

Krzysztof KURUS

Barbara BIAŁECKA

**MODEL
PROCESU PRODUKCJI WĘGLA
HANDLOWEGO UWZGLĘDNIAJĄCY
REDUKCJĘ WYBRANYCH
ZANIECZYSZCZEŃ**



Krzysztof KURUS

Barbara BIAŁECKA

**MODEL
PROCESU PRODUKCJI WĘGLA
HANDLOWEGO UWZGLĘDNIAJĄCY
REDUKCJĘ WYBRANYCH
ZANIECZYSZCZEŃ**

GLIWICE 2017

RECENZENCI:

prof. dr hab. inż. Stanisław HŁAWICZKA

prof. dr hab. inż. Barbara TORA

Układ typograficzny autorów.

Projekt i opracowanie graficzne okładki: Michał Zasadzień

ISBN 978-83-65265-11-1

© Copyright by Publisher PA NOVA SA. Gliwice
ul. Górnych Wałów 42, 44-100 GLIWICE, POLAND
tel. +4832 400 41 02
fax. +4832 400 41 10

All rights reserved
Printed in Poland

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany, rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym również nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w postaci cyfrowej zarówno w Internecie, jak i w sieciach lokalnych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Gliwice 2017

*Autorzy dziękują wszystkim,
którzy przyczynili się do powstania niniejszej monografii.*

*Składamy również serdeczne podziękowania dla pracowników
Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A., ZG „Siltech”,
oraz Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach
za wsparcie merytoryczne oraz pomoc przy wykonywaniu badań.*

*Część badawcza monografii została zrealizowana w ramach projektu
„Opracowanie bazy danych zawartości rtęci w krajowych węglach, wytycznych
technologicznych jej dalszej redukcji wraz ze zdefiniowaniem benchmarków
dla krajowych wskaźników emisji rtęci – Baza Hg”
w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach*

SPIS TREŚCI

WYKAZ AKRONIMÓW I POJĘĆ.....	11
WSTĘP	13
CELE MONOGRAFII.....	14
Metodyka badań.....	14
1. KWERENDA LITERATURY.....	16
1.1. Problem zanieczyszczeń zawartych w węglu kamiennym	16
1.2. Współwystępowanie zanieczyszczeń w węglu kamiennym	21
1.3. Badania rtęci w węglu kamiennym.....	24
1.4. Technologie i metody prowadzenia ruchu zakładu górniczego dla ograniczania zanieczyszczeń w węglu surowym	27
1.5. Infrastruktura i potencjał polskich zakładów górniczych w zakresie redukcji ładunku zanieczyszczeń w węglu handlowym.....	30
1.6. Mapowanie oraz modelowanie procesów technologicznych.....	38
2. BADANIA WŁASNE	43
2.1. Redukcja wybranych zanieczyszczeń w procesach produkcji węgla kamiennego – ocena wstępna	43
2.2. Badania pilotażowe w ZG „Siltech”	46
2.3. Jastrzębska Spółka Węglowa SA – badania produktów handlowych	50
2.4. Ocena redukcji zanieczyszczeń w procesach wzbogacania.....	55
2.5. Ruch „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” – argumentacja wyboru zakładu do potrzeb budowy modelu	59
2.6. Cykl życia zanieczyszczeń w produktach i odpadach górnictwa węgla kamiennego – próba wykonania bilansu	62
2.7. Bilans produktów i odpadów	67
3. PRODUKCJA WĘGLA HANDLOWEGO UWZGLĘDNIAJĄCA REDUKCJĘ ZANIECZYSZCZEŃ-MODEL PROCESU.....	72
3.1. Budowa modelu – szczegółowe badania urobku	72
3.2. Problem redukcji zanieczyszczeń w procesach wydobywania węgla	78
3.3. Model procesów technologicznych mechanicznej przeróbki węgla.....	81
3.4. Mapa procesów oraz możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń w procesach produkcji węgla kamiennego	86
3.5. Weryfikacja modelu.....	88
4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	92
LITERATURA	96
SPIS RYSUNKÓW	105
SPIS TABEL.....	107
ZAŁĄCZNIKI	109

WYKAZ AKRONIMÓW I POJĘĆ

A^a – popiół w stanie analitycznym

A^d – popiół w stanie suchym

A^r – popiół w stanie roboczym

Eko Plus sp. z o.o. – Zakład Górniczy z siedzibą w Bytomiu

EPH a.s. – Energetický a průmyslový holding, a.s. (KWK “Silesia”)

H^a – wodór w stanie analitycznym

H^d – wodór w stanie suchym

Hg^a – rtęć w stanie analitycznym

Hg^d – rtęć w stanie suchym

JSW SA – Jastrzębska Spółka Węglowa SA

KHW SA – Katowicki Holding Węglowy SA

KW SA – Kompania Węglowa SA

LWB SA – Lubelski Węgiel Bogdanka SA

ONZ – Organizacja Narodów Zjednoczonych

PME1 – wariant zakładu przeróbki mechanicznej dysponujący infrastrukturą wzbogacania węgla gruboziarnistego powyżej 20 (10) mm, prowadzący produkcję niewzbogaconych miałow energetycznych

PME2 – wariant zakładu przeróbki mechanicznej dysponujący infrastrukturą wzbogacania węgla energetycznego powyżej 1 (0,5) mm

PME3 – wariant zakładu przeróbki mechanicznej dysponujący infrastrukturą wzbogacania węgla energetycznego w całym zakresie uziarnienia

PMK1 – wariant zakładu przeróbki mechanicznej dysponujący infrastrukturą wzbogacania węgla koksującego w całym zakresie uziarnienia

Q_i^a – wartość opałowa w stanie analitycznym

Q_i^d – wartość opałowa w stanie suchym

R – rozstęp, miara różnicy między najwyższą a najniższą wartością zmiennej w zbiorowości

R^2 – współczynnik determinacji

S_t^a – siarka całkowita w stanie analitycznym

S_t^d – siarka całkowita w stanie suchym

TC^a – węgiel całkowity w stanie analitycznym

UNEP (United Nations Environmental Programme) – Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych

W^a – wilgoć w stanie analitycznym

W_t^r – wilgoć całkowita

$\bar{x}$ – średnia arytmetyczna

WSTĘP

Polski węgiel kamienny jest uznawany za silnie zanieczyszczony siarką i metalami ciężkimi, w tym rtęcią. Zmniejszenie ładunku niepożądanych substancji w węglu handlowym jeszcze na poziomie zakładu górniczego jest pierwszym etapem czystych technologii węglowych, który pozwala wymiennie ograniczyć ładunek zanieczyszczeń w paliwie oraz zminimalizować koszty zakładów energetycznych, ciepłowni oraz koksowni w zakresie utrzymania instalacji zmniejszających emisję do atmosfery. Potencjał redukcji zanieczyszczeń w węglu kamiennym rozumiany jako możliwość zmniejszenia ich zawartości poprzez wybór technologii eksploatacji oraz dobór modeli technologicznych przeróbki mechanicznej nie został do tej pory dostatecznie określony. Oprócz siarki, której wpływ na zanieczyszczenie środowiska jest powszechnie znany a co za tym idzie obniżenie jej zawartości wpływa na cenę węgla handlowego.

Na szczególną uwagę wśród zanieczyszczeń zasługuje rtęć ze względu na wyjątkowo szkodliwe oddziaływanie na otoczenie i zdrowie człowieka. Szacuje się, że około 25% światowej emisji rtęci do atmosfery pochodzi ze spalania węgla kamiennego i brunatnego, natomiast w Polsce ta wartość może sięgać nawet 90% [52]. Dla krajowej gospodarki, a zwłaszcza dla producentów węgla oraz branży energetycznej wprowadzenie Konwencji Rtęciowej przez Organizację Narodów Zjednoczonych w 2014 roku w przyszłości będzie oznaczało konieczność poniesienia kosztów związanych z dostosowaniem do globalnych limitów i norm emisji Hg do atmosfery. Z powyższych względów zawartość rtęci i stowarzyszonej z nią siarki w węglu surowym i w produkcji handlowym oraz sposoby ich minimalizacji w procesie produkcji węgla są przedmiotem szczegółowej analizy monografii. Istniejące opracowania w literaturze światowej nie zawierają kompleksowych analiz dotyczących potencjału redukcji ładunku rtęci w węglu kamiennym przed jego spalaniem. Autorzy prac sporadycznie analizują parametry procesów przerobczych oraz ich wpływ na zawartość zanieczyszczeń w węglu handlowym. W literaturze brak jest również informacji dotyczących kompleksowego modelowania procesów produkcji węgla uwzględniających redukcji pierwiastków śladowych. Opracowanie narzędzia wspomagającego produkcję węgla kamiennego w odniesieniu jest silnie uzasadnione przez planowane regulacje dot. ochrony powietrza. Obecnie na poziomie zakładu górniczego nie są znane możliwości sterowania ładunkiem rtęci poprzez zmiany parametrów technologicznych.

Dla budowy modelu procesu produkcji węgla handlowego uwzględniającego redukcję wybranych zanieczyszczeń konieczne jest określenie ładunku tych pierwiastków w węglu surowym, w produktach oraz odpadach zakładów górniczych, a także możliwości ich redukcji przy zastosowaniu odmiennych modeli technologicznych procesów wydobywania i przeróbki mechanicznej. Zebrana w trakcie badań własnych wiedza i opracowany na jej podstawie model mają za zadanie wspomóc proces redukcji wybranych zanieczyszczeń w węglu handlowym, a także umożliwić podjęcie racjonalnych decyzji w zakresie inwestycji w zakładach górniczych dysponujących ograniczoną infrastrukturą przeróbki węgla. Tego typu rozwiązanie nie zostało do tej pory zastosowane w światowym górnictwie.

CELE MONOGRAFII

Przyjęto, że głównym celem opracowania monograficznego jest:
Opracowanie i weryfikacja modelu produkcji węgla wspomagającego redukcję ładunku siarki i rtęci.

Dla tak sformułowanego celu głównego określono następujące cele poznawcze:

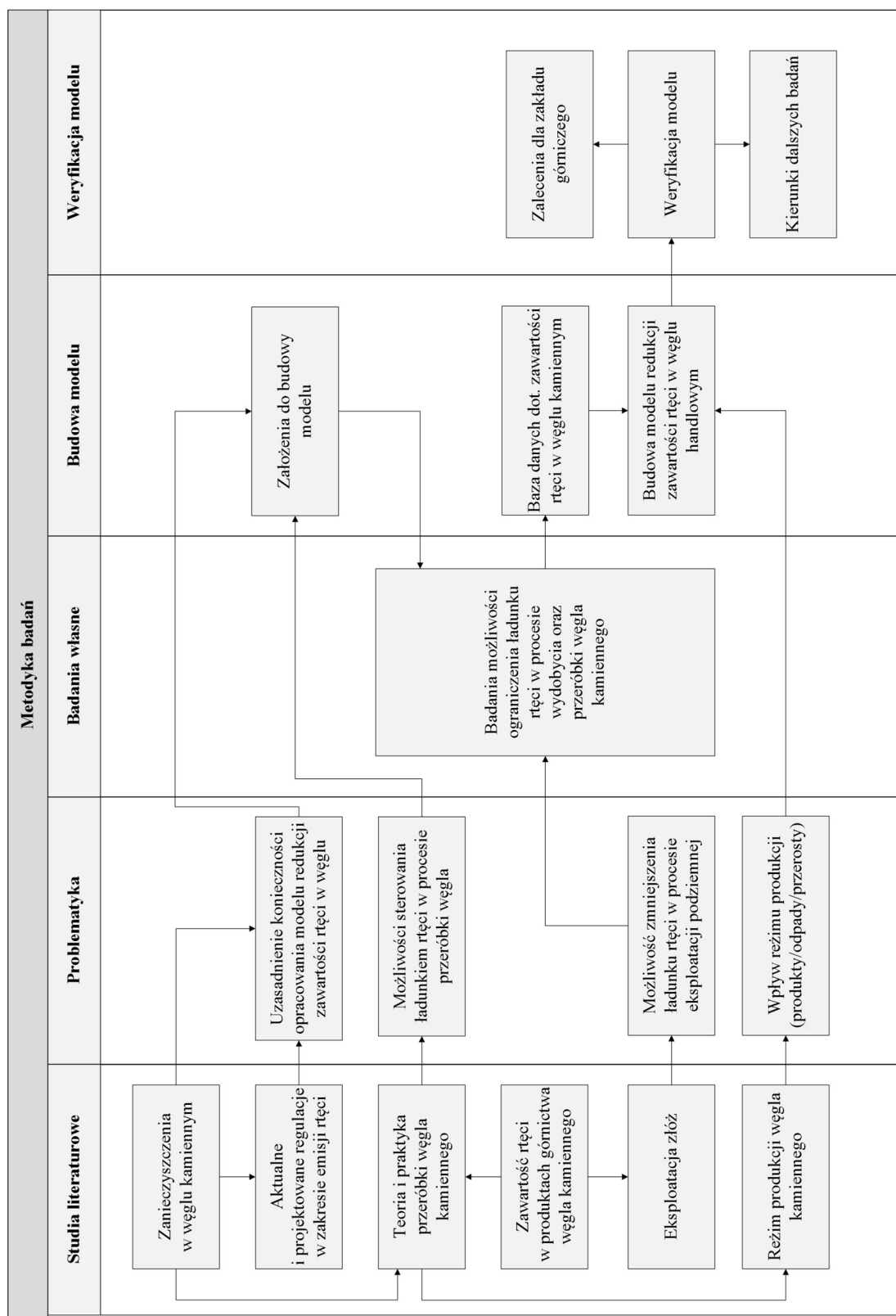
- analiza migracji zanieczyszczeń w cyklu życia węgla kamiennego od wydobywania na powierzchnię do powstania produktu handlowego i odpadów,
- analiza wpływu zmienności istotnych czynników technologicznych (materialne czynniki produkcji) na zawartość zanieczyszczeń w produktach handlowych,
- określenie statystycznej zmienności, zależności i korelacji pomiędzy badanymi parametrami,
- ocena możliwości prognozowania zawartości wybranych zanieczyszczeń w produktach i odpadach z kopalń węgla kamiennego dysponujących określoną infrastrukturą.

Metodyka badań

Dla realizacji celów opracowania dokonano wyboru metod badawczych umożliwiających pozyskanie informacji do analizy migracji zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla handlowego. Metody badawcze obejmowały szczegółowo:

- badania laboratoryjne parametrów handlowych węgla, w tym zawartości popiołu, wilgoci, wartości opałowej, siarki i rtęci,
- badania modelowe: określenie szczegółowości modelu, wybór obiektów i ich liczby oraz wzajemnych powiązań, badania eksperymentalne, estymacja parametrów modelu,
- standardowe metody numeryczne,
- opracowanie modelu oraz jego weryfikacja.

W oparciu o pozyskaną wiedzę zbudowano model – narzędzie wspomagające sterowanie ładunkiem zanieczyszczeń w procesie eksploatacji oraz przeróbki mechanicznej. Metodyka opracowania monograficznego została przedstawiona na rysunku 1. Badania obejmują kilka etapów dotyczących: przeglądu literatury, wskazania problematyki, opracowania założeń i pozyskiwania danych do budowy modelu. Opracowany model został poddany weryfikacji.



Rysunek 1. Metodyka opracowania monograficznego.

Źródło: opracowanie własne.

1. KWERENDA LITERATURY

1.1. Problem zanieczyszczeń zawartych w węglu kamiennym

Węgiel kamienny jest skałą osadową pochodzenia organicznego. W długotrwałym procesie przemian tkanek roślinnych, rozkładu w warunkach ograniczonego dostępu do tlenu, działania wysokiego ciśnienia, czynników chemicznych i biochemicznych oraz temperatury zwiększał się w nim udział pierwiastka C. Na świecie złoża węgla kamiennego występują głównie w warstwach paleozoicznych (karbonu i permu) oraz mezozoicznych [5]. Węgiel kamienny występujący w formie odmian petrograficznych takich jak: witryt, klaryt, duryt i fuzyt składa się z substancji takich jak [17]:

- palne substancje organiczne,
- substancje mineralnych (głównie SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO),
- woda.

Ze względu na stopień uwęglenia w polskiej klasyfikacji wymienia się 10 typów, które są określone oznaczeniami od 31 do 42. Podział pozwala na określenie najbardziej korzystnej formy zastosowania danego węgla w gospodarce w oparciu o zawartość części lotnych oraz zdolność spiekania. Na możliwości zagospodarowania wpływają rozmiary ziarn, które klasyfikuje się wg sortymentów handlowych dostosowanych do potrzeb przemysłowych lub indywidualnych odbiorców [44]. Spośród zanieczyszczeń występujących w węglu kamiennym dla celów handlowych najczęściej oznacza się [23]:

- popiół,
- siarkę,
- wilgoć,
- fosfor,
- chlor,
- zawartość węgla pierwiastkowego,
- parametry charakteryzujące właściwości koksotwórcze.

Poza wyżej wymienionymi substancjami w węglu handlowym znajdują się zanieczyszczenia niemające bezpośredniego wpływu na jego wartość dla potencjalnych nabywców, jednakże mogące powodować zagrożenie dla środowiska naturalnego oraz zdrowia człowieka. Sytuacja komplikuje się w momencie wprowadzenia chociażby limitów emisyjnych dla danych substancji występujących w paliwie, których zawartość od tego momentu będzie można uznawać za parametr handlowy [111]. Jednymi z najbardziej szkodliwych substancji mogących przedostać się do atmosfery podczas spalania węgla kamiennego w gazach oraz pyłach są związki metali ciężkich takich jak: arsen, kadm, chrom, miedź, rtęć, nikiel, ołów lub cynk [29].

Pierwiastkiem bezpośrednio powodującym pogorszenie jakości węgla oraz dalsze problemy środowiskowe jest siarka – wpływająca niekorzystnie na właściwości produkowanego koksu, jak również powodująca korozję kotłów w zakładach energetycznych i ciepłowniczych. Zmniejszenie emisji siarki było przedmiotem licznych prac badawczych w energetyce i ciepłownictwie [77, 85]. Również na etapie produkcji węgla kamiennego

niektóre z zakładów górniczych zostały wyposażone w instalacje służące zmniejszeniu zawartości siarki w drodze przeróbki mechanicznej [106, 131].

Już kilka dekad temu zwrócono szczególną uwagę na zawartość związków rtęci (Hg) w węglu kamiennym z powodu jej wyjątkowo silnych toksycznych właściwości dla zdrowia człowieka oraz środowiska naturalnego [126]. Szkodliwość rtęci jest ściśle związana z jej charakterystyką fizykochemiczną, która została zaprezentowana w tabeli 1. [16].

Tabela 1. Rtęć – właściwości fizyko-chemiczne.

Pierwiastek	Metal	Liczba atomowa	Gęstość	Stan skupienia	Temperatura topnienia	Temperatura wrzenia
Rtęć		80	13,54 g/cm ³	ciecz	- 38,73°C	353°C

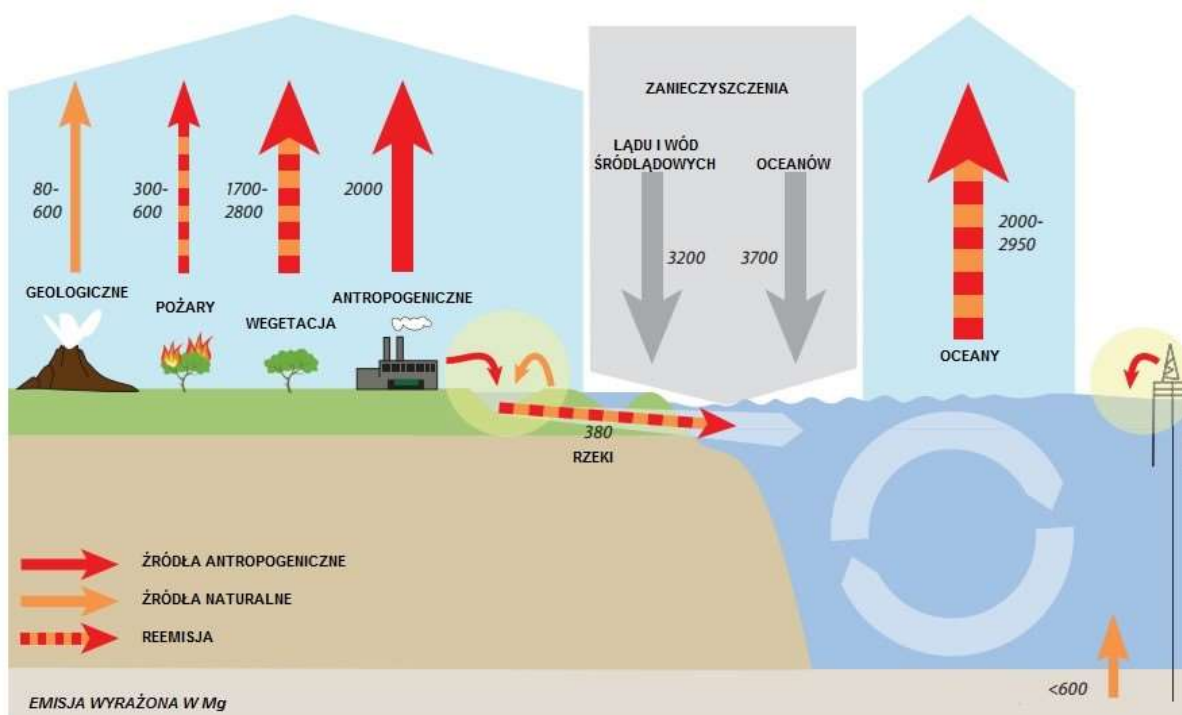
Źródło: opracowanie własne na podstawie [16].

Kluczową właściwością rtęci jest niska temperatura wrzenia wynosząca około 353°C, co powoduje jej praktycznie całkowitą emisję do atmosfery w przypadku obecności w spalonym paliwie [43]. Wtórne metody ograniczenia emisji rtęci w zakładach energetycznych mogą być kosztowne oraz wymagać zmian technologicznych oraz budowy nowych instalacji [4, 121]. Inne metale ciężkie nie cechują się tak niską temperaturą wrzenia przez co zazwyczaj nie będą tak łatwo trafiały do atmosfery w procesach spalania węgla [130]. Ich koncentracja występuje przede wszystkim w dennych popiołach paleniskowych.

W stosunku do innych zanieczyszczeń zawartość rtęci w węglu kamiennym jest nieznacząca – wynosi około 100 ppb. Masowe wykorzystanie węgla w światowej gospodarce powoduje jednak emisję jej znaczących ilości do atmosfery [36]. Uwolnione pary rtęci mogą zostać przeniesione nawet tysiące kilometrów dalej, czego dowodem jest obecność tego pierwiastka w lodowcach [60]. Wyniki analiz glaciologicznych wydają się potwierdzać zauważalne zwiększenie stężenia rtęci w atmosferze od czasów rewolucji przemysłowej, a więc początku masowego wykorzystania węgla przez człowieka. Istnieją teorie, które wiążą stwierdzoną zawartość rtęci ze wzrostem i spadkiem produkcji przemysłowej na przełomie kilkuset lat.

Opary rtęci negatywnie oddziałują na układ oddechowy, krwionośny, nerwowy oraz wykazują silne działanie teratogenne [105]. Najbardziej skrajnym przypadkiem szkodliwości rtęci była długotrwała seria zachorowań w japońskim mieście Minamata głównie w latach 1950-1970. Z powodu zrzutu ścieków zawierających metylortęć i dimetylortęć doszło do skażenia przybrzeżnych akwenów morskich, jak również znajdujących się w nich organizmów. Następnie na skutek spożywania dużej ilości ryb i owoców morza u mieszkańców pojawiły się objawy zatrucia rtęcią, które w konsekwencji doprowadziły do wielu zgonów [41]. Rysunek 2. prezentuje niebezpieczeństwo obiegu rtęci w przyrodzie oraz źródła jej emisji zarówno antropogeniczne, jak i naturalne.

Na przedstawionym rysunku można zauważyć, że źródła antropogeniczne znacząco zwiększają ilość rtęci znajdującej się w obiegu w środowisku. Dodatkową szkodliwą cechą jest zdolność rtęci do powrotu do atmosfery przez wegetację roślin oraz pożary. Ogólna ilość rtęci w środowisku stale zwiększa się z powodu uwolnienia rtęci zalegającej w skorupie ziemskiej [4]. Tło geochemiczne dla gleb w Polsce wynosi około 50 ppb dla rtęci, zaś wyższe wartości w środowisku lub minerałach będą oznaczały kumulację tego pierwiastka [91].



Rysunek 2. Obieg rtęci w przyrodzie.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [119].

Organizacja Narodów Zjednoczonych w ramach Programu Środowiskowego (UNEP) postanowiła wdrożyć światowy program redukcji emisji rtęci [119]. Po długich przygotowaniach oraz rozmowach na szczepku międzynarodowym we wrześniu 2014 podpisano Konwencję Minamata – nazwaną dla upamiętnienia wspomnianej wcześniej tragedii. Poprzez podpisanie aktu sygnatariusze, w tym Rzeczpospolita Polska zobligowali się między innymi do [118]:

- zaprzestania stosowania rtęci do pozyskiwania złota – przy czym ten problem nie dotyczy państw europejskich,
- zmniejszenia lub wyeliminowania rtęci z produktów takich jak: baterie, żarówki, świetlówki, kosmetyki, aparatura pomiarowa, termometry, amalgamaty dentystyczne oraz środki ochrony roślin,
- stopniowego wycofania się ze stosowania rtęci w przemyśle chemicznym oraz w innych gałęziach gospodarki,
- konsekwentnych działań na rzecz zaniechania celowego wydobycia rud rtęci oraz obrotu tym metalem na rynku,
- zabezpieczenia odpadów niebezpiecznych zawierających Hg,
- opracowania programu kontroli emisji rtęci w energetyce, ciepłownictwie, hutnictwie metali żelaznych i nieżelaznych, spalarniach odpadów oraz przemyśle cementowym w odniesieniu do lokalnych uwarunkowań.

Ogólną tendencją będzie najprawdopodobniej próba jak najdalej posuniętego wyeliminowania rtęci z gospodarki. Przykładem może być tutaj Norwegia, która już w 2008 roku zakazała stosowania Hg w przemyśle poza nielicznymi wyjątkami [22]. Polska przyczynia się do emisji rtęci głównie poprzez masowe wykorzystanie węgla kamiennego oraz brunatnego w gospodarce. Wielkość światowej emisji rtęci pochodzącej z różnych źródeł wskazano w Raporcie środowiskowym UNEP z 2013 roku. Wyniki prezentuje rysunek 3.



Rysunek 3. Ocena źródeł światowej emisji rtęci.

