogenicznych ognisk pożarowych składowiska odpadów pogórniczych „Waleska” w Łaziskach Górnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1715: Górnictwo z. 271, Gliwice, 2006
8. Korski J., Henslok P., Bodynek P.: Doświadczenia z likwidacji zapożarowania składowiska odpadów powęglowych "Skalny" w Łaziskach Górnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1650 Górnictwo Z. 261, s. 461-474. Gliwice 2004
9. Wasilewski S., Korski J.: Wczesne wykrywanie pożarów jako element monitoringu składowisk odpadów powęglowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 8(474) Sierpień 2010
10. Książkiewicz M.: Geologia dynamiczna, Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne, 1972
11. Gabzdyl W.: Geologia złóż węgla. Złoża świata. Polska Agencja Geologiczna. 1996
12. Misiak J.: Skład petrograficzny i formy litotypów węgla kamiennego w utworach karbonu górnego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Gospodarka surowcami mineralnymi – mineral resources management 2017 Volume 33 Issue 3, pp. 109–120
13. Sprawozdanie z wykonanych prac wiertniczych na terenie hałdy „Skalny” w Łaziskach Górnych dla rozpoznania budowy składowiska, warunków gruntowych i termicznych. CBC Geologia, Katowice, kwiecień-maj 2002
14. Buchwald P., Korski J.: Zastosowanie ciekłego CO_2 do profilaktyki i zwalczania ognisk pożarowych składowisk odpadów pogórniczych. Materiały 4 Szkoły Aerologii Górniczej, Kraków 2006
15. Różański Z.: Pozyskiwanie ciepła ze składowisk odpadów powęglowych podlegających naturalnym procesom utleniania. Praca doktorska, Wydział Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w Gliwicach, grudzień 2002 [materiały niepublikowane]
16. Różański Z.: Badania doświadczalne i modelowe nad pozyskiwaniem energii cieplnej z aktywnego termicznie zwałowiska odpadów powęglowych. W red.: 10-ta Sesja Międzynarodowego Biura Termofizyki Górniczej, Gliwice, Polska 14-18 luty 2005: Referaty. Instytut Geotechnologii, Geofizyki Górniczej i Ekologii Terenów przemysłowych Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Ss. 585-596

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.5

Zastosowanie kruszarki wibracyjnej do przygotowania nadawy do procesu granulacji

Marcin Mazur – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Jacek Feliks – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: Do przygotowania nadawy, wapienia do granulacji bezciśnieniowej, przez bardzo drobne kruszenie, zastosowano laboratoryjną wibracyjną kruszarkę szczękową z kinematycznym wymuszeniem ruchu drgającego szczęk. Kruszarka ta charakteryzuje się wysokim średnim stopniem rozdrobnienia 30÷50. W procesie kruszenia wibracyjnego wytworzono nadawę do granulacji o zawartości klasy ziarnowej 0÷200 μm, w zakresie 46,2÷69,6%. Następnie przeprowadzono badania granulowania w rynnowym granulatorze wibracyjnym. Uzyskano bardzo dobre rezultaty granulowania materiału uzyskanego z kruszarki wibracyjnej. Oznacza to, że kruszarka wibracyjna o niższym od każdego ze znanych młynów jednostkowym poborze energii, może znaleźć zastosowanie do produkcji granulatów nawozów mineralnych.

Słowa kluczowe: granulacja nawozu, kruszarka wibracyjna, kruszenie wibracyjne

The use of vibratory jaw crusher for feed preparing for granulation process

Abstract: Feed (limestone) for non-pressure granulation was prepared by very fine crushing in laboratory vibratory jaw crusher with kinematic actuation of crushers jaws. The crusher is characterized by high average degree of fragmentation (30÷50). Produced feed contain grain class 0÷200 microns in the range of 46.2%÷69.6%. Then, granulation tests were carried out in a vibrating chute granulator. Very good granulation results were observed for the material obtained from the vibrating crusher. This means that vibratory jaw crushers, which have lower energy consumption than any mills, can be used for production of granulated mineral fertilizers.

Keywords: fertilizer granulation, vibratory crusher, vibratory crushing, fine crushing

1. Wprowadzenie

W każdej z technologii wytwarzania granulowanych nawozów mineralnych występuje proces przygotowania materiału mineralnego przez poddanie go procesowi mielenia [1]. Proces ten zachodzi najczęściej w młynach z mielnikami swobodnymi, z których najbardziej popularne są młyny grawitacyjne, nazywane też kulowymi lub rurowo-kulowymi [2, 3]. Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne i parametry technologiczne tych młynów podano w pracy [4]. Młyny te cechuje znaczne zapotrzebowanie energii, stąd podejmowane są prace eksperymentalne nad zastosowaniem w procesach mielenia nowych maszyn rozdrabniających o znacznie większych możliwościach technologicznych, mniejszym zapotrzebowaniu na energię, a w szczególności niższych kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Ponadto można zaobserwować rosnące zapotrzebowanie na nawozy granulowane [5] oraz wzrost cen energii elektrycznej. Stąd w pracy zamieszczono wyniki wstępnych badań zastosowania wibracyjnej kruszarki szczękowej do przygotowania nawozu mineralnego - kamienia wapiennego do granulacji bezciśnieniowej. Kruszarkę tę cechują duże możliwości technologiczne, w porównaniu z powszechnie stosowanymi kruszarkami szczękowymi, w szczególności kilkakrotnie większy stopień średni rozdrobnienia [6]. Wykazały to wyniki wcześniejszych badań porównawczych (przeprowadzonych w Katedrze Inżynierii Maszyn i Transportu) w trzech kruszarkach szczękowych: wibracyjnej kruszarce KW 40/1 o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego szczęk, wibracyjnej kruszarce o bezwładności o wymuszeniu ruchu drgającego KWB-d oraz w klasycznej kruszarce szczękowej o prostym ruchu szczęki KS. Nadawa – materiał podawany do kruszenia do wszystkich kruszarek miała uziarnienie w zakresie 0÷40 mm. Najdrobniejszy produkt kruszenia o zawartości klasy ziarnowej 0÷1,0 mm w ilości ponad 60% otrzymano w kruszarce wibracyjnej

Open Access (CC BY-NC 4.0)

KW 40/1. Udział tej klasy w produkcie kruszenia z klasycznej kruszarki KS wynosił tylko około 10%. W badaniach procesu kruszenia w kruszarce KW 40/1 przyjęto szczelinę wylotową szczęk 1,5 mm. Szczelina wylotowa ma największy wpływ na uziarnienie produktu kruszenia i można ją zmniejszyć nawet do 0,5 mm, co jak wykazały badania [4, 6, 7] spowoduje korzystne zwiększenie udziału klasy 0÷1,0 mm oraz drobniejszych klas.

Na podstawie uzyskanych wyników zdecydowano się przeprowadzić badania kruszenia wibracyjnego i granulowania kamienia wapiennego do wykorzystania go jako nawóz granulowany. Do badań kruszenia wybrano wibracyjną kruszarkę szczękową o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego, charakteryzującą się najlepszymi parametrami technologicznymi. Do badań granulacji bezciśnieniowej przyjęto laboratoryjny granulator wibracyjny [8, 9, 10]. Możliwość zastosowania tego granulatora potwierdziły korzystne wyniki badań granulacji bezciśnieniowej kilku surowców mineralnych (w tym wapieni) zmielonych, w młynie wibracyjnym [11].

2. Cel i metoda badań

Celem badań było określenie możliwości przygotowania nadawy do procesu granulacji bezciśnieniowej w laboratoryjnej wibracyjnej kruszarce szczękowej. Materiałem użytym do badań był kamień wapienny z kopalni „Czatkowice” w Krzeszowicach, zwany dalej wapieniem w stanie suchym o uziarnieniu 0÷40 mm – oznaczany dalej symbolem NK.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. Etap pierwszy obejmował badania procesu kruszenia wibracyjnego, etap drugi granulację bezciśnieniową przeprowadzaną w granulatorze wibracyjnym rynnowym. Aby stwierdzić wpływ uziarnienia na możliwość granulacji wapienia zdecydowano o przeprowadzeniu badań procesu granulacji przy dwóch wariantach uziarnienia nadawy, to jest „drobnej” o uziarnieniu poniżej 0,5 mm – oznaczanej dalej symbolem ND oraz „grubej” o uziarnieniu poniżej 2,0 mm – oznaczanej dalej symbolem NG. Oba warianty nadawy wydzielano z próbki pierwotnej produktu kruszenia wibracyjnego – przez odsianie na sitach: 2 mm i 0,5 mm.

W procesie kruszenia wibracyjnego przyjmowano masę próbki 1 kg, częstotliwość drgań szczęk kruszarki wynosiła 20 Hz, szczelina wylotowa 0,5 mm.

W procesie granulacji przyjmowano masę próbki 0,5 kg, częstotliwość drgań rynny wynosiła 16 Hz. Jako lepiszcze stosowano wapno hydratyzowane 2% oraz wodę wodociągową w ilości średnio 10% do nadawy NG oraz 12% do nadawy ND.

3. Stanowiska badawcze kruszarki i granulatora

Stanowisko badawcze wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1 przedstawiono na rysunku 1.

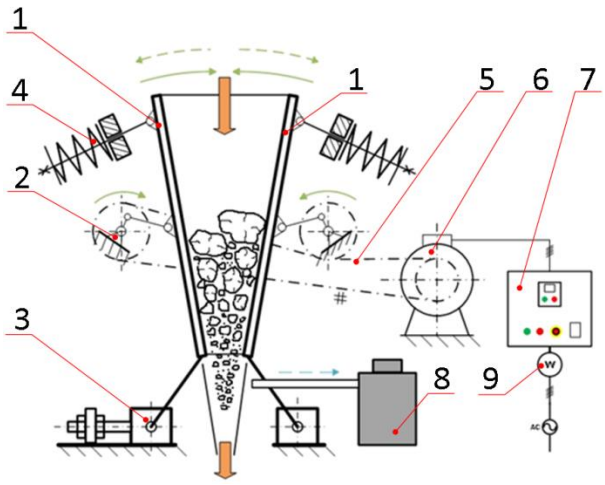
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego wibracyjnej kruszarki szczękowej o oznaczeniu KW 40/1

Stanowisko laboratoryjne składa się z wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1, układu ciągłego zasilania nadawą w postaci dozownika elektromagnetycznego, układu zasilania i regulacji częstotliwości drgań szczęk kruszarki (przemiennik częstotliwości - zwany dalej falownikiem), układu pomiaru mocy czynnej współpracującego z komputerem rejestrującym oraz układu odpylania i oczyszczania powietrza. Podczas określania składu ziarnowego nadawy i produktu kruszenia korzystano z w pełni wyposażonego stanowiska do analizy sitowej materiałów uziarnionych. Dodatkowo w skład stanowiska wchodzi komplet szczelinomierzy oraz innych narzędzi służących do regulacji nastaw parametrów pracy kruszarki.

Głównym elementem stanowiska laboratoryjnego jest wibracyjna kruszarka szczękowa KW 40/1 przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat budowy laboratoryjnej, wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1
1 - szczęki, 2 - wibrator kinematyczny, 3 - mechanizm regulacji szczeliny wylotowej, 4 - układ sprężysty, 5 - przekładnia łańcuchowa, 6 - silnik elektryczny, 7 - układ zasilania i sterowania częstotliwością drgań szczęk kruszarki, 8 - układ odpylania i oczyszczania powietrza, 9 - watomierz rejestrujący pobór mocy czynnej

Zespół roboczy kruszarki KW 40/1 przedstawionej na rysunku 2 stanowią dwie ruchome szczęki (1) zamocowane wahliwie u dołu. Układy sprężyste (4) dociskają obie szczęki do rolek napędowych wibratorów kinematycznych (2). Jedna ze szczęk ma mechanizm regulacji szczeliny wylotowej (3).

Open Access (CC BY-NC 4.0)

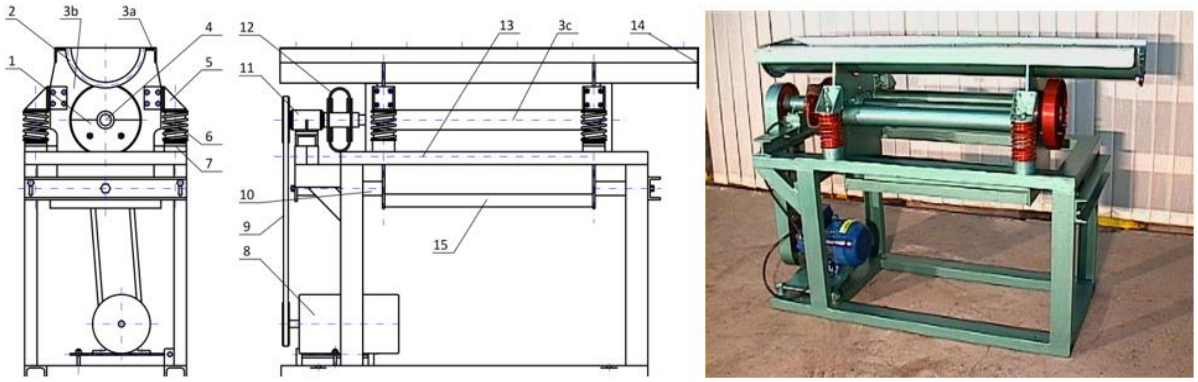
 ISBN 978-83-65593-32-0

Oba wały wibratora sprzężone są przekładnią łańcuchową (5), napędzaną z silnika elektrycznego (6). Dzięki przekładni łańcuchowej (5), ruch szczęk zachodzi w sposób przeciwsobny, to znaczy jednocześnie szczęki zbliżają się do siebie lub od siebie oddalają. Kruszarka ma możliwość regulacji skoku obu szczęk. Układ zasilania i sterowania częstotliwością drgań (7) umożliwia regulację prędkości obrotowej wałów wibratorów, a tym samym częstotliwości drgań szczęk oraz sprzężony jest z watomierzem rejestrującym pobór mocy czynnej (9), który posiada możliwość archiwizacji wyników pomiarów. Odpylanie strefy wylotu z kruszarki oraz oczyszczanie powietrza zapewnia odkurzacz przemysłowy, dodatkowo współpracujący z filtrem odśrodkowym (8).

Podstawowe parametry szczękowej kruszarki wibracyjnej KW 40/1

Wymiary wlotu: 100 x 160 mm, zakres regulacji szczeliny: 0,5÷10 mm, częstotliwość drgań szczęk: 8÷25 Hz, moc silnika 2,2 kW, maksymalny wymiar ziaren nadawy: 40 mm, wymiary 840 x 420 x 980 mm, masa: 145 kg, zakres wydajności: 50÷500 kg/h.

