



Tadeusz DZIOK<sup>1</sup>, Ireneusz BAIC<sup>2</sup>, Andrzej STRUGAŁA<sup>1</sup>, Wiesław BLASCHKE<sup>3</sup>

## Ekologiczne i ekonomiczne aspekty procesu suchego odkamieniania węgla kamiennych

**Streszczenie:** Węgiel kamienny wydobywany w kopalni (węgiel surowy) tworzy substancja organiczna i mineralna. Przed bezpośrednim wykorzystaniem urobek musi być poddany procesom wzbogacania. Stosowane procesy wzbogacania mają na celu usunięcie skały płonnej, pirytu, a także przerostów. Do wzbogacania węgla kamiennego stosowane mogą być zarówno metody wzbogacania na mokro, jak i na sucho. W pracy przedstawiono wybrane ekologiczne i ekonomiczne aspekty procesu suchego odkamieniania węgla kamiennego przy wykorzystaniu separatora powietrzno-wibracyjnego i separatora optyczno-rentgenowskiego. Zastosowanie nowoczesnych urządzeń do suchego odkamieniania, tj. separatorów powietrzno-wibracyjnych i separatorów optyczno-rentgenowskich, umożliwią obniżenie emisji pierwiastków ekotoksycznych ze spalania węgla kamiennego. Wydzielenie pirytu pozwala na obniżenie zawartości siarki, a także innych pierwiastków ekotoksycznych, m.in. rtęci, arsenu, talu, czy ołowiu. Generalnie pod względem ekonomicznym technologia suchego odkamieniania cechuje się niższymi nakładami inwestycyjnymi i kosztami eksploatacyjnymi w porównaniu do metod wzbogacania na mokro. Instalacje suchego odkamieniania są dobrym rozwiązaniem dla inwestycji o krótkim okresie planowanej eksploatacji i/lub dla instalacji o małej wydajności, a także w przypadku ograniczonej dostępności do wody. Dla instalacji o dłuższym okresie eksploatacji i o wyższych wydajnościach, efektywność inwestycji jest wyższa dla metod wzbogacania na mokro. Istnieje również możliwość suchego odkamieniania węgla na dole w kopalni przy użyciu tzw. kruszarek Bradforda. Wydzielony produkt w postaci grubych kamieni może znaleźć zagospodarowanie na dole kopalni, np. do podsadzania wyrobisk.

**Słowa kluczowe:** węgiel kamienny, suche odkamienianie, pierwiastki ekotoksyczne, efektywność ekonomiczna i ekologiczna

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Technologii Paliw, Kraków;  
e-mail: tadeusz.dziok@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Oddział Zamiejscowy w Katowicach

<sup>3</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Oddział Zamiejscowy w Katowicach; ORCID iD: 0000-0003-0892-3419



## **Ecological and economic aspects of the dry deshaling process of hard coal**

**Abstract:** Hard coal extracted from a mine (raw coal) is composed of both organic and mineral matter. In this form, it cannot be used directly and must be processed previously. The aim of the cleaning process is to remove gangue, pyrite grains, as well as the mineral matter overgrowths on coal grains. Both wet (washing) and dry (deshaling) methods can be used to perform the cleaning of hard coal. The paper presents selected ecological and economic aspects of the dry deshaling process of hard coal using a pneumatic vibrating separator and an optical X-ray separator.

The use of modern dry deshaling equipment (i.e., pneumatic vibrating FGX type and optical X-ray separators) enables a reduction of the emission of ecotoxic elements from hard coal combustion. The separation of pyrite grains results in a reduction of the content of sulphur and other ecotoxic elements, among others: mercury, arsenic, thallium and lead. In general, from the economic point of view, the dry deshaling technology, when compared to the washing methods, is characterized by both lower investment and operating costs. The dry deshaling technology is a suitable option for short-term investments and/or for low capacity plants with limited water availability. For long-term investments and more efficient plants, the investment efficiency is higher for the washing methods.

It is also possible to perform dry deshaling of hard coal at the bottom of the mine using Bradford crushers. The separated product in the form of coarse rocks can be used at the bottom of the mine, e.g. for backfilling.