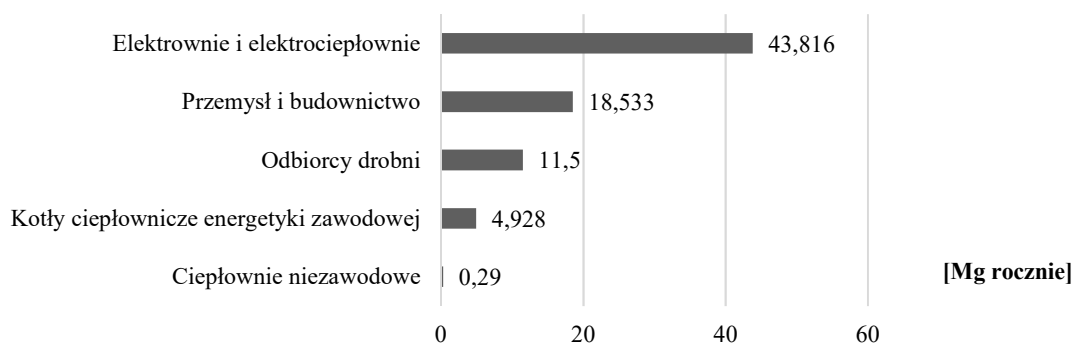
Źródło: opracowanie własne na podstawie [119].

Zdecydowanie najwięcej, bo aż około 37% emisji rtęci związana jest z górnictwem złota małej skali. Rtęć w tych zakładach jest stosowana do uzyskiwania złota z urobku w procesie amalgamacji, a następnie zostaje odparowana. Problem wynika ze stosowania prymitywnych technologii wzbogacania głównie w państwach Afryki Środkowej oraz Ameryki Południowej [24]. Na podstawie szacunków Programu Środowiskowego ONZ można stwierdzić, że gospodarcze wykorzystanie węgla kamiennego powoduje około 25-30% ogólnej emisji Hg do atmosfery oraz znaczną część przypisaną do hutnictwa oraz przemysłu cementowego. Ogólne zużycie węgla kamiennego w Polsce sięga około 79 mln Mg rocznie. W następnych latach będzie on najprawdopodobniej dalej spadać ze względu na malejącą rentowność polskiego górnictwa [55]. Należy jednak przypuszczać, że globalna produkcja wzrośnie ze względu na zapotrzebowanie energetyczne Indii oraz Chin [125].

Pomimo polityki Unii Europejskiej nastawionej na dekarbonizację gospodarki szybkie zastąpienie węgla innymi źródłami energii wydaje się być mało prawdopodobne. Nawet w przypadku likwidacji krajowego górnictwa węgla kamiennego problem emisji szkodliwych substancji ze spalania paliw stałych pozostanie aktualny.

Polska jest często zaliczana na arenie międzynarodowej do tzw. „dużych emitatorów rtęci” – krajów, w których jej emisja do powietrza przekracza 10 Mg w ciągu roku [135]. Na podstawie dostępnych oznaczeń zawartości rtęci w węglu kamiennym jej polską emisję można oszacować na 4,35 do 6,4 Mg, nie biorąc pod uwagę potencjału redukcji zanieczyszczeń [65]. Według założeń UNEP Polska powinna zostać zobligowana do szczególnych działań na rzecz zmniejszenia emisji rtęci do atmosfery ze względu na skalę oddziaływania na środowisko.

Polskę cechuje bardzo specyficzny rynek węgla kamiennego, którego elementem jest znaczący udział odbiorców tego paliwa na potrzeby ogrzewnictwa prywatnego [64]. Pomimo sporadycznego pojawiania się tego typu obserwacji – jest to jeden z kluczowych czynników determinujących rzeczywistą jakość polskiego węgla. Na rysunku 4. przedstawiono szczegółowy udział poszczególnych grup użytkowników węgla kamiennego w Polsce.



Rysunek 4. Zużycie węgla kamiennego w polskiej gospodarce w 2013 roku.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [38].

Najprawdopodobniej zużycie węgla kamiennego u odbiorców indywidualnych jest jeszcze większe ze względu na pośrednictwo w sprzedaży paliw w grupie „przemysł i budownictwo”. W Polsce wciąż 13,7 mln Mg węgla rocznie jest wykorzystywanych przez wymienioną grupę odbiorców, którzy w dużej mierze korzystają z paliw niskiej jakości (aż 3,5 mln Mg spalano przez nich paliwa stanowią miały węglowe) [38, 64]. Obecnie jedyną możliwą formą redukcji niskiej emisji jest poprawa jakości stosowanych paliw. Zwłaszcza w sąsiedztwie kopalń węgla kamiennego wciąż popularne jest spalanie paliw takich jak: miał, muł, czy flotokoncentrat. Spalanie tego typu paliw stanowi bezpośrednią uciążliwość dla otoczenia. Rzeczywista skala zjawiska jest trudna do oszacowania [3].

W Polsce eksploatację węgla kamiennego prowadzono w trzech zagłębiach:

- Górnośląskim,
- Dolnośląskim,
- Lubelskim.

Zagłębie Górnośląskie znajduje się na obszarze Polski oraz Republiki Czeskiej. Przemysłowe wydobycie węgla na tym obszarze rozpoczęło się pod koniec XVIII wieku. Obecnie jest to właściwie ostatni duży rejon przemysłowego wydobycia węgla kamiennego w Unii Europejskiej, w którym produkcja sięga około 70 mln Mg surowca rocznie (biorąc pod uwagę stronę czeską). W Zagłębiu Górnośląskim występują złoża węgla energetycznego oraz jedyne eksploatowane w Polsce węgla koksującego. Szacowane zasoby operatywne czynnych zakładów górniczych wynoszą około 3,2 mld Mg węgla kamiennego, co oznacza teoretyczną możliwość prowadzenia eksploatacji na obecnym poziomie przez niecałe 200 lat [92].

Pomimo wysokiej jakości węgla kamiennego w Zagłębiu Dolnośląskim pod koniec XX wieku podjęto decyzję o definitywnym zakończeniu wydobycia w tym regionie. Ostatnia kopalnia węgla kamiennego „Nowa Ruda” – pole „Słupiec” została zamknięta w 2000 roku [34]. W świetle problemu rtęci ciekawe wydają się badania wskazujące na wysoką zawartość pierwiastka w tamtejszych węglach sięgającą nawet 1 ppm. Tak wysokie zawartości rtęci

w węglu są prawdopodobnie związane z występowaniem intruzji cynobru (HgS) w złożach [13]. Szczegółowe badania dotyczące zawartości rtęci w dolnośląskich złożach węgla mogą okazać się kluczowe w odniesieniu do cyklicznie pojawiających informacji dot. budowy nowego zakładu górniczego w Nowej Rudzie lub Wałbrzychu [45].

Zagłębie Lubelskie jest obecnie jedynym rozwijającym się ośrodkiem wydobywania węgla kamiennego w Polsce. Badania nie potwierdzają szczególnie wysokich zawartości rtęci w węglach w tym obszarze. Spółka Lubelski Węgiel – Bogdanka słynie z dobrych wyników finansowych będących efektem sprzyjających warunków geologicznych oraz właściwego zarządzania przedsiębiorstwem. Należy podkreślić, że w zagłębiu występują węgle cechujące się wysokim zapopieleniem oraz zawartością siarki [81]. Niskie parametry jakościowe mogą stać się problemem w przypadku wprowadzenia w życie przepisów dot. podniesienia efektywności produkcji energii [89].

Mówiąc o rejonach eksploatacji węgla kamiennego w Polsce nie można pominąć problematyki złóż antropogenicznych – zwałowisk oraz osadników powstających w związku z działalnością górniczą. Ocenia się, że w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym zdeponowano ponad 120 mln Mg odpadów w osadnikach mułowych oraz 4 mld Mg na zwałowiskach [7, 73]. Zapożarowanie starych zwałowisk pozostaje przyczyną emisji znaczących ilości zanieczyszczeń, takich jak rtęć. Obecnie materiał ze złóż antropogenicznych jest wzbogacany w specjalnych zakładach przerobczych prowadzących odzysk surowców, których zdolności przetwórcze sięgają kilku mln Mg rocznie. Produkowane paliwa znajdują zastosowanie przede wszystkim w energetyce i ciepłownictwie [62].

Polska jest importerem węgla z krajów takich jak Rosja, Ukraina, Kazachstan, Republika Czeska, Stany Zjednoczone, Kazachstan i Kolumbia. Import węgla koksującego wynika często z braku odpowiedniej ilości produktów na rynku spełniających żądane parametry. W Polsce wiele gospodarstw domowych jest ogrzewanych kotłami przeznaczonymi do spalania sortymentów grubych lub średnich. Likwidacja wielu kopalń zwłaszcza w latach 90-tych doprowadziła do niedoborów na rynku krajowym w zakresie sortymentów grubych (inaczej niż w przypadku miałów energetycznych). W 2015 roku problem stanowił nadpodaż miałów przeznaczonych dla energetyki zawodowej [55]. Do Polski sprowadzane są również sortymenty przeznaczone dla palenisk retortowych z powodu konkurencyjnych cen. Import węgla energetycznych dla potrzeby produkcji energii oraz ogrzewnictwa komunalnego jest zjawiskiem stosunkowo nowym – wynikającym z niskiej konkurencyjności paliw krajowych [108]. Z powodu silnej karbonizacji gospodarki – problem rtęci jest niezaprzeczalnie istotną kwestią dla Polski, która będzie zobligowana do wprowadzenia krajowych programów na rzecz redukcji emisji tego pierwiastka. Jednym z kroków może być próba eliminacji problemu u źródła, a więc jeszcze na etapie produkcji węgla handlowego.

1.2. Współwystępowanie zanieczyszczeń w węglu kamiennym

Powszechnie uważa się, że rtęć w węglu kamiennym jest powiązana z siarczkami żelaza oraz innymi związkami siarki [111]. Najpowszechniejszymi formami występowania rtęci są: HgS (cynober), HgSO_4 oraz HgCl_2 [2, 26, 40]. Zazwyczaj najwięcej rtęci (około 70%) zawartej jest we frakcji mineralnej, jednakże nie jest to prawidłowość dla wszystkich badanych złóż. Istnieją także węgle, w których obecność rtęci związana jest z obecnością węglanów

i krzemianów [26, 132]. Obecność pierwiastków śladowych w węglu kamiennym ma związek z ich koncentracją w okresach wegetacji roślin węglotwórczych oraz rozkładu roślin w procesach biochemicznych i geochemicznych. Pod wpływem procesów geochemicznych następuje migracja związków z frakcji organicznej do mineralnej. Zjawisko to jest możliwe do zaobserwowania w pokładach o wyższym stopniu uwęglenia. Wraz ze wzrostem gęstości urobku obserwuje się wzrost zawartości rtęci, po czym następuje jej spadek przy wartości rzędu 2 kg/dm^3 [2, 122]. Wraz ze spadkiem wielkości ziarn węgla – zazwyczaj rośnie zawartość rtęci, co jest związane z charakterem jej występowania, głównie w postaci mikrointruzji. Największą zawartością rtęci cechują się przerosty. Standardowe metody wzbogacania węgla kamiennego nie dają możliwości pełnego oczyszczenia węgla kamiennego z rtęci ze względu na jej występowanie w lekkiej frakcji organicznej [80]. Wzbogacanie węgla kamiennego opiera się przede wszystkim na wykorzystaniu różnicy gęstości. Jeśli rtęć będzie skoncentrowana w glinokrzemianach oraz węglanach o gęstości $2600\text{--}2800 \text{ kg/dm}^3$ oraz w pirycie ($5000\text{--}5200 \text{ kg/dm}^3$), przerostach (gęstość zależy od typu węgla) – przeróbka mechaniczna będzie najprawdopodobniej skutecznym etapem redukcji emisji zanieczyszczeń [72]. Zawartość intruzji rtęci w pirycie może umożliwić przedostawanie się jej do koncentratu flotacyjnego w wypadku tej stosowania tej techniki wzbogacania. Prawdopodobnie najmniejszą zawartość rtęci w węglu kamiennym stwierdzono w Australii – 10 ppb dla węgla o znikomej zawartości siarki pirytovej 0,05% [71].

W wyniku przeprowadzonych badań wzbogalności węgla kamiennego w zakresie gęstości $1,4 \text{ kg/dm}^3$ do $2,0 \text{ kg/dm}^3$ w Republice Południowej Afryki stwierdzono, że istnieje wysoka korelacja pomiędzy zawartością popiołu oraz siarki pirytovej ($R^2 = 0,90$) oraz popiołu i rtęci ($R^2 = 0,88$). Koncentrację innych metali ciężkich takich jak nikiel, molibden, chrom można zaobserwować zwłaszcza we frakcjach lekkich. W przypadku badanego złoża Highveld kompleksowe badania densymetryczne dają podstawy do twierdzenia, że redukcja popiołu jest skutecznym sposobem obniżenia ładunku rtęci. Wysoką zawartość Hg zaobserwowano szczególnie w przerostach (średnio 270 ppb) oraz odpadach z robót przygotowawczych i udostępniających (średnio 474 ppb) [53, 54].

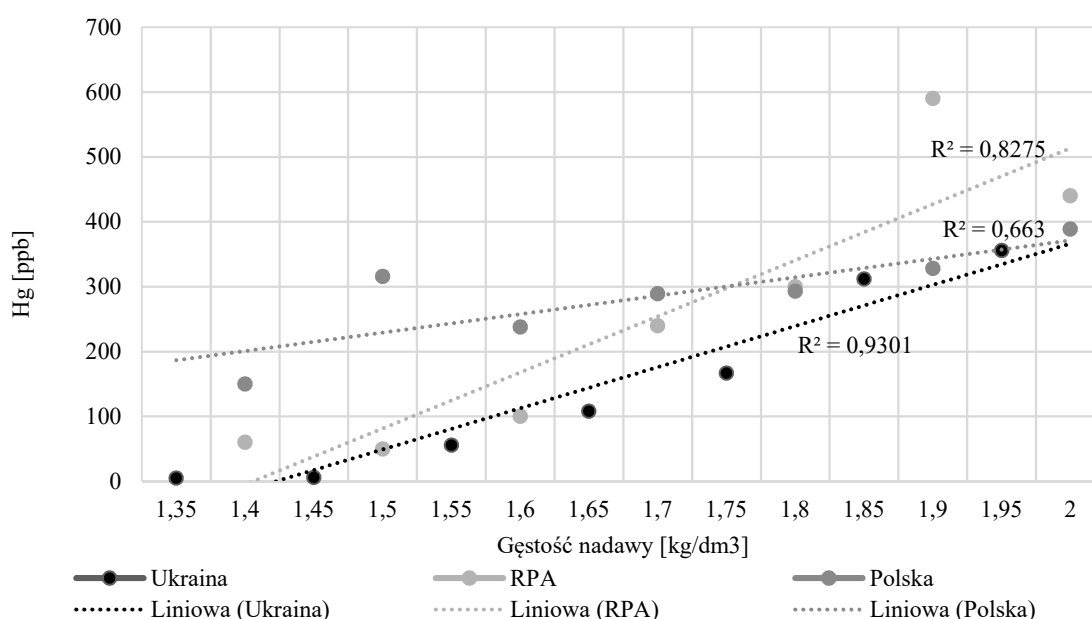
Amerykańskie badania przeprowadzone w kopalniach węgla kamiennego stanu Illinois dotyczyły problemu urabiania skały płonnej podczas eksploatacji pokładu. Próby bruzdowe przeprowadzone w wyrobiskach eksploatacyjnych 5 zakładów górniczych położonych w stanie Illinois (USA) wskazują na obecność rtęci także w skałach stropowych i spągowych, wynoszącą średnio 290 oraz 120 ppb. W przerostach stwierdzono średnią zawartość sięgającą 390 ppb, zaś w samym pokładzie węgla około 100 ppb [18]. Badania wykazały, że rtęć nie jest rozproszona równomiernie w górotworze.

Istnieje niewiele źródeł poruszających problematykę rtęci w kopalniach towarzyszących dla węgla kamiennego: badania zawartości w utworach karbońskich wskazały na jej wysoką zawartość chociażby w łupkach czarnych (od 31 do 340 ppb) [71]. W przypadku piaskowca oraz łupków stwierdzono jedynie śladowe ilości pierwiastka (do kilkunastu ppb). Należy pamiętać, że te skały są również wydobywane na powierzchnię i niejednokrotnie poddawane procesom przeróbczym wraz z węglem kamiennym. W przypadku Lubelskiego Zagłębia Węglowego zawartość rtęci w iłowcach – kopalniach towarzyszących wynosi średnio 180 ppb [13].

Próby znalezienia powiązania pomiędzy zawartością rtęci w pokładach a głębokością zalegania, stopniem uwęglenia oraz serią pokładów w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym nie przyniosły jednoznacznych rezultatów. Oznaczenia rtęci wyniosły od 30 do 300 ppb, natomiast różnice jej stężenia w jednej grupy pokładów sięgają kilku rzędów wielkości. Wydaje się, że prognozowanie zawartości rtęci w węglu surowym w odniesieniu do innych pokładów w ramach tej samej grupy nie jest możliwe [51].

Wyniki analizy przeprowadzonej przez Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze wchodzące w skład Jastrzębskiej Spółki Węglowej wykazały wzrost zawartości rtęci wraz z zapopieleniem. Stężenie rtęci wyniosło aż 150-200 ppb dla odpadu o zapopieleniu 60-80%. Niestety w badaniach nie określono jaką frakcję badano oraz z jakich pochodziła procesów [14].

Badania dotyczące zależności oraz współwystępowania rtęci oraz innych zanieczyszczeń należy traktować jedynie poglądowo. Wydaje się, że istnieje związek pomiędzy zawartością rtęci oraz siarki (zwłaszcza pirytowej). Najważniejszą obserwacją z punktu widzenia produkcji węgla kamiennego jest powszechne występowanie podwyższonej zawartości rtęci w ciężkich frakcjach densymetrycznych. Rysunek 5. pokazuje korelację pomiędzy zawartością rtęci a gęstością próbki dla różnych węgli kamiennych na podstawie badań w różnych krajach.



Rysunek 5. Współczynnik determinacji dla pomiaru rtęci w węglu kamiennym dla różnych frakcji densymetrycznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2, 54, 83].

W tym przypadku występująca korelacja umożliwia sterowanie zawartością rtęci w produktach handlowych w oparciu o grawitacyjne metody wzbogacania. W przypadku badań ukraińskich w Donbasie widoczny jest spadek zawartości rtęci w najcięższych frakcjach, powodujący zmniejszenie współczynnika korelacji. Pomimo istnienia badań wskazujących na występowanie korelacji pomiędzy popiołem, siarką a rtęcią wyniki analiz nie mają charakteru uniwersalnego [30]. Analiza form występowania rtęci powinna być wykonywana niezależnie dla każdego eksploatowanego pokładu. W literaturze można znaleźć przykłady badań, które nie

wykazały powiązania zawartości rtęci, siarki oraz popiołu. Ze względu na hydrofobiczne właściwości pirytu ma on tendencje do przechodzenia do koncentratu w procesie flotacji. W przypadku węgla kamiennego o wysokiej zawartości pirytu może być konieczne zastosowanie dodatkowych odczynników flotacyjnych dla uzyskania koncentratów o pożądanej zawartości związków rtęci [42, 47].

1.3. Badania rtęci w węglu kamiennym

Pierwsze doniesienia o występowaniu związków rtęci w węglu kamiennym pochodzą z pierwszej połowy XX wieku. W 1914 roku w Zagłębiu Ruhry wykazano obecność cynobru (HgS) w węglu kamiennym. W latach dwudziestych i trzydziestych XX wieku pojawiły się pierwsze szacunkowe dane dotyczące zawartości rtęci w węglu kamiennym, które przy ówczesnych technikach analitycznych wskazywały na stężenie około 0,01 ppm dla złóż Zagłębia Ruhry, Saary oraz Wielkiej Brytanii. Na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku w Donieckim Zagłębiu Węglowym wieku podczas badań składu sadzy w kominach ciepłowni także stwierdzono obecność tego pierwiastka [128]. W tamtym okresie zawartość rtęci w węglu kamiennym nie wzbudzała szczególnej uwagi ze względu na śladowy charakter, a przez to brak wpływu na jakość paliw. Pozyskiwanie gospodarcze rtęci odbywało się przez eksploatację złóż jej rud.

W doniesieniach medialnych oraz pracach naukowych, zwłaszcza po tragicznych zdarzeniach takich jak masowe zatrucia w Japonii zaczęto zwracać coraz większą uwagę na problem zanieczyszczenia środowiska związkami rtęci [115]. Na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych w Stanach Zjednoczonych przeprowadzono kompleksowe badania dotyczące form występowania rtęci w węglu kamiennym, które wskazały na jej współwystępowanie z pirytem. Znacznie mniej rtęci występowało w postaci siarczanów, a śladowe ilości w postaci elementarnej. Ówczesne badania pozwoliły na wyciągnięcie ważnego wniosku: *redukcja rtęci w węglu kamiennym metodami przeróbki mechanicznej opartej na różnicy gęstości minerałów jest ograniczona do usunięcia związków znajdujących się we frakcjach ciężkich* [33].

Prekursorami wprowadzenia regulacji w zakresie emisji rtęci były Stany Zjednoczone oraz Kanada. Amerykańska ustawa Clean Air Act Amendment z 1990 roku jako pierwsza wskazała na konieczność modernizacji zakładów energetycznych dla redukcji emisji związków takich jak rtęć. Prace w USA zostały rozpoczęte od stworzenia ogólnokrajowej bazy jakości węgla surowych. Po analizie ponad 7000 próbek oszacowano, że średnia zawartość rtęci wynosi około 200 ppb, choć zdarzają się przypadki, gdy w pokładzie węgla znajduje się ponad 1 ppm rtęci. Przeciętną zdolność przeróbki węgla w zakresie obniżenia zawartości rtęci określono na około 37% [111]. Wprowadzona w 2011 roku ustawa Mercury and Air Toxics Standards (MATS) określiła limity emisyjne dla instalacji energetycznych o mocy powyżej 25 MW. Za punkt odniesienia uznano 12% instalacji o najmniejszej względnej emisji, zaś czas dostosowania pozostałych instalacji do tego poziomu określono na 3 do 5 lat w zależności od decyzji władz stanowych. Emisję oblicza się w przeliczeniu na wytworzoną energię elektryczną [74]. Dostosowanie zakładów energetycznych do nowych standardów wymaga zastosowania najlepszych dostępnych technologii w zakresie ograniczenia emisji (Best Available

Technology). Na skutek polityki federalnej dotyczącej ochrony powietrza rtęć stała się jednym z parametrów handlowych dla węgla kamiennego.

Oznaczenia rtęci w próbkach są skomplikowane ze względu na jej niską zawartość, lotność oraz zdolność do osiadania na ściankach naczyń laboratoryjnych. Polskie normy określają sposób oznaczania zawartości rtęci w wodzie, ściekach, powietrzu atmosferycznym oraz w węglach. Po pobraniu próbki zgodnie z zaleceniami norm następuje etap oznaczenia rtęci metodami analitycznymi. Obecnie najdokładniejsza metoda tzw. zimnych par (CVAAS): próbka jest spalana w piecu, natomiast spaliny przepuszczane są przez sorbent ze złota, na którym następuje chemisorpcja oraz zatężenie rtęci, następnie podgrzewa się powstały amalgamat, rtęć jest uwalniana oraz oznaczana metodą absorpcji atomowej [79, 124].

W Polsce obowiązek pomiaru emisji rtęci w elektrowniach opartych na węglu brunatnym oraz kamiennym pojawił się 1 stycznia 2016 roku [82]. Jak na razie pomiary będą dotyczyć instalacji o mocy przekraczającej 50 MW, a zebrane dane zapewne posłużą w przyszłości do opracowania nowych krajowych programów ochrony powietrza. Poza badaniami emisji prowadzone są także pomiary parametrów handlowych węgla kamiennego wraz z oznaczeniem zawartości rtęci. Jednym z projektów jest „Opracowanie bazy danych zawartości rtęci w krajowych węglach, wytycznych technologicznych jej dalszej redukcji wraz ze zdefiniowaniem benchmarków dla krajowych wskaźników emisji rtęci – Baza Hg” realizowany przez Główny Instytut Górnictwa w latach 2013-2016.

W ostatnich latach pojawiło się więcej informacji dotyczących zawartości rtęci w złożach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Pomiary zostały prowadzone także w Lubelskim Zagłębiu Węglowym oraz w niewielkim Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym (niewielka liczba oznaczeń). Wyniki pochodzą głównie z badań przeprowadzanych na zlecenie producentów węgla kamiennego. Najczęstszą formą prezentacji danych dot. zawartości rtęci w węglu kamiennym jest jej stężenie podawane w ppb (część miliardowa). Stosuje się także inne standardy przedstawienia wyników jej zawartości dla poszczególnych węgli w odniesieniu do wartości opałowej lub popiołu [31, 95]. Warto zaznaczyć, że popularną jednostką w Stanach Zjednoczonych jest forma odnosząca się do energii (lb Hg/10¹² Btu – funt na bilion brytyjskich jednostek ciepła) [112]. Tabela 2. zawiera skrótowy opis serii badań dotyczących zawartości rtęci w węglu surowym oraz produktach węgla kamiennego pochodzących z Polski. Większość z nich dotyczyła badań węgla surowego bez odniesienia do późniejszych parametrów produktów na rynku. Poza oznaczeniami rtęci w węglu handlowym w Polsce oraz w innych krajach prowadzi się badania jej zawartości na składowiskach odpadów pogórnich, które wskazują na jej zawartość w odpadach procesów wydobywania oraz przeróbki węgla kamiennego [50]. Tematyka ta stanowi osobny problem, jednakże pośrednio wskazuje na możliwości usunięcia rtęci poprzez standardowe technologie przeróbki mechanicznej.

Prace naukowe dotyczące występowania rtęci w polskich węglach kamiennych bardzo często nie zawierają informacji wskazujących, czy mowa jest o próbach pokładowych, urobku, nadawie zakładu przerobczego, koncentratów lub produktach handlowych [101]. Fakt ten uniemożliwia zastosowanie części wyników do szczegółowej analizy poza ogólną oceną występowania problemu rtęci w węglu kamiennym. Dla potrzeb oceny emisji rtęci w Polsce najczęściej przyjmuje się wartości około 100 ppb, co jest faktycznie często spotykaną wartością. Do wyników zawartości rtęci w danych pokładach węgla kamiennego należy

podchodzić z rezerwą ze względu na ich dużą zmienność nawet w przypadku jednego zakładu górniczego [32].

Tabela 2. Inwentaryzacja danych o zawartości rtęci w węglu kamiennym.

Lp.	Średnia zawartość Hg [ppb]	Zakres danych min. – maks.	Charakterystyka	Uwagi
1	350	Wariancja 154%	Liczba próbek – 10	Brak informacji czy średnie są średnimi ważonymi
2	399 105 60	- 81-997 [ppb] 1-750 [ppb]	zagłębie dolnośląskie – 7 próbek węgla zagłębie lubelskie – 29 próbek węgla zagłębie górnośląskie – 114 próbek węgla	Brak informacji czy średnie są średnimi ważonymi
3	141	62-302 [ppb]	620 oznaczeń	Brak informacji czy średnie są średnimi ważonymi
4	80	12-230[ppb]	62 wyniki dla różnych węgli	Badania węgla handlowego energetycznego
5	Brak obliczeń	130-340 [ppb]	Próbki z 5 zakładów górniczych	Badania węgla surowego
6	100	50-150 [ppb]	Wyniki dla ponad 800 próbek	Badania węgla handlowego energetycznego
7	80-110	Wartości dla 95% próbek	Wyniki dla ponad 300 próbek	Badania węgla surowego nieomal wszystkich polskich zakładów górniczych
8	108	33-224 [ppb]	Wyniki dla 48 próbek	Badania 6 zakładów górniczych Jastrzębskiej Spółki Węglowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13, 36, 49, 76, 80, 124].