Stanowisko badawcze granulatora wibracyjnego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat i widok stanowiska laboratoryjnego wibracyjnego granulatora rynnowego

Głównym elementem granulatora jest rynna (2) o długości 1500 mm i promieniu 125 mm zakończona kołnierzami (14), służącymi do mocowania dodatkowych rynien lub ograniczników wysokości wysypu. Rynna jest przymocowana do kątowników (3a) stanowiących razem z płytami czołowymi (3b) i rurami usztywniającymi (3c) podstawę pod rynnę. Dodatkowo w dolnej części płyt przyspawane są ceowniki (15) z nawierconymi otworami służącymi do przymocowania dodatkowej masy w celu ewentualnego korygowania trajektorii drgań, tak aby uzyskać drgania kołowe. Masa drgająca oparta jest na sprężynach (6) poprzez uchwyty (5), które są skonstruowane w sposób umożliwiający ich obrót wokół własnej osi. Sprężyny ułożone są w gniazdach, pod którymi znajdują się podkładki (7) służące do zmiany kąta nachylenia rynny, całość opiera się na ramie (13) wykonanej z ceowników. Silnik napędowy (8) o obrotach znamionowych 1440 obr/min zasilany jest przez przemiennik częstotliwości (falownik) i umożliwia pracę z prędkością obrotową od 400 obr/min do 1800 obr/min. Moment obrotowy z silnika przekazywany jest poprzez przekładnię pasową (9) na wałek pośredni (11), a następnie przez sprzęgło oponowe (12), na wał wibratora (4), na którego końcach są zamontowane wymienne masy niewyważone (1). W wyniku zastosowania takiego napędu uzyskuje się wzbudzanie rynny do drgań kołowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi rynny. Laboratoryjny rynnowy granulator 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. W granulatorze zastosowano tłumiki (10) obniżające amplitudę drgań rezonansowych. Granulator posiada również możliwość zainstalowania w rynnie ślimaka transportowego w celu

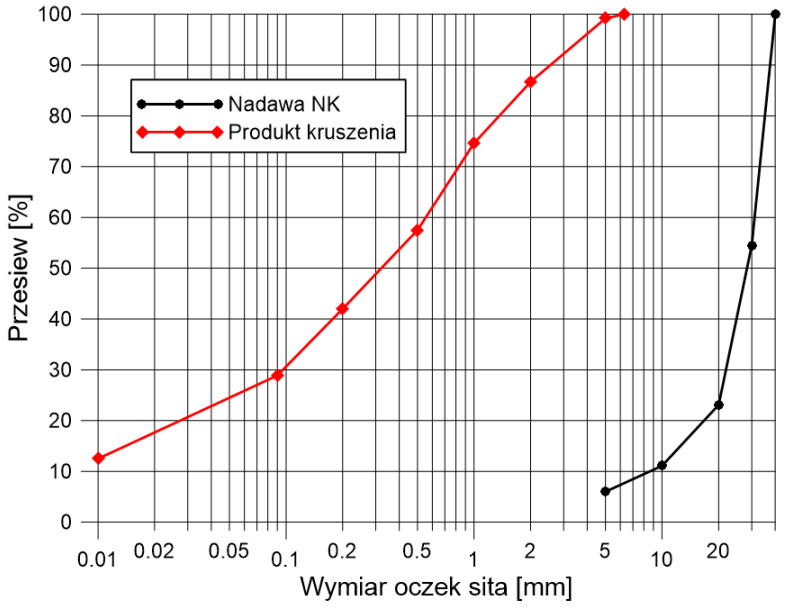
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

zwiększenia wydajności całkowitej. Do przeprowadzenia badań opisanych w tym rozdziale ślimak transportowy nie był wykorzystywany. Stanowisko pozwala na regulację amplitudy drgań od 2,2 mm do 5,6 mm. Podstawowe parametry granulatora wibracyjnego: długość rynny: 1 500 mm, promień rynny: 125 mm, kąt nachylenia: 0°, częstotliwość drgań rynny: 15÷30 obr/min, moc silnika wibratora: 1,5 kW, amplituda drgań: 2,2; 3,0; 3,8; 4,8; 5,6 mm, średnica i skok ślimaka: 250 mm, prędkość obrotowa ślimaka: 80÷140 obr/min. Wymiary: długość 1 900 mm, szerokość 880 mm, wysokość 1 250 mm, masa: 115 kg, zakres wydajności: 100÷250 kg/godz.

4. Realizacja i wyniki badań kruszenia wibracyjnego

Nadawę NK do procesu kruszenia w kruszarce wibracyjnej podawano ręcznie, starając się, aby strefa kruszenia była wypełniona do około połowy jej wysokości, bowiem wcześniejsze badania wykazały [4, 6], że przy takim wypełnieniu strefy kruszenia kruszarka uzyskiwała największą wydajność. Każdą próbę powtarzano dwukrotnie, a końcowe wyniki są średnią arytmetyczną z tych prób. Analizę granulometryczną nadawy i produktu kruszenia wykonywano na sucho zgodnie z PN C-04501:1971. Wydajność kruszarki wyznaczano przez pomiar czasu kruszenia od rozpoczęcia procesu do jego zakończenia. Na rysunku 4 przedstawiono w formie graficznej uziarnienie nadawy NK oraz produktu kruszenia – próbki pierwotnej.



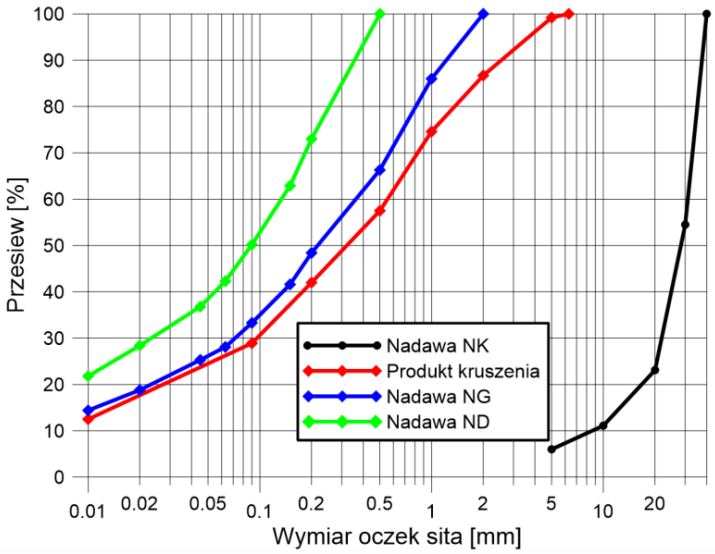
Rys. 4. Uziarnienie wapienia: nadawy NK i produktu kruszenia z kruszarki

Uziarnienie produktu kruszenia (próbki pierwotnej) z kruszarki mieściło się w 100% w klasie 0-6,3 mm, przy czym udział klasy 0÷200 µm, wynosił 40,2%.

Składy ziarnowe materiałów wytypowanych do granulacji (nadawa NG oraz ND) przedstawiono na rysunku 5.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

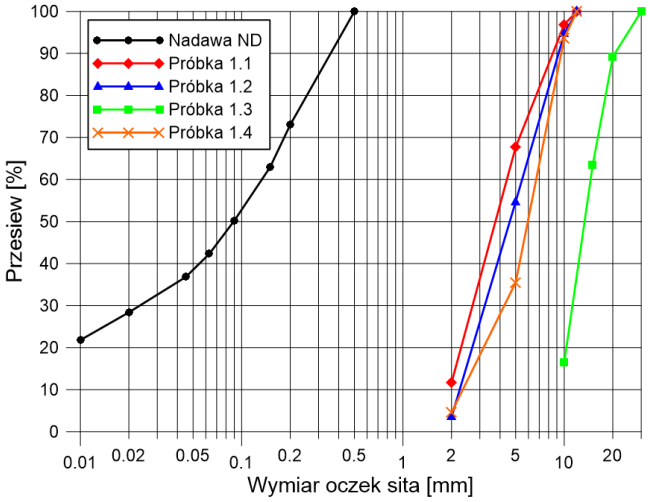


Rys. 5. Składy ziarnowe materiałów poddanych granulowaniu wibracyjnemu (nadawy NG oraz ND)

Nadawy do granulacji: NG (odsiana na sicie 2,0 mm) zawierała 46,2% klasy 0÷200 μm, natomiast nadawa ND (odsiana na sicie 0,5 mm) zawierała 69,6% klasy 0÷200 μm, ponad 50% klasy ziarnowej 0÷100 μm, oraz około 28% klasy 0÷20 μm. Ziarna o wymiarach poniżej 200 μm są bardzo pożądane w procesie granulacji i należy dążyć do jak największego ich udziału w nadawie granulatora.

5. Wyniki badań granulacji bezciśnieniowej

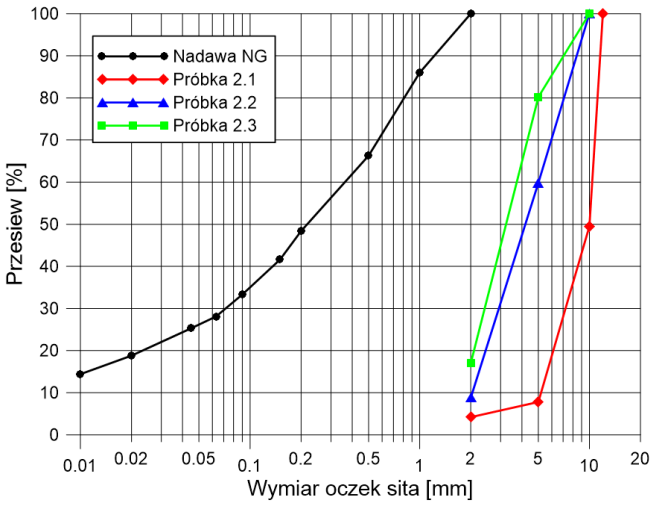
Zgodnie z przyjętą metodą i programem, badania granulacji bezciśnieniowej przeprowadzono przy nadawie ND (o uziarnieniu poniżej 0,5 mm) – seria 1, oraz nadawie NG (o uziarnieniu poniżej 2,0 mm) – seria 2, następnie określono składy ziarnowe produktów granulacji. Wyniki (składy ziarnowe) przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Jako lepiszcza użyto wapna hydratyzowanego w ilości 2% oraz wody w ilości 12% w serii 1, oraz 10% w serii 2.



Rys. 6. Uziarnienie nadawy ND i produktów granulacji w serii 1

Open Access (CC BY-NC 4.0)

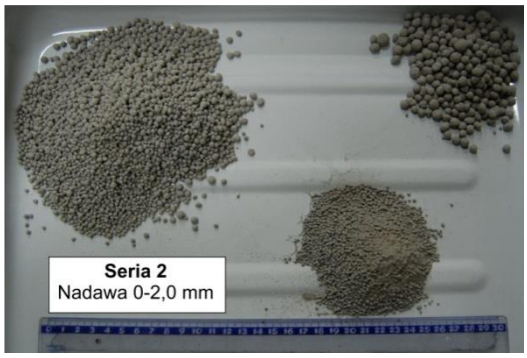
 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 7. Uziarnienie nadawy NG i produktów granulacji w serii 2

Materiał fotograficzny produktów obu serii przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

Rys. 8. Produkt granulacji serii 1



Rys. 9. Produkt granulacji serii 2

Po granulowaniu określono wilgotność poszczególnych próbek w danych seriach granulowania. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Wilgotność poszczególnych próbek wykorzystanych do granulowania

Tabela 1

Numer próbki	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3
Wilgotność masowa, [%]	13,0	14,0	15,0	14,4	13,0	12,0	12,0

6. Podsumowanie

Podczas bardzo drobnego kruszenia kamienia wapiennego, przeprowadzonego w wibracyjnej kruszarce szczękowej, otrzymano bardzo wysokie stopnie rozdrobnienia: i_{90}=14,7 oraz i_{50}=88,4. Z produktu kruszenia (próbek pierwotnych) wydzielono dwie klasy ziarnowe 0÷2,0 mm oraz 0÷0,5 mm, które były nadawami do procesu granulacji w granulatorze wibracyjnym. Oba rodzaje nadawy granulowały się dobrze. Korzystniejsze rezultaty, ze względu na udział granulatu w pożądanym zakresie

Open Access (CC BY-NC 4.0)

2÷5 mm, uzyskano przy nadawie „grubszej" NG. Dalsza ocena przydatności granulacji powinna być przeprowadzona przez odpowiednie instytucje badawcze.

Otrzymane wyniki badań z procesu kruszenia wibracyjnego oraz granulacji bezciśnieniowej, wskazują na dobrą przydatność obu maszyn przeróbczych do wytwarzania granulowanych nawozów mineralnych.

Ze względu na niższe (niż znane młyny) zapotrzebowanie energii, zastosowanie wibracyjnej kruszarki szczękowej do przygotowania nadawy do procesu granulacji, może znacznie obniżyć koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a w szczególności koszty poboru energii (szczególnie w porównaniu z młynami kulowymi). Wyniki badań wykazują potencjalną możliwość zastosowania wibracyjnej kruszarki szczękowej do bardziej ekonomicznego przygotowania nadawy do granulacji.

Literatura

1. Malinowski P., Kołosowski M., Biskupski A.: Zapewnienie jakości produkcji granulowanych nawozów mineralnych, Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, tom II, Oficyna Wydawnicza PTZP, s. 308-319, Opole 2015
2. Duda W.: Cement Data Book, 3rd Edition, Bauverlag GmbH, Berlin, 1985
3. Kurdowski W.: Poradnik technologa przemysłu cementowego, Wyd. Arkady, 1981
4. Mazur M.: Badania efektywności procesu kruszenia w wibracyjnych kruszarkach szczękowych, Praca doktorska, Kraków, 2016
5. Heffer P., Prud'homme M.: Short-Term Fertilizer Outlook 2014 – 2015, IFA Strategic Forum, Marrakech, November 2014
6. Sidor J., Mazur M.: Badania eksperymentalne procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w kruszarkach szczękowych, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, ISSN 0368-0827, R. 52 nr 3, s. 235–237, 2013
7. Sidor J., Mazur M., Feliks J.: Badania rozdrabniania wibracyjnego surowców mineralnych i materiałów ceramicznych. Examination of mineral and ceramic materials vibratory crushing. Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie: III międzynarodowa konferencja: Wisła, 15–17 czerwca 2016
8. Feliks J.: Badania i modelowanie wibracyjnych grudkowników rynnowych. Research and modeling of vibratory chute clump-producing device. Wydawnictwa AGH 186 (Rozprawy Monografie), Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; ISSN 0867-6631; 326), 2017
9. Feliks J.: Granulowanie drobnoziarnistych odpadów z kopalń kruszyw skalnych dla potrzeb remineralizacji podłoża glebowego - Granulation of small-size wastes from stone quarries for subsoil remineralization. Przemysł Chemiczny; ISSN 0033-2496. t. 96 nr 9, s. 1860–1863. 2017
10. Feliks J.: Performance tests of waste coal sludge granulation. Polish Journal of Environmental Studies. vol. 21 no. 5A, s. 69–72, 2012
11. Sidor J.: Nowe młyny i układy mielenia w technologii rozdrabniania rud i surowców mineralnych. Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych: KOMEKO, Gliwice, ITG KOMAG, s. 267–279, 2013

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.6

Wykorzystanie kopaliny towarzyszącej wydobyciu węgla do produkcji kruszyw w Zakładzie Górniczym Sobieski TAURON Wydobycie S.A.