**Keywords:** hard coal, dry deshaling, ecotoxic elements, economic and ecological efficiency

## **Wprowadzenie**

Węgiel kamienny wydobywany w kopalni, czyli węgiel surowy, tworzy zarówno substancja organiczna, jak i mineralna. W takiej postaci nie może on być kierowany do bezpośredniego wykorzystania i musi być poddany procesom przeróbczym (Blaschke 2009). W przypadku węgla energetycznego, jeśli parametry jakościowe odpowiadają wymaganiom potencjalnych odbiorców (wartość opałowa, zawartość popiołu, wilgoci i siarki) wystarczającą operacją jest rozdzielanie na klasy ziarnowe. Jednak w większości przypadków surowy węgiel energetyczny nie spełnia wymogów jakościowych odbiorców. Z kolei węgiel koksowy w stanie surowym nie nadaje się do bezpośredniego wykorzystania i musi być poddany procesom wzbogacania. Procesy wzbogacania mają na celu usunięcie kamienia, łupków, części przerostów kamiennie-węglowych i pirytu. Należy zaznaczyć, że procesy wzbogacania pozwalają także na obniżenie w węglu zawartości pierwiastków ekotoksycznych, w tym siarki, czy rtęci (Baic i in. 2015a; Dziok i Strugała 2017a; Gawenda i in. 2014; Makowska i in. 2014) i stąd też zaliczane są do grupy tzw. Czystych Technologii Węglowych (Blaschke i Nycz 2007).

Do wzbogacania węgla kamiennego stosowane mogą być zarówno metody wzbogacania na mokro, jak i na sucho (Aleksa i in. 2007; Baic i in. 2015a). Procesy suchej separacji, zwane również procesami suchego odkamieniania, realizowane są bez udziału wody, co sprzyja ochronie środowiska i pozwala zmniejszyć nakłady inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne (Blaschke 2013; Gawenda i in. 2014). W niektórych krajach sucha separacja stosowana jest jako węzeł przygotowania węgla do procesów wzbogacania na mokro. Wstępne usunięcie skały płonnej pozwala na:

- uproszczenie schematu technologicznego zakładu przeróbczego,
- zmniejszenie ilości nadawy do kolejnych procesów przeróbczych,

- ograniczenie ilości maszyn i urządzeń,
- ograniczenie zużycia energii,
- obniżenie kosztów wzbogacania na mokro.

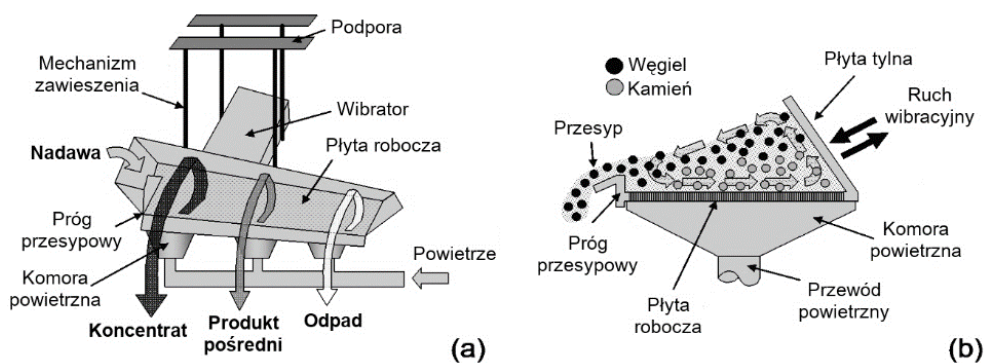
Wydzielone w procesie wzbogacania składniki mineralne w formie odpadów, z uwagi ich odpowiednie właściwości, mogą być z powodzeniem stosowane jako substytut kruszywa naturalnych (Baic i Blaschke 2013).

Do suchej separacji zastosowanie mogą znaleźć m.in. separatory powietrzno-wibracyjne i separatory rentgenowskie (Baic i Blaschke 2013; Gawenda i in. 2014). W pracy przedstawiono wybrane ekologiczne i ekonomiczne aspekty procesu suchego odkamieniania węgla kamiennego przy ich wykorzystaniu. Dodatkowo omówiono zastosowanie tzw. kruszarki Bradforda jako sposób wstępnego odkamieniania urobku na dole kopalni.

## 1. Przykłady urządzeń do suchego odkamieniania węgla kamiennych

### 1.1. Separator powietrzno-wibracyjnego typu FGX

Budowę separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX przedstawiono na rysunku 1. Separator składa się z leja nadawczego, podajnika dozującego, perforowanej płyty roboczej, wibratora, komór powietrznych, modułu odpylania oraz mechanizmów pozwalających zmienić kąt nachylenia płyty roboczej oraz częstotliwość wibracji. Pod wpływem połączonych sił prądu powietrza i wibracji złoża węglowe ulega uniesieniu, a następnie w zależności od gęstości, rozwarstwieniu. Materiał o małej gęstości (węgiel) koncentruje się na powierzchni złoża, a materiał o dużej gęstości (składniki mineralne) w strefie dolnej złoża. Dodatkowym