Nawet w obrębie pokładów jednej serii geologicznej obserwuje się znaczące zróżnicowanie zawartości tego pierwiastka. Wyniki badań (lp. 1 Tabela 2.) dotyczyły węgla eksportowanego z Polski do zakładów energetycznych w krajach Europy Zachodniej. Pomimo braku potwierdzenia tezy o szczególnie wysokiej zawartości rtęci przez krajowych badaczy – polski węgiel uchodzi za silnie zanieczyszczony jej związkami [71]. Tabela 3. zawiera podobne zestawienie odnoszące się do światowych producentów węgla kamiennego. Należy jednak pamiętać, że porównywane dane odnoszą się do węgli różnych typów, cechujących się odmiennym ich stopniu wzbogacenia.

Nie można jednoznacznie stwierdzić, że dany kraj posiada złoża węgla kamiennego o szczególnie wysokiej lub niskiej zawartości rtęci. W dużych państwach takich jak Chiny lub Stany Zjednoczone różnice pomiędzy zawartością rtęci w węglach z różnych zagłębi węglowych wahają się o rzędy wielkości. Zazwyczaj wyniki mieszczą się w granicach 50-300 ppb. W przypadku zawartości powyżej 1 ppm analizy wskazują za przyczynę najczęściej intruzje cynobru w złożach węgla [128]. Nie stwierdzono silnego związku pomiędzy stopniem uwęglenia pokładu a zawartością w nim rtęci.

Na podstawie badań można wyciągnąć wniosek, że przeróbka mechaniczna znacząco wpływa na zmniejszenie ładunku rtęci, co jest widoczne u krajów – eksporterów węgla takich jak RPA oraz Australia. Węgiel surowy stosowany w lokalnej gospodarce w obu przypadkach zawiera znacznie większe wartości Hg niż płukany. Badania węgla surowego dotyczą często

różnych pokładów, przez co nawet próbki pobrane w tym samym zakładzie górniczym mogą być innym surowcem. W przypadku prowadzenia wzbogacania węgla w danym zakładzie górniczym nie można jednoznacznie prognozować zawartości rtęci w produktach handlowych na podstawie badań węgla surowego.

Tabela 3. Światowe badania dotyczące zawartości w węglu kamiennym – wybrane przykłady.

Kraj	Zawartość średnia lub wartość min. i maks. [ppb]	Uwagi
USA	210 (10-3300)	Duże różnice pomiędzy zawartością rtęci w węglach w danych zagłębiach węglowych
Rosja	115 (maks. 250)	Badania węgla surowego
Ukraina	20-300 (1200-2500)	– korelacja z siarką pirytową 0,64 – wysokie wartości dla węgla jako kopaliny towarzyszącej dla złóż cynobru
RPA	150 ppb (40-270 ppb)	Badania surowego węgla kamiennego
	63 ppb	Węgiel eksportowy w pełni płukany
	295 ppb	Węgiel niewzbogacany kierowany do elektrowni
Australia	215 ppb (30-400 ppb)	UNEP 2011
	50 ppb	Węgiel surowy stosowany w energetyce
	20 ppb (10-80 ppb)	Węgiel eksportowy w pełni płukany
Chiny	147 ppb (9-1134)	Badania węgla kamiennego
Brazylia	190 ppb (40-670)	Węgiel surowy
Indie	90 ppb	Zagłębie Sohagpur – węgiel surowy
Czechy	43 ppb (30-90)	Węgiel handlowy (KWK „Darkov” oraz „ČSM”)
Norwegia	100 ppb	Węgiel handlowy – Svalbard

Źródło: opracowanie własne na podstawie [15, 25, 39, 54, 76, 84, 111, 116, 117, 128].

1.4. Technologie i metody prowadzenia ruchu zakładu górniczego dla ograniczania zanieczyszczeń w węglu surowym

Powszechnie uważa się, że przeróbka węgla kamiennego stanowi pierwszy etap produkcji, która umożliwia oczyszczanie surowca [93]. Potencjał obniżenia zawartości szkodliwych substancji istnieje jednak już na etapie eksploatacji złóż. W okresie Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej uznano, że spalanie węgla surowego w energetyce jest bardziej korzystne, nie bacząc na problem emisji zanieczyszczeń oraz powstania ogromnych ilości popiołów. Dopiero przepisy ochrony środowiska wprowadzone po 1990 roku wymusiły konieczność redukcji emisji tlenków siarki oraz lotnego popiołu. Skutki braku rzeczywistej analizy ekonomicznej polityki energetycznej są odczuwalne do dzisiaj [12]. Polskie kopalnie węgla kamiennego pod względem infrastruktury wzbogacania węgla kamiennego niejednokrotnie wyraźnie odstają od rozwiązań stosowanych wśród czołowych eksporterów tego surowca.

Zapobieganie emisji zanieczyszczeń poprzez ograniczenie zawartości szkodliwych związków chemicznych w paliwie jest pierwszym etapem czystych technologii węglowych. Koncepcja ta wywodzi się jeszcze z lat 60-tych ze Stanów Zjednoczonych, gdzie prawdopodobnie najwcześniej zauważono potencjał minimalizacji emisji w ramach całej gospodarki płynącej z koordynacji działań na różnych etapach produkcji [12]. Ograniczenie

zawartości zanieczyszczeń w węglu handlowym jest możliwe poprzez wdrożenie jednej z kilku koncepcji scharakteryzowanych poniżej.

Fuel-switching

Pojęcie fuel-switching odnosi się do zastępowania paliw innymi źródłami energii lub też takimi, które cechują się mniejszym zanieczyszczeniem. Wybór paliwa o mniejszym ładunku zanieczyszczeń może mieć podłoże administracyjne np. poprzez wprowadzenie zakazu stosowania paliw o danej zawartości szkodliwych substancji, jak również rynkowe – produkcja energii jest ekonomicznie nieopłacalna poprzez niską efektywność [46].

Zakres „przełączania paliw” dotyczy skali makro – np. zmiany polityki energetycznej kraju poprzez stopniowe wygaszanie energetyki konwencjonalnej na rzecz alternatywnej lub mikro – np. zaprzestania eksploatacji pokładu węgla o wysokiej zawartości siarki lub rtęci. Jednym z przykładów jest wygaszanie wydobywania w regionie Zatoki Meksykańskiej oraz Apalachów w Stanach Zjednoczonych na rzecz złóż o niższym ładunku rtęci w przeliczeniu na wartość opałową występujących w innych częściach kraju [110]. Pomimo niskiej wartości opałowej wynoszącej około 19 MJ/kg – niska zawartość siarki oraz metali ciężkich była powodem rozpoczęcia eksploatacji złóż Zagłębia Powder River w stanie Wyoming.

Koncepcja ta nie znalazła w Polsce bezpośredniego zastosowania, jednakże można uznać, że decyzje o braku podjęcia eksploatacji niektórych złóż podyktowane były wysokim zasiarczeniem oraz zapopieleniem węgla w pokładach [75]. Odtworzenie wielkości produkcji węgla kamiennego po zamknięciu danego zakładu górniczego nie jest obecnie uzasadnione ze względu na wątpliwą rentowność przedsięwzięcia. Program rządowy „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku” w zakresie produkcji energii z węgla wskazuje na konieczność racjonalnego i efektywnego gospodarowania złożami znajdującymi się na jej terenie. Założenia „Polityki...” odnośnie zapewnienia stałego bezpieczeństwa energetycznego opartego na udostępnionych złożach węgla kamiennego nie wydaje się być w pełni zgodne z koncepcją fuel-switching. Wątpliwości budzi chociażby pogodzenie idei zaprzestania eksploatacji w złożach cechujących się wysokim poziomem zanieczyszczeniem w stosunku do prowadzenia racjonalnej gospodarki.

W przypadku Polski należy więc szukać innych możliwości zapobiegania przedostawania się szkodliwych substancji do atmosfery niż odnawianie mocy produkcyjnych w innych zakładach górniczych. Koncepcja fuel-switching przy ograniczonych zasobach geologicznych oraz niskiej stopie zwrotu inwestycji nie wydaje się być optymalnym rozwiązaniem.

Czyste wybieranie złoża oraz zachowanie czystości nadawy

Problematyka obniżenia jakości urobku równoległe do wzrostu poziomu mechanizacji i automatyzacji była już poruszana w latach 50-tych XX wieku. Ze względu na dominację ścianowych systemów eksploatacji – oczyszczanie węgla z przerostów oraz skały płonnej poprzez oddzielne urabianie lub roboty strzałowe stawało się coraz trudniejsze w stosowaniu [6]. Obecnie za priorytet uznaje się przede wszystkim postęp przodka eksploatacyjnego, nie zaś selektywne wybieranie pokładu z pominięciem zanieczyszczeń. Stosowanie ręcznego wzbogacania w przodkach eksploatacyjnych dla zmniejszenia ilości odpadów w odstawie jest

zbyt pracochłonne i kłopotliwe. W literaturze sporadycznie pojawiają się idee podziemnych instalacji odkamieniania urobku, które jednak nie wyszły poza stadium koncepcji oraz projektowania. Efektem zastosowania tego typu rozwiązania byłoby zmniejszenie obciążenia węzłów wzbogacania na powierzchni kopalni oraz zmniejszenie masy skały płonnej wydobywanej na powierzchnię. Praktyczny brak możliwości podziemnego zagospodarowania odpadów gruboziarnistych skutecznie ogranicza racjonalność budowy podziemnych zakładów wzbogacania [86]. Zastosowanie podsadzki suchej na bazie odpadów gruboziarnistych na szeroką skalę zostało w polskim górnictwie zarzucone przed kilkoma dekadami [88].

Z punktu widzenia utrzymania czystości nadawy niezwykle ważną kwestią jest dobór maszyn i urządzeń kompleksów ścianowych. Stosowanie kombajnów ścianowych dostosowanych do urabiania pokładów o wyższej miąższości powoduje nieuzasadnione urabianie stropu i spągu. Odstawa potencjalnego odpadu powoduje także niepotrzebne zwiększenie kosztów przeróbki mechanicznej oraz zużycia maszyn i urządzeń. W sytuacji, gdy zakład górniczy nie dysponuje węzłami wzbogacania nadawy o danym uziarnieniu, skała płonna trafia do produktu handlowego obniżając jego wartość. Najprawdopodobniej do produktu dostaje się także dodatkowy ładunek siarki i rtęci [61].

Planowanie jakości urobku może być szczególnie istotnym elementem w przypadku produkcji mialów surowych. Istnieje możliwość prowadzenia jednoczesnej eksploatacji ścian o różnych parametrach węgla dla jego końcowego uśrednienia. W tym przypadku należy brać pod uwagę stopień jego zanieczyszczenia nie tylko w samym pokładzie, ale również w odstawie urobku [35].

Trafiające do produktu przerosty, skały stropowe oraz spągowe zawierają pewne ilości zanieczyszczeń powodujących pogorszenie jakości węgla handlowego. Pomimo stosowania metod wzbogacania, w Stanach Zjednoczonych skuteczność przemysłowego oczyszczania (obniżenia zapopielenia) urobku ocenia się na około 60-70% przy pełnym zakresie wzbogacania. W przypadku ograniczonego zakresu wartość będzie odpowiednio spadać. Jako źródła zanieczyszczenia urobku wskazywane są [18]:

- celowe lub przypadkowe urabianie stropu i spągu,
- zawały słabego stropu podczas urabiania pokładu,
- inne odpady skalne trafiające do odstawy.

Problematyka wtórnego zanieczyszczenia urobku była podejmowana przez badaczy, którzy starali się określić czynniki wpływające na zmniejszenie udziału węgla w urobku. W tabeli 4. przedstawiono kompleksową analizę źródeł oraz czynników, które mogą powodować wzrost obecności skały płonnej w urobku w ścianowym systemie eksploatacji.

W Polsce zdecydowana część wydobytego urobku pochodzi ze ścianowych systemów wybierania, przez co problematyka jest aktualna także w naszych warunkach [98]. Z analizy źródeł pochodzenia zanieczyszczeń wynika, że zależą one głównie od uwarunkowań geologiczno-górnictwowych. Istotnym czynnikiem jest jednak właściwe udostępnienie złoża oraz stosowanie kompleksów ścianowych odpowiednich dla danych warunków. Autorzy zwrócili uwagę również na występowanie zanieczyszczeń pochodzących z porządkowania wyrobiska. Zalicza się do nich także zużyte elementy oraz materiały wrzucone na przenośnik odstawy. W przypadku ostatniej grupy istnieje możliwość znaczącej redukcji zanieczyszczenia urobku

poprzez unikanie mieszania ich z wydobytym węglem. Na podstawie źródeł trudno jest jednak precyzyjnie określić wpływ wtórnego zanieczyszczenia na jakość produktu finalnego.

Tabela 4. Źródła oraz czynniki powodujące zanieczyszczenie urobku w ścianowym systemie eksploatacji.

Źródło zanieczyszczeń	Bezpośrednie zanieczyszczenia	Urabianie stropu i spągu	Warunki stropowe	Pofałdowanie górotworu		
				Natężenie oraz kierunek spękania skał		
				Rodzaj skał		
				Wytrzymałość skał		
				Warunki hydrogeologiczne		
			Obecność przerostów			
			Pofałdowanie górotworu			
			Miąższość pokładu			
	Wtórne zanieczyszczenia	Opad stropu	Warunki stropowe	Deformacje nieciągłe		
				Wytrzymałość skał		
				Rodzaj skał		
				Warunki hydrogeologiczne		
				Pofałdowanie górotworu		
			Natężenie oraz kierunek spękania skał			
			Głębokość zalegania			
			Rozpiętość odsłoniętego stropu	Głębokość zabioru		
				Długość maszyny urabiającej		
			Nachylenie pokładu			
			Roboty górnicze			
			Ciśnienie górotworu			
			Pozostałe zanieczyszczenia	Odstawa odpadów	Zarządzanie	
					Szkolenie załogi	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [18].

1.5. Infrastruktura i potencjał polskich zakładów górniczych w zakresie redukcji ładunku zanieczyszczeń w węglu handlowym

Przeróbka mechaniczna węgla kamiennego to zbiór operacji mających na celu uzyskanie jak największej ilości substancji użytecznej z wydobytego urobku i przystosowanie jej do pełnego wykorzystania lub przeprowadzenia dalszych procesów technologicznych. W powszechnej opinii w branży górniczej oraz energetycznej przeróbka węgla nie jest traktowana jako zespół środków umożliwiających zmniejszenie ładunku zanieczyszczeń powietrza [12]. Do zakresu przeróbki mechanicznej węgla kamiennego zalicza się podstawowe grupy operacji opisane w tabeli 5.

Zakres oraz parametry ww. operacji zależą od infrastruktury danego zakładu górniczego, wymagań odbiorców oraz obowiązujących praktyk. Procesy mają za zadanie zapewnić produkcję węgla kamiennego o właściwym zapopieleniu, wilgoci, wartości opałowej oraz między innymi zasiarczeniu. Usunięcie nadmiaru wilgoci jest koniecznością zakładu ze względu na powszechne prowadzenie wzbogacania w ośrodkach wodnych. Podejście do kwestii wzbogacania węgla kamiennego jest zróżnicowane wśród krajów - producentów oraz poszczególnych grup kapitałowych branży górniczej. Tabela 6. zawiera syntetyczną charakterystykę polityki surowcowo-energetycznej wobec przeróbki węgla kamiennego na świecie. Należy mieć na uwadze, że poziom technologiczny poszczególnych zakładów górniczych np. w Chinach i Indiach może być skrajnie zróżnicowany.

Tabela 5. Podstawowe operacje przeróbki mechanicznej węgla.

Operacja	Cel
Klasyfikacja	Sortowanie – rozdzielanie nadawy na sortymenty przeznaczone do oddzielnej sprzedaży Klasyfikacja – rozdzielanie nadawy na klasy ziarnowe przeznaczone do dalszych operacji przeróbczych
Wzbogacanie	Usuwanie ziarn skały płonnej w celu zwiększenia udziału minerału użytecznego
Rozdrabnianie	Zmniejszenie wielkości ziarn minerału surowego lub produktów wzbogacania do pożądanego rozmiarów
Odwadnianie i suszenie	Mechaniczne lub termiczne oddzielanie wody od produktów pochodzących z operacji przeprowadzanych w ośrodku wodnym
Odpylanie i odmulanie	Usuwanie najdrobniejszych ziarn, których obecność w nadanie utrudniałaby przebieg dalszych operacji przeróbczych
Mieszanie	Uśrednianie parametrów węgla poprzez łączenie produktów z różnych pokładów, zakładów górniczych lub frakcji nadawy

Zródło: opracowanie własne na podstawie [44].

Tabela 6. Przeróbka węgla kamiennego na świecie.

Kraj	Charakterystyka	Uwagi
Australia	– pełny zakres wzbogacania węgla koksującego oraz przeznaczanego na eksport (100%)	Największy eksporter węgla kamiennego na świecie
Chiny	– pełny zakres wzbogacania węgla koksującego – niewielki procent wzbogacania węgla energetycznego (plan 20% w 2020 roku)	Największy użytkownik i importer węgla kamiennego na świecie
USA	– duży potencjał technologiczny wzbogacania węgla kamiennego (90%) – wzbogacanie dostosowanie do potrzeb rynkowych – brak wzbogacania w przypadku niektórych węgli o niskiej kaloryczności	Redukcja rąci – jeden z celów wzbogacania węgla
Rosja	– praktycznie pełny zakres wzbogacania węgla koksującego – węgiel surowy energetyczny wzbogacany w niewielkim stopniu, głównie dla potrzeb odbiorców prywatnych	Największy eksporter węgla kamiennego do Polski
RPA	– pełny zakres wzbogacania węgla eksportowych – częste wykorzystanie sortymentów grubych i średnich do produkcji paliw syntetycznych	Duży eksporter węgla kamiennego, jedyne państwo przemysłowo prowadzące produkcję benzyny syntetycznej metodą Fischera-Tropscha
Indie	– wzbogacanie dotyczy głównie węgli koksujących – skrajnie zróżnicowany poziom technologiczny zakładów górniczych	Najszybciej rozwijający się rynek energetyki oraz koksownictwa na świecie
Polska	– pełny zakres wzbogacania węgla koksującego – wzbogacanie węgla energetycznego dla użytku przemysłowego w ograniczonym zakresie – pełne wzbogacanie sortymentów handlowych powyżej 20 mm	Bardzo skomplikowany wewnętrzny rynek paliw; wzbogacanie ograniczone do węgla koksującego oraz do sortymentów przeznaczonych dla użytkowników indywidualnych
Czechy	– pełny zakres wzbogacania węgla koksującego – wzbogacanie węgla także na potrzeby energetyki	Funkcjonują 3 ostatnie zakłady górnicze

Zródło: opracowanie własne na podstawie [37, 109, 117].

Można zaobserwować zależność, że procesy te są szczególnie dobrze rozbudowane u eksporterów paliw oraz w krajach, w których istnieją rygorystyczne normy emisji zanieczyszczeń.

Różnice w podejściu do przeróbki węgla kamiennego są wynikiem uwarunkowań takich jak [46]:

- specyfika wymagań odbiorców na rynku np. powszechne stosowanie węgla kamiennego w gospodarstwach domowych, produkcja węglowodorów syntetycznych na masową skalę,
- ogólny poziom rozwoju technologicznego danego kraju,

- spełnienie wymagań dot. paliw na rynkach światowych – np. standard 6000 kcal/kg, którego spełnienie wymusza wzbogacanie węgla kamiennego,
- konieczność redukcji zanieczyszczeń np. rtęci w Stanach Zjednoczonych dla spełnienia standardów emisyjnych.

Jeden ze stosowanych w Polsce podział zakładów przeróbki mechanicznej węgla opiera się na potencjalnym zakresie wzbogacania [29]. Faktyczny udział produktów wzbogaconych będzie zależy od wydajności poszczególnych węzłów, decyzji w zakresie produkcji, jakości nadawy oraz stanów awaryjnych. Poszczególne zakłady w ramach jednego modelu mogą znacząco się różnić ze względu na stosowane maszyny, urządzenia oraz parametry pracy. Tabela 7. zawiera podział zakładów przeróbki mechanicznej na 4 modele technologiczne, które charakteryzują się danym potencjałem wzbogacania klas ziarnowych.

Tabela 7. Czynne zakłady przeróbki kopaliń węgla w 2014 roku.

Typ węgla	Model zakładu	Potencjał wzbogacania klas ziarnowych [mm]	Stosowane wzbogacalniki	Liczba zakładów przeróbki danego modelu w spółkach węglowych w 2013 roku								Udział w sprzedaży [%]
				KW	JSW	KHW	Tauron	LWB	EPH	Siltech	Eko Plus	
Energetyczny	brak (ręczne odkamienianie)									1	1	0,4
	PME1	+20	Separatory cieczy ciężkiej, osadzarki ziarnowe	4		5			1			22,7
	PME2	+0,5 (0,1)	Separatory cieczy ciężkiej, osadzarki ziarnowe i miałowe, hydrocyklony, spirale	8		1	2	1				38,2
	PME3	Pełny zakres wzbogacania	Separatory cieczy ciężkiej, osadzarki ziarnowe	6		1						20,5
Koksujący	PMK1	Pełny zakres wzbogacania	ziarnowe i miałowe, hydrocyklony, spirale, flotowniki		6							18,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie [37, 66, 68, 90].

Zakłady PME 1 mają niewielkie możliwości ograniczenia ładunku zanieczyszczeń w produktach handlowych ze względu na brak technicznych możliwości wzbogacania węgla poniżej 20 (10) mm. Zakłady tego typu powstawały także w latach 70-tych np. KWK „Piast” ze względu na decyzje o wykorzystaniu miałów surowych na potrzeby energetyki [37].

Model PME 2 to najczęściej spotykany typ zakładu przeróbki mechanicznej węgla w Polsce. Nie wykonuje się w nich wzbogacania najdrobniejszych ziarn poniżej 0,1 (0,5) mm, w których zawartość rtęci może być stosunkowo najwyższa [103]. Model ten występuje w wielu krajach, jednakże bardzo często produkt niewzbogacony jest uśredniany płukanym węglem grubym i średnim.

Wymagania odbiorców polskiego węgla koksującego zmuszają producentów do jego pełnego wzbogacania. Obecnie wszystkie zakłady górnicze wydobywające węgiel koksujący

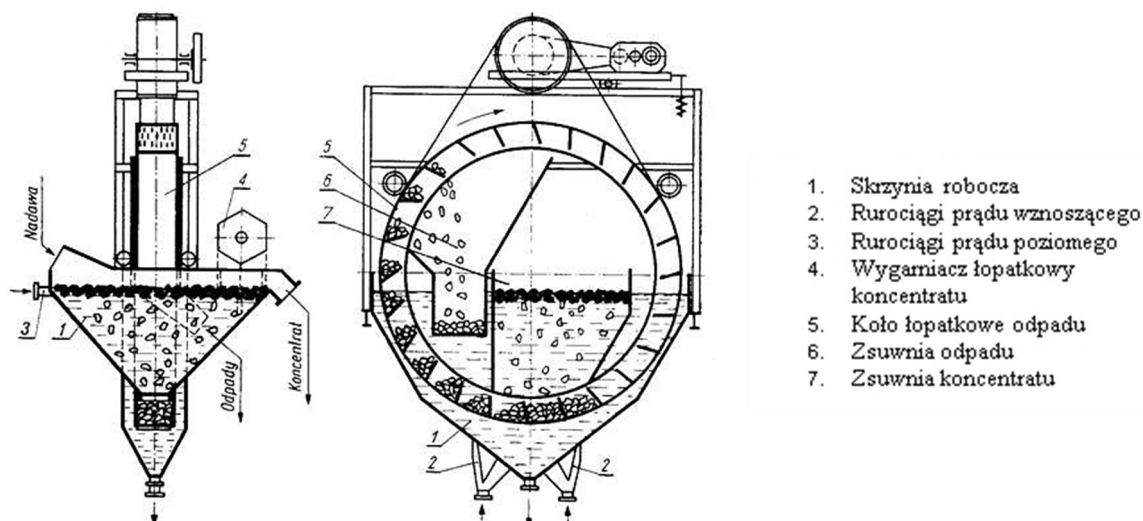
posiadają infrastrukturę do oczyszczania pełnego zakresu uziarnienia nadawy. Należy podkreślić, że wzbogacanie węgla koksującego nie było nigdy motywowane kwestiami środowiskowymi. Najpełniejszy model produkcji węgla uwzględniający redukcję wybranych zanieczyszczeń może być przeprowadzony w zakładach wydobywających i wzbogacających węgiel tego zastosowania. Pomimo istnienia kalkulacji świadczących o uzasadnieniu ekonomicznym flotacji mułów węgla energetycznych – zakłady wzbogacania w Polsce nie są rozbudowywane w tym kierunku [100].

Redukcja zanieczyszczeń w procesach produkcji węgla kamiennego będzie zależała od czynników geochemicznych opisanych w rozdziale 2.2. oraz modelu procesu produkcji. Zmiany parametrów wzbogacania mogą najprawdopodobniej wpłynąć na zmianę strumienia ładunków zanieczyszczeń, w tym rtęci. W przypadku polskiego górnictwa węgla kamiennego dominują 3 typy wzbogacalników: płuczki cieczy ciężkiej, osadzarki oraz flotowniki. Wzbogacalniki spiralne, hydrocyklony oraz cyklony cieczy ciężkiej występują jedynie w kilku zakładach górniczych [27].

Wzbogacanie w cieczach ciężkich

W polskim górnictwie węgla kamiennego dominującą metodą wzbogacania ziarn +20 (10) mm jest separacja w cieczach ciężkich. Rozdział nadawy odbywa się dzięki wykorzystaniu różnicy gęstości produktu użytecznego oraz skały płonnej i przerostów [114]. Najczęściej spotykanymi separatorami są maszyny serii DISA prowadzące wzbogacanie w ośrodku cieczy ciężkiej niejednorodnej. Istnieje wiele wariantów tego wzbogacalnika cechujących się odpowiednią wydajnością, przystosowaniem do określonej wielkości ziarn oraz innymi parametrami dostosowanymi do potrzeb danego zakładu przeróbki mechanicznej. Podstawową różnicą pomiędzy poszczególnymi modelami jest przystosowanie do wzbogacania dwu lub trójproduktowego. W przypadku wzbogacalników dwuproduktowych podczas ich pracy wydzielany jest koncentrat oraz odpady zgodnie z przyjętą gęstością rozdziału. Natomiast wzbogacalniki trójproduktowe są w istocie dwoma połączonymi układami dwuproduktowymi: w kolejnym separatorze dodatkowo z odpadu pierwszego stopnia wydziela się produkt pośredni oraz ostateczne odpady [69]. Na rysunku 6. przedstawiono separator Disa 1.

