



Tadeusz DZIOK*, Andrzej STRUGAŁA**, Tomasz CHMIELNIAK***,
Ireneusz BAIC****, Wiesław BLASCHKE*****

Koncepcja hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego

Streszczenie: W prowadzonych aktualnie pracach mających na celu obniżenie antropogenicznej emisji rtęci duży nacisk kładzie się na obniżenie emisji rtęci z procesów energochemicznego przetwórstwa węgla, głównie z procesów spalania. Jednym ze sposobów pozwalających na obniżenie antropogenicznej emisji rtęci jest jej usuwanie z węgla przed jego konwersją. Należy zaznaczyć, że rtęć w węglu kamiennym może być obecna zarówno w substancji organicznej jak i mineralnej, stąd też uniwersalna metoda powinna pozwalać na usuwanie rtęci z obu tych składowych substancji węglowej.

W pracy przedstawiono koncepcję hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego. Idea procesu polega na połączeniu procesów wzbogacania metodami mokrymi bądź suchymi (etap pierwszy) oraz wstępnej termicznej preparacji w temperaturze 200–400°C (etap drugi). W etapie pierwszym w procesie wzbogacania/odkameniania z węgla usuwana jest część rtęci występującej w substancji mineralnej. Natomiast w etapie drugim z węgla usuwana jest rtęć występująca w substancji organicznej oraz rtęć w obecnych jeszcze w węglu składnikach mineralnych o relatywnie niskiej temperaturze uwalniania rtęci.

Na podstawie wyników wstępnych badań, skuteczność obniżenia zawartości rtęci w węglu w takim procesie hybrydowym została oszacowana w przedziale od 36 do 75% (ze średnią wartością 58%). Efekt obniżenia zawartości rtęci w węglu jest jeszcze bardziej zauważalny w przypadku odniesienia jej zawartości do wartości opałowej węgla. Tak określona skuteczność obniżenia zawartości rtęci w węglu mieściła się w przedziale od 53 do 92% (przy średniej wartości wynoszącej 71%).

Słowa kluczowe: węgiel kamienny, rtęć, usuwanie rtęci, wzbogacanie węgla, suche odkamenianie, termiczna preparacja

* Dr inż., ** Dr hab. inż., prof. nadzw. AGH, *** Dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Technologii Paliw, Kraków;

e-mail: tadeusz.dziok@agh.edu.pl; strugala@agh.edu.pl; chmielniak@agh.edu.pl

**** Dr hab. inż., prof. nadzw., ***** Prof. dr hab. inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Oddział Zamiejscowy w Katowicach; e-mail: i.baic@imbigs.pl; wsblaschke@gmail.com

A concept of the hybrid mercury removal process from hard coal

Abstract: Nowadays, actions allowing for a reduction of anthropogenic mercury emission are taken worldwide. Great emphasis is placed on reducing mercury emission from the processes of energochemical coal conversion, mainly from the coal combustion processes. One of the methods which enable a reduction of anthropogenic mercury emission is the removal of mercury from coal before its conversion. It should be pointed out that mercury in hard coal may occur both in the organic and mineral matter. Therefore, a universal method should allow for the removal of mercury, combined in both ways, from coal.

In the paper, a concept of the hybrid mercury removal process from hard coal was presented. The idea of the process is based on the combination of the coal cleaning process using wet or dry methods (first stage) and the thermal pretreatment process at a temperature in the range from 200 to 400 °C (second stage). In the first stage, a part of mercury occurring in the mineral matter is removed. In the second stage, a part of mercury occurring in the organic matter as well as in some inorganic constituents characterized by a relatively low temperature of mercury release is removed.

Based on the results of the preliminary research, the effectiveness of the decrease in mercury content in coal in the hybrid process was estimated in the range from 36 to 75% with the average at the level of 58%. The effect of the decrease in mercury content in coal is much more significant when mercury content is referred to a low heating value of coal. So determined, the effectiveness was estimated in the range from 36 to 75% with the average at the level of 58%.

Keywords: hard coal, mercury, mercury removal, coal cleaning, dry deshaling, thermal pretreatment

Wprowadzenie

W ramach Konwencji Minamata ([Minamata Convention 2017](#)) prowadzone są aktualnie prace mające na celu obniżenie antropogenicznej emisji rtęci. Duży nacisk kładziony jest na obniżenie emisji rtęci z procesów energochemicznego przetwórstwa węgla, które w roku 2000 roku były źródłem aż 37% emisji antropogenicznej ([Pacyna i in. 2016](#)). Prognozuje się, że do roku 2035 procesy wykorzystujące węgiel wciąż będą głównym źródłem tej emisji.