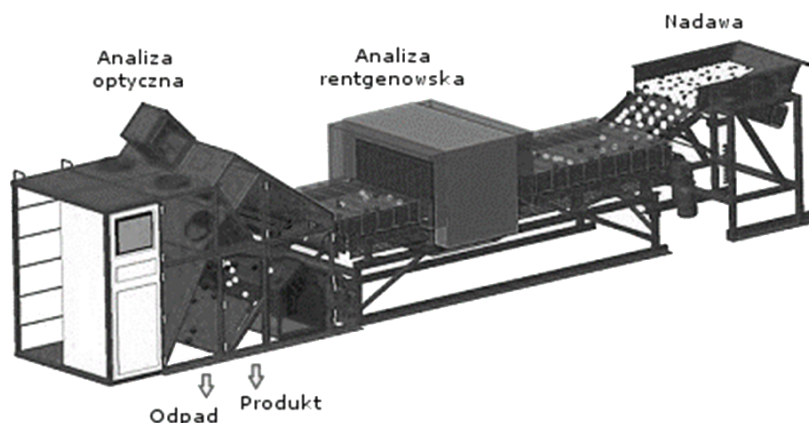
Rys. 1. Schemat separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX: a) widok ogólny, b) przekrój (Baic i in. 2014)

Fig. 1. Scheme of the pneumatic vibrating FGX type separator: a) overall view, b) cross-section

zjawiskiem jest efekt tzw. upłynnienia powstający w wyniku interakcji stanowiących zawieszinę ziaren drobnych z ziarnami grubymi. Zjawisko to poprawia skuteczność rozdziału klas gruboziarnistych. Z uwagi na to, że płyta robocza separatora jest pochylona w kierunku poprzecznym, materiał o małej gęstości znajdujący się na powierzchni złoża ma tendencję do przesuwania się po tej powierzchni i spadania pod wpływem siły grawitacji poprzez przegrodę usytuowaną na jej brzegu. Materiał o wyższej gęstości koncentruje się w dolnej części złoża i przesuwa się w kierunku wylotu odpadów. W zależności od jakości nadawy, a także ustawień urządzenia, można odbierać trzy lub dwa produkty (koncentrat, produkt pośredni i odpady). W celu ochrony środowiska przed zapyleniem płyta robocza jest osłonięta kurtyną gumową a zabudowany odpylacz wytwarza nad nią podciśnienie. Instalacja wyposażona jest również w wysokowydajny cyklon i filtry workowe, w których wydzielany jest pył unoszony wraz z powietrzem (Baic i Blaschke 2013).

### 1.2. Separatorsa optyczno-rentgenowskiego typu OSX-CXR

Przykładem separatora rentgenowskiego może być separator OSX-CXR firmy Comex (Gawenda i in. 2014). Separator pozwala na identyfikację struktury wewnętrznej i gęstości separowanego materiału. Urządzenie wykorzystuje jednocześnie analizę rentgenowską oraz własności optyczne materiału. Schemat działania separatora przedstawiano na rysunku 2. Urządzenie składa się z układu podającego nadawę, przenośnika taśmowego oraz zaawansowanego układu analizy i urządzenia odrzucającego. Nadawa jest równomiernie rozprowadzana przenośnikiem wibracyjnym na przenośniku taśmowym. Na przenośniku taśmowym prowadzona jest w sposób ciągły analiza rentgenowska, a przy wylocie analiza optyczna. Na podstawie wyników analiz urządzenie dokonuje selekcji i mechanicznie odrzuca ziarna substancji mineralnej (odpad) (Gawenda i in. 2014).



Rys. 2. Schemat separatora optyczno-rentgenowskiego typu OSX-CXR firmy Comex (Kołaczkowski 2015)

Fig. 2. Scheme of the optical X-ray separator

### 1.3. Porównanie separatora powietrzno-wibracyjnego i separatora optyczno-rentgenowskiego

Porównanie separatorów powietrzno-wibracyjnego i optyczno-rentgenowskiego przedstawiono w tabeli 1. Należy zwrócić uwagę na możliwość jedoczesnego odkamieniania i podsuszania węgla w nowszej konstrukcji separatora powietrzno-wibracyjnego, występującego pod nazwą ZM.

TABELA 1. Porównanie separatorów powietrzno-wibracyjnego i optyczno-rentgenowskiego (Baic i in. 2015b; Gawenda i in. 2014; TSM 2019)

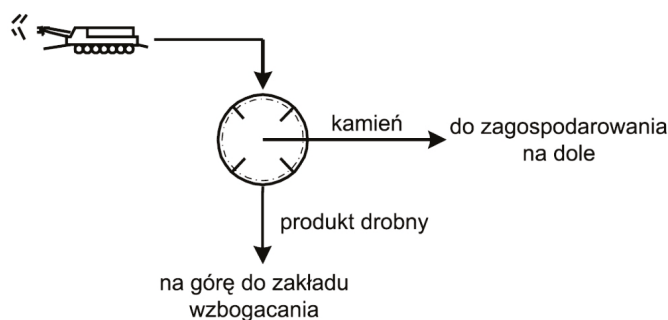
TABLE 1. Comparison of the pneumatic vibrating separator and the optical X-ray separator