Zasadą działania wzbogacalnika jest rozdział frakcji lekkiej oraz ciężkiej – tonącej w zbiorniku napelnionym cieczą ciężką. Produkt tonący jest wynoszony przez koło łopatkowe, natomiast produkt lekki jest wynoszony przelewem, przy wspomaganii wygarniaka łopatkowego. Zarówno produkt jak i odpady odprowadzane są na sita z natryskami w celu splukania obciążnika. Najczęściej stosowaną cieczą ciężką w polskim górnictwie jest mieszanina wody oraz magnetytu ze względu na łatwość uzyskania pożądanego ciężaru właściwego oraz zdolności skutecznego odzysku dzięki zastosowaniu rekuperatorów magnetycznych. Gęstość mieszaniny, którą może uzyskać w warunkach przemysłowych wynosi od około 1,1 do 2,5 kg/dm³ [68]. W polskim górnictwie spotykane są także inne konstrukcje oparte na podobnych zasadach działania np. płuczka Drew-Boy, wyposażona w nachylone koło wynoszące – maszyna tego typu znajduje się w KWK „Chwałowice” [90].



Rysunek 6. Separator stały łopatkowy Disa 1.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [69].

Tabela 8. zawiera parametry sterowania jakością produktu wzbogacalnika cieczy ciężkiej. Ograniczają się przede wszystkim do ustalenia gęstości cieczy ciężkiej, w której prowadzona jest separacja nadawy. Możliwe jest sterowanie automatyczne na podstawie danych z popiołomierzy radiometrycznych badających zawartość popiołu w odpadach i produktach lub ręczne oparte na cyklicznych badaniach laboratoryjnych.

Tabela 8. Możliwości sterowania jakością produktu wzbogacalnika cieczy ciężkiej.

Parametr rozdziału	ρ (gęstość rozdziału)
Zasada działania	Wykorzystanie różnicy gęstości pomiędzy minerałami
Sterowanie parametrem rozdziału	Zmiany gęstości cieczy ciężkiej poprzez dodawanie obciążnika oraz regulację ilości wody spłukującej
Ilość produktów	Wariant 1: Koncentrat + odpad Wariant 2: Koncentrat + odpad + półprodukt

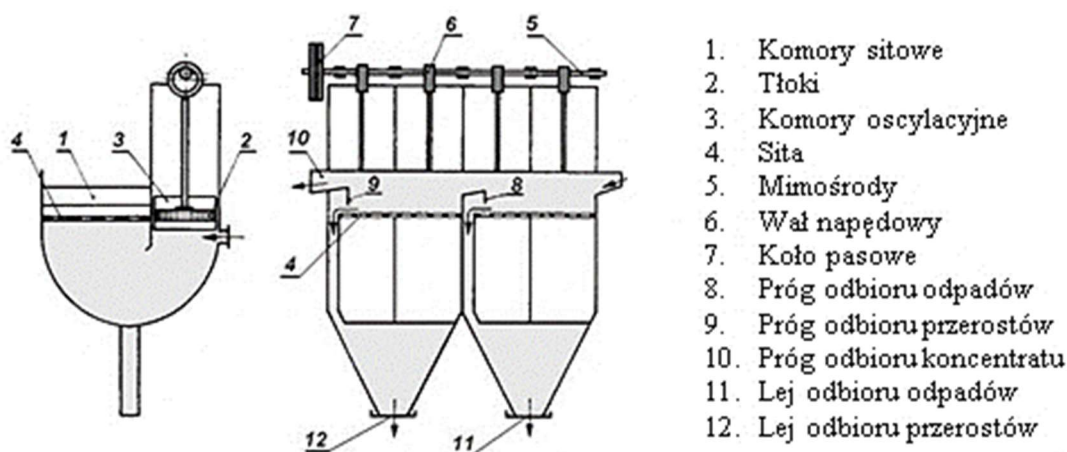
Źródło: opracowanie własne na podstawie [68].

Wzbogacanie w osadzarkach

Osadzarki są powszechnie stosowanymi separatorami w górnictwie na całym świecie. Podobnie jak płuczki cieczy ciężkiej opierają się na zasadzie wzbogacania grawitacyjnego w ośrodku wodnym, w którym pulsacja jest wywoływana poprzez cykliczne dozowanie sprężonego powietrza z kolektora do komór powietrznych. Proces ten doprowadza do wznoszenia i opadania wzbogacanego materiału na rusztach sitowych koryta roboczego. Osadzarki są maszynami prostszymi oraz bardziej niezawodnymi od wzbogacalników cieczy ciężkiej. W zależności od układu technologicznego zakładu przeróbki mechanicznej osadzarki dzielą się na grupy przystosowane do wzbogacania nadawy o zróżnicowanym uziarnieniu [87]:

- OZ osadzarka ziarnowa – wzbogacana klasa ziarnowa 120-20 mm,
- OS osadzarka średnioziarnowa – wzbogacana klasa ziarnowa 50-0,5 mm,
- OM osadzarka mialowa – wzbogacana klasa ziarnowa 20-0,5 mm.

Możliwe jest prowadzenie reżimu wzbogacania dwu- lub trójproduktowego. W odróżnieniu do wzbogacalników cieczy ciężkiej, w których wskaźnik imperfekcji może wynosić kilka setnych (współczynnik określający dokładność rozdziału wg przyjętej wartości) wynosi w optymalnych warunkach od 0,12 do 0,20 [1 2]. W wypadku nieprawidłowej pracy wzrasta nawet do 0,31 [8, 9]. Rysunek 7. przedstawia ogólny schemat osadzarki miałowej.



Rysunek 7. Osadzarka trójproduktowa.

Źródło: [68].

Sterowanie umowną gęstością odbioru nadawy jest możliwe przy zastosowaniu pływaka lub popiołomierza radiometrycznego reagującego na zmiany gęstości nadawy. Podstawowymi elementami umożliwiającymi regulację strumienia odbioru koncentratu są progi nr 9 oraz nr 8 (rysunek 7.), pozwalające na zatrzymanie przepływu nadawy o zbyt dużej gęstości (zapopieleniu) do produktu handlowego. Tabela 9. Przedstawia parametry sterowania jakością produktu osadzarki.

Tabela 9. Charakterystyka sterowania jakością produktu osadzarki.

Parametr rozdziału	q (umowna gęstość rozdziału)
Zasada działania	Wykorzystanie różnicy gęstości pomiędzy minerałami
Sterowanie parametrem rozdziału	– przepływ wody górnej i dolnej – pulsacja ośrodka – wysokość progu odbioru
Ilość produktów	Wariant 1: Koncentrat + odpad Wariant 2: Koncentrat + odpad + półprodukt

Źródło: opracowanie własne na podstawie [68].

Wzbogacanie flotacyjne

Flotacyjne wzbogacanie węgla kamiennego polega na wykorzystaniu różnic właściwości powierzchniowych minerałów. Rozdział następuje w mieszaniu drobnych ziarn oraz wody. Hydrofobowe ziarna są unoszone przez pęcherzyki powietrza do piany na powierzchni, ziarna hydrofilne natomiast toną. Dla wzmocnienia efektu w procesie przemysłowym do zawiesiny wprowadza się odczynniki flotacyjne.

Proces flotacji nie jest efektywny w zakresie odsiarczania produktu handlowego – pirit posiada podobne właściwości hydrofobowe do węgla, przez co również flotuje [56]. Flotowalność węgla jest uzależniona od stopnia uwęglenia – największą hydrofobowość

naturalną wykazują węgle koksujące (34-36). Węgłe nisko i silnie uwęglone flotują znacznie gorzej co może skutkować koniecznością zastosowania większej ilości odczynników flotacyjnych dla uzyskania optymalnych parametrów koncentratu [104].

Tabela 10. wskazuje możliwe parametry sterowania jakością wytwarzanego flotokoncentratu.

Tabela 10. Charakterystyka sterowania jakością flotokoncentratu.

Zasada działania	Wykorzystanie różnicy zwilżalności składników
Sterowanie parametrem rozdziału	– dobór odczynników flotacyjnych – poziom mieszaniny flotacyjnej – otwarcie odbioru odpadów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [68].

Flotacja jest trudnym do sterowania procesem, którego nastawy zazwyczaj nie są zmieniane dynamicznie. Spotykaną praktyką jest prowadzenie wzbogacania flotacyjnego bez użycia odczynników wyłącznie z wykorzystaniem jedynie wody słonej.

Inne operacje

Uśrednianie parametrów jakościowych (fuel blending) – operacja ta ma na celu zmieszanie węgla o różnych zawartościach zanieczyszczeń, tak aby uzyskać ich pożądany poziom. Przeszkodą w tworzeniu odpowiednich mieszanek może być dostęp do surowców o wskazanych parametrach jakościowych. Należy tutaj pamiętać, że uśrednianie musi prowadzić do uzyskania paliwa, które spełni wymagania odbiorców zwłaszcza w zakresie wartości opałowej oraz zawartości popiołu. Niejednokrotnie proces mieszania węgla odbywa się w ramach więcej niż jednego zakładu górniczego. Występującą praktyką jest również eksploatacja pokładów wbrew rachunkowi ekonomicznemu wyłącznie dla celów uśrednienia ostatecznego produktu [107].

Selektywne rozdrabnianie – metoda skuteczna dla węgla o dużej zawartości siarki pirytowej, w której węgiel jest poddawany procesom kruszenia oraz mielenia. Ze względu na znaczącą twardość ziarn pirytu nie ulega on łatwemu skruszeniu, przez co możliwe jest jego oddzielenie go od właściwego produktu.

Głębokie wzbogacanie węgla – pod tym pojęciem występuje wiele procesów opartych na wzbogacaniu węgla poddanego kruszeniu i mieleniu, co umożliwia rozluźnianie drobnych fragmentów skały płonnej. W tej formie nadawę poddaje się wzbogacaniu metodami flokulacji selektywnej, aglomeracji, aglomeracji selektywnej, flotacji i innymi np. ługowanie bakteryjne, wzbogacaniu w ciekłym dwutlenku węgla. Metody te nie znajdują szerokiego zastosowania w produkcji węgla na potrzeby energetyczne z powodu wysokich kosztów [10].

Podstawową zaletą standardowych metod wzbogacania takich jak: płukanie w cieczach ciężkich, osadzarkach, hydrocyklonach oraz flotacji jest ich niska cena jednostkowa oraz stosunkowo powszechne zastosowanie. Skuteczność procesów przeróbki np. dla zmniejszenia zawartości związków siarki jest ściśle związana z ich występowaniem we frakcji organicznej lub mineralnej. W zależności od lokalnych warunków zanieczyszczenia mogą kumulować się w produkcie handlowym, przerostach lub odpadach. Tabela 11. wskazuje na możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla kamiennego w przypadku modelu zakładu prowadzącego wzbogacanie w pełnym zakresie uziarnienia.

Tabela 11. Możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń, w tym rtęci w procesach wzbogacania węgla.

Ustalenie modelu i zakresu wzbogacania		Możliwości sterowania ładunkiem rtęci
Odkamienianie urobku		- wyeliminowanie ładunku zawartego w gruboziarnistej skale płonnej
Przygotowanie nadawy 200-20/10 mm i 20-0 mm/10-0 mm		
Wzbogacanie w cieczy ciężkiej		– gęstość rozdziału – ilość produktów i ich zastosowanie (np. skierowanie wytwarzanych produktów wyłącznie do zakładów energetycznych)
Wariant 1	Wariant 2	
2-produktowe	3-produktowe	
Wzbogacanie w ośrodku wodnym 20/10-0,5 mm lub 20/10-6/3 mm		
Wariant 1	Wariant 2	– umowna gęstość rozdziału – ilość produktów i ich zastosowanie
2-produktowe	3-produktowe	
Wzbogacanie flotacyjne mułów < 0,5 mm		– dobór odczynników flotacyjnych – zmiana nastaw flotownika
Obieg wodno-mułowy		-
Mieszanie oraz załadunek		– produkcja mieszanek handlowych - wydzielenie sortymentów o niższej zawartości zanieczyszczeń

Źródło: opracowanie własne na podstawie [67].

W rozdziale 2.2. przedstawiono czynniki geochemiczne warunkujące potencjał usunięcia rtęci z węgla kamiennego w przeróbce węgla kamiennego. W przypadku braku wzbogacania urobku – całość zanieczyszczeń znajdzie się w produkcie handlowym. W sytuacji, gdy nieoczyszczony węgiel trafi do palenisk w gospodarstwach domowych, większość zawartej w niej rtęci zostanie wyemitowana do atmosfery. W ostatnich kilkunastu latach pojawiła się pewna ilość danych oraz ocen ekspertów wskazujących na wymierną skuteczność zmniejszenia ładunku rtęci w procesach przeróbki mechanicznej, ich wyniki zostały przedstawione w tabeli 12. W większości dane potwierdzają skuteczność redukcji rtęci we wzbogacaniu węgla na poziomie kilkudziesięciu procent.

Tabela 12. Ocena skuteczności redukcji rtęci w procesach przeróbki mechanicznej węgla kamiennego.

Źródło	Ocena skuteczności redukcji Hg
Akers D.: Precombustion control option for air toxics. Fuel and Energy Abstracts vol. 37, no. 3., 1996	Pluczka cieczy ciężkiej 26% ↓ Flotacja 20% ↑ (liczby bezwzględne)
Toole-O'Neil B., Tewalt S.J., Finkelman R.B., Akers D.J., (1999). Mercury concentration in Coal - Unraveling the Puzzle. Fuel, Vol.: 78, 45-54	37% ↓ (liczby bezwzględne)
Dziok T., Strugała S., Rozwadowski A., Rozwadowska T.: Possibilities of mercury content reduction in hard coal. Poland. Paliwa i energia XXI wieku. Akapit, 2014	Pluczka cieczy ciężkiej 60-70% ↓ Flotacja 30% ↓ Osadzarki 40% ↓ (w odniesieniu do zawartości popiołu) Pluczka cieczy ciężkiej 30-40% ↓ Flotacja 10% ↑ Osadzarki 10-20% ↓ (liczby bezwzględne)
Pyka I. Wierzchowski K.: Problemy z rtęcią zawartą w węglu kamiennym. Geologia i Geoinżynieria. Poland. t. 34 z. 4/1 s. 241 – 249. 2010	Wyniki badań wzbogalności dla poszczególnych klas ziarnowych oraz gęstości rozdziału > 20 mm – 56% ↓ (1,8 g/cm ³) 20-0,5 mm – 35% ↓ (2 g/cm ³) 0,5-0,045 mm – 48,7% ↓ (2 g/cm ³)
Pyka I. Wierzchowski K.: split of mercury between products of coal cleaning versus mercury emissions reduction. Physicochem. Probl. Miner. Process. 52(1), 2016, 193–203	Migracja ładunku rtęci do odpadów w poszczególnych modelach wzbogacania węgla kamiennego Wzbogacanie klas ziarnowych > 20 mm – 12% Wzbogacanie klas ziarnowych > 1 mm – 35% (Zakres od 5% do 60%)
Aleksa H.: Dyduch F., Wierzchowski K.: Chlor i rtęć w węglu i możliwości ich obniżenia metodami przeróbki mechanicznej. Górnictwo i geoinżynieria, zeszyt 3/1, 2007	Zmniejszenie zawartości rtęci w koncentratkach flotacyjnych o około 30-40%
Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector. Department of Environmental Science and Engineering. Tsinghua University. Pekin 2011	Chiński program środowiskowy wskazuje na możliwość redukcji ładunku o 30% przy częściowym wzbogacaniu węgla energetycznych

Legenda: ↓ – obniżenie zawartości procentowej ↑ – zwiększenie zawartości procentowej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [1, 2, 32, 101, 102, 113, 117].

Badania dotyczące skuteczności obniżenia ładunku rtęci występują w literaturze znacznie rzadziej niż oznaczenia węgla surowego oraz samych produktów lub odpadów. Potencjał obniżenia ładunku Hg będzie zależał od wielu czynników takich jak: jej formy występowania w złożu, udział zanieczyszczeń wtórnych w urobku, infrastruktura zakładu przerobczego oraz wymagania odbiorców dot. parametrów handlowych. Źródła wskazują, że skuteczność redukcji rtęci w węglu handlowym wynosi do 70% procent przy pełnym zakresie wzbogacania [99]. Skuteczność zależy przede wszystkim od dominującej formy występowania rtęci w złożu. W przypadku zawartości związków Hg w ciężkiej frakcji mineralnej przeróbka mechaniczna będzie skutecznym środkiem obniżenia jej zawartość w produktach handlowych. Jeżeli zakres wzbogacania klas ziarnowych jest ograniczony – potencjał zmniejszenia ładunku rtęci w węglu handlowym sprowadza się do „fuel-switching” lub próby ograniczenia zawartości skały płonnej w nadawie [32]. Pomimo stwierdzonego w niektórych przypadkach wzrostu zawartości rtęci w koncentratkach procesów przeróbki mechanicznej należy pamiętać, że potencjalny ładunek zanieczyszczeń trafiających do powietrza został jednak ograniczony.

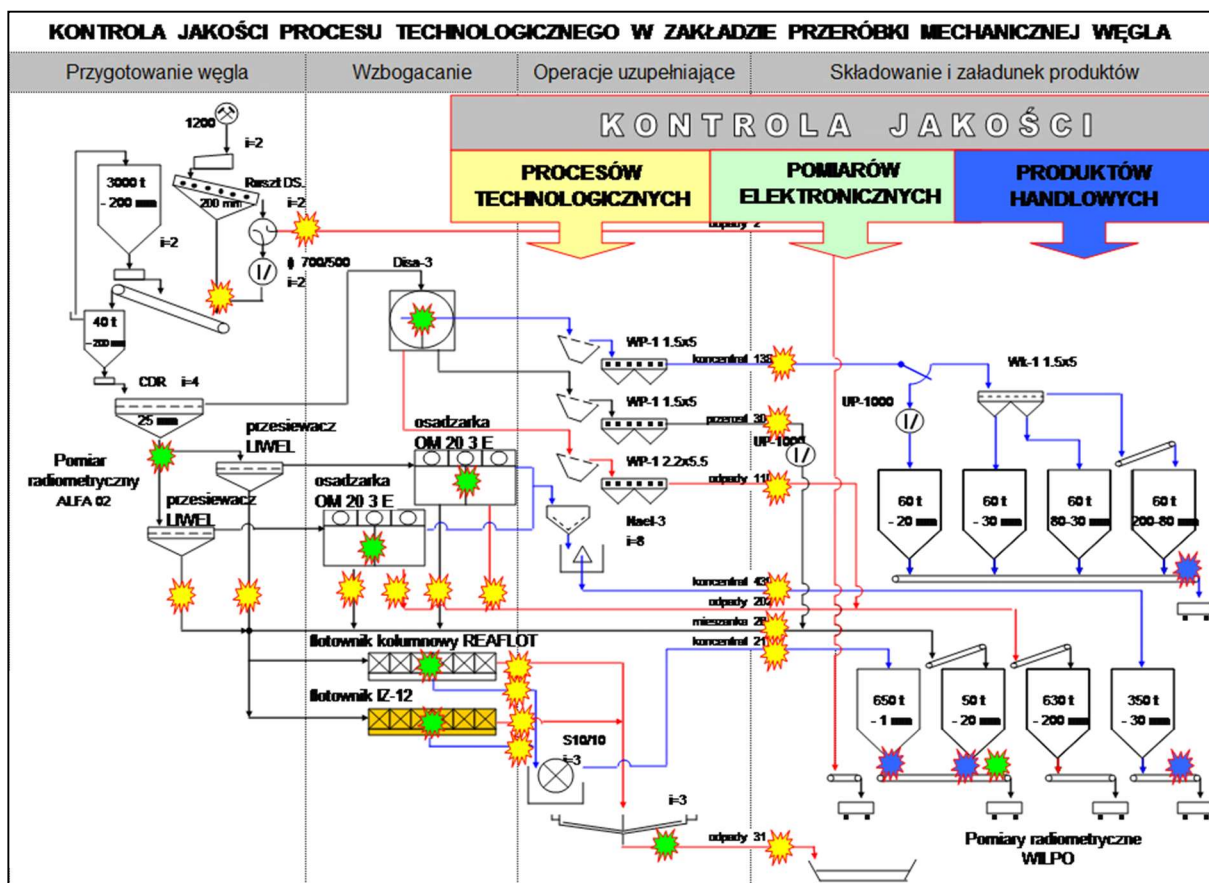
1.6. Mapowanie oraz modelowanie procesów technologicznych

Mapowanie jest graficznym przedstawieniem procesu technologicznego wspomagającym jego doskonalenie. Pozwala na wskazanie zależności pomiędzy poszczególnymi operacjami w ramach danego zakładu. Jego skondensowana forma umożliwia szybką diagnostykę istniejącego systemu, a holistyczne podejście ułatwia przewidywanie skutków potencjalnych zmian w procesie produkcji [19, 20, 21]. W przypadku zakładów przemysłowych o złożonej technologii mapowanie stanowi pierwszy krok w kierunku stworzenia opisu zachowania danego układu – modelowania. Na rysunku 8. przedstawiono przykład mapy procesów w zakładzie przeróbki mechanicznej węgla wraz ze wskazaniem punktów kontroli jakości nadawy oraz produktów.

Mapa procesów umożliwia prześledzenie powiązań pomiędzy procesami technologicznymi przeróbki węgla kamiennego oraz operacjami dodatkowymi. Wskazuje możliwości sterowania jakością węgla handlowego za pomocą istniejącej infrastruktury. Ważnym elementem przykładowej mapy są punkty kontrolne umożliwiające ocenę przebiegu wykonywanych operacji pod kątem zawartości zanieczyszczeń produktów. Mapa obrazuje jedynie najistotniejsze elementy danego procesu pomijając te, które nie mają bezpośredniego wpływu na jakość produktu np. operacje transportowe.

Proces produkcji węgla kamiennego można opisać za pomocą narzędzi o różnym zakresie zastosowania [20]:

- modeli statycznych,
- modeli dynamicznych,
- modeli wspomagających wytwarzanie produktów o danych parametrach ilościowo-jakościowych.



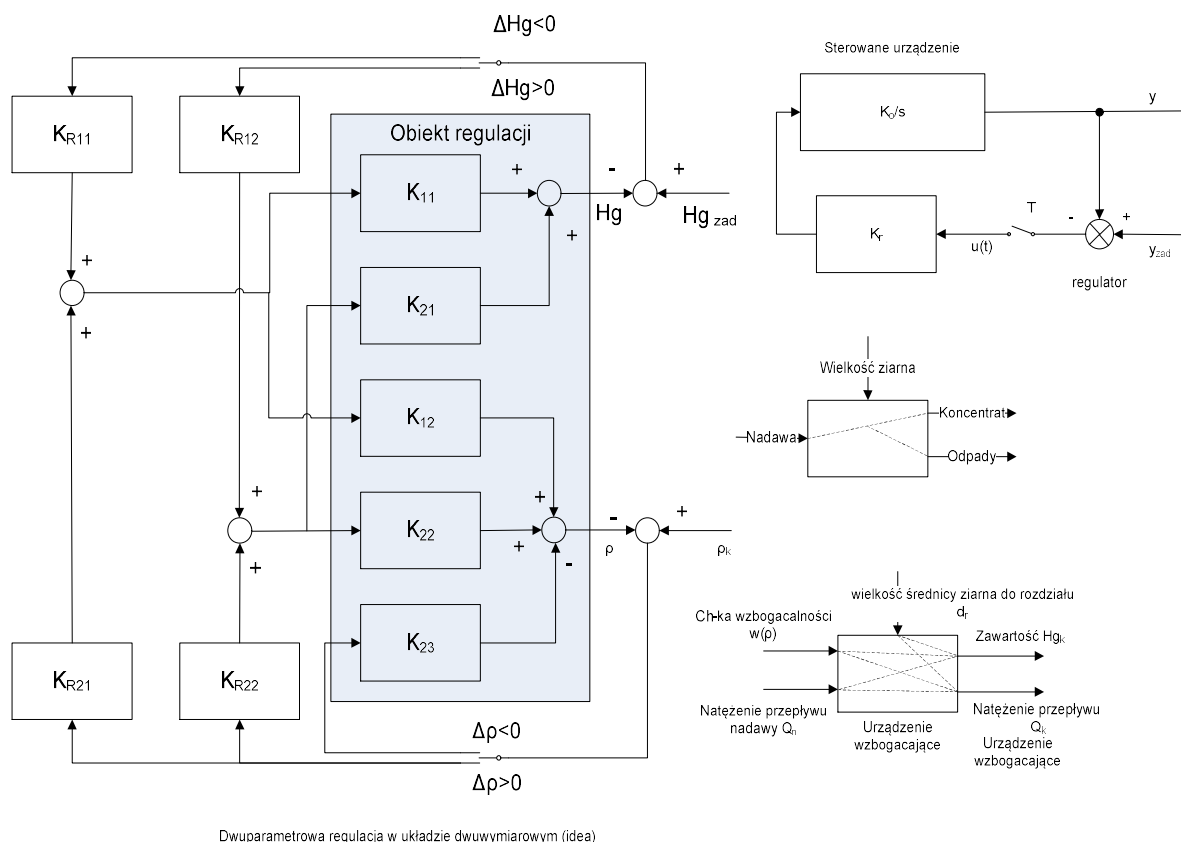
Rysunek 8. Przykład mapy procesów w zakładzie przeróbki mechanicznej węgla kamiennego.
Źródło: [76].

Statyczne modele procesów przerobczych znajdują zastosowanie przede wszystkim w projektowaniu układów technologicznych oraz w prognozowaniu efektów produkcji zaprojektowanego systemu. Modelowanie o charakterze statycznym pozwala na analizę optymalizacji produkcji oraz badanie wrażliwości układu na zakłócenia i regulację procesów. Jest również przydatne w doborze właściwych nastaw wzbogacalników dla uzyskania pożądanej jakości produktów (np. zawartości popiołu, wilgoci, wartości opałowej lub siarki). Modele dynamiczne dotyczą badania przebiegu procesów technologicznych w funkcji czasu w odniesieniu do rzeczywistych warunków sterowania [21].

Modele dynamiczne dają możliwość prognozowania efektu działania układu technologicznego złożonego z wielu operacji jednostkowych. Ich najważniejszym celem jest automatyzacja doboru parametrów rozdziału dla zadanych parametrów jakościowych produktów. Umożliwiają także funkcje celu optymalizujących wartości parametrów rozdziału w oparciu o ceny produktów lub parametry handlowe. Rysunek 9. przedstawia model dwuparametrowej regulacji oparty na krzywych wzbogacalności oraz dynamicznym pomiarze zawartości popiołu przez popiołomierze i masy przez wagi taśmowe [21].

Modelowanie jest również wykorzystywane w celu przeprowadzenia szczegółowej symulacji procesów przeróbki np. dynamiki ziarn podczas wzbogacania w osadzarce lub w cieczach ciężkich, ruchu cząstek w procesach odwadniania, czy też klasyfikacji sitowej [48].

Symulacje tego rodzaju są przede wszystkim w projektowaniu maszyn i urządzeń zakładów wzbogacania.