Jednym ze sposobów ograniczenia emisji rtęci z procesów energochemicznego przetwórstwa węgla jest stosowanie węgla o niskiej jej zawartości, choć należy zaznaczyć, że dostępność takich węgla jest ograniczona. Dla przykładu, zawartość rtęci w polskich węglach kamiennych wynosi od 9 do 518 µg/kg ([Burmistrz i in. 2016](#); [Pyka i Wierzchowski 2017](#); [Wichliński i in. 2016](#)). Zapotrzebowanie na węgiel o niskiej zawartości rtęci stwarza konieczność stosowania operacji pozwalających na usuwanie rtęci z węgla przed jego konwersją (metody precombustion).

Obecnie w skali przemysłowej powszechnie stosowane są metody wzbogacania węgla ([Pavlish i in. 2010](#); [Zajusz-Zubek i Koniecznyński 2014](#)), a także zastosowanie znajduje proces termicznej preparacji – tzw. łagodnej pirolizy ([Bland i in. 2007](#)). Procesy wzbogacania polegają na wydzieleniu z urobku węglowego zanieczyszczeń w postaci skały płonnej. Dla polskich węgla kamiennych skała płonna wydzielona z węgla charakteryzuje się zawartością rtęci od 55 do 266 µg/kg ([Dziok i in. 2015b](#); [Kłojzy-Karczmarczyk i Mazurek 2014](#)), a tym samym jej wydzielenie pozwala na zmniejszenie ładunku rtęci w węglu kierowanym do procesu spalania, zgazowania czy koksowania. Z kolei proces termicznej preparacji polega na ogrzaniu węgla do temperatury w zakresie 200–400°C ([Dziok i in. 2014](#); [Wichliński i in. 2012](#)). W tej temperaturze z węgla uwalniana jest część rtęci zawartej

w substancji organicznej oraz część związków rtęci zawartych w substancji mineralnej, charakteryzujących się relatywnie niską temperaturą jej uwalniania (Strezov i in. 2010). Należy wspomnieć, że proces termicznej preparacji może być stosowany zarówno dla węgla kierowanych do procesu spalania i zgazowania, a także w pewnych przypadkach do obniżenia zawartości rtęci z mieszanki węglowej kierowanej do procesu koksowania (Dziok i Strugała 2017; Porada i in. 2017).

Skuteczność usuwania rtęci w metodach wzbogacania i termicznej preparacji jest silnie zróżnicowana (Dziok i Strugała 2017; Zajusz-Zubek i Koniecznyński 2014), co jest uzależnione od sposobu jej występowania w węglu. Rtęć w polskim węglu kamiennym występuje zarówno w substancji organicznej, jak również w substancji mineralnej – głównie w piryście, ale także w innych składnikach mineralnych (Dziok i in 2015a, 2016). Uniwersalna metoda powinna zatem pozwalać na skuteczne usunięcie rtęci zarówno z mineralnej jak i organicznej substancji węglowej. W pracy przedstawiono koncepcję hybrydowego (dwuetapowego) procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego, polegającego na połączeniu metod wzbogacania i wstępnej termicznej preparacji oraz zaprezentowano wyniki wstępnych badań.

1. Cel pracy i zakres badań

Celem pracy było przygotowanie koncepcji hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego, polegającego na połączeniu procesu wzbogacania i wstępnej termicznej preparacji. Dla potwierdzenia słuszności tej koncepcji zaprezentowano wyniki wstępnych badań. W pracy przebadano węgle surowe i koncentraty z pięciu urządzeń do wzbogacania na mokro, a następnie koncentraty te poddano preparacji termicznej prowadzonej w instalacji laboratoryjnej w temperaturze 300°C.

2. Metodyka badań

2.1. Charakterystyka badanych próbek

Badaniom poddano próbki węgla surowych, nadaw na urządzenia do wzbogacania oraz próbki wytworzonych w nich koncentratów. Próbki pochodziły z dwóch krajowych zakładów przeróbczych. Pierwszy z zakładów przeróbczych stosował układ wzbogacania w trzech sekcjach: wzbogacanie w płuczce zawieszinowej cieczy ciężkich, wzbogacanie w osadzarkach i wzbogacanie flotacyjne (przypadki 1–3). Drugi zakład przeróbczy stosował układ wzbogacania w dwóch sekcjach: wzbogacanie w osadzarkach i wzbogacanie flotacyjne (przypadki 4–5).