Parametr	Separator powietrzno-wibracyjny	Separator optyczno-rentgenowski
Zasada działania	Wznoszący ruch powietrza powoduje rozluźnienie, podniesienie i zawieszenie ziaren nadawy, czego rezultatem jest ich rozdzielanie ze względu na gęstość. Z kolei ruch wibracyjny płyty roboczej powoduje przemieszczanie materiału po jej powierzchni i odbiór poszczególnych produktów	Separator wyposażony jest w układ do analizy optycznej i rentgenowskiej pozwalającej na separację materiału. Na podstawie wyników analizy podejmowana jest automatyczna decyzja co do odrzucenia danego ziarna materiału
Stosowanie wody	Nie	Nie
Uziarnienie nadawy [mm]	0–75	8–250 (300)
Wydajność [Mg/h]	Do 1000	Do 500
Możliwość usuwania przerostów pirytów	Tak – piryt posiada znacznie większą gęstość (ok. 5 g/cm <sup>3</sup> ) niż substancja organiczna węgla (ok. 1,3–1,8 g/cm <sup>3</sup> ) i możliwy jest ich rozdział	Tak – piryt wykazuje silną zdolność do absorbowania promieniowania X, co pozwala na łatwe rozpoznanie ziaren z przerostem pirytów i ich odrzucenie
Możliwość podsuszania węgla	Tak (seria ZM)	Nie

### 1.4. Krusząka Bradforda

Istnieje również możliwość suchego odkamieniania węgla na dole w kopalni przy użyciu tzw. krusząek Bradforda. Wzbogacanie urobku węglowego w krusząkach Bradforda polega na selektywnym kruszeniu surowego urobku węglowego i wydzieleniu frakcji węglowej i odpadowej. Zasada działania polega na tym, że węgiel ulega rozdrobnieniu, a skała płonna pozostaje w zasadzie nieskruszona (Baic i Blaschke 2013). Przykład wykorzystania krusząki Bradforda do wstępnego odkamieniania urobku na dole kopalni przedstawiono

na rysunku 3. Urobek kruszony jest selektywnie w kruszarce, a następnie produkt drobny składający się z węgla, przerostu i kamienia, kierowany jest do zakładu wzbogacania. Produkt nierozdrobniony w postaci grubych kamieni może znaleźć zagospodarowanie na dole kopalni, np. do podsadzania wyrobisk (Tumidajski i in. 2008).



Rys. 3. Zasada wykorzystania kruszarki Bradforda do wstępnego odkamieniania urobku na dole kopalni (Tumidajski i in. 2008)

Fig. 3. Principle of the application of a Bradford crusher for the primary deshaling of raw coal at the bottom of a coal mine

## 2. Aspekt ekologiczny zastosowania procesu suchego odkamieniania

Do niewątpliwych zalet procesu suchego odkamieniania należy zaliczyć znaczące ograniczenie lub brak obiegu wodno-mułowego, co pozwala na zmniejszenie zapotrzebowania na wodę dla układu technologicznego, a przez to ograniczenie ilości powstających ścieków. Z uwagi na brak kontaktu z wodą skała płonna, stanowiąca produkt uboczny separacji węgla (odpady z procesu suchego odkamieniania), może być wykorzystywana jako substytut kruszyw naturalnych (Baic i in. 2015a i 2015b).

Separatory pozwalają na efektywne wydzielenie z węgla ziaren z przerostami pirytu (tab. 1). Piryt jest w węglu głównym nośnikiem siarki (Jasieńko i in. 1995a), a jego wydzielenie pozwala na znaczące obniżenie jej zawartości w węglu i redukcję emisji tlenków siarki do atmosfery w wyniku jego spalania. Piryt, podobnie jak inne siarczki występujące w węglu, tworzył się w procesach syngenetycznych i epigenetycznych (Diehl i in. 2004; Jasieńko 1995b), którym towarzyszyło kumulowanie się w pirycie pierwiastków ekotoksycznych, takich jak rtęć czy arsen. Piryt uważany jest za jeden z głównych nośników tych pierwiastków w węglu. Porównanie przeciętnej zawartości wybranych pierwiastków ekotoksycznych w węglu kamiennym i ich zawartości w siarczках występujących w polskich węglach kamiennych przedstawiono w tabeli 2. Zawartość pierwiastków jest znacząco wyższa w siarczках niż w węglu, a w przypadku rtęci nawet do 10 000 razy. Należy zaznaczyć, że w literaturze raportowane są jeszcze wyższe zawartości tych pierwiastków w pirycie

(Ding i in. 2001). Usunięcie pirytu z węgla pozwala zatem na zmniejszenie emisji pierwiastków ekotoksycznych do atmosfery. Obecnie głównym źródłem tej emisji w Polsce są procesy spalania, głównie węgla, których udział w emisji np. w przypadku niklu stanowi blisko 75%, a w przypadku rtęci 70% – tabela 3.