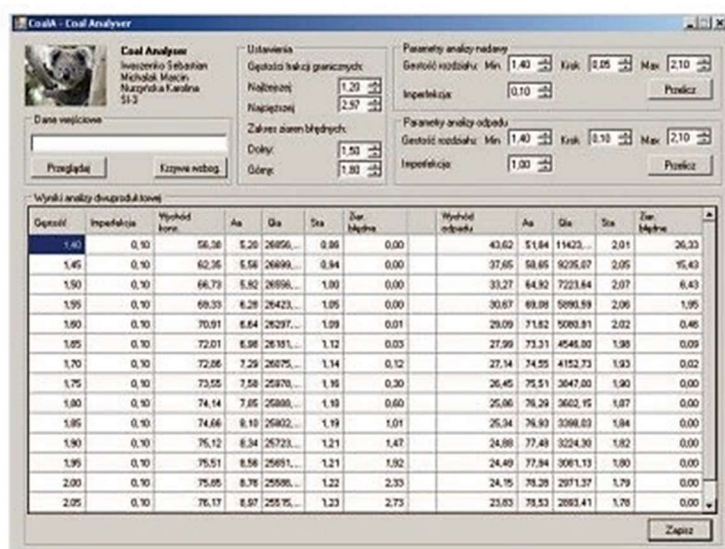


Rysunek 9. Dwuparametrowa regulacja w układzie trójwymiarowym.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [19, 21].

Trzecią kategorią modeli stanowią narzędzia wspomagające produkcję węgla kamiennego o danych parametrach, występujące w postaci programów komputerowych. Na podstawie krzywych wzbogalności dla danych parametrów jakościowych, wskaźników imperfekcji wzbogalników, danych dotyczących wychodu frakcji ziarnowych i densymetrycznych prognozują końcową jakość produktu handlowego [57]. Rysunek 10. przedstawia wybrany przykład komputerowego modelu wzbogacania [78].

Istniejące koncepcje modelowania procesów wytwarzania produktów handlowych można uzupełnić o dodatkowy parametr jakościowy jakim najprawdopodobniej w przyszłości będzie zawartość rtęci. Problem polega na konieczności dopasowania modelu krzywej wzbogalności do zawartości rtęci, której dynamiczny pomiar nie jest technicznie możliwy. Opracowanie modelu procesu produkcji węgla z uwzględnieniem migracji zanieczyszczeń wspomogłoby podjęcie decyzji w obliczu konieczności obniżenia zawartości rtęci w węglu kamiennym. Obecna wiedza dot. występowania zanieczyszczeń takich jak np. rtęć nie daje możliwości wspomagania procesu produkcji węgla kamiennego w zakresie potrzebnym do celów planowania jakości produkcji.



Rysunek 10. Moduł dopasowania krzywych wzbogacalności – przykład interfejsu modelu wzbogacania.
Źródło: [57].

PODSUMOWANIE BADAŃ LITERATUROWYCH

Gospodarcze wykorzystanie węgla niesie ze sobą wiele aspektów środowiskowych, a jednym z najpoważniejszych jest uwolnienie szkodliwych substancji do atmosfery. Emisje związków siarki, pyłów są dobrze znanym skutkiem wykorzystania węgla kamiennego. Problem zawartości metali ciężkich w węglu kamiennym, a zwłaszcza rtęci wydaje się być szczególnie istotny ze względu na ich silną toksyczność oraz zdolność kumulacji w organizmach żywych. Niska temperatura wrzenia rtęci powoduje przedostanie się tego pierwiastka do atmosfery w procesie spalania paliw kopalnych. Polska jako największy producent węgla kamiennego oraz jeden z głównych jego użytkowników w Unii Europejskiej będzie musiała określić krajowy program redukcji rtęci do atmosfery.

Formy występowania rtęci oraz jej zawartość w węglu kamiennym są zróżnicowane. Analiza źródeł literaturowych nie pozwala na określenie uniwersalnego sposobu prognozowania zawartości rtęci na podstawie innych parametrów węgla takich jak popiół i siarka. Liczne źródła literaturowe wskazują na realne możliwości ograniczenia ładunku rtęci w węglu handlowym poprzez zastosowanie standardowych procesów technologicznych przeróbki mechanicznej. Potencjał redukcji ograniczony jest do usunięcia rtęci zawartej we frakcjach ciężkich w przypadku wzbogacalników grawitacyjnych. W przypadku flotacji hydrofobowe ziarna nadawy zawierające dany ładunek rtęci zostaną skierowane do produktu. Nieliczne źródła literaturowe wskazują na potencjał ograniczenia ładunku rtęci w paliwie jeszcze na etapie eksploatacji poprzez ograniczenie zanieczyszczenia nadawy. Niewątpliwie ładunek rtęci emitowany do atmosfery jest ściśle związany z głębokością wzbogacania użytkowanego paliwa.

Pełny zakres ziarnowy wzbogacania węgla koksujących pozwala na kompleksowe zbadanie zjawiska migracji zanieczyszczeń w węglu kamiennym na etapie wydobywania oraz przeróbki mechanicznej. Modelowanie ruchu zakładu o pełnym zakresie wzbogacania umożliwi także określenie możliwości redukcji ładunku zanieczyszczeń w odmiennych modelach zakładów wzbogacania poprzez nieuwzględnienie wzbogacania w części węzłów

technologicznych. Ze względu na dużą zmienność występowania zanieczyszczeń, a zwłaszcza rtęci, wydaje się koniecznością ograniczenie badań do jednego zakładu górniczego.

Dotychczas nie przedstawiono modelu wspierającego redukcję rtęci wraz z zanieczyszczeniami takimi jak popiół i siarka w procesach produkcji węgla kamiennego. Potrzeba budowy modelu tego rodzaju była wskazywana w literaturze [80]. Istniejące narzędzia wspierające decyzje w zakresie wzbogacania węgla kamiennego najprawdopodobniej można zaadaptować dla celów redukcji rtęci.

Budowa procesu produkcji węgla kamiennego uwzględniającego redukcję wybranych zanieczyszczeń nie wydaje się być możliwa na podstawie dostępnych źródeł literaturowych odnoszących się do wielu zakładów górniczych. Dotychczas nie przeprowadzono kompleksowych analiz sterowania ładunkiem zanieczyszczeń w produktach handlowych oraz odpadach. Ze względu na rozbudowaną infrastrukturę – zakłady przeróbki mechanicznej węgla koksującego wydają się najbardziej odpowiednie do przeprowadzenia próby budowy modelu migracji zanieczyszczeń. Celem budowy tego narzędzia powinno być wspomaganie decyzji w zakresie produkcji węgla kamiennego w odniesieniu do nowych wymagań środowiskowych. Należy określić możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń poprzez zmiany w technologii eksploatacji, przeróbki mechanicznej, a zwłaszcza parametrów rozdziału oraz reżimu produkcji.

2. BADANIA WŁASNE

2.1. Redukcja wybranych zanieczyszczeń w procesach produkcji węgla kamiennego – ocena wstępna

Produkcja węgla kamiennego jest nastawiona na spełnienie parametrów jakościowych stawianych przez jego odbiorców. Wzbogacanie jest jednym ze środków mających na celu dostosowanie produktu do wymagań rynkowych. Proces ten wiąże się ze stratą pewnej ilości substancji węglowej trafiającej do odpadu, jednakże równocześnie zwiększa efektywność produkcji energii oraz koksu z uzyskanego koncentratu. W obliczu nowych wymagań środowiskowych konieczne jest zbadanie migracji zanieczyszczeń na etapie produkcji węgla kamiennego oraz możliwości jej kontroli. Kluczowym projektem badawczym w tym zakresie jest „Opracowanie bazy danych zawartości rtęci w krajowych węglach, wytycznych technologicznych jej dalszej redukcji wraz ze zdefiniowaniem benchmarków dla krajowych wskaźników emisji rtęci – Baza Hg” prowadzony przez Główny Instytut Górnictwa. Autorzy monografii biorą czynny udział w realizacji prac badawczych przedsięwzięcia.

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych dotychczas w ramach projektu możliwe było dokonanie ogólnych obliczeń dotyczących skuteczności przeróbki mechanicznej w redukcji ładunku rtęci w węglu kamiennym. Obiektem prostej symulacji był hipotetyczny zakład przeróbki mechanicznej węgla koksującego dysponujący infrastrukturą o pełnym zakresie wzbogacania klas ziarnowych. Ocena redukcji wybranych zanieczyszczeń przedstawiona w tabeli 13. została przeprowadzona w oparciu o następujące założenia:

- zakład wzbogacania posiada wydajność 1000 Mg/h a obciążenie płuczki ciężkiej, osadzarek oraz flotacji wynosi odpowiednio: 300 Mg/h, 400 Mg/h oraz 300 Mg/h (wartości umowne ustalone na podstawie konsultacji z pracownikami jednego z zakładów górniczych),
- powstająca ilość produktów i odpadów w zakładzie górnictwym jest stała, jak również zawarta w nich rtęć,
- nastawy maszyn oraz urządzeń nie ulegają zmianom – produkcja zakładu opiera się o dotychczasowe wymagania klienta,
- istnieje możliwość wydzielenia przerostów (półproduktu) w płuczce cieczy ciężkiej oraz osadzarce,
- zakład górniczy jest producentem tylko jednego sortymentu węgla handlowego,
- eliminacja poszczególnych węzłów wzbogacania wskaże potencjał redukcji rtęci w zakładach o ograniczonej infrastrukturze,
- skierowanie ładunku rtęci do odpadu jest uznawane za redukcję zanieczyszczeń,
- skutki środowiskowe kumulacji rtęci w odpadach nie są rozpatrywane.

W omawianej symulacji istnieje możliwość usunięcia do 46% ładunku rtęci na wyjściu w stosunku do jego zawartości w węglu surowym na wejściu przy zastosowaniu wzbogacania o pełnym zakresie klas ziarnowych w dwuproduktowym reżimie produkcji. Biorąc pod uwagę ładunek zawarty w produkcie handlowym można zauważyć brak zbilansowania zanieczyszczeń sięgający ok. 20% dla płuczki cieczy ciężkiej, co wynika z przyjęcia uśrednionych wartości dla różnych węgli oraz pominięcia procesów odwadniania w obliczeniach. Pomimo stosunkowo

niewielkiej masy przerostów (stanowią zaledwie kilka procent masy urobku) – ich obecność w produkcie podnosi ładunek rtęci w produkcie finalnym nawet o 10%.

Tabela 13. Ocena redukcji ładunku rtęci w różnych modelach wzbogacania węgla kamiennego.

Zawartość Hg	Pluczka cieczy ciężkiej			Osadzarka			Flotacja			Wskaźnik redukcji rtęci	Wskaźnik redukcji rtęci przy dwuproduktowym reżimie produkcji
	> 20 mm lub > 10 mm			< 20 mm			< 1 mm				
	Hg ^a [ppb]	Masa [Mg]	Hg ładunek [g]	Hg ^a [ppb]	Masa [Mg]	Hg ładunek [g]	Hg ^a [ppb]	Masa [t]	Hg ładunek [g]		
Nadawa	83	300	24,9	105	400	42,0	130	300	39		
Koncentrat	45	225	10,1	92	280	25,8	107	200	21,4		
Przerosty	165	12,5	2,1	218	17,5	3,8	-	-	-		
Odpad	120	62,5	7,5	98	103	10,0	119	100	11,9		
Przerosty + Odpad	128	75	9,6	116	120	13,8	119	100	11,9		
Wskaźnik redukcji rtęci	59% (51%)			39% (30%)			45%			40%	46%
Ładunek Hg w produkcie [g]	105,9										
PME3 PMK1	Hg ładunek [g] = 63,2 Hg w przerostach [g] = 5,9										
PME2	Hg ładunek [g] = 80,8 Hg w przerostach [g] = 5,9									24%	29%
PME1	Hg ładunek [g] = 93,2 Hg w przerostach [g] = 91,1									12%	14%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [63, 66].

W omawianym przypadku rezultaty oceny są porównywalne z danymi zawartymi w tabeli 12. (rozdział 1.5.) dotyczącymi światowych szacunków skuteczności redukcji rtęci na etapie wzbogacania. Na podstawie oceny skuteczności redukcji zanieczyszczeń w węglu handlowym przeprowadzono analizę obejmującą potencjalne korzyści płynące ze zmiany modeli wzbogacania we wszystkich zakładach górniczych na terenie Polski (tabela 14.). Zestawienie zawiera dane dot. rocznej sprzedaży prowadzonej przez zakłady górnicze oraz średnią zawartość rtęci w ich złożach.

Przewaga modeli PME1 oraz PME2 skłania do stwierdzenia, że ładunek rtęci w przypadku większości polskiego węgla na rynku jest zredukowany w ograniczonym stopniu.

Tabela 14. Potencjał redukcji rtęci w przypadku zastosowania różnych modeli wzbogacania w polskim górnictwie na podstawie danych z roku 2013.

Kopalnie węgla kamiennego (zakłady wzbogacania)	Sprzedaż netto [mln Mg]	Model	Zawartość Hg w węglu [g/Mg]	Ładunek rtęci w węglu surowym [Mg]	Ładunek rtęci w paliwie[Mg]			
					PME 1	PME2	PME3 PMK1	Pełny zakres wzbogacania – reżim dwuproduktowy
Borynia-Zofiówka	3,87	PMK	0,066	0,26	0,22	0,19	0,15	0,14
Jas-Mos	1,59	PMK	0,04	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03
Pniówek	2,62	PMK	0,018	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02
Krupiński	2,19	PMK	0,102	0,22	0,20	0,17	0,13	0,12
Budryk	3,06	PMK	0,14	0,43	0,38	0,33	0,26	0,23
Anna*	0,77	PME3	0,071	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
Rydułtowy	1,32	PME2	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Marcel	2,48	PME3	0,058	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08
Jankowice	2,63	PME3	0,078	0,21	0,18	0,16	0,12	0,11
Chwałowice	2,37	PME2	0,119	0,28	0,25	0,21	0,17	0,15
Bielszowice	1,68	PME3	0,088	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08
Pokój	1,21	PME3	0,086	0,10	0,09	0,08	0,06	0,06
Halemba-Wirek	1,92	PME2	0,088	0,17	0,15	0,13	0,10	0,09
Ziemowit	3,81	PME1	0,155	0,59	0,52	0,45	0,35	0,31
Piast	4,5	PME3	0,099	0,45	0,39	0,34	0,27	0,24
Brzeszcze	1,43	PME1	0,136	0,19	0,17	0,15	0,12	0,10
Sośnica	1,57	PME3	0,104	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09
Makoszowy	1,22	PME2	0,178	0,22	0,19	0,17	0,13	0,12
Knurów	2,07	PME3	0,142	0,29	0,26	0,22	0,18	0,16
Szczygłowice	1,84	PME3	0,099	0,18	0,16	0,14	0,11	0,10
Bolesław Śmiały	1,66	PME3	0,132	0,22	0,19	0,17	0,13	0,12
Piekary	1,54	PME1	0,058	0,09	0,08	0,07	0,05	0,05
Bobrek	0,42	PME1	0,082	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Centrum	1,39	PME2	0,051	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04
Murcki	2	PME3	0,079	0,16	0,14	0,12	0,09	0,08
Staszic	2,4	PME2	0,103	0,25	0,22	0,19	0,15	0,13
Wesoła	3,74	PME1	0,151	0,56	0,50	0,43	0,34	0,30
Wieczorek	1,79	PME1	0,072	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07
Wujek-Śląsk	2,77	PME1	0,098	0,27	0,24	0,21	0,16	0,14
Kazimierz-Juliusz*	0,56	PME1	0,1	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
Silesia**	0,06	PME1	0,083	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bogdanka	5,84	PME2	0,105	0,61	0,54	0,47	0,37	0,32
Janina	1,88	PME3	0,066	0,12	0,11	0,09	0,07	0,07
Sobieski	2,85	PME3	0,106	0,30	0,27	0,23	0,18	0,16
Siltech	0,18	brak	0,1	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Eko-Plus	0,1	brak	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ładunek rtęci [Mg]				7,16	6,30	5,44	4,30	3,80

Legenda: *zakład w likwidacji **okres konserwacji zakładu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [66, 70].

Wstępna ocena redukcji ładunku rtęci w odniesieniu do poszczególnych modeli procesów wzbogacania węgla pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- zakres wzbogacania oraz reżim technologiczny to kluczowe czynniki warunkujące wielkość ładunku zanieczyszczeń skierowanego do produktu handlowego,
- potencjał redukcji zanieczyszczeń na etapie precombustion w Polsce jest wykorzystany w niewielkim stopniu, co jest typowym zjawiskiem dla kraju, w którym wydobywa się znaczące ilości węgla kamiennego,
- analiza migracji zanieczyszczeń powinna być przeprowadzona oddzielnie dla każdego zakładu ze względu na czynniki wskazane w badaniach literaturowych,
- ocenę zawartą w tym rozdziale należy rozumieć jedynie jako próbę oszacowania skuteczności wzbogacania węgla kamiennego jako jednego z etapów czystych technologii węglowych,
- należy przeprowadzić badania zmierzające do wskazania środków wspomagających redukcję zanieczyszczeń na wszystkich etapach procesu technologicznego oraz wskazać korelacje pomiędzy parametrami handlowymi a rtęcią,
- konieczne jest przeprowadzenie ukierunkowanych badań dotyczących występowania zanieczyszczeń w węglu kamiennym wraz z określeniem możliwości ich redukcji.

2.2. Badania pilotażowe w ZG „Siltech”

W lipcu 2013 roku w Zakładzie Górniczym „Siltech” w Zabrze przeprowadzono badania handlowych parametrów węgla różnych sortymentów oraz odpadów pochodzących z eksploatacji. W ZG „Siltech” wydobywanie węgla kamiennego prowadzone jest w dawnym obszarze górniczym KWK „Jadwiga” („Pstrowski”), przy zatrudnieniu około 180 osób osiąga wielkość produkcji około 200 tys. Mg rocznie. Działalność górnicza jest skierowana przede wszystkim na wybieranie resztek złóż pozostawionych w dawnych filarach ochronnych szybów oraz wyrobisk kapitałnych [123]. Ze względu na nieregularny kształt oraz stosunkowo niewielkie rozmiary pozostawionych parcel zastosowanie ubierkowych systemów eksploatacji okazało się problematyczne. Liczne opady stropu, zjawiska „kominowania się” pokładu, skomplikowana tektonika oraz przeszła działalność górnicza powodująca konieczność przebijania się przez zroby oraz sieć dawnych wyrobisk uniemożliwiły zastosowanie ścianowych systemów eksploatacji. Wydobywanie resztek pokładów 501/1, 504, 507, 508, 509 odbywa się systemem krótkich chodników eksploatacyjnych. Niskie nakłady, możliwość uzysku większej ilości grubych (i zyskowych) sortymentów węgla energetycznego oraz zachowania czystości urobku są powodem rentowności prywatnego przedsięwzięcia [134].

ZG „Siltech” nie dysponuje mechanicznym zakładem wzbogacania węgla, a jedynie sortownią. Sortymenty grube są poddawane ręcznemu odkamienianiu na powierzchni zakładu. Pomimo braku infrastruktury wzbogacania oferowany miał energetyczny cechuje się stosunkowo niską zawartością popiołu wynoszącą zazwyczaj od 10 do 18%. Wytwarzane przez zakład paliwo jest stosowane do uśredniania wartości opałowej w zakładach energetycznych, jak i użytku prywatnego. Brak różnicy pomiędzy urobkiem a produktem handlowym umożliwił przeprowadzenie badań węgla, który nie został poddany procesom wzbogacania, a jednocześnie cechuje się rynkowymi parametrami jakościowymi. Dodatkowo postanowiono zbadać skały płonne stanowiące wtórne zanieczyszczenie węgla handlowego podczas procesów

eksploatacji. Pobór prób węgla oraz skały płonnej został wykonany zgodnie z zaleceniami normy PN-ISO 18283 [96].

Wysoka czystość urobku, wydobyte na niewielką skalę, wydzielona odstawa skały płonnej umożliwiło wykonanie wstępnej analizy zanieczyszczeń węgla kamiennego. Dodatkowym celem badań w ZG „Siltech” była próba znalezienia korelacji pomiędzy zawartością siarki, popiołu a obecnością rtęci w węglu handlowym. Dla celów badawczych pobrano 7 prób węgla: 6 prób miałów odsianych z urobku w podziemiach zakładu oraz jedną z klasy ziarnowej orzech w sortowni, ponadto skały stropowe oraz spągowe. Tabela 15. przedstawia wyniki analizy dla 9 próbek pobranych w zakładzie górniczym z pokładu 508. Analizy zostały przeprowadzone w Zakładzie Monitoringu Środowiska Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach.

Tabela 15. Wyniki analiz prób węgla z ZG „Siltech” – pokład 508.

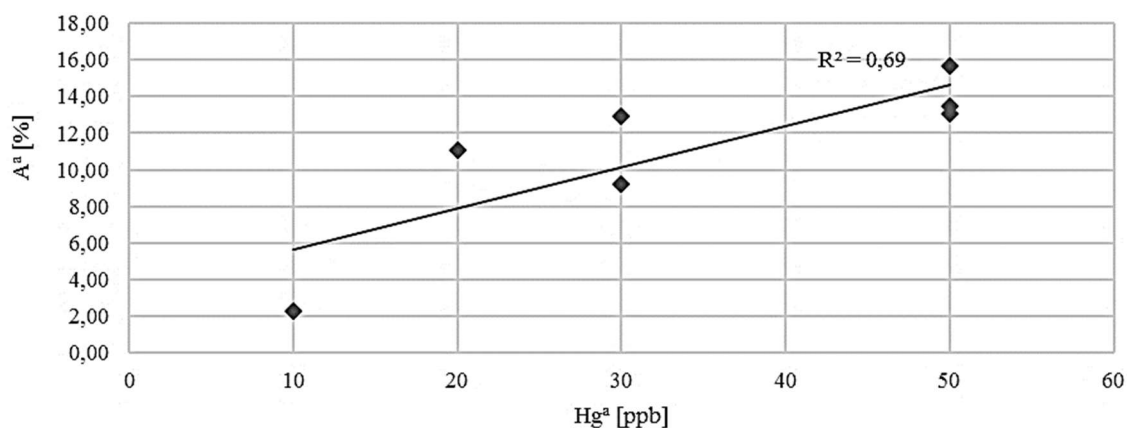
Lp.	Skała	Klasa ziarnowa	W ^a [%]	A ^a [%]	S ^a [%]	Hg ^a [ppb]	Q ^a [MJ/kg]
1	Węgiel	miał	2,41	14,38	0,89	30	26960
2	Węgiel	miał	2,35	14,72	0,92	60	26590
3	Węgiel	miał	2,36	14,82	0,63	50	26950
4	Węgiel	miał	2,38	17,27	0,58	50	25900
5	Węgiel	miał	2,44	10,21	0,91	30	28500
6	Węgiel	miał	2,41	12,21	0,83	20	27910
7	Skała stropowa	-	0,74	-	0,40	190	-
8	Skała spągowa	-	0,96	-	0,08	40	-
9	Węgiel	orzech	2,72	2,28	0,37	10	31460

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki badań wskazały na nieznaczną zawartość rtęci w badanym węglu kamiennym wynoszącą średnio 35 ppb. Zainteresowanie wzbudziła stosunkowo wysoka zawartość rtęci w skałach stropowych (piaskowcu) wynosząca 190 ppb. W przypadku spągu wyniki sugerują na występowanie znacznie mniejszej ilości rtęci w materii organicznej niż mineralnej. Zastanawiającym faktem jest odmienna zawartość rtęci w próbce nr 1 i 2 (tabela 15.) przy podobnej zawartości popiołu oraz siarki. Może to być spowodowane odmienną genezą rtęci w węglu kamiennym. W przypadku próbek nr 5 i 6 (tabela 15.) o zapopieleniu poniżej 13% można zauważyć niższą zawartość Hg, która nie przekracza 30 ppb.

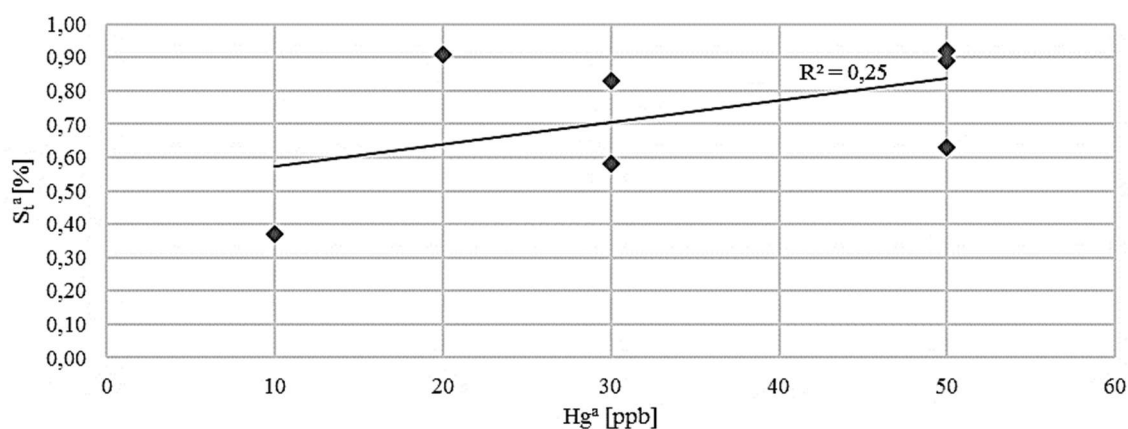
Ze względu na brak zakładu wzbogacania węgla nie przeprowadzono badań wzbogacalności, które mogłyby umożliwić określenie najkorzystniejszych parametrów pracy zakładu przeróbki mechanicznej [72]. Rysunki 11. i 12. przedstawiają wykresy zależności pomiędzy zawartością rtęci i popiołu. W przypadku znalezienia istotnej korelacji istniałaby możliwość wstępnego szacowania zawartości rtęci na podstawie wiedzy o występowaniu popiołu lub siarki. Ze względu na odmienny charakter próbki na wykresie nie wskazano pomiarów dotyczących skały płonnej.

Korelacja pomiędzy zawartością rtęci a popiołu jest istotna, gdyż współczynnik $R^2 = 0,69$. Wydaje się, że precyzyjne szacowanie zawartości Hg w węglu na podstawie popiołu nie jest w tym przypadku osiągalne. Wykres wskazuje na zewnętrzne pochodzenie rtęci w urobku, której zawartość rośnie wraz z zanieczyszczeniem skałą płonną.



Rysunek 11. Zależność pomiędzy zawartością rtęci a popiołu dla prób pobranych w ZG „Siltech” wraz ze współczynnikiem R^2 .