Charakterystykę badanych próbek przedstawiono w tabeli 1. Dla badanych próbek wykonano podstawową analizę techniczną (wilgoć, popiół, wartość opałowa) oraz oznaczono zawartość rtęci. Analizę techniczną wykonano za pomocą analizatora TGA Thermostep firmy Eltra (wilgoć i popiół) i kalorymetru AC 350 firmy Leco (wartość opałowa). Zawartość

rtęci oznaczono za pomocą analizatora MA-2000 (Nippon Instruments Corporation) wykorzystującego technikę zimnych par CVAAS.

TABELA 1. Charakterystyka badanych próbek

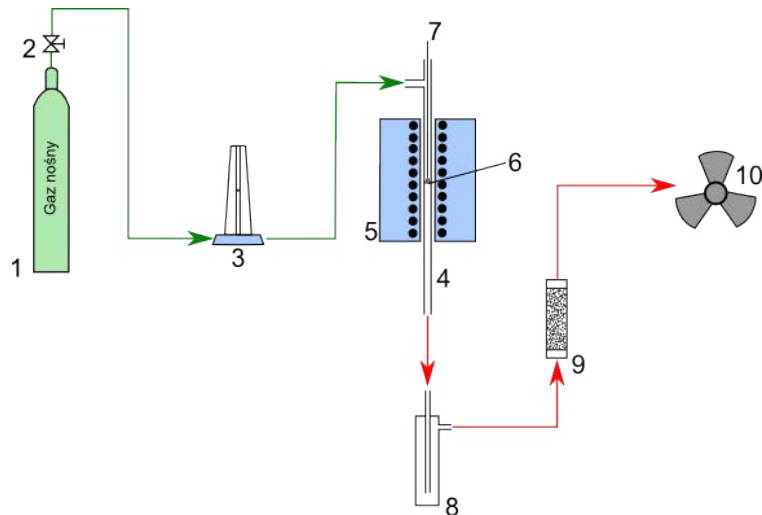
TABLE 1. Characteristics of examined samples

Analizowany przypadek	Urządzenie do wzbogacania	Rodzaj próbki	Ozn. próbki	W ^a [%]	A ^a [%]	Q _i ^a [kJ/kg]	Hg _t ^d [µg/kg]
1	płuczka zawieszinowa	nadawa	N1	1,5	61,0	10 041	114
		koncentrat	K1	1,4	6,3	32 160	42
2	osadzarka	nadawa	N2	1,7	29,1	22 988	131
		koncentrat	K2	1,5	5,8	32 911	90
3	flotownik	nadawa	N3	1,6	24,4	25 200	242
		koncentrat	K3	1,6	5,8	32 536	63
4	osadzarka	nadawa	N4	1,4	35,9	20 457	148
		koncentrat	K4	1,5	5,4	31 937	108
5	flotownik	nadawa	N5	1,4	22,4	25 771	218
		koncentrat	K5	1,3	7,2	31 327	185

2.2. Procedura procesu termicznej preparacji koncentratów

Badane w pracy koncentraty zostały poddane procesowi wstępnej termicznej preparacji w temperaturze 300°C. Termiczna preparacja została przeprowadzona przy wykorzystaniu laboratoryjnego stanowiska pomiarowego przedstawionego na rysunku 1.

Gaz płuczający (azot) dozowano z butli gazowej (1). Prędkość przepływu gazu ustalana była za pomocą reduktora (2), a kontrolowana w sposób ciągły za pomocą rotametu (3). Do badań wykorzystano reaktor kwarcowy z przepływem gazów ku dołowi (4), który był umieszczony w pionowym piecu rurowym (5). W połowie wysokości reaktora wbudowany został ruszt, na którym umieszczano próbkę koncentratu (6). W próbce umieszczono termoparę pomiarową (7), która była jednocześnie termoparą sterującą urządzenia do regulacji temperatury pieca. Stosowano próbki o masie 5 g i uziarnieniu poniżej 3,15 mm. Próbkę ogrzewana była od temperatury otoczenia do temperatury końcowej 300°C z szybkością 8°C/min. Po osiągnięciu zadanej temperatury próbkę ogrzewano w temperaturze końcowej przez 5 minut. Proces nagrzewania realizowany był w przepływie azotu o natężeniu przepływu 50 cm³/min. Gazy poprocesowe opuszczające reaktor były chłodzone w chłodnicy (8), a po oczyszczeniu na filtrze z węgla aktywnego (9) odprowadzane były do odciągu (10). Po zakończeniu pomiaru retorta wraz z próbką była wyjmowana z pieca i chłodzona do