Łukasz Rzeźniczek – TAURON Wydobycie S.A.

Streszczenie: Efektywne zagospodarowanie odpadów wydobywczych jest dla polskich kopalń węgla kamiennego kluczowym elementem działań w zakresie ograniczania niekorzystnego oddziaływania na środowisko. Z powodu rosnących ograniczeń prawno-finansowych drastycznie kurczą się możliwości składowania tego typu materiałów. Coraz chętniej odpady wydobywcze wykorzystywane są w geoinżynierii oraz budownictwie, szczególnie drogowym i hydrotechnicznym. W branżach tych wysokie wymagania jakościowe dotyczące właściwości stosowanych materiałów zmuszają zakłady górnicze do wytwarzania produktów – mieszanin wiążących lub spoiwowo-kruszywowych o określonych parametrach. Ich składnikami są bardzo często uboczne produkty spalania – zwykle popioły lotne. W rozdziale opisano proces powstawania ubocznych produktów wydobycia w ciągu technologicznym zakładu przeróbczego oraz sposoby wykorzystania tych produktów do tworzenia kruszyw.

Słowa kluczowe: odpady, uboczne produkty wydobycia, mieszanki kruszywowe, spoiwa

The use of minerals accompanying coal mining for the production of aggregates at the Sobieski Mining Plant TAURON Wydobycie S.A.

Abstract: Effective management of mining waste is a key element for Polish hard coal mines in the field of reducing adverse environmental impact. Due to the growing legal and financial constraints, the storage capacity of this type of materials is drastically reduced. Increasingly, mining waste is used in geoengineering and construction, especially road and hydrotechnical. In these industries, high quality requirements regarding the properties of the materials used force mining plants to produce products – binding or binder-aggregate mixtures with specific parameters. Their components are very often by-products of combustion – usually fly ash. The chapter describes the process of formation of by-products of extraction in the technological line of the processing plant and the ways of using these products to create aggregates.

Keywords: waste, mining by-products, aggregate mixes, binders

1. Wstęp

Eksploatacja węgla kamiennego powoduje powstanie odpadów, których źródłem są roboty górnicze związane z udostępnianiem i urabianiem pokładów, jak również procesy jego wzbogacania oraz powstanie ubocznych produktów spalania (UPS), których źródłem są procesy przetwórcze w elektrowniach i elektrociepłowniach. Zagospodarowanie odpadów i UPS jest obowiązkiem ich wytwórcy zgodnie z ustawą o odpadach oraz ustawą o odpadach wydobywczych.

Obowiązek ten wiąże się z koniecznością poniesienia dodatkowych kosztów, których wielkość zależy od ilości i właściwości powstających odpadów oraz możliwych kierunków ich zagospodarowania. Dużą rolę odgrywa tu umiejętność dopasowania własności powstających materiałów odpadowych do lokalnych warunków i potrzeb, przy jednoczesnym ograniczeniu ich ewentualnego, negatywnego wpływu na środowisko. Jednym ze sposobów na spełnienie tych warunków jest przetwarzanie odpadów, poprzez tworzenie różnego typu nowych produktów (np. mieszanek) [1].

Zagospodarowanie kamienia, który pozostawał po przeróbce surowego węgla, stanowiło duży problem dla kopalń węgla kamiennego przez wiele lat. Najczęściej składowano go na przykopalnianych hałdach bądź wywożono na zewnętrzne składowiska, co generowało ogromne koszty. Obecnie kruszywa powydobywcze stanowią cenny materiał dla budownictwa drogowego jako jeden z elementów warstw drogi i są substytutem dla kruszyw naturalnych. Ich stosowanie, ma również wymiar ekologiczny w kontekście ochrony zasobów naturalnych.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

2. Wytwarzanie odpadów w procesie technologicznym

TAURON Wydobycie S.A. realizuje politykę ograniczania ilości wytwarzanych odpadów wydobywczych, a w przyszłości całkowitego ich zagospodarowania, prowadzi działania zmierzające do wykorzystania odpadów – mułów oraz skały płonnej na użyteczne produkty.

Poprzez właściwy dobór proporcji składników oraz stosując odpowiednią technologię homogenizacji skały płonnej i odpowiednich rodzajów popiołów zgodnie z technologią, uzyskuje się kruszywa i mieszanki spełniające wymagania obowiązujące dla materiałów stosowanych w budowie dróg, autostrad i budowli hydrotechnicznych.

Warunkiem wprowadzenia do obrotu otrzymanych produktów są konieczne atesty i certyfikaty, potwierdzające deklarowane własności użytkowe wydawane przez uprawnione ośrodki naukowo-badawcze, posiadające specjalne akredytacje.

Zakład Górniczy Sobieski realizuje program minimalizacji ilości wytwarzanych odpadów pochodzących z procesów wzbogacania węgla o kodzie 01 04 12. Obecnie zagospodarowanie tych odpadów jako Ubocznych Produktów Wydobycia (UPW) odbywa się w kopalni w następujących kierunkach:

1. Produkcja kruszyw, które używane są do celów budowlanych, między innymi, do budowy obiektów inżynieryjnych oraz do produkcji mieszanek kruszywowych. Kruszywa i mieszanki kruszywowe są produktami handlowymi.
2. Produkcję granulatów mułowych na bazie odpadowych mułów węglowych, które wykorzystywane są do tworzenia miałowych mieszanek energetycznych.

2.1. Zagospodarowanie UPW – aktualne kierunki

Aktualne kierunki zagospodarowania UPW, pochodzących ze wzbogacania węgla w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej ZG Sobieski [2]:

A. Odpady ze wzbogacania w cieczy ciężkiej są w części (od 20% do 50%) przetwarzane przez ZG Sobieski na kruszywo, które jest produktem handlowym TAURONIT D AK o uziarnieniu 0 – 125 mm wykorzystywanym przez odbiorców do robót inżynieryjnych.

B. Odpady ze wzbogacania w osadzarce (o uziarnieniu 0 -31,5 mm) są w części przetwarzane przez ZG Sobieski w dedykowanej do tego celu instalacji na kruszywo – produkt handlowy i wykorzystywane przez odbiorców do robót inżynieryjnych.

C. Odpady ze wzbogacalników spiralnych (o uziarnieniu 0,1-2,0 mm) są wykorzystywane przez zakład górniczy na potrzeby własne m.in. do profilaktyki przeciwpożarowej na dole kopalni, jako składnik mieszanek kruszywowych w instalacji produkcji kruszyw oraz sprzedawane jak pełnowartościowe kruszywo wykorzystywane przez odbiorców do robót inżynieryjnych.

D. Odpady gromadzone w osadniku Biały Brzeg są przekazywane do zagospodarowania przez podmioty posiadające odpowiednie decyzje administracyjne.

E. Muły węglowe powstałe w procesach wzbogacania węgla są sprzedawane do energetyki jako produkt handlowy oraz zagospodarowywane jako główny komponent do produkcji granulatów mułowych.

Odpady – uboczne produkty wydobycia, które ZG Sobieski nie jest w stanie zużyć do produkcji kruszyw czy granulatów, są przekazywane przez zakład górniczy do zagospodarowania podmiotom zewnętrznym. Podmioty te są związane z TAURON Wydobycie S.A. stosownymi umowami na odbiór i gospodarcze wykorzystanie przedmiotowych odpadów, posiadają stosowne decyzje na ich zagospodarowanie i przetwarzanie.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

2.2. Produkcja kruszyw i mieszanek kruszywowych

W latach 2009–2010 Południowy Koncern Węglowy S.A. (następca prawny TAURON Wydobycie S.A.) wspólnie z Instytutem Badawczym Dróg i Mostów (IBDiM), Laboratorium Inżynierii Lądowej Labotest i Ecocoal Consulting Center, przeprowadził szereg badań określających przydatność skały płonnej wydzielanej w procesie wzbogacania węgla jako kruszywa mającego zastosowanie w inżynierii komunikacyjnej i robotach inżynieryjnych [3]. W badaniach zostały określone możliwości produkcji różnego rodzaju kruszyw pochodzących z bezpośredniej produkcji i hałd górniczych oraz mieszanin kruszywowych tworzonych na bazie wymienionych kruszyw i różnego rodzaju popiołów z energetyki (ubocznych produktów spalania – UPS).

2.3. Produkty wytwarzane w ZG Sobieski

Łupek powęglowy nieprzepalony towarzyszący wydobyciu i przeróbce węgla w Zakładzie Górniczym Sobieski wykorzystywany jest do produkcji Kruszyw **TAURONIT D** (budownictwo drogowe), **TAURONIT H** (budownictwo hydrotechniczne) oraz **TAURONIT W** (niwelacja terenów).

Produkcja Kruszyw TAURONIT w Zakładzie Górniczym Sobieski:

- TAURONIT D AK: 0-2 mm i 0-125 mm (rys. 1),
- TAURONIT D AK: 0-31,5 mm AW (rys. 1),
- TAURONIT H: 0-125 mm (rys. 2) oraz TAURONIT W: 0-31,5mm i 0-125 mm (rys. 3).

Rys. 1. Kruszywa dla drogownictwa

Rys. 2. Kruszywa do budownictwa hydromelioracyjnego

Rys. 3. Kruszywa do niwelacji terenów

2.4. Zastosowanie Kruszyw TAURONIT

Kruszywa TAURONIT stosuje się w:

- budownictwie drogowym, w tym głównie budowa nasypów drogowych,
- budowie wałów przeciwpowodziowych,

Open Access (CC BY-NC 4.0)

- robotach budowlanych w zakresie niwelacji i utwardzania terenu,
- budowie nasypów kolejowych,
- budowie podbudów,
- rekultywacji technicznej terenu.

Główne kierunki stosowania kruszyw to budownictwo drogowe oraz budownictwo hydrotechniczne (m.in. budowa wałów przeciwpowodziowych). W tych obszarach kruszywa posiadają Krajowe Oceny Techniczne:

- Krajowa Ocena Techniczna IBDiM-KOT-2020/0447 – Kruszywa naturalne z łupka powęglowego nieprzepalonego do mieszanek niezwiązanych i związanych hydraulicznie o nazwie handlowej **TAURONIT D** do zamierzonego zastosowania w budownictwie komunikacyjnym – data ważności do 12 lutego 2025 r. (rys. 4).

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
03-302 Warszawa, ul. Instytutowa 1
tel. sekretariat: 22 814 50 25, fax: 22 814 50 28

Warszawa, 26 czerwca 2020 r.

KRAJOWA OCENA TECHNICZNA

Nr IBDiM-KOT-2020/0447 wydanie 2

Na podstawie art 9 ust.2 ustawy z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych (t. j. Dz. U. z 2019 r. poz. 266), po przeprowadzeniu postępowania zgodnie z przepisami rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie krajowych ocen technicznych (Dz. U. z 2016 r. poz. 1968), na wniosek producenta o nazwie:

TAURON Wydobycie S. A.

z siedzibą: **ul. Grunwaldzka 37, 43-600 Jaworzno**

Instytut Badawczy Dróg i Mostów
stwierdza pozytywną ocenę właściwości użytkowych wyrobu budowlanego:

Kruszywa naturalne z łupka powęglowego nieprzepalonego do mieszanek niezwiązanych i związanych hydraulicznie

o nazwie handlowej: **TAURONIT D**

do zamierzonego zastosowania w budownictwie komunikacyjnym w zakresie podanym w niniejszej Krajowej Ocenie Technicznej IBDiM.

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW WARSZAWA

DYREKTOR
wz. Sadyle
prof. dr hab. inż. Leszek Rafalski

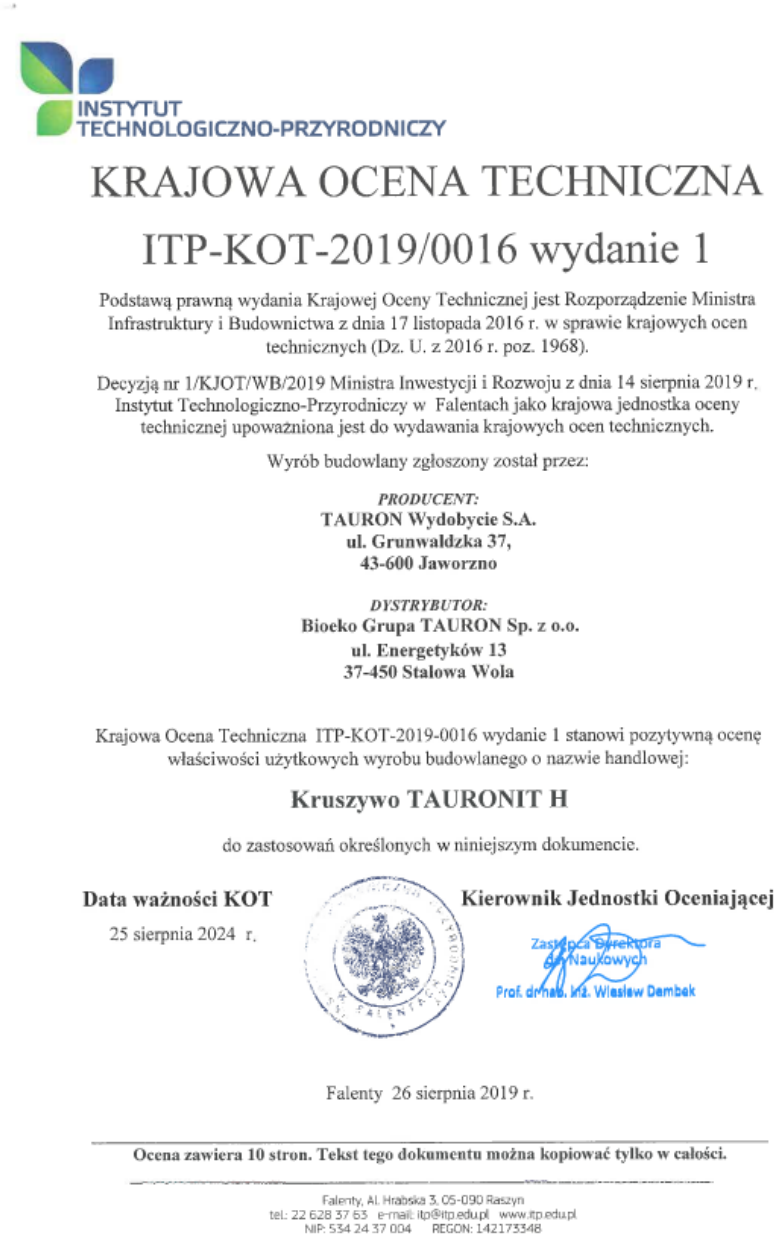
Data wydania Krajowej Oceny Technicznej: **12 lutego 2020 r.**
Data utraty ważności Krajowej Oceny Technicznej: **12 lutego 2025 r.**

Dokument Krajowej Oceny Technicznej Nr IBDiM-KOT-2020/0447 wydanie 2 zawiera stron **26** w tym Załączniki 2. Krajowa Ocena Techniczna Nr IBDiM-KOT-2020/0447 wydanie 2, zmienia Krajową Ocenę Techniczną Nr IBDiM-KOT-2020/0447 wydanie 1.