TABELA 2. Porównanie zawartości wybranych pierwiastków ekotoksycznych w węglu kamiennym i siarczku (Dziok i in. 2019; Ketris, Yudovich 2009; Makowska i in. 2019)

TABLE 2. Comparison of the content of selected ecotoxic elements in hard coal and in sulphides

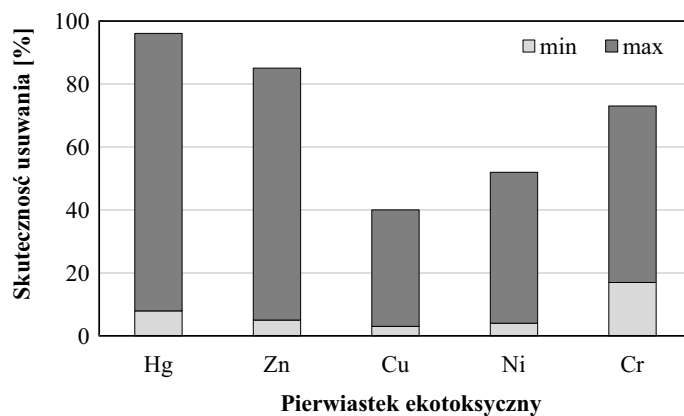
Pierwiastek	Przeciętna zawartość w węglu kamiennym [mg/kg]	Maksymalna zawartość odnotowana w siarczku		Współczynnik wzbogacania siarczku w pierwiastek [-]
		[%]	[mg/kg]	
Hg	0,10	0,100	1 000	10 000
As	9,00	1,346	13 460	1 496
Tl	0,58	0,213	2 130	3 672
Pb	9,00	0,537	5 370	597

TABELA 3. Emisja wybranych pierwiastków ekotoksycznych w Polsce w roku 2017 (KOBiZE 2019)

TABLE 3. Emission of selected ecotoxic elements in Poland in 2017

Źródło emisji	Emisja [kg]						
	Hg	Pb	As	Cr	Cu	Ni	Zn
Procesy spalania w sektorze produkcji i transformacji energii	5 149	22 911	4 811	6 010	17 299	31 064	82 303
Procesy spalania poza przemysłem	923	60 886	3 480	7 567	47 108	17 384	103 224
Procesy spalania w przemyśle	629	34 480	2 859	4 949	18 429	19 196	143 153
Emisja całkowita	9 578	305 490	16 713	41 615	203 646	90 392	652 480
Udział procesów spalania w całkowitej emisji [%]	70,0	38,7	66,7	44,5	40,7	74,8	50,4

Wyniki przeprowadzonych przez autorów badań (Dziok i Strugała 2017a; Makowska i in. 2018) wykazały możliwość obniżenia zawartości pierwiastków ekotoksycznych w węglu kamiennym na drodze jego suchego odkamieniania przy wykorzystaniu separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX. Skuteczność usuwania (rys. 4) wahała się w dość szerokich zakresach i zależała od ilości substancji mineralnej wydzielanej z węgla w formie



Rys. 4. Skuteczność usuwania pierwiastków ekotoksycznych z węgla kamiennego przy wykorzystaniu separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX (Dziok i Strugała 2017a; Makowska i in. 2018)

Fig. 4. Effectiveness of the removal of ecotoxic elements from hard coal using the pneumatic vibrating FGX type separator

odpadów oraz zawartości w nich pierwiastków ekotoksycznych. Najwyższą skuteczność osiągnięto dla rtęci, a najniższą dla miedzi. Przydatność separatora optyczno-rentgenowskiego do usuwania pierwiastków ekotoksycznych wykazały wstępne badania przeprowadzone w Katedrze Technologii Paliw AGH. W przypadku rtęci skuteczność usuwania wyniosła 12% (Dziok i Strugała 2017b). Tych wyników nie należy jednak generalizować, ponieważ analizie poddano tylko jeden typ węgla.

### 3. Aspekt ekonomiczny stosowanie procesu suchego odkamieniania

Wyniki uproszczonej analizy ekonomicznej instalacji wyposażonej w separator powietrzno-wibracyjny, pracującej w USA przedstawiono w tabeli 4. W porównaniu do metody wzbogacania na mokro nakłady inwestycyjne i eksploatacyjne technologii suchego odkamieniania stanowiły odpowiednio 48 i 25% (Honaker 2007).