Rys. 1. Instalacja laboratoryjna do termicznej preparacji węgla
 1 – butla z gazem nośnym, 2 – reduktor, 3 – rotametr, 4 – reaktor kwarcowy, 5 – piec rurowy,
 6 – ruszt z próbką, 7 – termopara sterująca, 8 – chłodnica, 9 – filtr z węgla aktywnego, 10 – odciąg

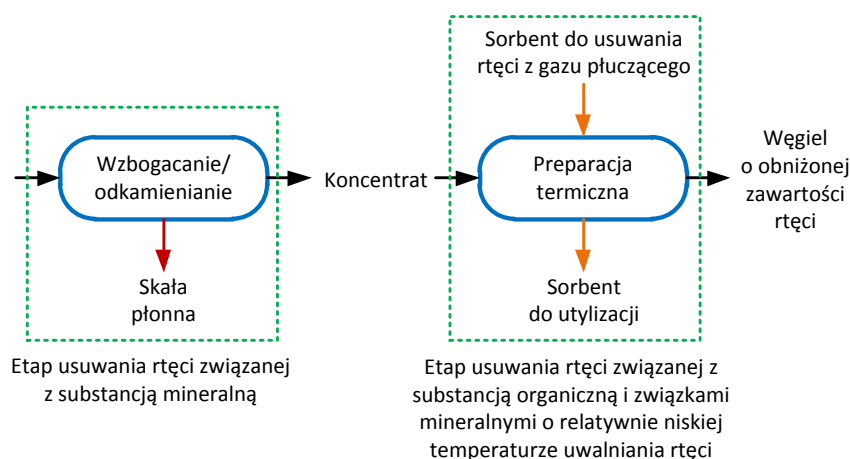
Fig. 1. Laboratory equipment for the thermal pretreatment of coal
 1 – carrier gas cylinder, 2 – gas reducer with control valve, 3 – rotameter, 4 – quartz reactor,
 5 – tube furnace, 6 – grid with sample, 7 – furnace control thermocouple, 8 – cooler, 9 – active carbon
 bed, 10 – exhaust

temperatury pokojowej w strumieniu azotu. Parametry procesowe dobrano na podstawie wcześniejszych badań własnych (Dziok i in. 2014). Dla każdego z badanych koncentratów preparację termiczną przeprowadzono dwukrotnie.

3. Koncepcja hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego

Skuteczna metoda usuwania rtęci z węgla kamiennego musi uwzględniać fakt występowania rtęci zarówno w substancji mineralnej i organicznej węgla jak i skale płonnej (Dziok i in. 2015a). W substancji organicznej rtęć powiązana jest z głównie z siarką organiczną, a w substancji mineralnej z pirytem. Badania skały płonnej z procesu wzbogacania węgla kamiennych wykazały, że wysokim zawartościom siarki pirytowej towarzyszyła również wysoka zawartość rtęci (Dziok 2015b). Z kolei badania przy wykorzystaniu mikros sondy elektronowej (Dziok 2016) wykazały ponadto, że rtęć w substancji mineralnej może być powiązana także z innymi siarczkami (chalkopirytem i markasytem) oraz innymi składnikami nieorganicznymi, takimi jak glinokrzemiany, węglany czy siarczany. Uniwersalna metoda usuwania rtęci z węgla kamiennego powinna zatem pozwalać na usuwanie rtęci zarówno z substancji organicznej jak również z mineralnej.

Koncepcja hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego polega na połączeniu procesów wzbogacania/odkameniania (etap pierwszy) i wstępnej termicznej preparacji w temperaturze 200–400°C (etap drugi). Schemat koncepcyjny przedstawiono na rysunku 2. Według przedstawionej idei w etapie pierwszym w procesie wzbogacania z węgla usuwana jest razem ze skałą płonną część rtęci występującej w substancji mineralnej. W etapie drugim z węgla usuwana jest część rtęci występującej w substancji organicznej oraz rtęć pozostająca jeszcze w składnikach mineralnych o relatywnie niskiej temperaturze uwalniania rtęci. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na występowanie efektu synergii wynikającej z połączenia procesów mechanicznej przeróbki i wstępnej preparacji termicznej (Dziok i Strugała 2017). Możliwość usuwania rtęci w procesie preparacji termicznej ze wzbogaconego węgla potwierdzają również wyniki przedstawione w pracy (Wichliński i in. 2015).