Rys. 4. Krajowa Ocena Techniczna TAURONIT D

 ISBN 978-83-65593-32-0

– Krajowa Ocena Techniczna ITP.-KOT-2019/0016 – wyrób budowlany o nazwie handlowej Kruszywo **TAURONIT H** do stosowania w budownictwie hydrotechnicznym i melioracyjnym - data ważności do 25 sierpnia 2024 r. (rys. 5).



INSTYTUT TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY

KRAJOWA OCENA TECHNICZNA

ITP-KOT-2019/0016 wydanie 1

Podstawą prawną wydania Krajowej Oceny Technicznej jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie krajowych ocen technicznych (Dz. U. z 2016 r. poz. 1968).

Decyzją nr 1/KJOT/WB/2019 Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 14 sierpnia 2019 r. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach jako krajowa jednostka oceny technicznej upoważniona jest do wydawania krajowych ocen technicznych.

Wyrób budowlany zgłoszony został przez:

PRODUCENT:
TAURON Wydobycie S.A.
ul. Grunwaldzka 37,
43-600 Jaworzno

DYSTRYBUTOR:
Bioeko Grupa TAURON Sp. z o.o.
ul. Energetyków 13
37-450 Stalowa Wola

Krajowa Ocena Techniczna ITP-KOT-2019-0016 wydanie 1 stanowi pozytywną ocenę właściwości użytkowych wyrobu budowlanego o nazwie handlowej:

Kruszywo TAURONIT H

do zastosowań określonych w niniejszym dokumencie.

Data ważności KOT
25 sierpnia 2024 r.

Kierownik Jednostki Oceniającej
Zastępca Dyrektora ds. Naukowych
Prof. dr hab. inż. Wiesław Dembek

Falenty 26 sierpnia 2019 r.

Ocena zawiera 10 stron. Tekst tego dokumentu można kopiować tylko w całości.

Falenty, Al. Hrabska 3, 05-090 Raszyn
tel.: 22 628 37 63 e-mail: itp@itp.edu.pl www.itp.edu.pl
NIP: 534 24 37 004 REGON: 142173348

Rys. 5. Krajowa Ocena Techniczna TAURONIT H

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

– Krajowa Ocena Techniczna ITB-KOT-2019/0673 – wyrób budowlany o nazwie handlowej Kruszywo **TAURONIT W** do rekultywacji terenów, w tym do niwelacji terenów niekorzystnie przekształconych - data ważności do 29 marca 2024 r. (rys. 6).

INSTYTUT TECHNIKI BUDOWLANEJ
PL 00-611 WARSZAWA, ul. Filtrowa 1, www.itb.pl

CZŁONEK EOTA i UEAtc

KRAJOWA OCENA TECHNICZNA
ITB-KOT-2019/0673 wydanie 1

Niniejsza Krajowa Ocena Techniczna została wydana zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 17 listopada 2016 r. w sprawie krajowych ocen technicznych (Dz. U. z 2016 r., poz. 1968) przez Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie, na wniosek:

Tauron Wydobycie S.A.
ul. Grunwaldzka 37, 43 - 600 Jaworzno

Krajowa Ocena Techniczna ITB-KOT-2019/0673 wydanie 1 stanowi pozytywną ocenę właściwości użytkowych poniższych wyrobów budowlanych do zamierzonego zastosowania:

Kruszywa z łupka powęglowego nieprzepalonego „Kruszywo TAURONIT W"

Data ważności Krajowej Oceny Technicznej:
29 marca 2024 r.

DYREKTOR
z up.
Zastępca Dyrektora
ds. Oceny Technicznej
i Harmonizacji Europejskiej
mgr inż. Anna Panek

Warszawa, 29 marca 2019 r.

Dokument Krajowej Oceny Technicznej ITB-KOT-2019/0673 wydanie 1 zawiera 11 stron, w tym 1 Załącznik. Tekst tego dokumentu można kopiować tylko w całości. Publikowanie lub upowszechnianie w każdej innej formie fragmentów tekstu Krajowej Oceny Technicznej wymaga pisemnego uzgodnienia z Instytutem Techniki Budowlanej.

Rys. 6. Krajowa Ocena Techniczna TAURONIT W

2.5. Instalacja produkcji kruszyw - TAURONIT D AW 0-31,5 mm

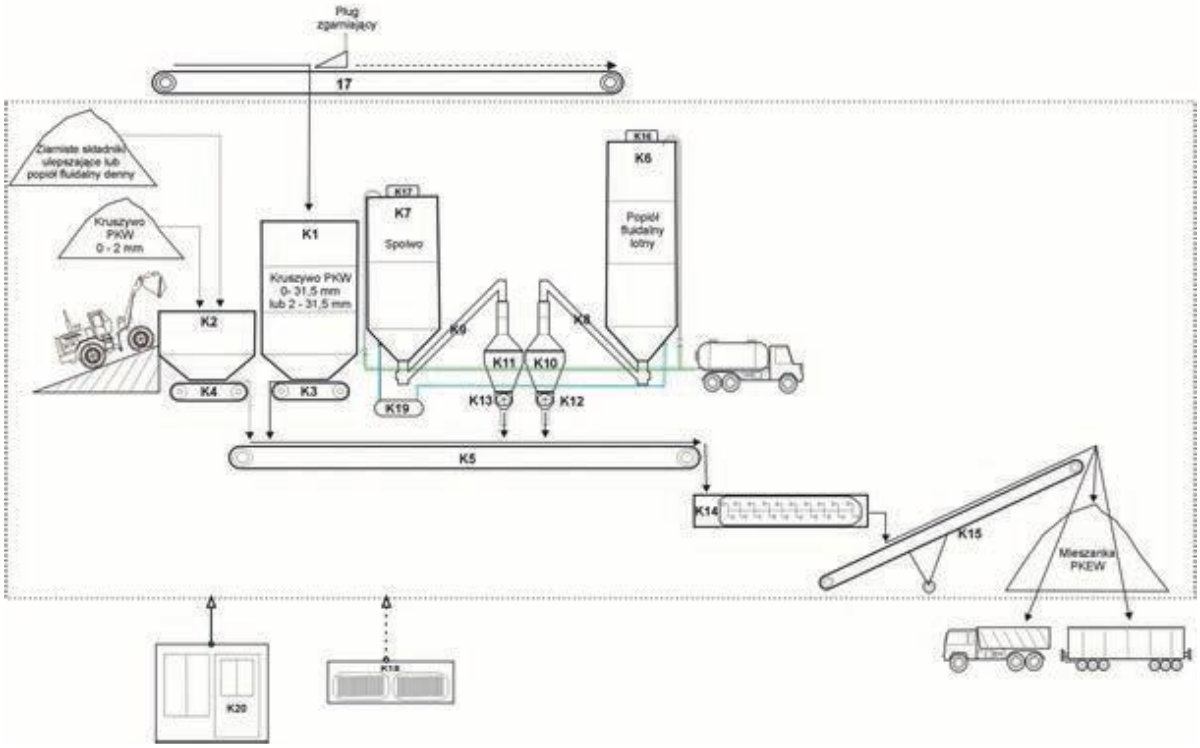
W czerwcu 2011 roku na terenie ZG Sobieski przy współpracy z firmą Ciepiela Technology Promotion została zainstalowana w oparciu o włoską linię produkcyjną RCC C MIX 2/150 instalacja (rys. 8, rys. 9, rys. 10) do ciągłej produkcji mieszanek kruszywowo-popiołowych, której wydajność wynosi około 150 Mg/godz.

Instalację włączono w ciąg technologiczny zakładu wzbogacania węgla, z którego wyselekcjonowana skała płonna (UPW) jest poddawana procesowi mieszania, w zależności

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

od produkowanego kruszywa, z określoną ilością i rodzajem spoiwa (popioły, cement, wapno) (rys. 7). Instalacja umożliwia tworzenie mieszanek stabilizowanych kruszywo-spoiwowych o różnych parametrach technicznych, zgodnie z jedną z 20 opracowanych receptur. Wszystkie dodatki, a w szczególności dodatki popiołów fluidalnych i spoiw na ich bazie, zawierających aktywne związki wapnia, mają za zadanie poprawę parametrów fizycznych i chemicznych kruszyw zwiększając, między innymi, ich wytrzymałość mechaniczną (nośność, wytrzymałość na ściskanie) oraz zmniejszając ich pęcznienie, współczynnik filtracji i rozpuszczalność.



Rys. 7. Schemat produkcji mieszanek kruszywowo-spoiwowych w ZG „Sobieski”

Rys. 8. Instalacja do produkcji mieszanek kruszywowo–popiołowych w ZG „Sobieski

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 9. Składowisko mieszanek kruszywowo–popiołowych w ZG „Sobieski”

Rys. 10. Gotowy produkt mieszanek kruszywowo–popiołowych w ZG „Sobieski

3. Współpraca TAURON Wydobycie S.A. z Bioeko Grupa TAURON Sp. z o.o. (BGT)

Od 2019 roku zgodnie z decyzją zakończonego „Projektu Reorganizacji Obszaru UPS i UPW w Grupie TAURON” oraz decyzją Zarządu TAURON Polska Energia S.A. (TPE), spółka BGT stała się jednym operatorem zewnętrznym GT w obszarze procesów sprzedażowych Ubocznych Produktów Spalania (UPS) i Ubocznych Produktów Wydobycia (UPW) [4, 5, 6].

TAURON wydobycie S.A. sukcesywnie prowadzi, obecnie z Bioeko Grupa TAURON Sp. z o.o., produkcję i sprzedaż kruszyw.

Przykładowe projekty budowlane, w których zostało zastosowane kruszywo produkowane przez ZG Sobieski TAURON Wydobycie S.A.

Kruszywa oferowane przez TAURON Wydobycie S.A. cieszą się dobrą opinią firm na rynku budowlanym i były wykorzystane głównie na terenie Małopolski i Śląska m.in. przy budowie obwodnicy Chrzanowa, modernizacji linii kolejowej Kraków – Katowice, do budowy nasypów

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

drogowych oraz kolejowych przy inwestycji budowy nowego bloku energetycznego 910 MW w Jaworznie (tabela 1).

Zestawienie realizacji zadań z wykorzystaniem kruszyw ZG Sobieski

Tabela 1

ZG Sobieski		
Nazwa zadania	**Okres realizacji**	**Ilość (tony)**
Nowy ślad drogi DK 79 - Jaworzno	IX 2010 - VI 2011	**26 300**
Północno-wschodnia obwodnica - Chrzanów	VII 2011 - IX 2012	**51 900**
Zachodnia obwodnica - Chrzanów	IV - X 2015	**132 700**
Rekultywacja składowiska odpadów - Trzebinia	X - XI 2015	**16 800**
Przebudowa węzeła Mirowskiego autostrady A4 - Kraków	II - III 2016	**25 300**
Przebudowa ulicy Szpitalnej - Chrzanów	V 2016	**7 600**
Naprawa szkód górniczych - Jaworzno	V - VI 2016	**9 200**
Rekultywacja osadnika KWK Jan Kanty - Jaworzno	IV - IX 2016	**124 500**
Obwodnica Myszkowa	VI 2017 - V 2018	**76 700**
Modernizacja linii kolejowej J-no Szczakowa - Trzebinia	VII 2017 - V 2018	**72 400**
Budowa odcinka kolejowego do Bloku 910 Jaworzno	III 2018 - V 2018	**82 500**
RAZEM	**2010 - 2018**	**625 900**

Obecnie kruszywa powydobywcze z Zakładów Górniczych TAURON Wydobycie S.A. wykorzystywane są między innymi przy rozbudowie DK 81, budowie drogi DK 79 w Jaworznie (rys. 11) oraz przy inwestycjach związanych z przebudową wałów przeciwpowodziowych w okolicach Oświęcimia (rys. 12).

Rys. 11. Budowa drogi DK 79 w Jaworznie (od ul. Wojska Polskiego do ul. Orląt Lwowskich)

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Rys. 12. Budowa wałów przeciwpowodziowych w okolicach Oświęcimia

4. Podsumowanie

Wdrożenie „podejścia produktowego" do zagospodarowania odpadów otworzyło nowe perspektywy i możliwości wykorzystania odpadów. Nowe kierunki wiążą się z koniecznością zapewnienia możliwie najlepszych parametrów mieszanek produktowych, niekiedy o różnych właściwościach dedykowanych dla konkretnych zastosowań. Wymaga to od producenta mieszanek zapewnienia stabilizacji, optymalizacji i specjalizacji w zakresie właściwości wytwarzanych produktów na bazie odpadów. Badania właściwości technologicznych różnego rodzaju mieszanin na bazie odpadów, powinny zmierzać do określenia zestawu właściwości szczególnie istotnych dla wybranych kierunków zagospodarowania, a także ograniczenia lub określenia zakresu zmienności właściwości produktów.

Przed wprowadzeniem nowych produktów na rynek, konieczne jest także wykonanie szczegółowych badań w zakresie wyeliminowania niekorzystnych interakcji pomiędzy składnikami mieszanin, oceny wypływu czasu i oddziaływań zewnętrznych na właściwości wytwarzanych produktów na bazie odpadów. Dopiero tak zgromadzona wiedza o zachowaniu się produktów na bazie odpadów zapewni możliwość bezpiecznego ich stosowania i użytkowania. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom odbiorców, a także dla zapewnienia zbytu, konieczne będzie opracowanie katalogu produktów na bazie odpadów, o właściwościach zoptymalizowanych dla wybranych kierunków zagospodarowania. Produkty takie wymagać będą szczegółowej i bieżącej analizy właściwości zarówno materiałów bazowych, jak również właściwości wytworzonych produktów. W przyszłości konieczne będzie elastyczne i dynamiczne zarządzanie strumieniem odpadów, w celu optymalizacji ich wykorzystania.