TABELA 4. Przybliżone koszty inwestycyjne i eksploatacyjne instalacji suchego odkamieniania w warunkach USA (Honaker 2007)

TABLE 4. Approximate investment and operating costs of the dry deshaling plant in the US

Rodzaj procesu	Koszty inwestycyjne [\$/ (Mg·h)]	Koszty eksploatacyjne [\$/Mg]
Suche odkamienianie (separator powietrzno-wibracyjny typu FGX)	6 200,0	0,50
Metody wzbogacania na mokro	13 000,0	1,95



Natomiast porównanie kosztów technologii suchego odkamieniania z metodami wzbogacania na mokro (cyklony z cieczą ciężką) dla instalacji funkcjonujących w RPA wykazały, że jej koszty inwestycyjne stanowią 25, a eksploatacyjne 32% technologii wzbogacania na mokro (de Korte 2014). Relację okresu i stopy zwrotu nakładów dla obu technologii przedstawiono w tabeli 5. Technologia suchego odkamieniania wykorzystująca separatory powietrzno-wibracyjne typu FGX ma krótszy okres zwrotu niż instalacje wykorzystujące cyklony z cieczą ciężką i odznacza się wyższym współczynnikiem zwrotu inwestycji.

TABELA 5. Porównanie okresu i stopy zwrotu dla separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX i cyklonów z cieczą ciężką w RPA (de Korte 2014)

TABLE 5. Comparison of payback period and return on investment for the pneumatic vibrating FGX type separator and the heavy medium cyclone in South Africa

Rodzaj procesu	Okres zwrotu [lata]	Stopa zwrotu [%]
Suche odkamienianie (separator powietrzno-wibracyjny typu FGX)	0,72	39
Metody wzbogacania na mokro (cyklony z cieczą ciężką)	0,92	9

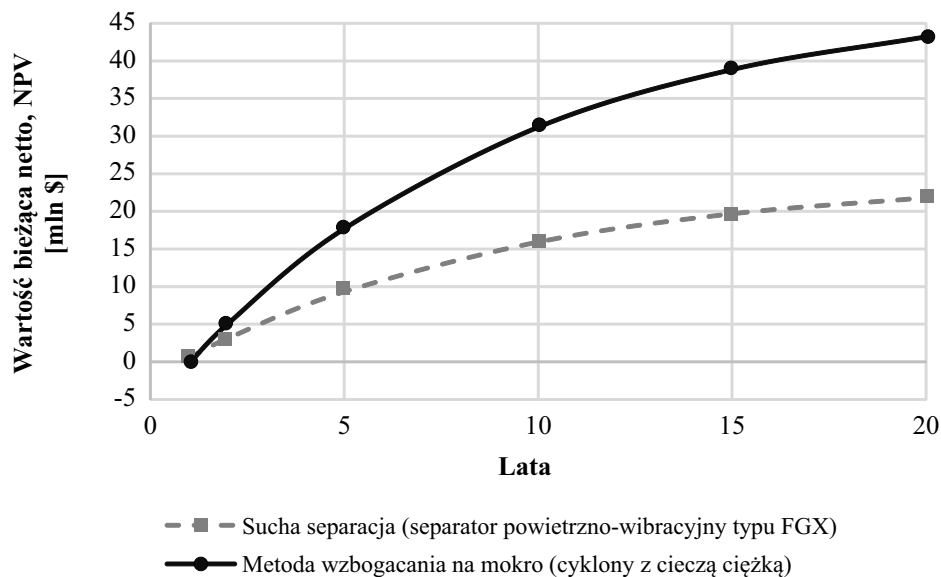
W przypadku separatora optyczno-rentgenowskiego koszty inwestycyjne i eksploatacyjne również są niższe niż dla metod wzbogacania na mokro. Koszty inwestycyjne stanowią odpowiednio 60–80% kosztów instalacji wzbogacania na mokro, a koszty eksploatacyjne 10–15% (Gawenda i in. 2014).

Należy jednak podkreślić, że relacja kosztów dla warunków polskich może kształtować się niekoniecznie na tym samym poziomie, co wynika bezpośrednio z:

- uwarunkowań prawnych i środowiskowych,
- lokalizacji zakładów wydobywczych i przerobczych węgla,
- parametrów jakościowych wydobywanego węgla,
- infrastruktury technologicznej,
- wymagań stawianych przez sektor energetyczny (Buchalik i in. 2019).

Oprócz kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych istotna jest również efektywność inwestycji. Na rysunku 5 przedstawiono dla instalacji funkcjonujących w RPA porównanie wartości bieżącej netto (NPV) dla separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX i cyklonów z cieczą ciężką. Niskie nakłady inwestycyjne i koszty operacyjne instalacji wyposażonej w separatory typu FGX pozwalają uzyskać dodatnią wartość NPV już na koniec 1 roku eksploatacji, podczas gdy dla instalacji wykorzystujących cyklony z cieczą ciężką współczynnik NPV jest ujemny. Niemniej jednak już po drugim roku eksploatacji wartość współczynnika NPV dla instalacji wykorzystujących cyklony z cieczą ciężką przyjmuje wyższą wartość niż dla instalacji z separatorami typu FGX (rys. 5).