Rys. 2. Schemat koncepcyjny hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego

Fig. 2. Concept of the hybrid mercury removal process from hard coal

Należy zaznaczyć, że usuwana w procesie termicznej preparacji rtęć wymaga jej wyłapania z gazu płuczącego. W tym celu zastosowanie znajdują filtry w postaci złoża stałego z sorbentów mineralnych bądź organicznych. W porównaniu z procesem usuwania rtęci ze spalin, w tym przypadku proces usuwania jest łatwiejszy ze względu na od 25 do 35 razy wyższą koncentrację rtęci w oczyszczanym gazie płuczącym (Chmielniak 2011). Zużyty sorbent wymagać będzie regeneracji lub deponowania.

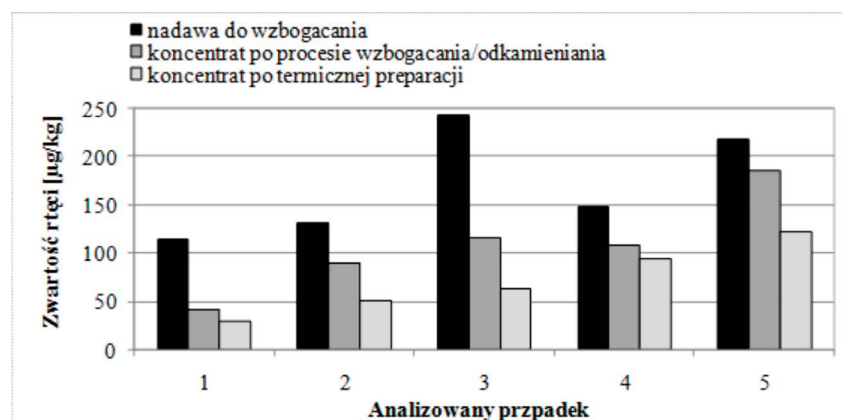
Zastosowanie obu procesów poza możliwością usuwania rtęci z substancji organicznej i mineralnej dostarcza innych wymiernych korzyści wynikających z polepszenia parametrów jakościowych węgla. Proces wzbogacania pozwala na obniżenie zawartości popiołu w koncentracie, co skutkuje wzrostem kaloryczności. Dodatkowo pozwala na usunięcie części siarki pirytovej, a także pierwiastków ekotoksycznych (Makowska i in. 2014). Z kolei proces wstępnej preparacji termicznej pozwala na obniżenie zawartości wilgoci, co skutkuje

zwiększeniem wartości opałowej węgla, a także umożliwia częściowe usunięcie siarki (Dziok i Strugała 2017). Ponadto wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że proces ten jest atrakcyjny ekonomicznie (Chmielniak i in. 2017, Chmielniak in. 2015). W przypadku uwzględnienia w kosztach separacji rtęci kosztu składowania zużytego sorbentu oraz kosztów wynikających ze straty finansowej związanej z brakiem możliwości zagospodarowania powstałych popiołów (wzrost zawartości węgla w popiele) koszt usunięcia rtęci przy wykorzystaniu preparacji termicznej jest wyraźnie niższy (od 16 do 66%) od kosztów usuwania rtęci przy zastosowaniu wtrysku sorbentu do spalin.

Należy zaznaczyć, że kierowany do procesu wstępnej preparacji termicznej koncentrat ze wzbogacania może także pochodzić z procesów suchej separacji węgla. Skuteczność usuwania rtęci z węgla w procesach wzbogacania na mokro i suchej separacji kształtuje się na zbliżonym poziomie (Dziok i Strugała 2017). Co więcej, zastosowanie suchej separacji pozwala na uproszczenie schematu technologicznego zakładu przerobczego, zmniejszenie jego energochłonności oraz ograniczenie lub całkowitą eliminację kosztownych obiegów wodno-mułowych. Ponadto metoda ta w porównaniu do procesu wzbogacania na mokro odznacza się niższymi nakładami inwestycyjnymi i kosztami eksploatacyjnymi (Baic i in. 2015a). Należy również podkreślić, że proces suchej separacji umożliwia skuteczne usunięcie z węgla siarki pirytowej i ziaren z klasy ziarnowej poniżej 0,5 mm, a wydzielona w procesie skała płonna jako produkt uboczny (z uwagi na brak kontaktu z wodą) może być wykorzystywana jako substytut kruszyw naturalnych (Baic in. 2015a i 2015b; Baic i Blaschke 2017).