Literatura

1. Cała M., Tajduś A., Pomykała R., Przystaś R., Adamczyk J., Stopkowicz A., Kępys W., Wałach D., Blajer M., Kolano M.: Odpady energetyczne i wydobywcze jako składniki produktów dla górnictwa, budownictwa i geoinżynierii. XXIX Międzynarodowa konferencja „Popioły z energetyki 2016" Polska Unia Ubocznych Produktów Spalania, źródło książka „Popioły z energetyki" 2016
2. Dokumentacja Techniczno – Technologiczna Działu Przeróbki Mechanicznej Zakładu Górniczego Sobieski TAURON Wydobycie S.A. w Jaworznie (materiały niepublikowane)
3. Wróbel J., Fraś A., Przystaś R., Hycnar J. J., Tora B.: Uboczne produkty wzbogacania węgla źródłem paliw i kruszyw. Gospodarka odpadami poprodukcyjnymi w kopalniach Południowego Koncernu Węglowego S.A. Inżynieria Mineralna, Polskie Towarzystwo Przeróbki Kopalin 2017 r., strony 39-45
4. Materiały udostępnione przez Bioeko Grupa TAURON (materiały niepublikowane)
5. https://bioeko.tauron.pl [dostęp 01.03.2023]
6. https://www.tauron-wydobycie.pl [dostęp 01.03.2023]

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.7

Przegląd literatury dotyczącej odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE

Paweł Friebe – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przeprowadzono przegląd literatury dotyczącej recyklingu ZSEiE (zużyte sprzęty elektryczne i elektroniczne) wyposażonych w magnesy NdFeB. Magnesy te zawierają w swoim składzie REE (Rare Earth Elements – pierwiastki ziem rzadkich), takie jak: Nd – neodym, Dy – dysproz, Pr – prazeodym. Sprzęty wyłączone z eksploatacji zawierające magnesy NdFeB mogą stać się źródłem pozyskiwania REE. W przeglądzie literatury zebrane zostały informacje dotyczące ilości magnesów NdFeB, wykorzystywanych do produkcji urządzeń komercyjnych w danych latach, co pozwoli oszacować ilość przyszłych odpadów zawierających te magnesy. Zamieszczono również zestawienie metali zawartych w ZSEiE, na przykładzie dysków twardych, co wykorzystano następnie do wyznaczenia potencjalnych przychodów ze sprzedaży metali pochodzących z recyklingu 1 Mg ZSEiE. W niniejszej publikacji przedstawiona została koncepcja technologii recyklingu REE z ZSEiE z zastosowaniem podejścia Magnet-to-Magnet. Technologia ta obejmuje przetwarzanie dysków twardych począwszy od ich pozyskania, a skończywszy na uzyskaniu sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB, przy zachowaniu niskiej emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Słowa kluczowe: ZSEiE, recykling, Magnet-to-Magnet, magnesy NdFeB, gospodarka o obiegu zamkniętym

Literature review on the recovery of powdered mixed NdFeB alloy from WEEE

Abstract: This chapter presents a literature review on the recycling of WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) containing NdFeB magnets. These magnets contain REE (Rare Earth Elements) in their composition such as Nd - Neodymium, Dy - Dysprosium, Pr - Praseodymium. Waste equipment containing NdFeB magnets can be a source of REEs. The literature review includes information on the quantities of NdFeB magnets used in the manufacture of commercial equipment in specific years, which allows an estimation of future waste containing these magnets. A summary of the metals contained in WEEE was also included, using hard drives as an example, which was then used to determine the potential revenue from the sale of metals from the recycling of 1 Mg of WEEE. This publication presents the concept of a technology for recycling REE from WEEE using a magnet-to-magnet approach. This technology involves the processing of the REE from collection to the production of a powdered NdFeB alloy mixture with low emissions to the environment.

Keywords: WEEE, recycling, Magnet-to-Magnet, NdFeB magnets, circular economy

1. Wprowadzenie

REE są stosowane w elektronice, ale również w medycynie oraz przy wytwarzaniu specjalnych materiałów. Pierwiastki te znajdują się między innymi w magnesach NdFeB (neodymowych) ze stopu $Nd_2Fe_{14}B$ szeroko stosowanych w sprzętach elektronicznych, które po wyeksploatowaniu są wycofywane z użytku [1]. Magnesy te w swoim składzie zawierają następujące REE: Nd – neodym, Dy – dysproz, Pr – prazeodym. Wygenerowane ZSEiE, mogą stać się wtórnym źródłem pierwiastków krytycznych, w tym REE poprzez skierowanie ich do recyklingu [2].

Jedną z alternatywnych metod pozyskiwania REE jest metoda recyklingu nazywana Magnet-to-Magnet [3]. Procesy technologiczne stosowane w tej metodzie polegają na ponownym wykorzystaniu magnesów NdFeB w celu wytworzenia z nich mieszaniny drobnych ziaren. Mieszanina ta po dalszej obróbce metalurgicznej ma posłużyć do wytworzenia nowych produktów, tj. nowych magnesów NdFeB.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Zakładając, że pozostałe składniki przetwarzanych urządzeń również będą selektywnie separowane i wykorzystane, ograniczy się znacząco ilość generowanych odpadów, co jest zgodne z polityką gospodarki obiegu zamkniętego.

2. Cel

Celem niniejszej publikacji jest identyfikacja ilości magnesów NdFeB, jaka jest wykorzystywana do produkcji urządzeń komercyjnych. Informacja ta pozwoli określić jaka ilość magnesów NdFeB będzie możliwa do odzyskania, po ich wyeksploatowaniu. Niniejszy rozdział został opracowany również w celu oszacowania zawartości REE w dyskach twardych oraz ich wartości finansowej. Kolejnym celem rozdziału jest przedstawienie koncepcji technologii recyklingu REE z ZSEiE, z wykorzystaniem metody Magnet-to-Magnet, również na przykładzie dysków twardych. Technologia ta obejmuje przetwarzanie dysków twardych począwszy od ich pozyskania, a skończywszy na uzyskaniu sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB. Technologia ta obejmuje procesy fizyczne, takie jak: segregacja, rozdrabnianie, separacja, demagnetyzacja, mielenie, które będą prowadziły do uzyskania sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB ze zużytych sprzętów, przy zachowaniu niskiej emisji zanieczyszczeń do środowiska.

3. Analiza literatury

W zamieszczonej poniżej tabeli 1 zawarto dane dotyczące globalnej ilości sprzedaży sprzętów, do których budowy zostały wykorzystane komponenty z magnesami NdFeB. Ilość sprzętów wprowadzanych na rynek odpowiadać będzie ilości sprzętów wyłączonych z użytkowania, po ich wyeksploatowaniu.

Znając masę magnesu NdFeB zużywaną do produkcji jednej sztuki danego produktu oraz wartość jego sprzedaży, wyznaczona zostanie całkowita masa wykorzystanego NdFeB. Materiał ten będzie mógł zostać przetworzony ponownie w przyszłości na drodze recyklingu. Największy udział magnesów NdFeB wynoszący – 70,9% jest wykorzystywany do budowy turbin wiatrowych, zaś do produkcji pojazdów zużywane jest 19,2% wszystkich magnesów. Najmniejszy udział w zużyciu magnesów NdFeB posiada elektronika konsumencka i sprzęt komputerowy wynoszący 9,7%.

Ponowne wykorzystanie NdFeB z turbin wiatrowych polega na ich demontażu z turbiny uszkodzonej i ponownym montażu w nowej turbinie. Większą trudność sprawiają pozostałe wymienione sprzęty z uwagi na niewielki rozmiar zastosowanych w nich magnesów. Przetwarzanie ręczne takich urządzeń jest kłopotliwe oraz bardzo kosztowne. Ze względu na to konieczne jest opracowanie technologii umożliwiającej odzysk cennych metali, w tym REE z urządzeń komercyjnych o mniejszych rozmiarach.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Wykorzystanie magnesów NdFeB w sprzętach elektronicznych [4]

Tabela 1

Podzespoły urządzeń zawierające magnesy NdFeB	Masa magnesów w sztuce urządzenia	Globalna sprzedaż danego urządzenia	Całkowita masa magnesów przypadająca urządzeniom wyprodukowanym w danym roku [kg/%]
dyski twarde komputerowe	10-20 g	316,3 mln sztuk w 2019	4 744 500/ 9,0
głośniki tel. kom.	0,046-0,120 g	1378,7 mln sztuk w 2020	114 432/ 0,2
głośniki laptopów	1-2,4 g	167,0 mln sztuk w 2020	283 900/ 0,5
silniki klimatyzatorów	-	5,91 mln sztuk w 2020	-
generatory turbin wiatrowych	400 kg/MW	93,0 GW nowych instalacji w 2020	37 200 000/ 70,9
silniki pojazdów elektrycznych	2,1 kg	1,9 w 2021	3 990 000/ 7,6
silniki pojazdów hybrydowych	1,4 kg	3,5 w 2021	4 900 000/ 9,3
silniki hulajnóg elektrycznych	300-350 g	3,7 (tylko w UE) w 2020	1 202 500/ 2,3
		Sumarycznie	52 435 332

Oszacowano możliwe przychody ze sprzedaży metali zawartych w 1 Mg ZSEiE na przykładzie dysków twardych (tabela 2). Szacunku tego dokonano na podstawie średnich zawartości poszczególnych metali, które uzyskano z literatury oraz na podstawie cen metali na giełdzie. Sumaryczna wartość metali w 1 Mg ZSEiE wynosi 10 484,00 USD. Znacząca część tej kwoty należy do metali, takich jak: Ag – 1228,00 USD, Au – 4333,00 USD oraz Pd – 982,00 USD. Metale te są zawarte w płycie obwodów drukowanych, która jest jednym z elementów dysku twardego.

Pierwiastki: Al – 1435,00 USD, Si – 249,00 USD oraz Cu – 452,90 USD są zawarte w obudowie dysku. Magnesy NdFeB zawierają metale, takie jak: Fe – 3,70 USD, Nd – 1037,00 USD, Pr – 151,00 USD, Dy – 352,00 USD. Wynika z tego, że dyski twarde mogą stać się wtórnym źródłem pozyskiwania surowców krytycznych – pierwiastków ziem rzadkich oraz innych cennych metali.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Średnia zawartość danego metalu w dyskach twardych oraz wartość tych metali [5, 6]

Tabela 2

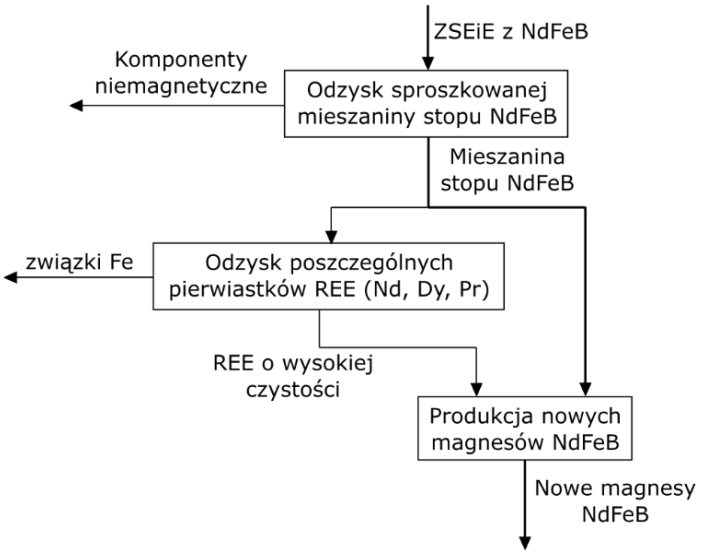
Metal	Średnia zawartość metalu w dyskach twardych [%]	Wartość danego metalu w 1 Mg dysków twardych [USD]	Wartość sumaryczna metali zawartych w 1 Mg dysków twardych [USD]
Al	64,0	1435	10484,0
Si	8,9	249,0	
Fe	3,2	3,7	
Cu	5,4	452,9	
Ni	0,18	49,0	
Sn	0,17	41,5	
Ti	0,04	3,8	
Zn	0,03	0,8	
Ce	0,04	132,0	
Nd	0,73	1037,0	
Pr	0,11	151,0	
Dy	0,08	352,0	
Co	0,07	34,1	
Sb	0,01	0,8	
Ta	0,06	0,3	
Ag	0,0234	1228,0	
Au	0,0071	4333,0	
Pd	0,0015	982,0	

4. Koncepcja technologii recyklingu zużytych sprzętów

Celem opracowania niniejszej technologii jest umożliwienie odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE, która pozwoli na zwiększenie możliwości produkcji niezbędnych dla nowoczesnych technologii – magnesów NdFeB. Jednocześnie ograniczy się oddziaływanie na środowisko, w porównaniu do górnictwa metali ze źródeł naturalnych. Technologia obejmuje wykorzystanie fizycznych metod przeróbki surowców. Propozycja technologii bezpośredniego recyklingu Magnet-to-Magnet została przedstawiona na rysunku 1 pogrubioną linią. Jednakże kontrolowana produkcja nowych magnesów NdFeB, będzie wymagać utrzymywania odpowiedniego stosunku składników stopu, co będzie się wiązało z koniecznością użycia, między innymi, pierwiastków ziem rzadkich o wysokiej czystości. Mogą one zostać pozyskane metodami hydrometalurgicznymi również wykorzystując uzyskaną, sproszkowaną mieszaninę stopu NdFeB.

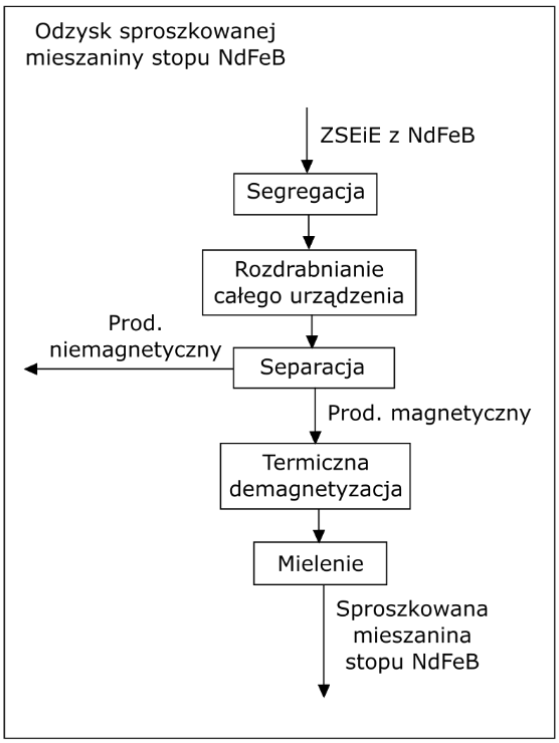
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0



Rys. 1. Etapy recyklingu prowadzące do wytworzenia nowych magnesów NdFeB z ZSEiE

Procesy proponowane do wykorzystania w technologii odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE przedstawiono na rysunku 2. Zastosowano tu tylko procesy fizycznej przeróbki materiałów, które zostały scharakteryzowane w dalszej części publikacji.