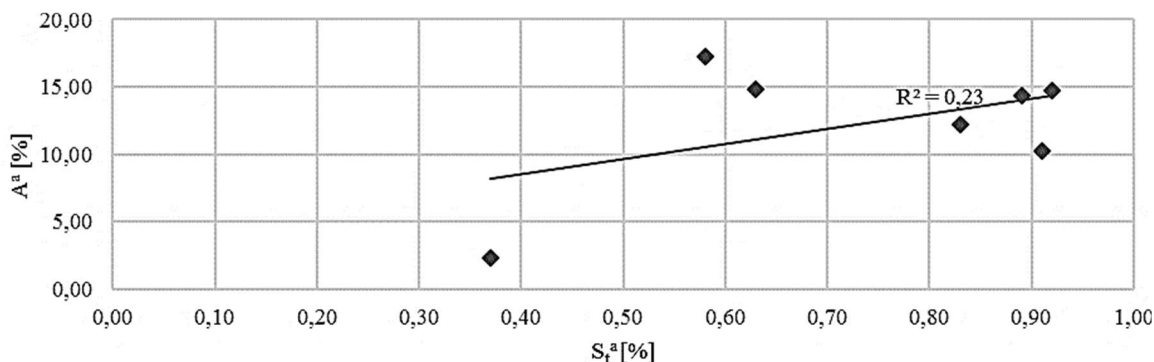
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 12. Korelacja pomiędzy zawartością rtęci a siarki dla prób pobranych w ZG „Siltech”.

Źródło: opracowanie własne.

Współczynnik determinacji $R^2 = 0,25$ wskazuje najprawdopodobniej na istnienie związku pomiędzy występowaniem rtęci i siarki. Jest to zdecydowanie mniejsza zależność niż wskazywana w literaturze w rozdziale 2.2. Z punktu widzenia budowy modelu procesu produkcji uwzględniającego redukcję rtęci – zawartość siarki nie mogłaby w przypadku stanowić użytecznej informacji dla sterowania procesem. Również korelacja pomiędzy zawartością siarki i popiołu przedstawiona na rysunku 13. nie pozwala na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków.



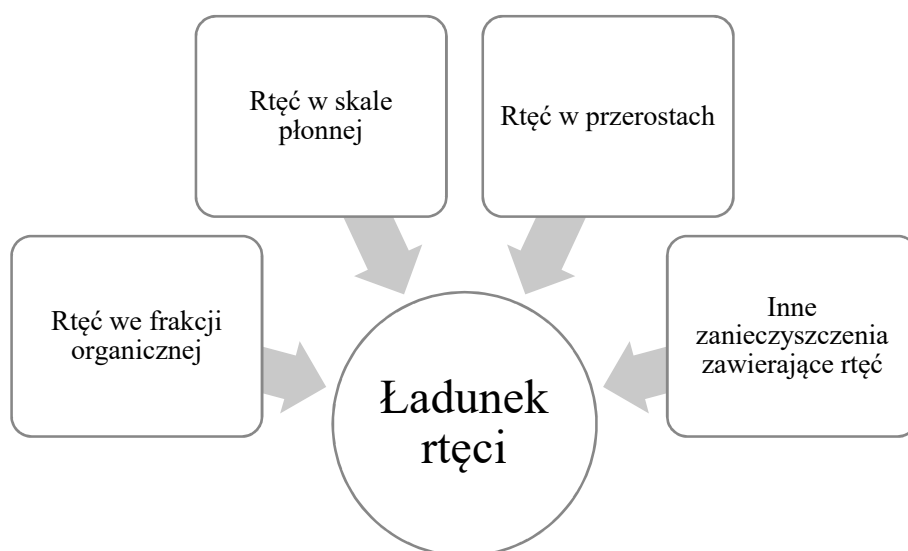
Rysunek 13. Korelacja pomiędzy zawartością siarki oraz popiołu dla prób pobranych w ZG „Siltech”.

Źródło: opracowanie własne.

Niska zawartość popiołu w koncentracji generalnie wiąże się z obniżoną zawartością siarki. W przypadku prowadzenia wzbogacania urobku standardowymi metodami przeróbki mechanicznej najpewniej istniałaby możliwość obniżenia jej zawartości w koncentracji.

W świetle badań pilotażowych można wyciągnąć następujące wnioski, które posłużyły do uszczegółowienia badań nad potencjałem redukcji wybranych zanieczyszczeń:

- w przypadku pokładu 508 bardzo niskie zapopielenie urobku jest tożsame z ograniczoną zawartością rtęci w urobku $R^2 = 0,69$,
- korelacja rtęci oraz siarki jest niska $R^2 = 0,25$ i nie daje podstaw do prognozowania na tej podstawie zawartości rtęci,
- węgiel gruby zawiera ograniczoną ilość zanieczyszczeń, co jest zgodne z badaniami literaturowymi w tym zakresie [49],
- wzbogacanie nadawy umożliwiłoby zmniejszenie zawartości rtęci znajdującej się w skałach o wyższej gęstości niż węgiel kamienny, ładunek rtęci w węglu surowym może pochodzić z źródeł wskazanych na rysunku 14.



Rysunek 14. Pochodzenie ładunku rtęci w węglu handlowym.

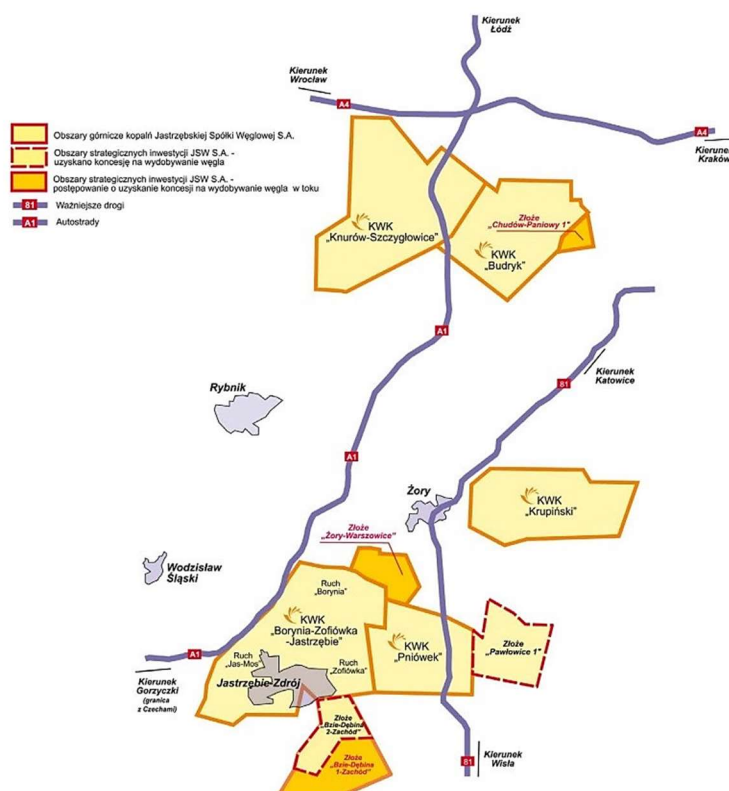
Źródło: opracowanie własne.

Badania wskazały na znaczący potencjał redukcji zanieczyszczeń w węglu kamiennym jeszcze na etapie jego produkcji. Wnioski należy uważać za wskazówki do dalszego postępowania, nie zaś uniwersalne zalecenia przemysłowe. Następnym etapem była ocena skuteczności redukcji wybranych zanieczyszczeń na etapie procesów przeróbki mechanicznej węgla. Na tym etapie zwrócono uwagę na rozproszenie rtęci w górotworze.

W Polsce całkowitemu oczyszczaniu poddaje się praktycznie wyłącznie węgiel koksujący, którego dominującym producentem na polskim rynku jest Jastrzębska Spółka Węglowa SA. W pozostałych spółkach wydobywczych zakłady mechanicznej przeróbki węgla kamiennego prowadzą produkcję zróżnicowanych sortymentów przeznaczonych dla odbiorców przemysłowych lub indywidualnych. Żaden z zakładów górniczych spoza JSW SA nie wytwarza więcej niż kilkadziesiąt procent węgla koksującego spośród ogółu wydobywania. Z wyżej wymienionych powodów podjęto decyzję o przeprowadzeniu szczegółowych badań w omawianym przedsiębiorstwie [127].

2.3. Jastrzębska Spółka Węglowa SA – badania produktów handlowych

Jastrzębska Spółka Węglowa SA powstała 1 kwietnia 1993 roku na bazie 7 niezależnych przedsiębiorstw górniczych należących niegdyś do Rybnicko-Jastrzębskiego Gwarectwa Węglowego. Spółka jest największym producentem węgla typu 35 (hard) w Europie. Grupa skupia przedsiębiorstwa branży wydobywczej, energetycznej, koksowniczej oraz pokrewnych. W 2011 roku spółka została częściowo sprywatyzowana poprzez emisję akcji na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie [129]. Rysunek 15. przedstawia obszary górnicze JSW SA ulokowane w 3 rejonach południowo-zachodniej polskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.



Rysunek 15. Obszary górnicze Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA.

Źródło: [www.jsw.pl].

Na koniec 2015 roku spółka zatrudniała około 24 tys. pracowników przy wydobyciu sięgającym 9,9 mln Mg węgla koksującego oraz 4 mln Mg energetycznego. Na skutek spadku cen węgla oraz dużej ilości inwestycji zwłaszcza zakupu od Kompanii Węglowej KWK „Knurów-Szczygłowice” JSW przeżywa duże trudności finansowe. Pomimo wdrożenia planów oszczędnościowych przyszłość przedsiębiorstwa pozostaje niepewna. W najbliższym okresie spółkę czekają najprawdopodobniej istotne działania restrukturyzacyjne zmierzające do minimalizacji strat. Doniesienia medialne dotyczą przede wszystkim zamiarów władz JSW SA obejmujących sprzedaż aktywów niezwiązanych jak i związanych z eksploatacją złóż, redukcji zatrudnienia, zwiększenie udziału węgla koksującego w ogólnej sprzedaży. Spółka w nieznacznym procencie prowadzi sprzedaż węgla na potrzeby indywidualnych odbiorców.

W 2016 roku w skład spółki wchodziło 5 samodzielnych zakładów górniczych przedstawionych szczegółowo w tabeli 16. Zakłady górnicze rejonu Jastrzębia-Zdroju

produkują niemal wyłącznie węgiel koksujący. W zależności od parametrów jakościowych węgiel z pozostałych zakładów górniczych może być sprzedawany na potrzeby zakładów energetycznych (np. drobne sortymenty KWK „Krupiński”, które nie spełniają wymagań branży koksowniczej).

Tabela 16. Charakterystyka zakładów górniczych Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA
wg danych z 31 grudnia 2014.

Zakład	Borynia-Zofiówka-Jastrzębie	Budryk	Knurów-Szczygłowice	Krupiński	Pniówek
Ilość ruchów	3	1	2	1	1
Typ węgla	35.1, 35.2	34.2	34.1, 34.2	34.1, 34.2	35.1
Sprzedaż węgla koksującego [%]	96,2	29,9	58,8	35,5	99,1
Wydobycie dobowe (netto) [Mg]	9 600 10 300 6 700	12 000	15 000	8 500	11 600
Zasoby operatywne [mln Mg]	33,8 + 104,2 + 28,2	241,7	164 + 181,7	80,9	160,5
Rok rozpoczęcia eksploatacji w obszarze	1971 1969 1962	1994	1910 1961	1983	1975
Model zakładu przerobczego	PMK Płuczka cieczy ciężkiej + osadzarki + flotacja	PMK Osadzarki + flotacja	PMK Płuczka cieczy ciężkiej + osadzarki + flotacja	PMK Osadzarki + flotacja	PMK Płuczka cieczy ciężkiej + osadzarki + flotacja

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [34, 127, 129]

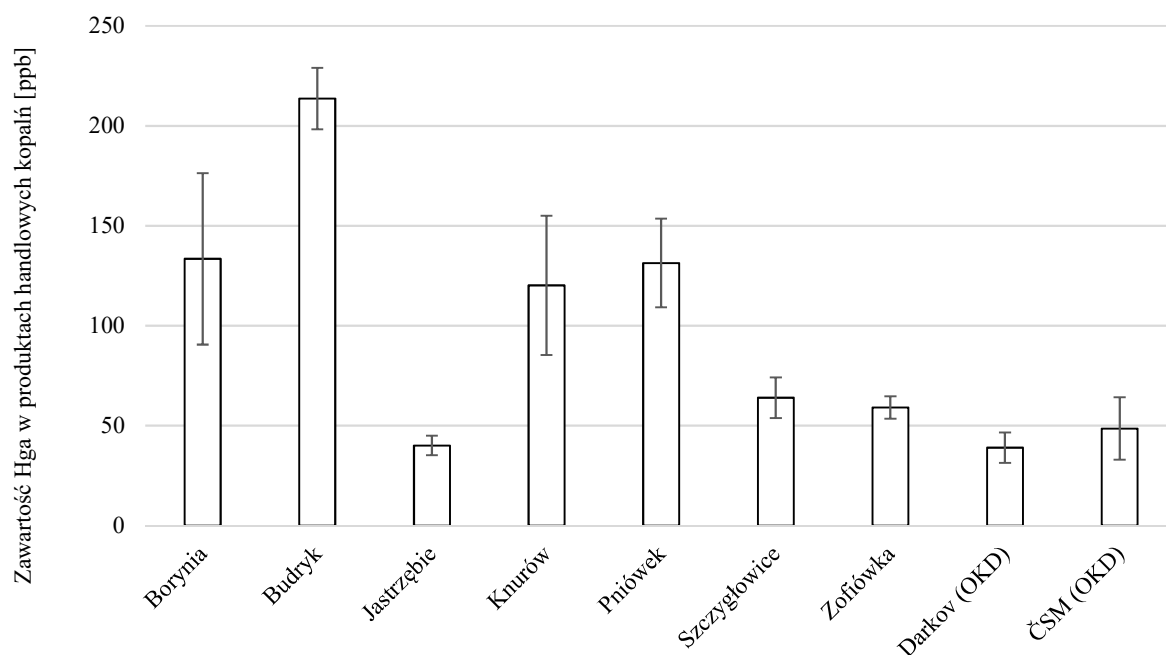
Największym centrum wydobywczym spółki jest powstała 1 stycznia 2013 roku kopalnia zespólna „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” złożona z wcześniejszych trzech niezależnych podmiotów. W najbliższych latach planuje się całkowite przeniesienie przeróbki węgla kamiennego do Ruchu „Zofiówka” oraz stopniową koncentrację produkcji w jego polu górniczym. Do czasu całkowitego przeniesienia produkcji do Ruchu „Zofiówka” każdy z oddziałów można traktować jako osobny zakład. Względna jednorodność zakładów górniczych JSW SA uzasadnia wybór spółki jako przedsiębiorstwa właściwego dla celów badania problematyki zanieczyszczeń w węglu kamiennym oraz ich redukcji.

Badania produktów handlowych w ramach projektu „Opracowanie bazy danych zawartości rtęci w krajowych węglach, wytycznych technologicznych jej dalszej redukcji wraz ze zdefiniowaniem benchmarków dla krajowych wskaźników emisji rtęci – Baza Hg” dotyczyły wszystkich zakładów górniczych JSW SA wydobywających węgiel koksujący, obejmowały oznaczenie: wilgoci, popiołu, części lotnych, wartości opałowej, węgla całkowitego, wodoru, siarki, chloru, rtęci oraz właściwości koksotwórczych. Dodatkowo przeprowadzono porównawcze badania produktów zakładów górniczych „Darkov” oraz „ČSM” – należących do czeskiego koncernu OKD, który prowadzi eksploatację w czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Tabela 17. zawiera wyniki dotyczące zawartości rtęci w węglu handlowym przeznaczonym do koksowania. Pełen zakres analizy zawarty jest w załączniku 1. Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 17. opracowano wykres średnich zawartości rtęci w produktach handlowych wraz z przedziałami ufności średnich dla poziomu prawdopodobieństwa 95% (rysunek 16.).

Tabela 17. Badania węgla handlowego JSW SA oraz OKD a.s.

Zakład górniczy (ruch)	n	Hg ^a min. [ppb]	Hg ^a maks. [ppb]	$\bar{x}$ Hg ^a [ppb]	Hg ^a Odchylenie standardowe [ppb]	$\bar{x}$ A ^a [%]	Rozstęp A	$\bar{x}$ S _r ^a [%]	Rozstęp S _r ^a
Borynia	5	78,9	167,4	133,5	33,4	8,6	2,2	0,63	0,06
Budryk	4	200,1	224,2	213,7	9,6	26,4	9,5	0,99	0,17
Jastrzębie	6	33,2	47,4	40,1	4,5	7,5	2,2	0,49	0,09
Knurów	10	61,1	182,6	120,2	46,9	15,3	21,2	0,72	0,23
Pniówek	6	103,6	163,6	131,4	20,3	12,5	3,2	0,65	0,07
Szczygłowie	11	43,3	88,2	64	14,6	14,6	22,4	0,61	0,38
Zofiówka	6	51,9	64,8	59,1	5,1	6,6	1,5	0,48	0,09
Darkov (OKD)	6	30,8	47,6	39	6,9	7,3	1,1	0,39	0,01
ČSM (OKD)	5	30,6	62,3	48,6	12,1	5,6	0,2	0,46	0,1

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].



Rysunek 16. Średnie zawartości w produktach handlowych zakładów górniczych – słupki błędów wskazują poziom ufności dla 95 % prawdopodobieństwa.

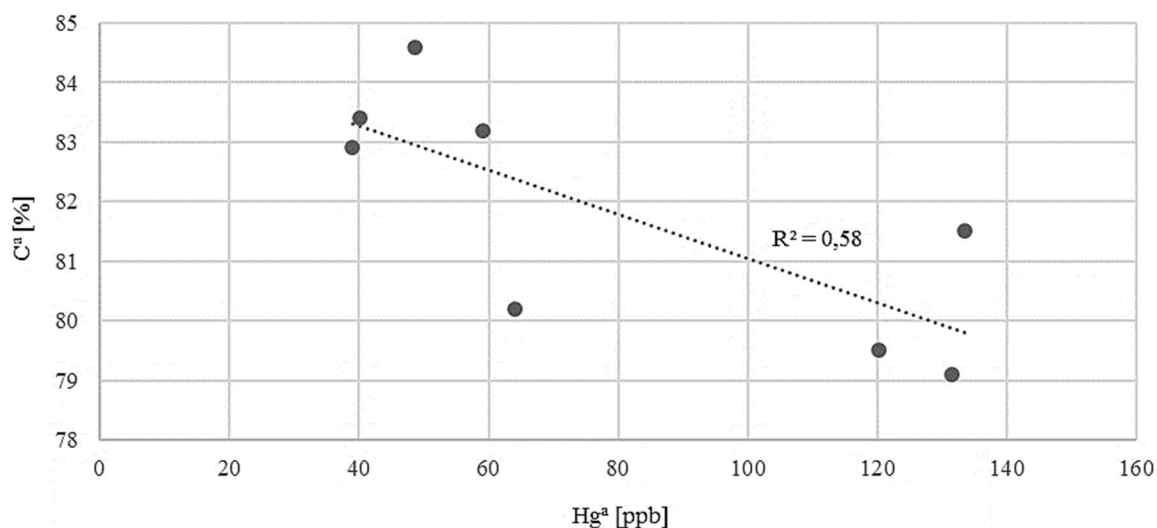
Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

Węgiel handlowy pochodzący z zakładów wzbogacania „Jastrzębie”, „Zofiówka” cechują się niską zawartością rtęci oraz niewielkim współczynnikiem jej zmienności wynoszącym do 11%. Podobną charakterystykę produktu handlowego posiadają czeskie zakłady górnicze „Darkov” i „ČSM”. Pomimo eksploatacji pokładów tej samej serii produkt handlowy Ruchu „Borynia” zawiera znacznie więcej rtęci – średnio 133,5 ppb przy współczynniku zmienności wynoszącym 26%. Prawdopodobnym powodem występowania dużej zmienności zawartości rtęci może być pobór prób spośród produktu handlowego pochodzącego z różnych pokładów. Produkty KWK „Pniówek” cechują podobną zawartością rtęci.

W produkcji KWK „Knurów-Szczygłowie” występują znaczące wahania zawartości rtęci od 61,1 do 182,6 ppb (Ruch „Knurów”) oraz 43,3 do 88,2 ppb (Ruch „Szczygłowie”). Należy jednak zaznaczyć, że pobrany węgiel handlowy z Ruchu „Knurów” zawierał średnio 15,3% popiołu, jednak rozstęp wynosił aż 21,2%. W przypadku „Szczygłowie” – średnio

14,6%, a rozstęp 22,4%. Rozstęp zawartości siarki wynosi odpowiednio 0,23% oraz 0,38%. Spośród zakładów górniczych wysoką zawartością Hg w produkcie handlowym cechuje się KWK „Budryk” przy średniej zawartości wynoszącej 213,7 ppb oraz współczynnika zmienności wynoszącym 5%. Zasiarczenie wynosi średnio około 1%, natomiast zawartość popiołu w badanym węglu handlowym jest bardzo wysoka – wynosi średnio 26,4%. Parametry tego produktu uniemożliwiają jego zastosowanie w koksownictwie, jednakże może zostać zastosowany w energetyce lub ciepłownictwie.

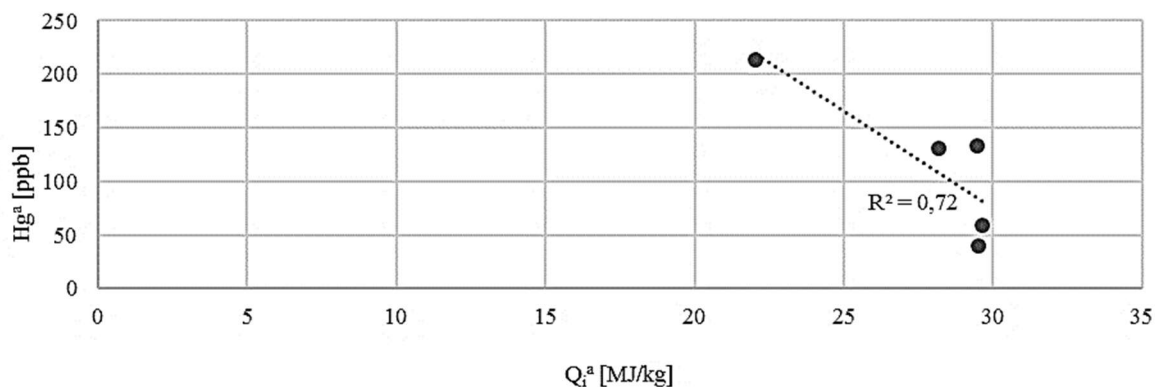
Korzystając z danych zawartych w rozszerzonej tabeli wyników analizy (Załącznik 1.) dokonano próby znalezienia zależności umożliwiających prognozowanie występowania danych zanieczyszczeń w węglu handlowym. Szczególną uwagę skupiono na parametrach mających istotne znaczenie dla prowadzenia procesów przeróbki mechanicznej. Z uwagi na brak pomiarów wszystkich parametrów fizyko-chemicznych w węglu handlowym – część wykresów opiera się na ograniczonym zasobie danych. Pierwszą z badanych zależności była zawartość węgla całkowitego oraz rtęci w produkcie handlowym przedstawiona na rysunku 17. Wykres przedstawia dodatkowo współczynnik determinacji R dla dwóch zmiennych.



Rysunek 17. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości rtęci oraz węgla całkowitego w produkcie handlowym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

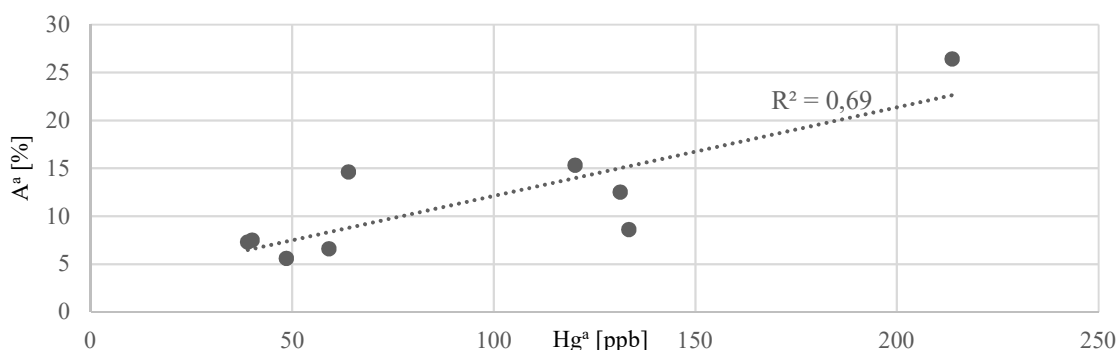
Współczynnik determinacji $R^2 = 0,58$ wskazuje na mniejszą zawartość rtęci w koncentratkach o wyższej zawartości węgla pierwiastkowego. Stopień uwęglenia pokładu wpływa na migrację związków Hg do frakcji mineralnej, co jest korzystnym zjawiskiem z punktu widzenia standardowych metod wzbogacania węgla kamiennego. Wyższa zawartość węgla całkowitego w produkcie handlowym jest również oznaką głębszego wzbogacania przy surowcu pochodzącego z tej samej serii pokładów. Kolejną badaną zależnością była zawartość rtęci oraz popiołu – kluczowego parametru handlowego węgla koksujących. Rysunek 18. zawiera wykres wartości średnich popiołu oraz rtęci dla wszystkich badanych produktów handlowych.



Rysunek 18. Współczynnik determinacji R^2 dla popiołu i rtęci.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

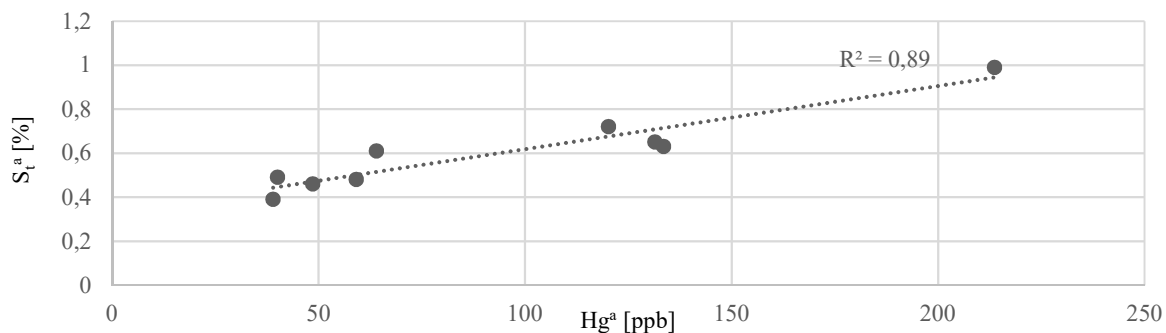
Współczynnik determinacji $R^2 = 0,69$ oznacza wzrost zawartości rtęci wraz z zapopieleniem produktu handlowego. Niską zawartością popiołu oraz rtęci cechują się zwłaszcza produkty handlowe zakładów rejonu Jastrzębia-Zdroju oraz Karwiny w Czechach. Odstający wynik KWK „Budryk” dotyczył węgla handlowego o dużym zapopieleniu – trudno powiedzieć jaką zawartością rtęci cechowałby się po przeprowadzeniu głębokiego wzbogacania. Podobne wnioski można wyciągnąć z wykresu przedstawionego na rysunku 19. przedstawiającego zależność pomiędzy wzrostem wartości opałowej a zawartością rtęci.