4. Wyniki wstępnych badań w skali laboratoryjnej

Na skuteczność zaproponowanego hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego wskazują uzyskane wyniki wstępnych badań laboratoryjnych. Na rysunku 3 przedsta-



Rys. 3. Zmiana zawartości rtęci w badanych próbkach nadaw i koncentratów

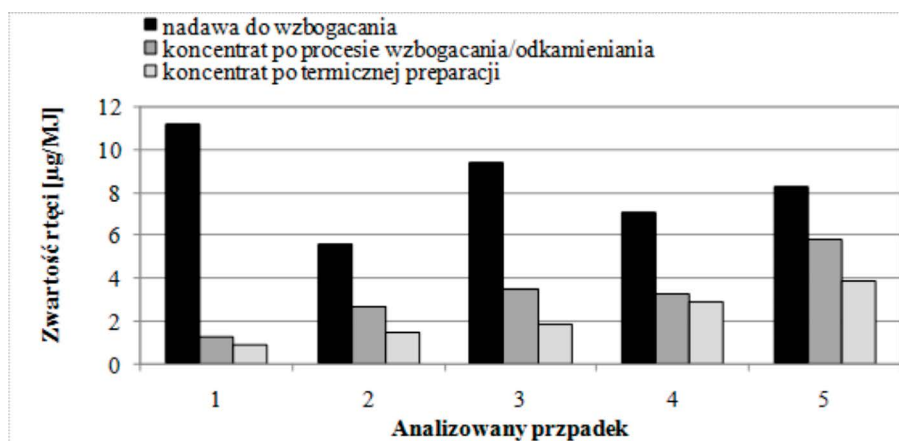
Fig. 3. Changes in mercury content in the analyzed samples of feed coals and concentrates

TABELA 2. Skuteczność usuwania rtęci z badanych próbek nadaw i koncentratów [%]

TABLE 2. Effectiveness of mercury removal from analyzed samples of feed coals and concentrates [%]

Analizowany przypadek	Skuteczność usuwania rtęci wyznaczona na podstawie zawartości rtęci w badanych próbkach wyrażonej [$\mu\text{g}/\text{kg}$]			Skuteczność usuwania rtęci wyznaczona na podstawie zawartości rtęci w badanych próbkach wyrażonej [$\mu\text{g}/\text{MJ}$]		
	wzbogacanie/ /odkamienianie	termiczna preparacja	proces hybrydowy	wzbogacanie/ /odkamienianie	termiczna preparacja	proces hybrydowy
1	63	31	75	88	31	92
2	31	44	62	52	44	73
3	52	45	74	63	46	80
4	27	13	36	54	12	59
5	15	34	44	30	33	53
Średnia	38	34	58	57	33	71

wiono zmianę zawartości rtęci w badanych próbkach, tj. w nadawach do wzbogacania oraz w koncentratkach przed i po ich termicznej preparacji. Dla każdego z analizowanych przypadków odnotowano znaczące obniżenie rtęci w efekcie zastosowania zaproponowanego procesu. Podsumowanie uzyskanych wyników przedstawiono w tabeli 2. Proces wzbogacania/odkamieniania pozwolił na obniżenie zawartości rtęci od 15 do 63%, a proces termicznej preparacji pozwolił na obniżenie zawartości rtęci w koncentratkach z procesu wzbogacania od 13 do 45%. Natomiast skuteczność obniżenia zawartości rtęci w wyniku zastosowania obu tych procesów wahała się w przedziale od 36 do 75% (przy średniej wynoszącej 58%).



Rys. 4. Zmiana zawartości rtęci w badanych próbkach nadaw i koncentratów odniesiona do ich wartości opałowej

Fig. 4. Changes in mercury content in analyzed samples of feed coals and concentrates with reference to their lower heating value

Efekt obniżenia zawartości rtęci w węglu jest jeszcze bardziej zauważalny w przypadku odniesienia jej do wartości opałowej węgla (rys. 4). Związane jest to z obniżeniem zawartości popiołu w koncentracie, co skutkuje wzrostem jego kaloryczności. Proces wzbogacania/odkameniania pozwolił na obniżenie tak wyrażonej zawartości rtęci od 30 do 88%, a proces termicznej preparacji pozwolił na obniżenie zawartości rtęci w koncentratkach z procesu wzbogacania od 12 do 46%. Natomiast skuteczność obniżenia zawartości rtęci w wyniku zastosowania obu tych procesów łącznie wahała się w przedziale od 53 do 92% – średnio 71% (tab. 2).