Rys. 2. Koncepcja technologii odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB, zgodnie z podejściem Magnet-to-Magnet

Pierwszym etapem recyklingu ZSEiE zawierających magnesy NdFeB jest ich segregacja. Ze względu na odmienną budowę ZSEiE, konieczny jest ich rozdział na grupy zawierające np. tylko telefony komórkowe czy dyski twarde. ZSEiE takie jak wcześniej wymienione w tabeli 1 posiadają odmienną charakterystykę, tj. masę magnesów, trudność rozdrabniania i inne. Z tego powodu do

Open Access (CC BY-NC 4.0)

recyklingu powinno kierować się strumienie materiału zawierające tylko jeden dany zużyty produkt, by w kolejnych procesach uzyskać możliwie jak najwyższą sprawność odzysku. Pozyskanie wstępnie rozdzielonych na grupy ZSEiE jest możliwe z przedsiębiorstw, zajmujących się zbiórką odpadów, które znajdują się przy większych polskich miastach. Kolejnym etapem jest proces rozdrabniania. Do tego procesu zastosowane zostanie urządzenie nazywane dezintegratorem. Zasada działania tego urządzenia jest następująca: materiał trafia między przeciwbieżnie obracające się i zazębione pary wałów tnących, które powoli odrywają niewielkie fragmenty materiału, aż do jego całkowitego przejścia pomiędzy wałami. W urządzeniu tym zastosowano podzespoły rozdrabniające wykonane z materiałów niemagnetycznych, które umożliwią rozdrabnianie ZSEiE z wbudowanymi, silnymi magnesami NdFeB.

Następnym procesem jest separacja. Zastosowanie tego procesu ma na celu wydzielenie, z rozdrobnionego wcześniej materiału – cząstek ferromagnetycznych tj. magnesów NdFeB, które są częścią mechanizmu pozycjonującego dysku twardego. Proces ten może przebiegać w separatorze magnetycznym, który umożliwi wydzielenie cząstek ferromagnetycznych. Produkt niemagnetyczny stanowi mieszanina cząstek rozdrobnionych, pozostałych podzespołów dysków twardych, takich jak: obudowy, płyty obwodów drukowanych, talerze, głowice oraz mniejsze części plastikowe. W dalszej kolejności produkt magnetyczny kierowany ma być do demagnetyzacji. Celem tego procesu jest rozmagnesowanie magnesów NdFeB w celu umożliwienia prowadzenia następnego procesu – mielenia. Proces ten jest realizowany poprzez ogrzewanie magnesów powyżej ich temperatury punktu Curie 312°C [7]. Powyżej tej temperatury drgania cieplne sieci krystalicznej niszczą ustawienia dipoli magnetycznych, w wyniku czego magnesy NdFeB stają się paramagnetykami, a po ochłodzeniu mogą one być ponownie namagnesowane [8, 9]. Temperatura punktu Curie może być jednak wyższa. Jest ona zależna od dodatków stopowych, które mogą wpływać na podwyższenie temperatury punktu. Dodatkami tymi są pierwiastki, takie jak dysproz (Dy), terb (Tb) i kobalt (Co). Mogą one podwyższyć temperaturę Curie do 350÷400°C [10, 11].

Ostatnim procesem omawianej koncepcji jest proces mielenia, który jest prowadzony w celu uzyskania sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB o jednorodnym uziarnieniu. Do procesów hydrometalurgicznego odzysku REE ze zużytych magnesów NdFeB wymagane jest uziarnienie około 500 μm [12]. Z kolei do ponownego przetworzenia sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB na nowe magnesy, wymagane jest głębsze mielenie – do około 5 μm, które może być przeprowadzone przy pomocy młynów strumieniowych. Po uzyskaniu proszku o odpowiednim uziarnieniu możliwe jest jego ponowne przetworzenie na nowe magnesy wykorzystując te same procesy produkcji magnesów NdFeB, co w przypadku wykorzystania materiału wcześniej nieprzetwarzanego [9].

5. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zebrane zostały informacje dotyczące ilości magnesów NdFeB aktualnie stosowanych do produkcji urządzeń elektronicznych. Masa magnesów NdFeB wykorzystana do produkcji nowych urządzeń będzie identyczna z masą magnesów w sprzętach wyłączonych z użytku, po ich wyeksploatowaniu. Spośród analizowanych grup urządzeń elektronicznych największa część magnesów NdFeB jest stosowana do budowy turbin wiatrowych - 70,9%, zaś do produkcji pojazdów elektrycznych i hybrydowych wykorzystywane jest 19,2% wszystkich magnesów. Elektronika konsumencka i sprzęt komputerowy posiadają najmniejszy udział w zużyciu magnesów NdFeB wynoszący 9,7%.

Ponadto, na przykładzie dysków twardych oszacowano potencjalne przychody ze sprzedaży metali zawartych w 1 Mg ZSEiE. Przeanalizowana została zawartość poszczególnych metali w dysku twardym oraz ich ceny na rynku. Całkowita wartość metali w 1 Mg ZSEiE wyniosła 10 484,00 USD. Większość tej kwoty należy do metali szlachetnych, takich jak: Ag, Au, Pd (6 543,00 USD). Metale te są związane

Open Access (CC BY-NC 4.0)

z płytą obwodów drukowanych, która jest jednym z elementów dysku twardego. Metale, takie jak: Al, Si oraz Cu (2 136,90 USD), związane są z obudową dysku twardego. Z kolei metale ziem rzadkich, takie jak: Nd, Pr, Dy (1 543,70 USD), zawarte są w magnesach NdFeB, które są częścią układu pozycjonowania głowicy dysku twardego.

Ze względu na duże znaczenie pierwiastków ziem rzadkich w przemyśle oraz globalne ryzyko niedoborów dostaw, pierwiastki te zostały określone przez Komisję Europejską „surowcami krytycznymi". Z tego względu zaproponowana została technologia odzysku sproszkowanej mieszaniny stopu NdFeB z ZSEiE. Aktualnie stosowane sposoby odzyskiwania REE z magnesów NdFeB obejmują wykorzystanie procesów hydrometalurgicznych, które powodują powstanie szkodliwych emisji do środowiska. W zaprezentowanej koncepcji technologii odzysku wykorzystano procesy fizycznej przeróbki surowców, które nie powodują znacznego obciążenia środowiska. Uzyskana w efekcie drobnoziarnista mieszanina stopu NdFeB umożliwi zamknięcie pętli recyklingu, zmniejszając tym samym zanieczyszczenie środowiska spowodowane koniecznością pozyskiwania REE ze źródeł naturalnych oraz deponowaniem odpadów – ZSEiE.

Literatura

1. Binnemans K., McGuiness P., Jones P. T.: Rare-earth recycling needs market intervention. Nature Reviews Materials, 6(6), 2021, s. 459–461
2. Yang Y., Walton A., Sheridan R., Güth K., Gauß R., Gutfleisch O., Binnemans K.: Ree recovery from end-of-life NDFEB permanent magnet scrap: A critical review. Journal of Sustainable Metallurgy, 3(1), 2016, s.122–149
3. Jin H., Afiuny P., McIntyre T., Yih Y., &amp, Sutherland J. W.: Comparative life cycle assessment of ndfeb magnets: Virgin production versus magnet-to-magnet recycling. Procedia CIRP, 48, 2016, s. 45–50
4. Friebe P., Suponik T., Nuckowski P.: Research on hard drives in the context of the construction of shredding knives in the recovery of rare earth elements. Materiały na konferencję "EURECA-PRO Conference on Responsible Consumption and Production 2022", Leon, 19-21 września 2022
5. https://www.lme.com/en/ [dostęp 29 grudnia 2022]
6. https://www.metal.com/ [dostęp 28 grudnia 2022]
7. Sagawa M., Fujimura S., Yamamoto H., Matsuura Y., Hiraga K.: Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. IEEE Transactions on Magnetics, 20(5), 1984, s. 1584–1589
8. Jiles D.: Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. 2nded. New York: Chapman & Hall, 1998
9. Zakotnik M., Tudor C. O., Peiró L. T., Afiuny P., Skomski R., &amp, Hatch G. P.: Analysis of energy usage in Nd–Fe–B magnet to magnet recycling. Environmental Technology & Innovation, 5, 2016, s. 117–126
10. Abrahami S. T., Xiao Y., &amp, Yang Y.: Rare-earth elements recovery from post-consumer hard-disc drives. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 124(2), 2014, s. 106–115
11. http://pl.bhmagnets.com/news/curie-temperature-and-working-temperature-of-s-25362646.html [dostęp 16 grudnia 2022]
12. Erust C., Akcil A., Tuncuk A., Deveci H., &amp, Yazici E. Y.: A multi-stage process for recovery of neodymium (ND) and dysprosium (dy) from spent hard disc drives (hdds). Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 42(2), 2019, s. 90–101

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.8

Nowa technologia wytwarzania wodoru i kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórniczych

Piotr Matusiak – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Daniel Kowol – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono założenia i strukturę projektu H2GEO finansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali, którego liderem jest Instytut Techniki Górniczej KOMAG. Opisano dotychczasowy stan wiedzy w obszarach badawczych projektu. Przedstawione zostały główne cele projektu, które mają zostać osiągnięte w ciągu 3 lat jego trwania, w tym opracowanie systemu do rozdziału odpadów pogórniczych, opracowanie technologii produkcji kompozytów geopolimerowych oraz wodoru z wydzielonych frakcji mineralnych i energetycznych. Ponadto w rozdziale opisano szczegółowo cele pakietów roboczych. Uniwersalność kompleksowej, opracowanej w ramach projektu, technologii zagospodarowania składowisk odpadów pogórniczych pozwoli na jej wykorzystanie we wszystkich krajach, w których górnictwo węglowe jest wygaszane.

Słowa kluczowe: składowisko odpadów pogórniczych, węgiel, skała płonna, kompozyt geopolimerowy, wodór

New technology for hydrogen and geopolymer composites production from post-mining waste

Abstract: This chapter presents the assumptions and structure of the H2GEO project funded by the Coal and Steel Research Fund, led by the KOMAG Institute of Mining Technology. The state of the art in the research areas of the project is described. The main objectives of the project, which are to be achieved within 3 years, are presented, including the development of a system for the separation of post-mining waste, the development of technology for the production of geopolymer composites and hydrogen from separated mineral and energy fractions. In addition, the paper details the objectives of the work packages. The versatility of the comprehensive post-mining waste dump management technology developed within the project will allow it to be used in all countries where coal mining is being phased out.

Keywords: post-mining landfill, coal, gangue, geopolymer composite, hydrogen

1. Wprowadzenie

W celu pozyskania środków finansowych z Funduszu Badawczego Węgla i Stali (RFCS) na opracowanie technologii wytwarzania wodoru i kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórniczych zostało zawiązane konsorcjum składające się z 7 jednostek z 3 krajów (Polska, Czechy i Słowacja):

1. Instytut Techniki Górniczej KOMAG – lider projektu.
2. Główny Instytut Górnictwa.
3. Slovak Academy of Sciences. Institute of Construction and Architecture of SAS (Słowacja).
4. Instytut Technologii Paliw i Energii (dawne IChPW).
5. VSB - Technical University of Ostrava (Czechy).
6. Politechnika Wrocławska.
7. Haldex S.A.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

W ramach projektu, któremu nadano akronim H2GEO planowane jest opracowanie kompleksowej technologii zagospodarowania składowisk (hałd) odpadów wydobywczych.

Składowiska odpadów kopalnianych (rys. 1) powstałe głównie w wyniku mechanicznej przeróbki węgla kamiennego, degradują środowisko i stwarzają wiele zagrożeń, do których można zaliczyć m.in. pożary i związane z nimi wydzielanie gazów zanieczyszczających atmosferę (tlenek i dwutlenek węgla), a także zanieczyszczenia wód powierzchniowych i gruntowych, poprzez wymywanie ze składowisk chlorków i siarczanów.

Rys. 1. Centralne Składowisko Odpadów Górniczych w Knurowie

Ponadto składowiska są uciążliwe same w sobie, gdyż zajmują znaczne powierzchnie gruntu, który staje się nieużytkiem. Eliminacja ww. zagrożeń może ułatwić proces rekultywacji i zagospodarowania gruntów.

Problemy te występują w większym lub mniejszym stopniu we wszystkich krajach produkujących węgiel obecnie lub w przeszłości [1-5].

Składowiska kopalniane (hałdy) powinny być traktowane jako wtórne złoża materiałów użytecznych. Analiza literaturowa wykazała, że po odpowiedniej przeróbce mechanicznej oczyszczone odpady kopalniane można stosować jako:

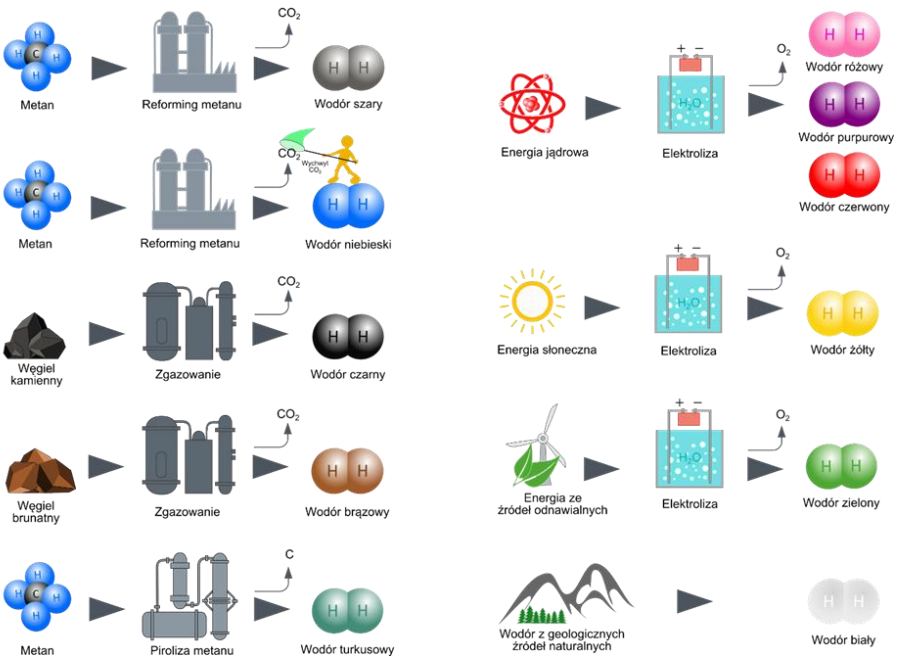
- mieszanki kruszyw wzbogacanych innymi mrozoodpornymi kruszywami,
- materiały do budownictwa hydrotechnicznego (groble ziemno-nasypowe, wały przeciwpowodziowe),
- składniki do produkcji materiałów budowlanych (cement, ceramika, budowlana),
- składniki do ulepszenia podbudów zasadniczych i pomocniczych,
- materiał podsadzkowy do podsadzania wyrobisk podziemnych,
- materiał podsypkowy do zimowego utrzymania dróg oraz stabilizacji i wypełniania gruntów [6].