Instalacje do suchego odkamieniania węgla kamiennego są dobrym rozwiązaniem w szczególności dla inwestycji krótkoterminowych i/lub instalacji o małej wydajności.



Rys. 5. Porównanie wartości bieżącej netto (NPV) dla separatora powietrzno-wibracyjnego typu FGX i cyklonów z cieczą ciężką w RPA (de Korte 2014)

Fig. 5. Comparison of the net present value (NPV) for the pneumatic vibrating FGX type separator and the heavy medium cyclone in South Africa

W przypadku inwestycji długoterminowych i/lub instalacji o dużej wydajności, pomimo wyższych nakładów inwestycyjnych i kosztów operacyjnych metod wzbogacania na mokro, metody suchej separacji nie są już pod względem ekonomicznym konkurencyjne (Buchalik i in. 2019; de Korte 2014). Należy także wspomnieć, że instalacje suchego odkamieniania mogą również stanowić węzeł przygotowania węgla do wzbogacania w osadzarkach umożliwiającą poprawę efektywności i jakości rozdziału poprzez uśrednienie nadawy kierowanej do wzbogacania (Blaschke i Baic 2018). Warto podkreślić, że na wybór danej technologii mogą mieć istotny również takie czynniki jak:

- dostępność wody do procesów wzbogacania,
- lokalizacja zakładu wzbogacania i odbiorców otrzymanych produktów,
- charakterystyka rozmywalności węgla surowego,
- wymagania jakościowe odbiorców,
- dostępność niezbędnej infrastruktury (de Korte 2014).

### Podsumowanie

Analizowane urządzenia do suchego odkamieniania (separator powietrzno-wibracyjny typu FGX i separator optyczno-rentgenowski typu OSX-CXR) pozwalają na obniżenie emisji pierwiastków ekotoksycznych ze spalania węgla kamiennego. Separatory umożliwiają

wydzielanie z węgla przerostów pirytu, co pozwala na obniżenie w nim zawartości siarki, a także innych pierwiastków ekotoksycznych występujących powszechnie w pirycie, m.in. rtęci, arsenu, talu.

Pod względem ekonomicznym technologia suchego odkamieniania odznacza się niższymi nakładami inwestycyjnymi i kosztami operacyjnymi w porównaniu do metod wzbogacania na mokro. Instalacje suchej separacji węgla są dobrym rozwiązaniem dla inwestycji o krótkim okresie planowanej eksploatacji i/lub dla instalacji o małej wydajności, a także w przypadku ograniczonej dostępności do wody. Dla instalacji o dłuższym okresie eksploatacji i o wyższych wydajnościach, efektywność inwestycji jest wyższa dla metod wzbogacania na mokro.

Praca została sfinansowana z Subwencji Badawczej AGH nr 16.16.210.476.

## Literatura

- Aleksa i in. 2007– Aleksa, H., Dyduch, F. i Wiechowski, K. 2007. Chlor i rtęć w węglu i możliwości ich obniżenia metodami przeróbki mechanicznej. *Górnictwo i Geoinżynieria* 31(3/1), s. 35–48.
- Baic, I. i Blaschke, W. 2013. Analiza możliwości wykorzystania powietrznych stołów koncentracyjnych do otrzymania węglowych paliw kwalifikowanych i substytutów kruszyw. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* 16(3), s. 247–260.
- Baic i in. 2014 – Baic, I., Blaschke, W. i Szafarczyk, J. 2014. Dry coal cleaning technology. *Inżynieria Mineralna* 15(2), s. 257–262.
- Baic i in. 2014 – Baic, I., Blaschke, W., Sobko, W. i Fraś, A. 2015a. Application of air concentrating table for improvement in the Quality parameters of the commercial product “Jarek”. *Inżynieria Mineralna* 16(1), s. 221–226.
- Baic i in. 2014 – Baic, I., Blaschke, W., Góralczyk, S., Szafarczyk, J. i Buchalik, G. 2015b. A New Method for Removing Organic Contaminants of Gangue from the Coal Output. *Annual Set The Environment Protection* 17, s. 1274–1285.
- Blaschke, W. i Nycz, R. 2007. Przeróbka mechaniczna pierwszym etapem technologii czystego węgla. *Inżynieria Mineralna* t. styczeń–czerwiec, s. 29–36.
- Blaschke, W. 2009. *Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne*. Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN. ISBN 978-83-60195-03-1.
- Blaschke, W. 2013. Nowa generacja powietrznych stołów koncentracyjnych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 84, s. 67–74.
- Blaschke, W. i Baic, I. 2018. Poprawa parametrów rozdziału węgla w osadzarkach poprzez wstępne uśrednianie nadawy metodą odkamieniania na sucho. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 104, s. 163–172.
- Buchalik i in. 2019 – Buchalik G., Motyczka S., Szafarczyk J., Baic I. i Blaschke W. 2019. Economic efficiency of the dry coal separation process – Polish experience. *International Coal Preparation Congress (ICPC) 2019* (w druku).
- Diehl i in. 2004 – Diehl, S.F., Goldhaber, M.B. i Hatch, J.R. 2004. Modes of occurrence of mercury and other trace elements in coals from the warrior field, Black Warrior Basin, Northwestern Alabama. *International Journal of Coal Geology* 59, s. 193–208.
- Ding i in. 2001 – Ding, Z., Zheng, B., Long, J., Belkin, H.E., Finkelman, R.B., Chen, C., Zhou, D. i Zhou, Y. 2001. Geological and geochemical characteristics of high arsenic coals from endemic arsenosis areas in southwestern Guizhou Province, China. *Applied Geochemistry* 16, s. 1353–1360.
- Dziok, T. i Strugała, A. 2017a. Preliminary assessment of the possibility of mercury removal from hard coal with the use of air concentrating tables. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 33(4), s. 125–142.