Rysunek 19. Współczynnik determinacji R^2 dla wartości opałowej i rtęci.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

Współwystępowanie rtęci i siarki było przedmiotem wielu badań. W przypadku koncentratów węgla koksującego wydaje się, że istnieje istotna korelacja pomiędzy ich zawartością, co jest pokazane na rysunku 20.



Rysunek 20. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości siarki i rtęci.

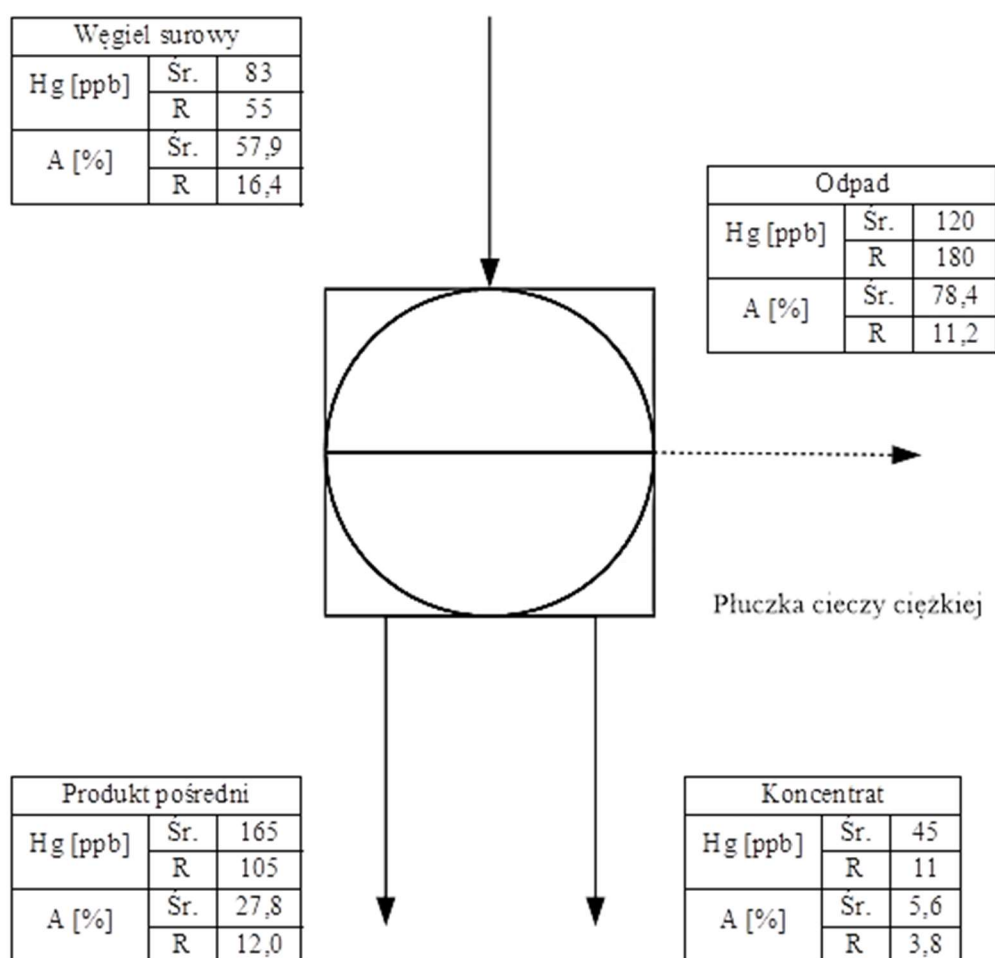
Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

Silna korelacja pomiędzy zmiennymi na rysunku 20. pozwala stwierdzić, że koncentraty o niskim stężeniu siarki zawierają stosunkowo niewielkie ilości rtęci.

Należy pamiętać, że badania dotyczą węgla handlowego, przez co trudno jest porównywać potencjał redukcji danych zanieczyszczeń. Wydaje się, że silnie uwęglone pokłady koksujące zawierają znacznie mniej rtęci oraz siarki. Ostateczny ładunek rtęci i siarki w węglu handlowym zależy również od wtórnych zanieczyszczeń urobku. Następnym etapem badań była analiza migracji zanieczyszczeń w procesach produkcji węgla handlowego.

2.4. Ocena redukcji zanieczyszczeń w procesach wzbogacania

W zakładach Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA w ramach projektu „Opracowanie bazy danych zawartości rtęci w krajowych węglach, wytycznych technologicznych jej dalszej redukcji wraz ze zdefiniowaniem benchmarków dla krajowych wskaźników emisji rtęci – Baza Hg” przeprowadzono kompleksowe badania skuteczności procesów w redukcji związków tego pierwiastka w odniesieniu do zmniejszenia zawartości popiołu. Pomiary zawartości popiołu i rtęci w węglu zostały wykonane we wszystkich zakładach Jastrzębskiej Spółki Węglowej. Na rysunku 21. przedstawiono wejście i wyjście procesu wzbogacania w cieczy ciężkiej z uwzględnieniem średnich zawartości rtęci i popiołu oraz rozstępu skrajnych wartości w nadawie oraz w produktach i odpadach.



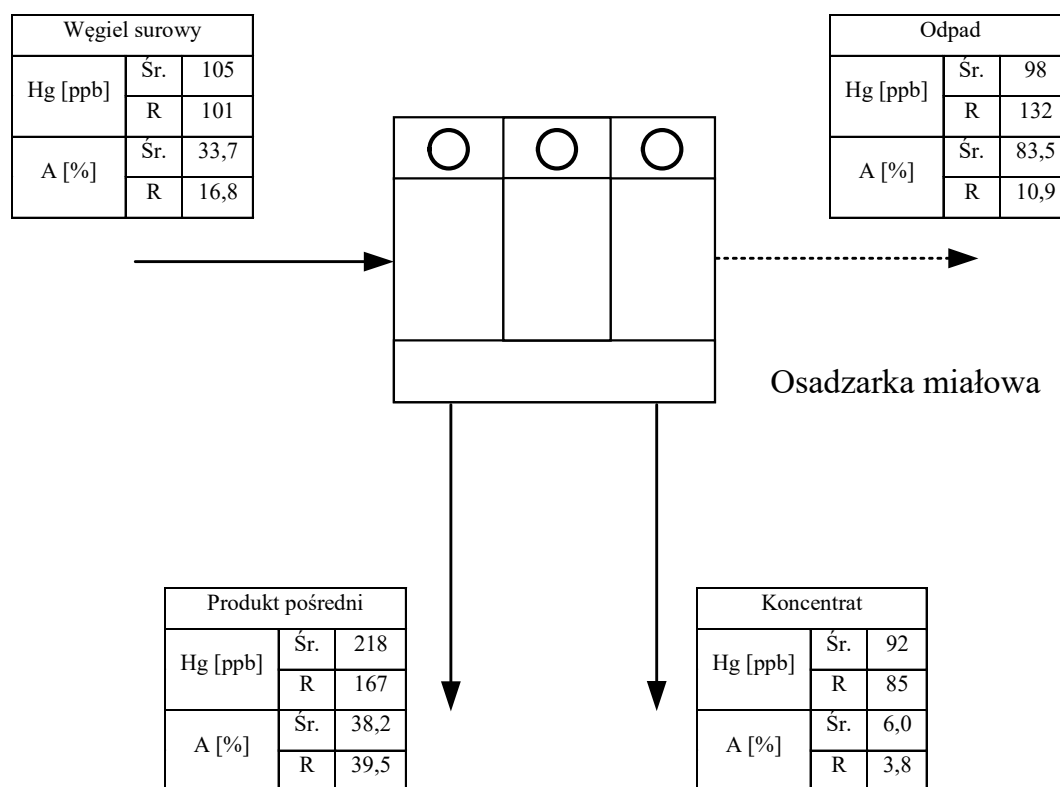
Rysunek 21. Migracja zanieczyszczeń w procesie wzbogacania w cieczy ciężkiej.

Wyniki dla próbek w stanie analitycznym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

W przypadku nadawy do płuczki cieczy ciężkiej występuje wysokie zapopielenie wynoszące średnio aż 57,9% spowodowane dużą ilością grubych ziarn skały płonnej. Znaczna różnica gęstości pomiędzy skałą płonną jest powodem dobrej skuteczności procesu separacji w cieczy ciężkiej – koncentrat zawiera średnio 5,6% popiołu. W zależności od zakładu górniczego prowadzi się wzbogacanie trój- lub dwuproduktowe. Produkt pośredni jest stosowany w energetyce lub częściowo dozowany do podstawowego sortymentu handlowego. Zawartość rtęci wyniosła średnio 83 ppb w węglu surowym, w koncentracie zaś średnio 45 ppb przy bardzo niskiej wartości rozstępu pomiędzy minimalnym a maksymalnym stężeniem. Wyższe stężenie Hg występuje w odpadach i w półprodukcie – średnio 120 ppb oraz 165 ppb. Duży rozstęp może sugerować niejednorodne występowanie rtęci w skale płonnej. Ze względu na niskie wyniki pomiarów rtęci w koncentracie płuczki cieczy ciężkiej wydaje się, że jest to proces skuteczny dla zmniejszenia jej ładunku.

Osadzarki w JSW SA występują w odmianach dwu- oraz trójproduktowych. Rysunek 22. zawiera wyniki pomiarów migracji zanieczyszczeń przeprowadzoną w procesach wzbogacania w osadzarkach.



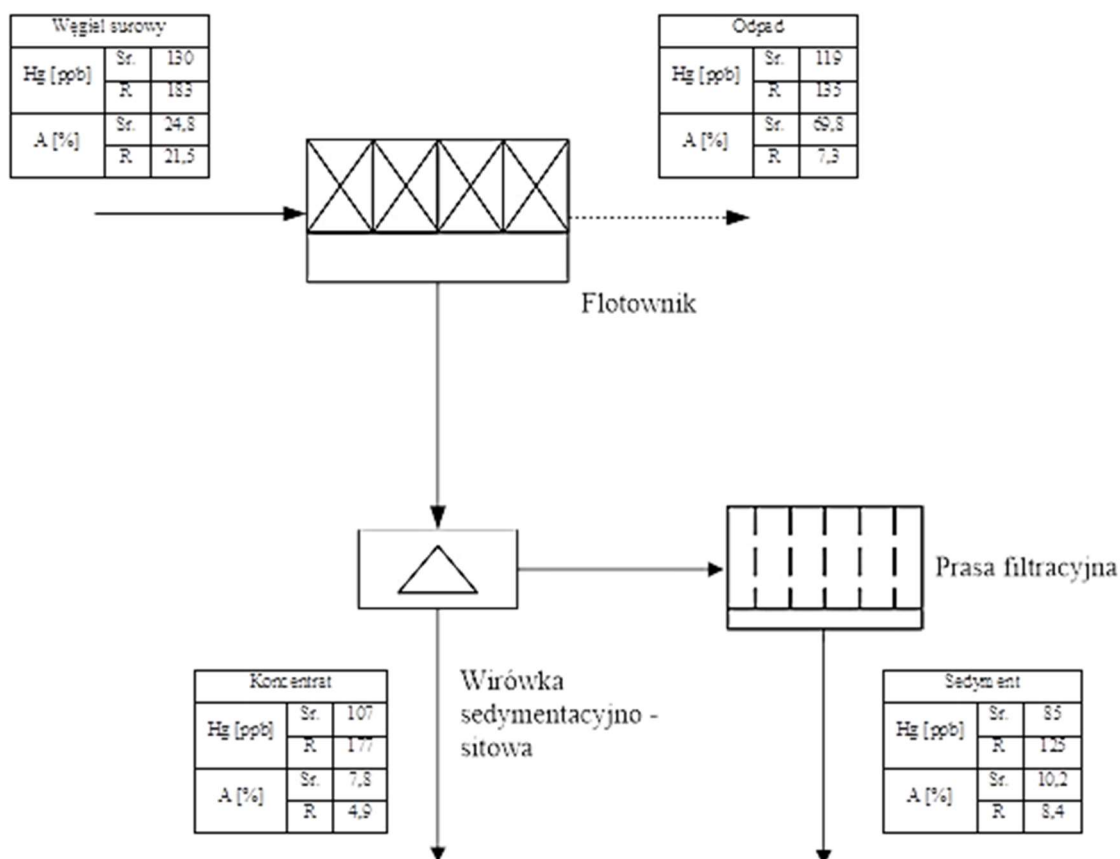
Rysunek 22. Migracja zanieczyszczeń w procesie wzbogacania w osadzarkach.
Wyniki dla próbek w stanie analitycznym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

Osadzarki skutecznie zmniejszają zawartość popiołu w koncentracie w stosunku do nadawy średnio z 33,7% do 6%. Separacja produktu pośredniego pozwala na uzysk surowca o zapopieleniu wynoszącym średnio 38,2% – trudnego do wykorzystania w produkcji węgla dla koksownictwa. Zawartość rtęci w produkcie pośrednim jest szczególnie wysoka – średnio aż 218 ppb, zaś w odpadzie wynosi 98 ppb. Rozstęp wartości w obu przypadkach jest znaczący

– 167 ppb oraz 132 ppb, co również potwierdza istnienie różnych formy występowania tego pierwiastka. Wydaje się, że wzbogacanie w osadzarkach nie jest tak skuteczne jak w przypadku płuczek cieczy ciężkiej, co jest spowodowane wyższą imperfekcją separacji.

Wzbogacanie flotacyjne należy rozpatrywać łącznie z układem odwadniania wyposażonego w wirówki sedymentacyjno-sitowe lub suszarnie bębnowe. W niektórych zakładach przeróbki mechanicznej prowadzących odwadnianie w wirówkach występują także instalacje odzysku zawiesiny wodno-mułowej. Rysunek 23. przedstawia analizę migracji zanieczyszczeń w tym układzie.



Rysunek 23. Migracja zanieczyszczeń podczas wzbogacania flotacyjnego wraz z odwadnianiem oraz odzyskiem sedymentu. Wyniki dla próbek w stanie analitycznym.

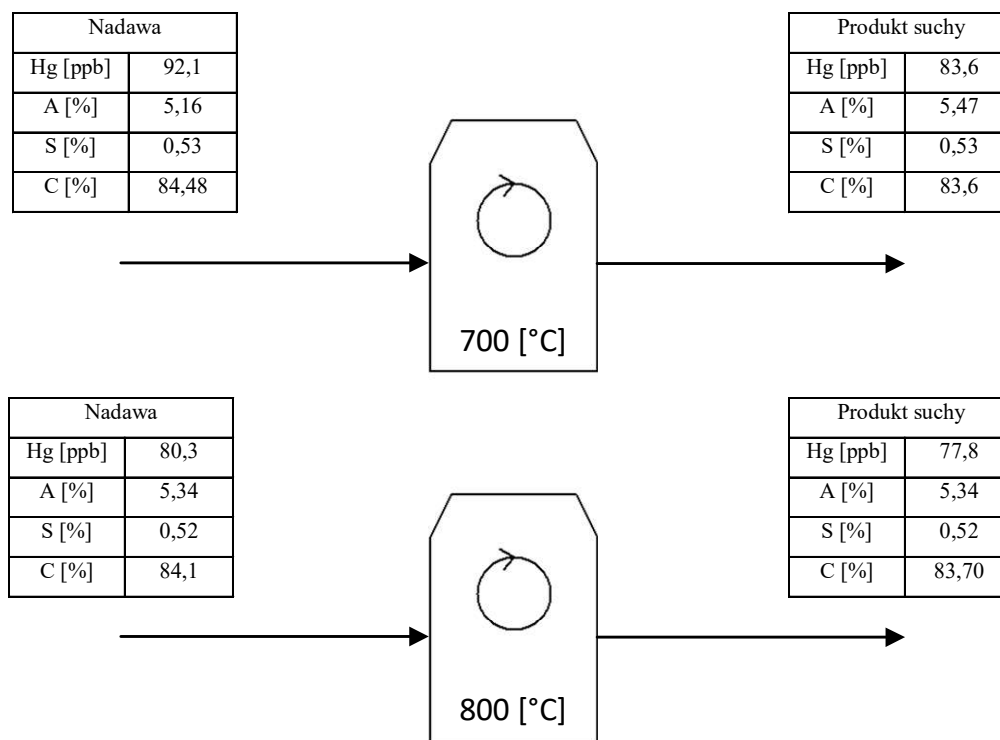
Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

Najdrobniejsze ziarna wzbogacane w procesach flotacji wstępnie wzbogacone w poprzednich procesach cechują się mniejszą zawartością popiołu – średnio 24,8%. Odpady flotacyjne zawierają średnio około 70% popiołu oraz 119 ppb rtęci przy rozstępie wynoszącym aż 135 ppb. Koncentrat cechuje się dość wysoką zawartością rtęci – średnio 107 ppb przy rozstępie wynoszącym aż 177 ppb. Mimo, iż sedymant zawiera większą ilość popiołu – średnio 10,2% – stężenie rtęci spada, co jest spowodowane najpewniej jej nagromadzeniem w substancji organicznej.

Dodatkowy element badań stanowił pomiar zmienności zawartości rtęci w procesach termicznego suszenia flotokoncentratu, których nie zalicza się do operacji wzbogacania. Obecnie rozwiązanie to jest stosowane jedynie w dwóch zakładach przeróbki mechanicznej w Polsce: KWK „Pniówek” oraz KWK „Krupiński”. Technologia ta ma charakter zanikający

ze względu na uciążliwość dla środowiska wynikającą z emisji pyłów oraz gazów do atmosfery, jak również zagrożenie pożarem i wybuchem występujące podczas pracy.

Pomiary zostały przeprowadzone we wrześniu 2015 roku przez autorów. Miały miejsce w suszarni zakładu przeróbki mechanicznej KWK „Pniówek”. Obiekt wyposażony jest w 4 bębny zasilane spalinami powstającymi w wyniku spalania pyłu węglowego odzyskiwanego w procesie suszenia. Ze względu na wysokie wejściowe temperatury spalin w bębnie założono, że zawartość rtęci w produkcie suchym może ulec zmianie z powodu niskiej temperatury wrzenia tego pierwiastka. Rysunek 24. zawiera porównanie zawartości zanieczyszczeń we flotokoncentracie w wyniku suszenia termicznego.



Rysunek 24. Badania zmian zawartości zanieczyszczeń w procesach termicznego suszenia flotokoncentratu – pomiary przedstawione w stanie analitycznym.

Źródło: opracowanie własne.

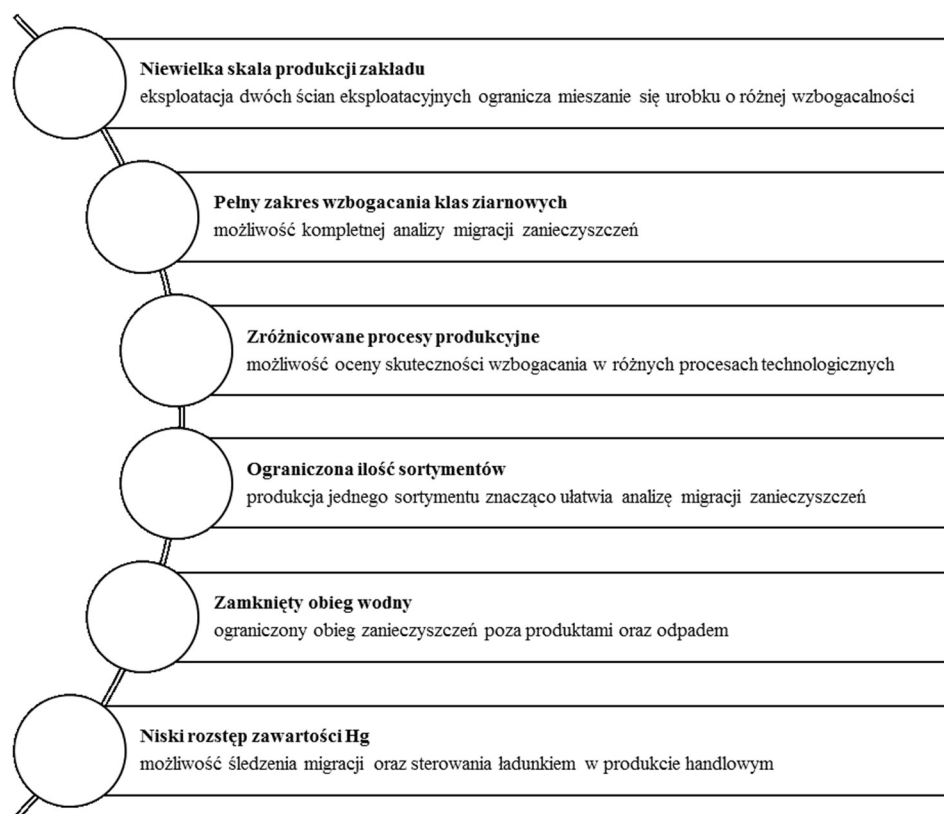
W procesach termicznego suszenia flotokoncentratu dochodzi do nieznacznego zmniejszenia zawartości rtęci w produkcie prawdopodobnie na skutek wydmuchu najdrobniejszych cząstek w strumieniu spalin. Nie jest zauważalny związek pomiędzy temperaturą spalin na wejściu bębna a zmniejszenia zawartości rtęci lub siarki oraz węgla całkowitego. Wilgoć przemijająca w wyniku procesu zmniejsza się z około 24% w nadawie do 12-14% w produkcie suchym. Najprawdopodobniej wysoka zawartość wilgoci w produkcie mokrym uniemożliwia parowanie rtęci w procesie suszenia. Z punktu widzenia zmiany ładunku rtęci oraz siarki, proces termicznego suszenia flotokoncentratu nie wywołuje istotnych zmian. Badania zmian zawartości rtęci w procesach suszenia flotokoncentratu zostały wykonane dla porównania do prób usuwania rtęci metodami termicznymi, których skuteczność została udowodniona w warunkach laboratoryjnych [120].

Kompleksowa i spójna ocena w oparciu o wyniki zawartości rtęci i popiołu dla celów redukcji zanieczyszczeń jest bardzo trudna. Ze względu na duże różnice w zawartości

zanieczyszczeń oraz dominujących form ich występowania badania należy zawęzić do jednego zakładu górniczego. Wydaje się, że skuteczność wzbogacania w cieczach ciężkich w odniesieniu do rtęci jest ogólnie wysoka, natomiast w osadzarkach oraz flotacji jest silnie zróżnicowana. Budowa modelu procesu produkcji węgla kamiennego uwzględniającego redukcję zanieczyszczeń wydaje się niemożliwa w oparciu o dane pochodzące z różnych zakładów górniczych. Z tego powodu uznano, że należy wybrać jeden zakład, w którym zostanie przeprowadzona szczegółowa analiza.

2.5. Ruch „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” – argumentacja wyboru zakładu do potrzeb budowy modelu

W Jastrzębskiej Spółce Węglowej występują 2 odmiany zakładów przeróbki mechanicznej węgla koksującego: wyposażone w płuczki cieczy ciężkiej dla wzbogacania klas ziarnowych powyżej 20 mm lub osadzarki ziarnowe. Drugie rozwiązanie było wdrażane w Polsce w nowszych kopalniach węgla kamiennego co jest widoczne w tabeli 16. (rozdział 2.3.). Praktyka przemysłowa wskazuje na niższą imperfekcję wzbogacania w cieczach ciężkich, jednakże procesy te są bardziej kłopotliwe ze względu na dużą złożoność maszyn oraz konieczność utrzymania systemu rekuperacji obciążnika [11]. Wyniki badań zaprezentowane w poprzednim rozdziale wydają się potwierdzać tą tezę. Dla celów budowy modelu procesu produkcji węgla uwzględniającego redukcję wybranych zanieczyszczeń wybrano Ruch „Jas-Mos” zespolej kopalni węgla kamiennego „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”, w oparciu o argumentację wskazaną na rysunku 25.



Rysunek 25. Argumentacja wyboru zakładu górniczego dla celów modelowania.

Źródło: opracowanie własne.

Budowa kopalni węgla kamiennego „Jastrzębie” rozpoczęła się w 1955 roku zgodnie z uchwałą Rady Ministrów o zapoczątkowaniu eksploatacji złóż węgla kamiennego w rejonie dzisiejszego miasta Jastrzębie-Zdrój. We wcześniejszych latach mimo wstępnego rozpoznania bogatych złóż węgla koksujących nie zdecydowano się na budowę zakładu górniczego w tym rejonie ze względu na szczególne zagrożenie metanowe. Dopiero rozwój techniki wentylacji pozwolił na uruchomienie wydobywania, które początkowo miało wynosić zaledwie 4 tys. Mg na dobę. W 1957 roku kilka kilometrów dalej rozpoczęto budowę podobnej kopalni „Moszczenica”, która została połączona z „Jastrzębiem” w 1963 roku a następnie rozdzielona w 1966 roku. W 1969 roku w KWK „Jastrzębie” uruchomiono płuczkę o planowanej wydajności 3,4 mln ton rocznie oraz flotację – 683 tys. ton rocznie. Flotokoncentrat był odwadniany w suszarni termicznej. W związku z rozwojem technik urabiania oraz wentylacji zwiększono wydobywanie do 10 Mg ton dziennie w 1974 roku [34].

W 1994 po utworzeniu Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA podjęto decyzję o powtórnym połączeniu KWK „Jastrzębie” oraz „Moszczenica”, w wyniku którego powstała KWK „Jas-Mos”. W 1999 Zarząd JSW SA podjął decyzję o likwidacji Ruchu „Moszczenica” ze względu na nieopłacalną eksploatację w rejonie filaru ochronnego miasta Jastrzębie-Zdrój oraz konieczność poniesienia znaczących środków na udostępnienie pola eksploatacyjnego „Gołkowice”. 1 stycznia 2013 roku utworzono zespólną kopalnię węgla kamiennego „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”. Stopniowo planuje się przeniesienie wzbogacania urobku do Ruchu „Zofiówka”, co teoretycznie ma nastąpić w 2018 roku. W tabeli 18. Przedstawiono podstawowe informacje dotyczące Ruchu „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”.

Tabela 18. Podstawowe informacje dotyczące Ruchu „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”.

Dane charakteryzujące Ruch „Jas-Mos” w 2016 roku	
Gminy leżące w obszarze górnictwa	Jastrzębie-Zdrój, Mszana, Godów
Rok rozpoczęcia wydobywania	1962
Pole górnicze	32,5 [km ²]
Poziomy wydobywcze	–400 , –600, –800 [m]
Ilość szybów	5 (wydobywczy, 2 zjazdowe, 2 wentylacyjno-materiałowe)
Odstawa urobku	Taśmowa
Wydajność zakładu przeróbki	13 200 [Mg/dzień przy pracy 16h]
Zapocielenie nadawy	15-30 [%]
Zatrudnienie własne	< 4000 os.
Wydobywany węgiel	Koksujący 35.2 B
Sortyment handlowy	0-20 mm

Źródło: opracowanie własne na podstawie [127].

Całość produkcji Ruchu „Jas-Mos” przeznaczona jest na potrzeby koksownictwa. Prowadzi się wzbogacanie węgla w całym zakresie klas ziarnowych. Dla celów analizy migracji zanieczyszczeń oraz budowy modelu ich redukcji – produkcja jednego sortymentu (0-20 mm) ułatwi wykonanie spójnego bilansu.