Wykorzystywanie odpadów zalegających składowiska jest działaniem zgodnym ze zrównoważonym rozwojem. Przyczynia się bowiem do zmniejszenia ilości składowanych odpadów i powoduje uzyskanie oszczędności w nieodnawialnych zasobach naturalnych surowców.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Uniwersalność opracowanej technologii pozwoli na jej zastosowanie w innych krajach UE, gdzie hałdy stwarzają problemy środowiskowe i społeczne. Główną ideą projektu jest opracowanie nowej technologii przetwarzania odpadów mineralnych i popiołów lotnych z wykorzystaniem (utylizacją) CO_2 do produkcji kompozytów geopolimerowych. Ponadto projekt określi kierunki zagospodarowania wydzielonej z odpadów frakcji energetycznej. Prowadzone będą badania mające na celu opracowanie efektywnej metody produkcji wodoru (rys. 2) z gazu syntezowego otrzymywanego ze zgazowania frakcji węglowych.



Rys. 2. Rodzaje wodoru [ITPE]

W celu uzyskania wysokiej jakości materiałów z odpadów wydobywczych do dalszego przetwarzania, na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizy możliwości wykorzystania wybranych procesów wzbogacania, opracowana zostanie koncepcja i dokumentacja mobilnego systemu wzbogacania odpadów kopalnianych.

Opracowana jednostka mobilna zostanie wyposażona w innowacyjny system sterowania, który umożliwi bardzo efektywną separację odpadów i pozyskiwanie wysokojakościowych produktów.

2. Aktualny stan wiedzy z zakresu projektu

2.1. Technologia przeróbki odpadów

Możliwy, a nawet konieczny jest odzysk węgla ze składowisk odpadów wydobywczych [6-8]. Po pierwsze, odzysk węgla zmniejsza ryzyko samozapłonu i pożarów składowisk. Po drugie, proces odzysku materiałów użytecznych jest ekonomicznie uzasadniony. Z analizy literatury wynika, że zawartość węgla w odpadach wydobywczych w różnych krajach Europy może sięgać nawet 30%.

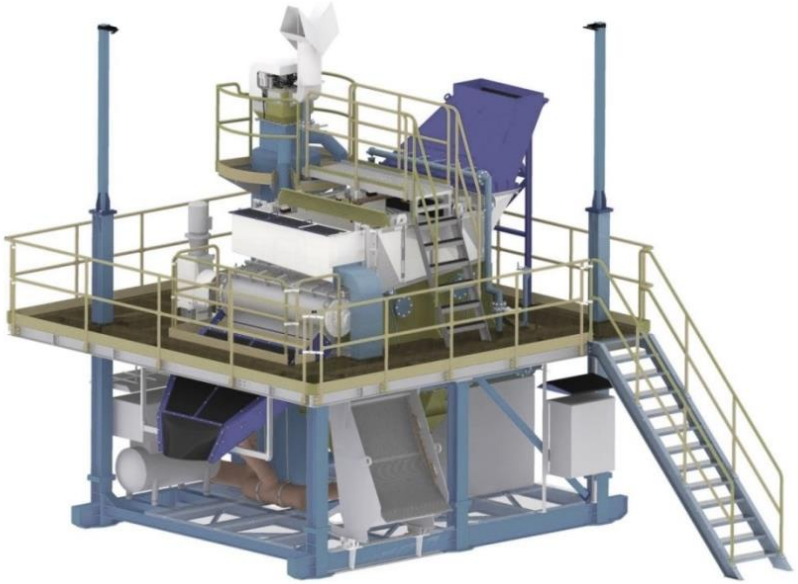
Technologia stosowana przy odzyskiwaniu materiałów użytecznych z materiału hałdowego jest typowa dla przeróbki węgla kamiennego i obejmuje etapy klasyfikacji, wzbogacania i odwadniania. Z uwagi na znaczną różnicę gęstości ziaren frakcji palnej (węgla) oraz skały płonnej skuteczny rozdział odpadów jest możliwy poprzez zastosowanie technologii wzbogacania grawitacyjnego.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Znane są rozwiązania pozwalające na rozdział (wzbogacanie) odpadów wydobywczych:

- w cieczy ciężkiej – cyklony c. c.,
- w ośrodku wodnym – klasyfikator (osadzarka) pulsacyjna (rys. 3), hydrosizer.



Rys. 3. Klasyfikator pulsacyjny K-102 [7]

Niezwykle istotnym elementem układu wzbogacania jest system sterowania, który umożliwia dostosowanie parametrów procesu do wymaganej jakości wyrobów określonej przez użytkownika.

2.2. Geopolimery

Odzyskane w wyniku procesu wzbogacania w osadzarkach frakcje mineralne i energetyczne mogą stanowić surowiec do dalszego przetwarzania z wykorzystaniem innych materiałów odpadowych.

Jednym z obiecujących kierunków jest możliwość otrzymania geopolimerów z wyżej wymienionych materiałów odpadowych [9-13].

Geopolimery (rys. 4) są stosunkowo nową klasą materiałów, które znalazły już szerokie zastosowanie w transporcie, metalurgii, materiałach filtracyjnych i utylizacji odpadów jądrowych.

Rys. 4. Przykład kostek z geopolimerów [14]

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Do zalet geopolimerów należy zaliczyć m.in.:

- niską szkodliwość dla środowiska (dwukrotnie mniej energochłonny proces w stosunku do produkcji cementu portlandzkiego oraz 4–8 razy mniejsze wydzielanie dwutlenku węgla),
- doskonałe właściwości mechaniczne,
- odporność na działanie wysokich temperatur i kwasów.

Z kolei do wad należy zaliczyć:

- wyższą temperaturę utwardzania (temperatura otoczenia nie jest wystarczająca),
- w przypadku utwardzania w temperaturze otoczenia niższą wytrzymałość i twardość,
- krótki czas wiązania,
- stosunkowo wysoką cenę.

Produkty te mogą być wykorzystane na wiele sposobów np. jako materiał do zasypywania pustek poeksploatacyjnych, budowy ulic i dróg (rys. 5), jako surowiec w przemyśle cementowym i betonowym, jako surowiec do produkcji materiałów budowlanych i nawozów. Nie ustają jednak działania zmierzające do znalezienia nowych możliwych zastosowań popiołów. Najnowsze badania koncentrują się na wykorzystaniu ubocznych produktów spalania węgla.

Rys. 5. Przykładowe zastosowanie geopolimerów:
a) poziomowanie, b) wypełnianie kawern, c) wsparcie strukturalne

2.3. Zgazowanie

Zgazowanie ma wiele zalet, w tym możliwość wykorzystania różnych rodzajów paliw, takich jak węgiel, biomasa czy odpady, do produkcji czystego gazu syntezowego.

Zgazowanie przepływowe (rys. 6)

Zalety:

- obecnie najnowocześniejsze reaktory do zgazowania,
- konstrukcje umożliwiają wytwarzanie bardzo czystych gazów syntezowych z niemal całkowitą konwersją.

Wady:

- trudność w utrzymaniu stałego składu chemicznego popiołu i znaczna jego ilość w przypadku surowców mineralnych zawierających duże ilości substancji mineralnych o różnych właściwościach fizykochemicznych,

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

– problemy z usuwaniem żużla i spadek mocy reaktora.

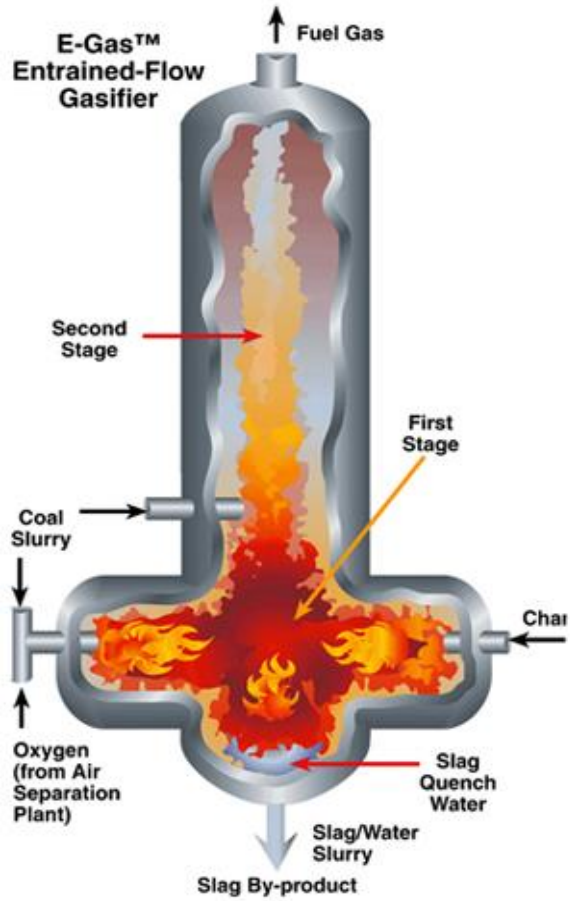
Zgazowanie w złożu fluidalnym (rys. 7)

Zalety:

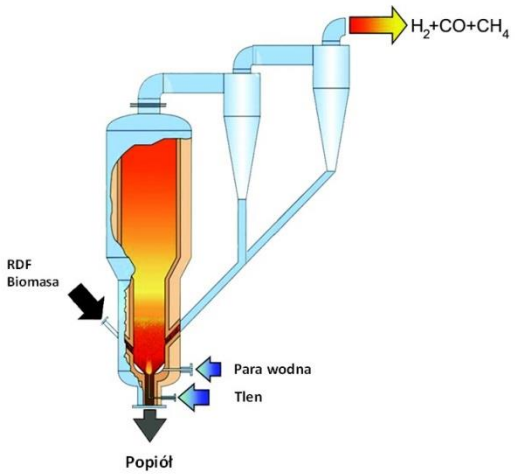
– dostępność na rynku rozwiązań komercyjnych,
– konwersja surowca zachodzi szybko i z dużą wydajnością,
– struktura popiołu zwiększa jego przydatność do odzyskiwania CRM.

Wady:

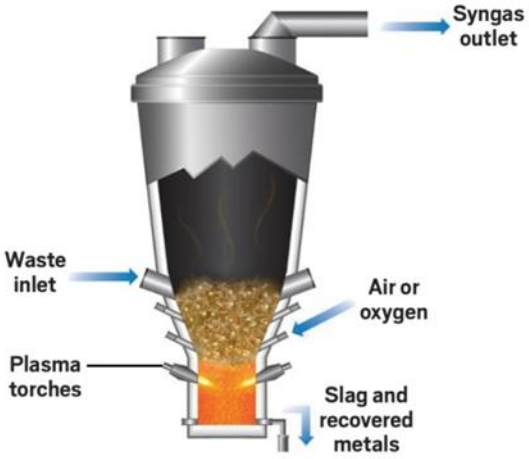
– konieczność ograniczenia temperatury konwersji poniżej temperatury topnienia popiołu wsadu,
– gaz syntezowy jest nieco bogatszy w związki organiczne i często wymaga zastosowania reaktorów do krakingu i konwersji.



Rys. 6. Reaktor do zgazowywania przepływowego [15]



Rys. 7. Schemat reaktora zgazowania ze złożem fluidalnym [16]



Rys. 8. Schemat reaktora do zgazowania plazmowego [17]

Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

Zgazowanie plazmowe (rys. 8)

Zalety:

- uzyskuje się gaz syntezowy o bardzo wysokiej czystości i minimalnej zawartości węglowodorów,
- frakcja mineralna odzyskiwana jest w zeszklonej formie, która może być łatwo wykorzystana w inżynierii lądowej.

Wady:

- forma (struktura) popiołu może uniemożliwić ewentualny odzysk CRM,
- palniki indukcyjne i laserowe (lub inne typy palników plazmowych) są nadal w fazie rozwoju lub są używane tylko w instalacjach pilotażowych.

2.4. Produkcja wodoru

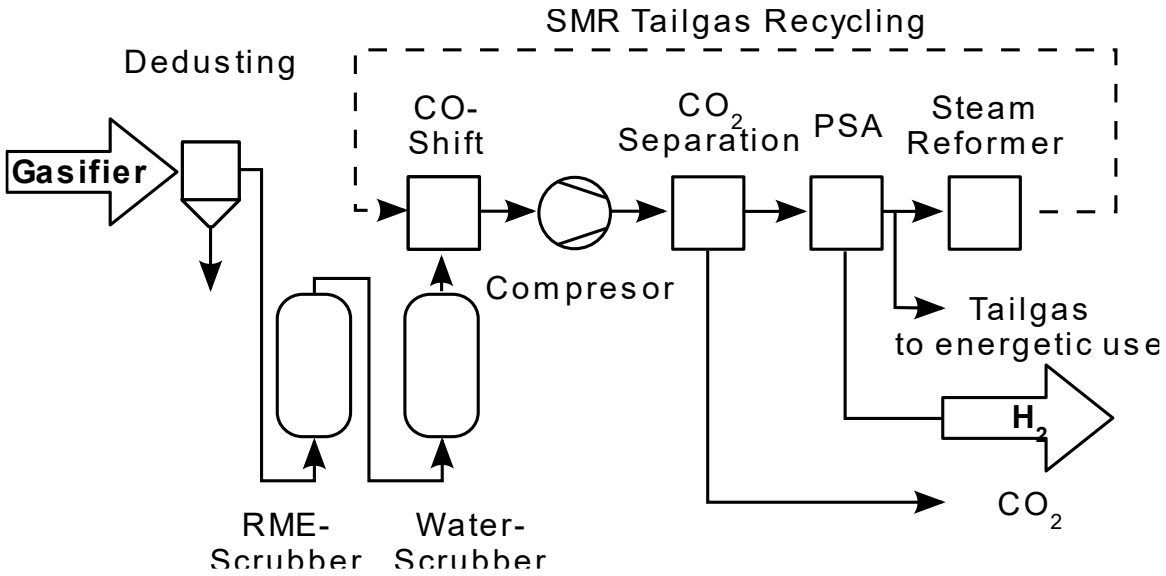
Obecnie najpowszechniejszą metodą produkcji wodoru jest reforming parowy gazu ziemnego lub SMR (reforming parowy metanowy – rys. 9) [18-20].

Ta metoda produkcji opiera się na reformerze parowym, reaktorze CO-shift i adsorpcji zmiennociśnieniowej.

W swej istocie proces składa się z następujących etapów:

- reformingu parowego/konwersji gazu ziemnego na gaz syntezowy,
- reformingu nieprzereagowanych związków i oddzielenia H_2 od gazu syntezowego.

Korzystną metodą produkcji czystego wodoru jest adsorpcja zmiennociśnieniowa, która umożliwia produkcję wodoru o wysokiej czystości (H2 > 99,9 vol.%).