- Dziok, T. i Strugała, A. 2017b. Method selection for mercury removal from hard coal. E3S Web of Conferences 14, 02007.
- Dziok i in. 2019 – Dziok, T., Strugała, A. i Włodek, A. 2019. Studies on mercury occurrence in inorganic constituents of Polish coking coals. *Environmental Science and Pollution Research* 26, s. 8371–8382.
- Gawenda i in. 2014 – Gawenda, T., Krawczykowski, D. i Marciniak-Kowalska, J. 2014. Rozdrabnianie, klasyfikacja granulometryczna i wzbogacanie węgla do zgazowania naziemnego w generatorze fluidalnym. Wrocław: Wydawnictwo GrafiPol. ISBN: 978-83-64423-14-7.
- Honaker, R.Q. 2007. *Dry Coal Cleaning Technologies for India Coal*". Workshop on coal beneficiation and utilization of rejects: initiatives, policies and best practices Ranchi, India.
- Jasieńko i in. 1995a – Jasieńko S., Bujnowska B. i Gerus-Piasecka I., Gryglewicz G. 1995a. *Budowa organicznej substancji węglowej* [W:] *Chemia i fizyka węgla*, pod red. Jasieńko S. Wrocław: Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Jasieńko, S. 1995b. *Substancja mineralna w węglu* [W:] *Chemia i fizyka węgla*, pod red. Jasieńko S. Wrocław: Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Ketris, M.P. i Yudovich, Ya.E. 2009. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology* 78, s. 135–148.
- KOBiZE 2019. *Krajowy bilans emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2015–2017 w układzie klasyfikacji SNAP Raport syntetyczny*. Warszawa.
- Kołacz, J. 2015. *Nowy typ separatora rentgenowskiego firmy Comex i jego szerokie możliwości zastosowania*. [Online] [http://www.powderandbulk.pl/pl-PL/nowy\\_typ\\_separatora\\_rentgenowskiego\\_firmy\\_comex\\_i\\_jego\\_szerokie\\_mozliwosci\\_zastosowania.html](http://www.powderandbulk.pl/pl-PL/nowy_typ_separatora_rentgenowskiego_firmy_comex_i_jego_szerokie_mozliwosci_zastosowania.html) [Dostęp: 08.07.2019].
- de Korte, G.J. 2014. *Dry processing of coal – status update, Report CSIR/Nre/Mmr/Er/2014/0040/B*. Coaltech, RPA.
- Makowska i in. 2014 – Makowska, D., Bytnar, K., Dziok, T. i Rozwadowska, T. 2014. Wpływ procesu wzbogacania na zawartość niektórych metali ciężkich w polskich węglach kamiennych. *Przemysł Chemiczny* 93(12), s. 2048–2053.
- Makowska i in. 2018 – Makowska, D., Pacura, W., Mazgała, A., Wierońska, F. i Dziok, T. 2018. The reduction of ecotoxic elements in hard coal via dry separation process. *Konferencja Energy and Fuels 2018*, Kraków, 19–21.09.2018.
- Makowska i in. 2019 – Makowska, D., Strugała, A. i Wierońska, F. 2019. Assessment of the content, occurrence, and leachability of arsenic, lead, and thallium in wastes from coal cleaning processes. *Environmental Science and Pollution Research* 26, s. 8418–8428.
- TSM 2019. *Broszura firmy Tangshan Shenzhou Manufacturing*.
- Tumidajski i in. 2008 – Tumidajski, T., Gawenda, T., Niedoba, T. i Saramak, D. 2008. Kierunki zmian technologii przeróbki węgla kamiennego w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 24(1/2) s. 245–258.