Należy zaznaczyć, że potwierdzenie skuteczności usuwania rtęci z węgla w procesie hybrydowym wymaga przeprowadzenia dalszych badań. Konieczne jest również zweryfikowanie uzyskanych wyników w skali wielkolaboratoryjnej i pilotowej.

Podsumowanie

Koncepcja hybrydowego procesu usuwania rtęci z węgla kamiennego polega na połączeniu procesów wzbogacania/odkameniania (etap pierwszy) i wstępnej termicznej preparacji w temperaturze 200–400°C (etap drugi). W etapie pierwszym z węgla razem ze skałą płonną usuwana jest część rtęci występującej w substancji mineralnej. W etapie drugim z węgla usuwana jest część rtęci występującej w substancji organicznej oraz w składnikach mineralnych o relatywnie niskiej temperaturze uwalniania rtęci. Wprowadzeniu obu metod towarzyszy efekt synergii.

Skuteczność obniżenia zawartości rtęci w węglu w procesie hybrydowym została wstępnie oszacowana w przedziale od 36 do 75% (średnio 58%). Natomiast skuteczność obniżenia zawartości rtęci odniesiona do wartości opałowej węgla wahała się w przedziale od 53 do 92% (średnio 71%).

Zastosowanie obu procesów poza obniżeniem zawartości rtęci dostarcza także innych wymiernych korzyści. Proces wzbogacania/odkameniania węgla pozwala na obniżenie w nim zawartości popiołu i siarki piritowej oraz zwiększenie jego kaloryczności. Natomiast zastosowanie procesu wstępnej termicznej preparacji pozwala usunąć z węgla wilgoć, skutkując zwiększeniem jego wartości opałowej, oraz umożliwia częściowe usunięcie siarki.

Należy podkreślić, że kierowany do procesu wstępnej preparacji termicznej koncentrat ze wzbogacania może także pochodzić z procesów suchej separacji węgla. Zastosowanie suchej separacji pozwala na uproszczenie schematu technologicznego zakładu przerobczego, zmniejszenie jego energochłonności oraz ograniczenie lub całkowitą eliminację kosztownych obiegów wodno-mułowych. Ponadto metoda ta odznacza się niższymi nakładami inwestycyjnymi i kosztami eksploatacyjnymi niż wzbogacanie węgla na mokro.

Należy dodać, że proponowana technologia może zostać zastosowana również dla węgla koksowych. W przypadku przygotowania wsadu dla baterii pracujących w systemie zasypowym wstępna termiczna preparacja oprócz usunięcia rtęci umożliwi również redukcję zawartości wilgoci we wsadzie. To ostatnie korzystnie wpływa na wydajność procesu jak i jakość produkowanego koksu.

Praca została przygotowana w ramach pracy statutowej Wydziału Energetyki i Paliw, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie nr 11.11.210.373.