Rys. 9. Koncepcja produkcji wodoru z gazu syntezowego [ITPE]

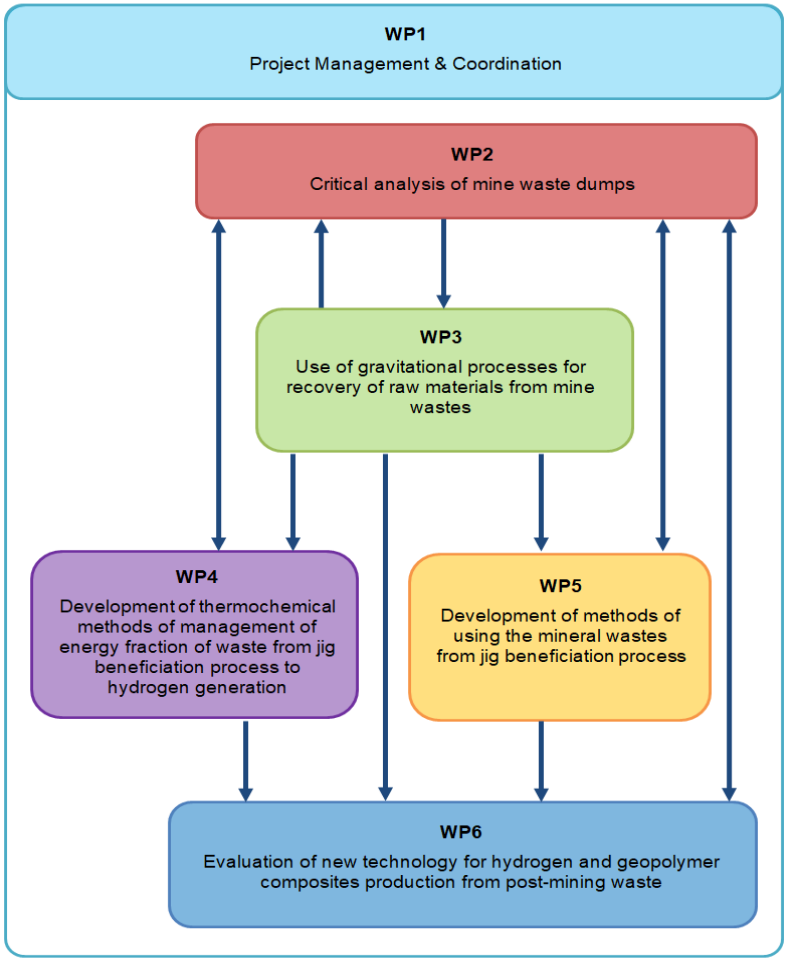
Open Access (CC BY-NC 4.0)

 ISBN 978-83-65593-32-0

3. Opis projektu

3.1. Struktura projektu

Partnerzy Projektu H2GEO będą realizować swoje zadania w ramach sześciu pakietów roboczych (rys. 10), gdzie WP1 pełni rolę koordynującą. KOMAG jako koordynator będzie aktywny zarówno w zakresie koordynacji w ramach WP1, jak i we wszystkich aspektach technicznych projektu.



Rys. 10. Schemat powiązań pakietów roboczych w projekcie

3.2. Pakiety robocze

WP1 Zarządzenie i koordynacja

Cele pakietu roboczego:

- koordynacja i zarządzanie projektami,
- koordynacja spotkań projektowych,
- przygotowanie Umowy Konsorcjum,
- przygotowywanie i składanie wszelkich raportów technicznych i finansowych,
- upowszechnianie rezultatów projektu,
- rozwój i utrzymanie strony internetowej projektu H2GEO.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

WP2 Krytyczna analiza składowisk odpadów kopalnianych

Cele pakietu roboczego:

- inwentaryzacja czynnych i rekultywowanych składowisk odpadów kopalnianych w wybranych krajach Europy,
- badania właściwości fizykochemicznych i mechanicznych odpadów wydobywczych,
- opracowanie bazy danych wyników projektu.

WP3 Wykorzystanie procesów grawitacyjnych do odzysku surowców z odpadów kopalnianych

Cele pakietu roboczego:

- określenie możliwości wykorzystania wzbogacania grawitacyjnego w pulsującym ośrodku wodnym do wzbogacania odpadów kopalnianych na stanowisku osadzarki laboratoryjnej,
- badanie właściwości fizyko-chemicznych i mechanicznych produktów z laboratoryjnych badań wzbogacania grawitacyjnego,
- opracowanie prototypu mobilnego systemu separacji węgla i surowców z odpadów kopalnianych.

WP4 Rozwój termochemicznych metod zagospodarowania frakcji energetycznej odpadów osadzarkowego procesu wzbogacania do wytwarzania wodoru.

Cele pakietu roboczego:

- przeprowadzenie badań zgazowania frakcji węglowonośnej (CBF) w zgazowarce plazmowej oraz optymalizacja parametrów procesu,
- określenie składu produktu zgazowania plazmowego,
- wyznaczenie parametrów kinetycznych zgazowania parą wodną CBF i ich optymalizacja poprzez mieszanie z innymi paliwami,
- przeszukiwanie stanu procesu zgazowania FB CBF w skali laboratoryjnej,
- zademonstrowanie procesu produkcji H_2 w skali PDU,
- definiowanie projektu procesu dla procesów na skalę komercyjną,
- wyznaczanie bilansów masowych i energetycznych zgazowania,
- opracowanie modelu skalowania, ocen ekonomicznych i środowiskowych.

WP5 Opracowanie metod wykorzystania odpadów mineralnych z osadzarkowego procesu wzbogacania

Cele pakietu roboczego:

- wykorzystanie odpadów mineralnych do otrzymywania kompozytów geopolimerowych z wykorzystaniem CO_2 i popiołów lotnych,
- opracowanie optymalnych warunków procesu dla zaawansowanej obróbki termicznej odpadów mineralnych jako surowca do geopolimeryzacji,
- zastosowanie odpadów mineralnych w materiałach budowlanych i drogowych, inżynierii środowiska, górnictwie,
- wykorzystanie odpadów mineralnych w rolnictwie i rekultywacji gruntów,

Open Access (CC BY-NC 4.0)

- wykorzystanie odpadów mineralnych w procesie odzysku minerałów.

WP6 Ocena nowej technologii wytwarzania wodoru i kompozytów geopolimerowych z odpadów pogórniczych

Cele pakietu roboczego:

- opracowanie koncepcji technologicznej zagospodarowania hałd w celu uzyskania produktów: wodoru i geopolimerów,
- ocena opłacalności opracowanej technologii produkcji wodoru i geopolimerów z odzyskanych składników użytkowych hałd,
- analiza aspektów środowiskowych i społecznych opracowanego systemu,
- analiza i porównanie dwóch technologii zgazowania do produkcji wodoru pod kątem ekonomicznym i ekologicznym.

3.3. Zaplanowane efekty projektu

Planowane efekty realizacji projektu można podzielić na:

Środowiskowe:

- lepsza efektywność wykorzystania zasobów i mniejszy wpływ na środowisko,
- zmniejszenie ilości odpadów zalegających na hałdach kopalnianych zmniejszy obciążenie środowiskowe regionu i zwiększy jego atrakcyjność dla przyszłych inwestorów i mieszkańców.

Ekonomiczne:

- pozyskanie inwestycji, innowacje i miejsca pracy do regionów „węglowych” w okresie ich transformacji poprzez zwiększenie zainteresowania ponownym wykorzystaniem składowisk odpadów pokopalnianych,
- odzysk i recykling materiałów z odpadów kopalnianych stanowi istotną korzyść ekonomiczną związaną z ponownym wykorzystaniem materiałów do produktów o wysokiej jakości.

Społeczne:

- opracowany model przekształcania terenów pogórniczych, ze szczególnym uwzględnieniem dobrobytu lokalnej ludności w zakresie nowych, kreatywnych miejsc pracy,
- wzrost zaufania społecznego do projektów górniczych.

Techniczne/technologiczne:

- wprowadzenie nowych produktów i usług.

Naukowe:

- wyniki projektu H2GEO pomogą wzmocnić Europejską Przestrzeń Badawczą i promować europejskie przywództwo w dziedzinie innowacji środowiskowych.

Open Access (CC BY-NC 4.0)

4. Podsumowanie

H2GEO wprowadzi nowe praktyki w zakresie przetwarzania odpadów górniczych ze składowisk. Ich celem będzie zarówno zmniejszenie ilości odpadów, jak i ponowne ich wykorzystanie jako nowych surowców w procesach przemysłowych [21].

Konsorcjum projektu osiągnie ten plan poprzez:

- stworzenie bazy danych zwałowisk odpadów górniczych w wybranych krajach europejskich na podstawie klasyfikacji zwałowiska na czynne i zrekultywowane oraz z uwzględnieniem charakterystyki zdeponowanych odpadów i możliwości ich wykorzystania w procesie wzbogacania,
- określenie charakterystyki zdeponowanych odpadów i możliwości zastosowania procesu wzbogacania do ich przetwarzania,
- opracowanie systemu wzbogacania odpadów kopalnianych w celu uzyskania produktów wysokiej jakości do dalszego przetwarzania,
- opracowanie i optymalizacja metody, która pozwoli na produkcję wysokowartościowego wodoru z frakcji węglonośnych (CBF) uzyskanych w procesie wzbogacania odpadów górniczych,
- określenie możliwości wykorzystania odpadów mineralnych do produkcji kompozytów geopolimerowych z CO_2 i popiołów lotnych,
- opracowanie kompleksowej technologii zagospodarowania zwałowisk odpadów kopalnianych do produkcji wodoru i kompozytów geopolimerowych,
- wykonanie analiz ekonomicznych, środowiskowych, społecznych i prawnych dla opracowanego systemu.

Literatura

1. Gawor Ł., 2014: Coal mining waste dumps as secondary deposits – examples from the Upper Silesian Coal Basin and the Lublin Coal Basin, Geology, Geophysics & Environment, vol. 40 (3), 285-289
2. Kryl V., Sixta J., & Fröhlich E., (2002): Removing mining activities and reclamation. VSB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mining and Geology, 79
3. Kuna-Gwoździewicz P., 2013: Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhalation zones of thermally active mine waste dumps. Journal of Sustainable Mining, 12, 1, 7–12
4. Schulz D.: 2004: Recultivation of mining waste dumps in the Ruhr area, Germany. [In:] Water, Air & Soil Pollution, Springer Netherlands, p. 89-98
5. Zástěrová P., Marschalko M., Niemiec D., Durďák J., BulkoR., Vlček J.: Analysis of Possibilities of Reclamation Waste Dumps after Coal Mining, Procedia Earth and Planetary Science, Volume 15, 2015, Pages 656-662
6. Galos K., Szlugaj J.: Wastes from mining industry and from hard coal processing as materials for production of mineral aggregates (Odpady z górnictwa i przeróbki węgla kamiennego, jako materiały do produkcji kruszyw mineralnych). Cuprum No. 4 (65), 2012, pp. 79-93
7. Matusiak P., Kowol D.: Use of jig beneficiation for recovery of raw material from mine waste dump (Zastosowanie osadzarkowego procesu wzbogacania do odzysku surowca ze składowiska odpadów górniczych). Min. Sci., Miner. Aggreg. 2016 No. 1 pp. 115-125, ISSN 2300-9586

Open Access (CC BY-NC 4.0)

8. Różański Z., Suponik T., Matusiak P., Kowol D., Szpyrka J., Mazurek M., Wrona P.: Coal recovery from a coal waste dump. MEC 2016, Mineral Engineering Conference, E3S Web of Conferences 8, 01052 (2016)
9. Kumar S., Mucsi G., Kristály F., Pekker P.: Mechanical activation of fly ash and its influence on micro and nano-structural behaviour of resulting geopolymers, In Advanced Powder Technology, Volume 28, Issue 3, 2017, Pages 805-813
10. Mabrouma S., Moukannaa S., El Machi A., Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R.: Mine wastes based geopolymers: A critical review, Cleaner Engineering and Technology. Vol. 1, 2020, 100014
11. Mehta A., Siddique R.: An overview of geopolymers derived from industrial by-products, In Construction and Building Materials, Volume 127, 2016, Pages 183-198
12. Živica V., Palou M. T., Kuzielová E., Žemlička M.: Super high strength metabentonite based geopolymer. In Procedia Engineering, 2016, vol. 151, p. 133-140. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.354 WOS
13. Živica V., Palou M. T.: Influence of heat treatment on the pore structure of some clays - precursors for geopolymer synthesis. In Procedia Engineering, 2016, vol. 151, p. 141-148. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.401 WOS 5
14. https://technologyinarchitecture.wordpress.com/2018/06/19/mr-geopolymer-concrete-alternative/ [dostęp 09 marca 2023]
15. Lutyński M., Lutyński A.: Coal waste slurries as a fuel for integrated gasification combined cycle plants. E3S Web of Conferences 8, 01056 (2016)
16. https://www.nucoal.pl/ [dostęp 09 marca 2023]
17. https://cen.acs.org/articles/94/i15/Air-Products-retreats-wasteenergy.html [dostęp 09.05.2023]
18. Balas M., Lisy M., Kubicek J., Pospisil J.: Syngas cleaning by wet scrubber. WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 9. 2014. Pp. 195-204
19. Faheem H., Tanveer H., Abbas S., Maqbool F.: Comparative study of conventional steam-methane-reforming (SMR) and auto-thermal-reforming (ATR) with their hybrid sorption enhanced (SE-SMR & SE-ATR) and environmentally benign process models for the hydrogen production, Fuel, Volume 297, 2021
20. Oreggioni G. D., Brandani S., Luberti M., Baykan Y., Friedrich D., Ahn H.: CO_2 capture from syngas by an adsorption process at a biomass gasification CHP plant: Its comparison with amine-based CO_2 capture, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 35, 2015, pp. 71-81
21. Midor K., Biały W., Rogala-Rojek J., Matusiak P.: The Process of Designing the Post-Mining Land Reclamation Investment Using Process Maps. Case Study. Energies 2021, nr 14(17), 5429, s. 1-10. DOI: 3390/en14175429, ISSN 1996-1073

Open Access (CC BY-NC 4.0)

ISBN 978-83-65593-32-0

INDEKS AUTORÓW

Cholewa Mirosław (rozdz. 3)

Feliks Jacek (rozdz. 5)
Friebe Paweł (rozdz. 7)

Jachimczyk Dariusz (rozdz. 3)

Jagiełło Zbigniew (rozdz. 2)

Korski Jacek (rozdz. 4)
Kowol Daniel (rozdz. 8)

Łaskuda Robert (rozdz. 2)

Matusiak Piotr (rozdz. 8)
Mazur Marcin (rozdz. 5)
Mijał Waldemar (rozdz. 1)

Przystaś Rafał (rozdz. 2)

Rzeźniczek Łukasz (rozdz. 6)

Sołtys Józef (rozdz. 2)
Szczepaniak Krzysztof (rozdz. 1)

Zachariasz Tomasz (rozdz. 1)

Open Access (CC BY-NC 4.0)