Literatura

- Baic i in. 2015a – Baic, I., Blaschke, W., Góralczyk, S., Szafarczyk, J. i Buchalik, G. 2015a. Nowa ekologiczna metoda usuwania zanieczyszczeń skałą płonną z urobku węgla kamiennego. *Rocznik Ochrona Środowiska* 17, s. 1274–1285.
- Baic i in. 2015b – Baic, I., Blaschke, W. i Sobko, W. 2015b. Badania nad odkamienianiem energetycznego węgla kamiennego na powietrznych stołach koncentracyjnych. *Rocznik Ochrona Środowiska* 17, s. 958–972.
- Baic, I. i Blaschke, W. 2017. Preliminary study on the reduction of mercury content in steam coal by using a pneumatic vibrating concentrating table, *Proceedings 21th International Conference on Environment and Mineral Processing*, Ostrava 1–3.06.2017, s. 7–16.
- Bland i in. 2007 – Bland, A.E., Greenwell, C., Newcomer, J., Sellakumar, K. i Carney, B. 2007. Pilot Testing of WRI's Novel Mercury Control Technology by Pre-Combustion Thermal Treatment of Coal. *US DOE Mercury Control Conference*, Pittsburgh 11–13.12.2007.
- Burmistrz i in. 2016 – Burmistrz, P., Kogut, K., Marczak, M. i Zwoździak, J. 2016. Lignites and subbituminous coals combustion in Polish power plants as a source of anthropogenic mercury emission. *Fuel Processing Technology* 152, s. 250–8.
- Chmielniak, T. 2011. Reduction of Mercury emissions to the atmosphere from coal combustion processes of using low-temperature pyrolysis – a concept of process implementation on a commercial scale. *Rynek Energii* 93(2), s.176–181.
- Chmielniak i in. 2015 – Chmielniak, T., Misztal, E. Mazurek, I. i Sajdak, M. 2015. Technologia usuwania rtęci z węgla przed procesem spalania. *Przemysł Chemiczny* 94(4), s. 480–486.
- Chmielniak i in. 2017 – Chmielniak, T., Słowik, K. i Sajdak, M. 2017. Mercury removal by mild thermal treatment of coal. *Fuel* 195, s. 290–298.
- Dziok i in 2014 – Dziok, T., Strugała, S., Rozwadowski, A. i Okońska, A. 2014. Wpływ wybranych parametrów procesu termicznej obróbki węgla kamiennego na skuteczność usuwania rtęci. *Przemysł Chemiczny* 93(12), s. 2034–2037.
- Dziok i in. 2015a – Dziok, T., Strugała, A., Rozwadowski, A. i Macherzyński, M. 2015a. Studies of the correlation between mercury content and the content of various forms of sulfur in Polish hard coals. *Fuel* 159, s. 206–213.
- Dziok i in. 2015b – Dziok, T., Strugała, A., Rozwadowski, A., Macherzyński, M. i Ziomber, S. 2015b. Rtęć w odpadach z procesu wzbogacania węgla kamiennych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 31, z. 1, s. 107–122.
- Dziok, T. 2016. *Badania zmiany zawartości rtęci na drodze przeróbki mechanicznej i wstępnej preparacji termicznej węgla kamiennych*. Rozprawa doktorska. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Kraków.
- Dziok, T. i Strugała, A. 2017. Method selection for mercury removal from hard coal. *E3S Web of Conferences* 14(02007), s. 1–10.
- Klojzy-Karczmarczyk, B. i Mazurek, J. 2014. Badania zawartości rtęci i siarki w odpadach z obszaru nieczynnej haldy odpadów górnictwa węgla kamiennego. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 17, z. 4, s. 289–302.
- 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.
- Minamata Convention 2017 – Minamata Convention on Mercury. [Online] Dostępne w: <http://mercuryconvention.org/> [Dostęp. 10.07.2017].
- Pacyna i in. 2016 – Pacyna, J.M., Travnikov, O., De Simone, F., Hedgecock, I.M., Sundseth, K., Pacyna, E.G., Steenhuisen, F., Pirrone, N., Munthe, J. i Kindbom, K. 2016. Current and future levels of mercury atmospheric pollution on a global scale. *Atmos. Chem. Phys.* 16, s. 12491–12511.
- Pavlish i in. 2010 – Pavlish, J.P., Hamre, L.L. i Zhuang, Y. 2010. Mercury control technologies for coal combustion and gasification systems. *Fuel* 89, s. 838–847.

- Porada i in. 2017 – Porada, S., Dziok, T., Czerski, G., Grzywacz, P. i Strugała, A. 2017. Examinations of polish brown and hard coals in terms of their use in the steam gasification process. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 33, z. 1, 15–34.
- Pyka, I. i Wierzchowski, K. 2017. Rozkład zawartości rtęci w polskim węglu kamiennym do celów energetycznych w 2015 roku na tle wybranych parametrów jakościowych. *Przegląd Górniczy* 73(5), s. 17–23.
- Strezov i in. 2010 – Strezov, V., Evans, T.J., Ziolkowski, A. i Nelson, P.F. 2010. Mode of occurrence and thermal stability of mercury in coal. *Energy & Fuels* 24, s. 53–57.
- Wichliński i in. 2012 – Wichliński, M., Kobyłecki, R. i Bis, Z. 2012. Przegląd metod ograniczenia emisji rtęci w elektrowniach podczas spalania paliw stałych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 4, s. 151–160.
- Wichliński i in. 2015 – Wichliński, M., Kobyłecki, R. i Bis, Z. 2015. Niskotemperaturowa obróbka termiczna węgla wzbogaconych i niewzbogaconych w celu obniżenia zawartości rtęci. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 18, z. 4, s. 113–124.
- Wichliński i in. 2016 – Wichliński, M., Kobyłecki, R. i Bis, Z. 2016. Badania zawartości rtęci w mułach węglowych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 19, z. 4, s. 115–124.
- Zajusz-Zubek, E. i Koniecznyński, J. 2014. Coal cleaning versus the reduction of mercury and other trace elements' emissions from coal combustion processes. *Archives of Environmental Protection* 40(1), s. 115–127.