Zakład przeróbki mechanicznej KWK „Jas-Mos” prowadzi wzbogacanie w 3 klasach ziarnowych. Wydajność zakładu przekracza 13 200 Mg/dzień, co na obecną chwilę przekracza wydobywanie dobowe zakładu górniczego. Tabela 19. zawiera szczegółowy opis węzłów z parametrami maszyn i urządzeń zainstalowanych w zakładzie przeróbki mechanicznej Ruchu „Jas-Mos”.

Tabela 19. Szczegółowy opis zakładu przeróbki mechanicznej węgla Ruchu „Jas-Mos”.

Węzeł	Wyszczególnienie	Nazwa	Ilość	Wydajność [Mg/h]
Stacja przygotowania węgla	Przesiewanie wstępne	WK-1	2	1600
	Taśmy przebiecze	Ciała obce	2	
	Kruszenie i wzbogacanie	KB-2600/4000	2	
Klasyfikacja wstępna	Przesiewacz	WP	4	900
Płuczka zawieszinowa > 20 mm	Wzbogacalniki	DISA 3S (dwuproduktowa)	2	325
	Przesiewacze odwadniające	WP-1	6	
	Kruszarki koncentratu	UP 1000x1500	2	
	Ciecz ciężka	Magnetyt	-	
	Rekuperacja	MR-9/204 (podwójny)	1	
Płuczka osadzkowa 0,5-20 mm	Osadzarki	OM-18	2	475
	Sita OSO	φ 2800	3	
	Owadnianie koncentratu	WOW 1,3	3	
	Podnośniki kamienia	B-1000	2	
	Podnośniki przerostu	B-1000	2	
Flotacja < 0,5 mm	Flotowniki	IF-30W; IF100	1 1	140
	Odczynnik flotacyjny	Woda słona	-	
Odwadnianie flotokoncentratu	Wirówki sedimentacyjno- filtracyjne	Bird SB-6400	4	4
Gospodarka wodno- mułowa	Odmulniki Dorra – popłuczkowe	φ 25 m	3	-
	Odmulniki Dorra – poflotacyjne	φ 35 m	2	
	Osadniki betonowe	14000 m ³	1	
	Prasa komorowo- membranowa	GHT - 1500	1	

Źródło: opracowanie własne na podstawie [59, 133].

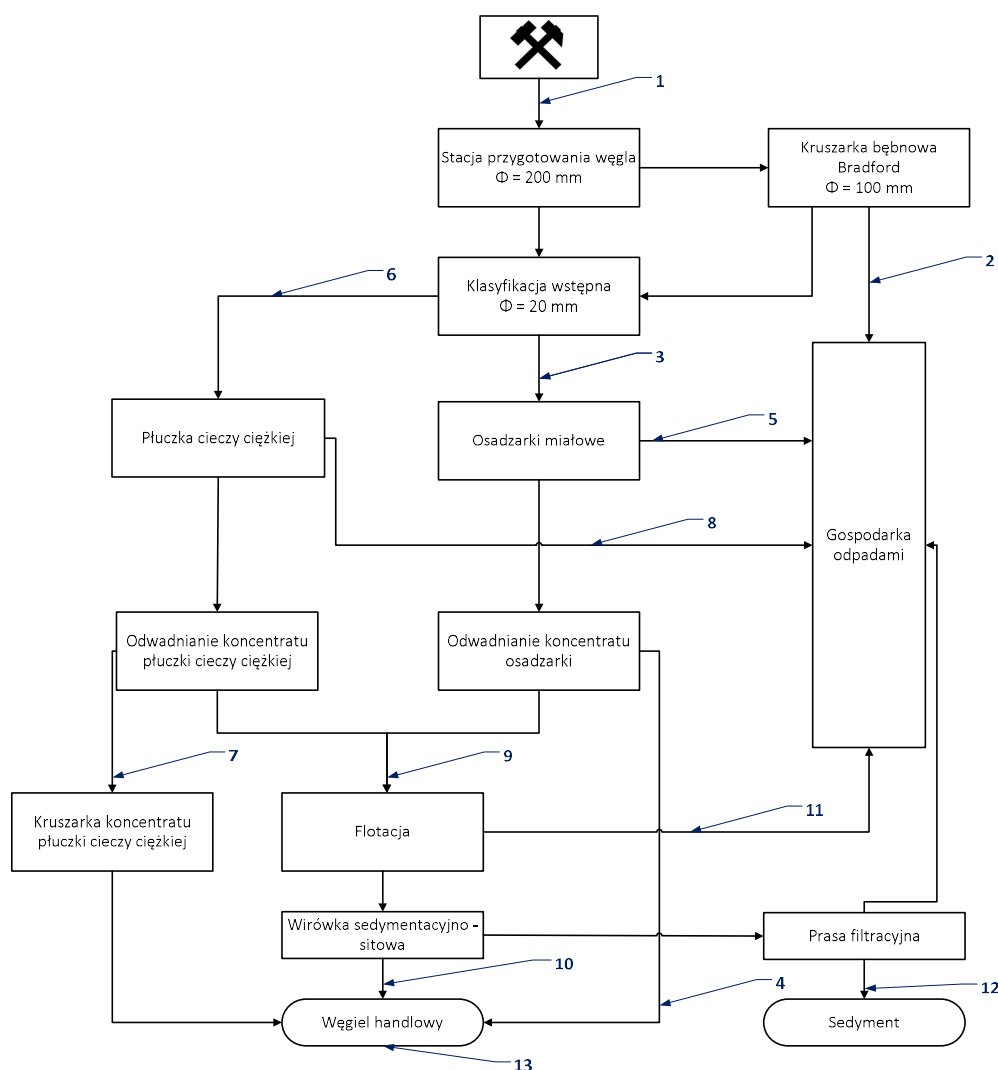
Ruch „Jas-Mos” posiada zakład przeróbki mechanicznej przeznaczony do wzbogacania węgla koksujących. W wyniku analizy ekonomicznej zrezygnowano w nim z trójproduktowego reżimu produkcji w płuczce cieczy ciężkiej oraz osadzkach. Decyzja była poprzedzona badaniami wzbogacalności nadawy oraz analizą ekonomiczną, która wykazała niską rentowność oddzielania półproduktów. Zakład był prekursorem wprowadzenia w Polsce wirówek sedimentacyjno-filtracyjnych dla celów odwadniania flotokoncentratu [58]. W zakładzie przeróbki mechanicznej tego ruchu prowadzone są wszystkie najczęściej spotykane procesy wzbogacania węgla kamiennego w Polsce. W zakładzie w 2011 zastosowano innowacyjną metodę odzysku części stałych zawiesziny wodno-mułowej zawierającej ziarna poniżej 25 μm z odwadniania flotokoncentratu za pomocą pras filtracyjnych. W związku z zamierzeniami zatrzymania przeróbki węgla w Ruchu „Jas-Mos” w ramach kopalni zespółonej nie przewiduje się znaczących inwestycji w zakładzie. Według ostatnich informacji uzyskanych w czasie opracowania monografii Ruch „Jas-Mos” definitywnie zakończy wydobywanie węgla w 2022 roku po czym nastąpi likwidacja zakładu. Część zakładu górniczego zostanie już wcześniej przekazana do Spółki Restrukturyzacji Kopalń. Przedłużenie żywotności zakładu górniczego wiązałoby się z koniecznością budowy nowej infrastruktury szybowej lub drażenia upadowej do pola rezerwowego „Gołkowice”. Przy aktualnych możliwościach inwestycyjnych spółki scenariusz wydaje się mało prawdopodobny.

Z punktu widzenia budowy modelu redukcji zanieczyszczeń Ruch „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” wydaje się optymalnym wyborem ze względu na rozbudowane

węzły technologiczne oraz niską zmienność zawartości rtęci w produkcie handlowym potwierdzoną badaniami.

2.6. Cykl życia zanieczyszczeń w produktach i odpadach górnictwa węgla kamiennego – próba wykonania bilansu

W celu wykonania bilansu zanieczyszczeń w produktach i odpadach zakładu przeróbki mechanicznej dokonano wyboru 13 punktów pomiarowych, w których zostały pobrane próby dla celów analitycznych. Plan przeprowadzenia badań został szczegółowo skonsultowany z pracownikami Głównego Instytutu Górniczego. Próby zostały pobrane zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-ISO 18283 [96].



Rysunek 26. Punkty pomiaru prób jakościowych w Ruchu „Jas-Mos”.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek powyżej (Rysunek 26.) przedstawia schemat poboru prób na wejściach i wyjściach procesów technologicznych zakładu przeróbki mechanicznej Ruchu „Jas-Mos”. Zgoda na przeprowadzenie badań została wydana przez Zarząd Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA w lipcu 2015 roku.

Pobór prób miał miejsce 8 września 2015 roku podczas zmiany roboczej B. Wykonany został przez autorów przy wsparciu pracowników zakładu. Na skutek awarii w ruchu zakładu górniczego w tamtej chwili wydobywanie węgla kamiennego było prowadzone tylko w jednej ścianie eksploatacyjnej, co mogło istotnie oddziaływać na wynik pomiaru. Sytuacja mogła wpłynąć na większą jednorodność nadawy, a przez to zmniejszyć wahania parametrów wzbogacalności.

Pomiary przeprowadzono na wejściach i wyjściach procesów, które wskazano na podstawie wcześniejszych badań literaturowych oraz własnych. Tabela 20. zawiera wyniki analizy fizyko-chemicznej pobranych prób nadawy, koncentratu oraz odpadów. Analiza chemiczno-techniczna została wykonana przez Laboratorium Analiz Odpadów Stałych Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach.

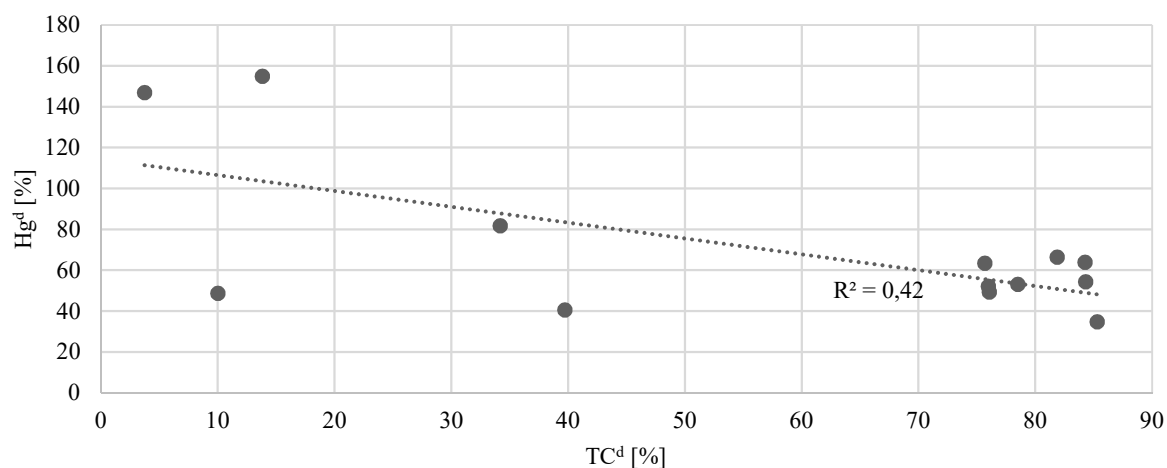
Tabela 20. Wyniki analizy fizyko-chemicznej prób pobranych w Ruchu „Jas-Mos” (stan analityczny suchy).

Lp.	Opis	Maksymalna wielkość ziarna [mm]	Hg ^d [ppb]	A ^d [%]	TC ^d [%]	S ^d [%]	H ^d [%]	Q ^d [kJ/kg]
1	Węgiel surowy (urobek)	200	52	14,27	76,00	0,31	4,18	29750
2	Odpad kruszarka Bradford	120 (min.)	147	87,74	3,74	0,03	-	-
3	Nadawa do osadzarki	20	64	14,54	75,68	0,34	-	-
4	Koncentrat z osadzarki	20	54	6,28	84,32	0,42	4,51	32900
5	Odpady z osadzarki	20	155	78,00	13,82	0,10	-	-
6	Nadawa do wzbogacalnika DISA	200	41	51,35	39,73	0,18	-	-
7	Koncentrat z DISA	200	35	5,36	85,32	0,34	4,46	33180
8	Odpady z DISA	200	49	83,59	10,03	0,09	-	-
9	Nadawa na flotację	0,5	49	14,33	76,07	0,41	-	-
10	Flotok koncentrat po odwadnianiu w wirówkach sedimentacyjno-sitowych	0,5	66	7,08	81,87	0,42	-	-
11	Odpady flotacyjne	0,5	82	54,77	34,19	0,41	-	-
12	Odzysk części stałych z zawiesiny wodno-mułowej (Prasy filtracyjne)	25 (μm)	53	11,56	78,50	0,40	4,25	30780
13	Produkt handlowy	20	64	5,99	84,27	0,49	4,50	32850

Źródło: opracowanie własne.

Uropek (lp. 1 tabela 20.) cechował się niską zawartością popiołu wynoszącą 14,27%, co mogło mieć związek z przestojem awaryjnym w podziemiach kopalni. Unieruchomienie części odstawy mogło spowodować zatrzymanie strumienia skały płonnej z robót udostępniających i wpływać na obecność popiołu w węglu surowym. Zawartość rtęci w węglu surowym wynosiła 52 ppb, natomiast siarki 0,31% (niska wartością w warunkach polskich [80]). Odpady z kruszarki Bradford (lp. 2 tabela 20.) zawierały znacznie więcej rtęci niż uropek (146,9 ppb). Zawartość rtęci w piaskowcu była dotychczas stwierdzona w badaniach pilotażowych w ZG „Siltech”.

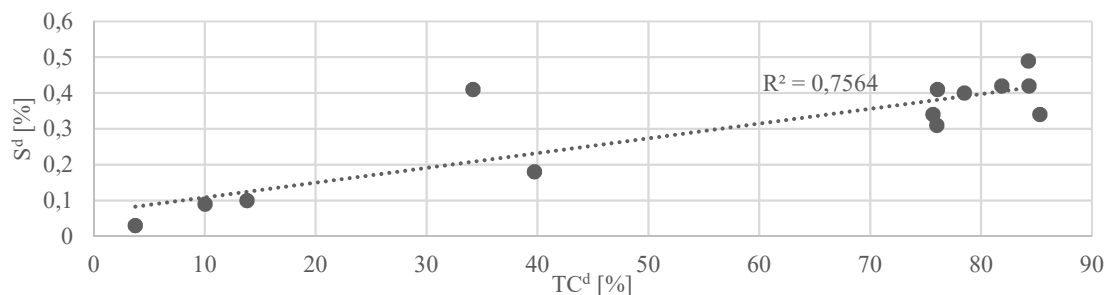
Odpady z osadzarki również cechują się znaczną zawartością rtęci (155 ppb) oraz niewielką siarki (0,1%). W przypadku odpadów z płuczki cieczy ciężkiej oraz odpadów flotacyjnych zawartość rtęci wyniosła 49 ppb oraz 82 ppb, natomiast siarki odpowiednio 0,09% oraz 0,41%. Koncentraty wzbogacania charakteryzują się zawartością rtęci od 35 ppb (płuczka cieczy ciężkiej) do 66 ppb w przypadku odwodnionego flotokoncentratu. Ze względu na brak trójproduktowego reżimu wzbogacania na podstawie badań trudno jest jednoznacznie określić czy rtęć skumulowana jest w skale płonnej czy w półprodukcie. Wyniki analiz posłużyły do opracowania wykresów zależności pomiędzy danymi parametrami fizyko-chemicznymi, które zostały zawarte na rysunkach 27-32. Rysunek 27. przedstawia zależność pomiędzy zawartością węgla całkowitego i rtęci.



Rysunek 27. Współczynnik determinacji R^2 dla węgla całkowitego i rtęci.

Źródło: opracowanie własne.

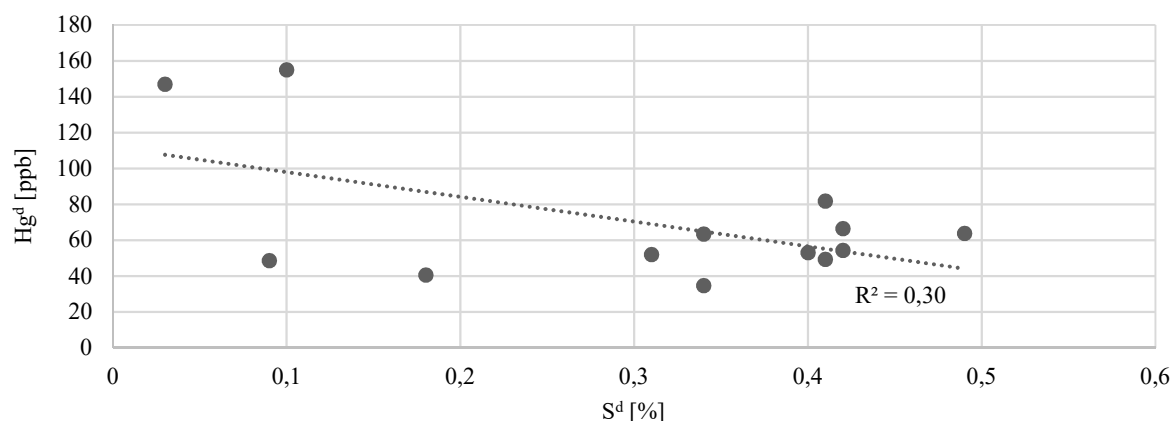
Zawartość rtęci nie przekracza wartości około 70 ppb dla węgla wzbogaconych. Wykres wskazuje na koncentrację rtęci wraz ze spadkiem zawartości węgla pierwiastkowego. W przypadku urobku, nadawy i odpadów płuczki cieczy ciężkiej zawartość rtęci nie jest wyższa niż w koncentraty węglowych. Może to świadczyć o znikomej obecności przerostów zawierających podwyższoną zawartość rtęci. Odpady flotacyjne wydają się zawierać frakcje o podwyższonym stężeniu rtęci, choć są one rozrzedzone przez wysokie stężenie węgla pierwiastkowego. W badanym przypadku koncentraty węglowe cechują się zawartością rtęci na poziomie tła geochemicznego. Rysunek 28. przedstawia wykres zależności zawartości węgla całkowitego od siarki całkowitej.



Rysunek 28. Współczynnik determinacji R^2 dla węgla całkowitego i siarki całkowitej.

Źródło: opracowanie własne.

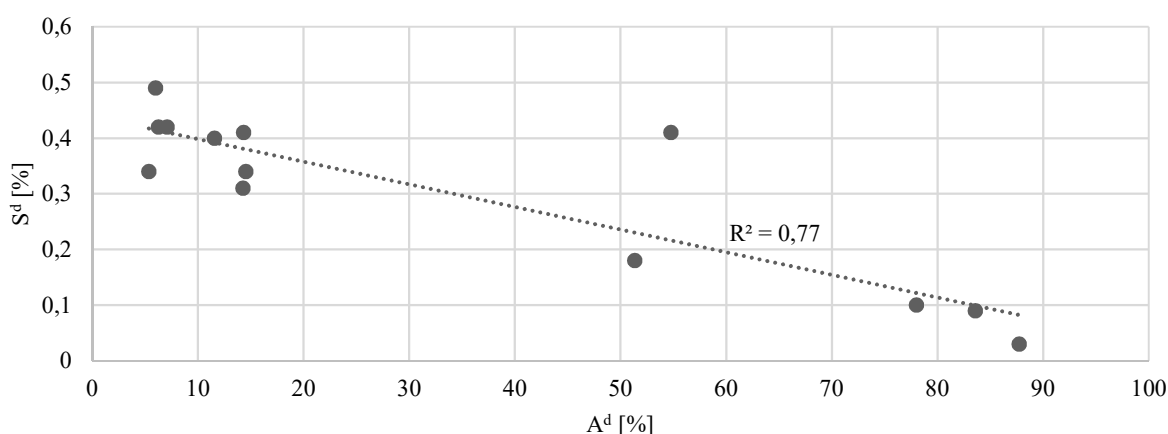
Węgiel pochodzący z Ruchu „Jas-Mos” charakteryzuje się kumulacją siarki w substancji organicznej. W przypadku usunięcia odpadów flotacyjnych z wykresu współczynnik R^2 przyjmuje wartość 0,92. Wyniki oznaczają, że jedynie flotacja pozwala na wymierne zmniejszenie zawartości siarki w produkcie zakładu „Jas-Mos”. Dalsza redukcja siarki w koncentracie nie jest możliwa poprzez zastosowanie standardowych technologii wzbogacania węgla. Rysunek 29. przedstawia zależność pomiędzy rtęcią a siarką całkowitą.



Rysunek 29. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości siarki i rtęci.

Źródło: opracowanie własne.

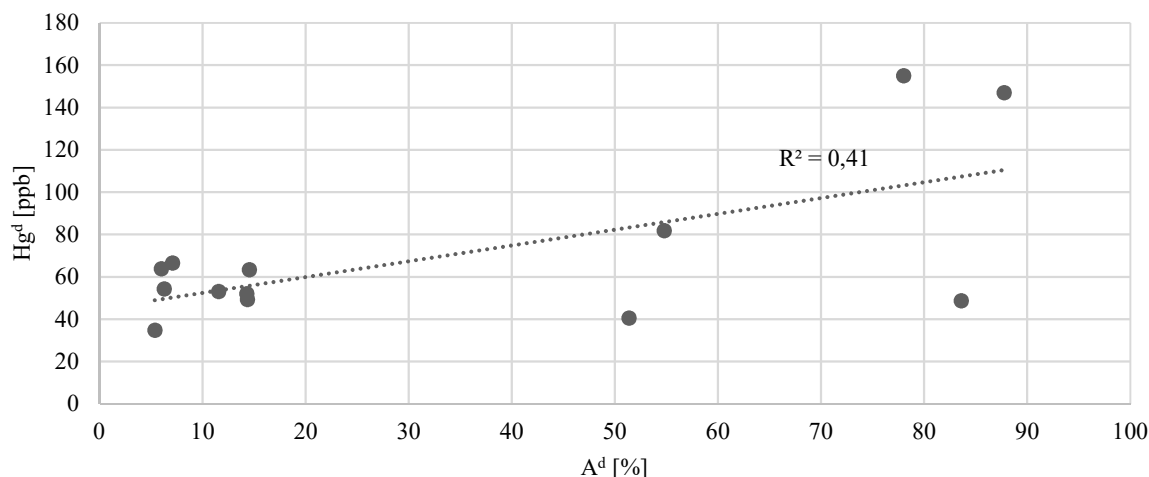
Istnieje ujemna korelacja dla siarki i rtęci w badanym przypadku. Rtęć nie wydaje się być związana z występowaniem siarki, co nie jest zgodne z badaniami literaturowymi oraz analizą wyników węgla handlowego z Jastrzębskiej Spółki Węglowej (np. na rysunku 17. – rozdział 2.3.). Omawiany przypadek wskazuje na sprzeczność potencjalnej redukcji rtęci i siarki w węglu handlowym. Prognoza zawartości rtęci na podstawie oznaczeń siarki nie wydaje się być możliwa. Rysunek 30. przedstawia zależność pomiędzy zawartością popiołu a siarki.



Rysunek 30. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości popiołu i siarki.

Źródło: opracowanie własne.

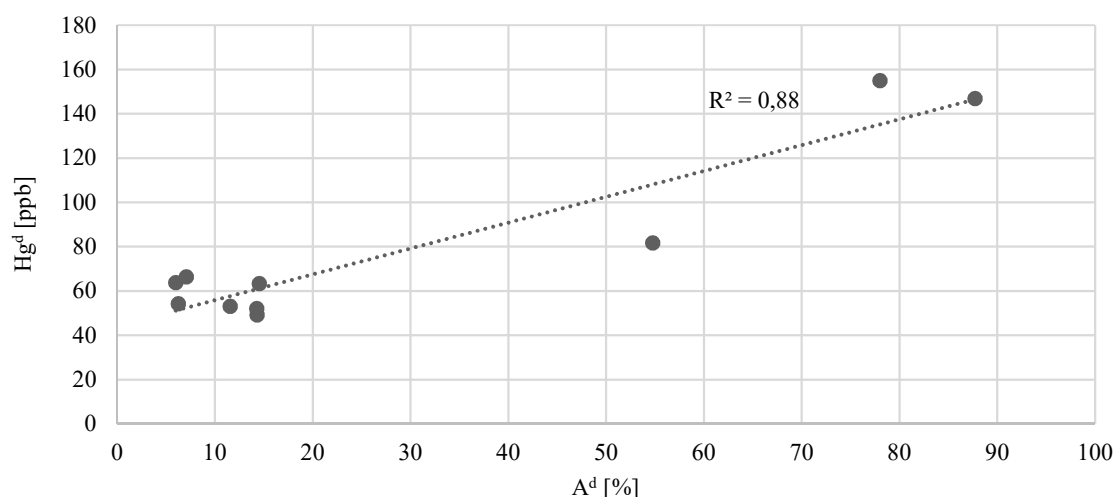
Siarka kumuluje się w węglu o niskiej zawartości popiołu. Wyjątkiem są tutaj odpady poflotacyjne zawierające około 0,41% siarki. Są to wyniki zbieżne z podanymi na wykresie dotyczącym węgla całkowitego i siarki. Istnieje ujemna korelacja pomiędzy zawartością siarki i popiołu. Jest to kolejny dowód na znikomą skuteczność odsiarczania w procesach przeróbki mechanicznej w tym przypadku. Rysunek 31. przedstawia zależność pomiędzy zawartością popiołu a rtęcią.



Rysunek 31. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości popiołu i rtęci.

Źródło: opracowanie własne.

Węgiel o niskim zapopieleniu w badanym przypadku nie przekracza 70 ppb zawartości rtęci. Zawartość rtęci w odpadach flotacyjnych (55% popiołu) wskazuje na wzrost obecności Hg wraz z zanieczyszczeniem skałą płonną. Niską zawartością rtęci cechuje się nadawa (51% popiołu) oraz odpad płuczki cieczy ciężkiej (83,6% popiołu). Jest to najprawdopodobniej związane z występowaniem skały płonnej o niskiej zawartości rtęci. Z tego względu na rysunku 32. przedstawiono wykres z pominięciem pomiarów z wejścia i wyjścia płuczki cieczy ciężkiej.



Rysunek 32. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości popiołu i rtęci z pominięciem wejść i wyjść płuczki cieczy ciężkiej.

Źródło: opracowanie własne.

Usunięcie płuczki cieczy ciężkiej z wykresu spowodowało znaczący wzrost współczynnika determinacji R^2 dla zawartości popiołu i rtęci. Wyniki wskazują na odmienną formę występowania rtęci w nadawie do płuczki cieczy ciężkiej niż w przypadku osadzarki i flotacji. Bez znajomości parametrów wzbogacalności węgla, trudno jest określić, w których frakcjach urobku skoncentrowana jest rtęć oraz siarka. Pełne zrozumienie charakterystyki występowania rtęci w węglu kamiennym wymagałoby przeprowadzenia kompleksowych badań petrograficznych oraz analitycznych skały płonnej.

Analiza wyników pomiarów nadawy, koncentratów oraz skały płonnej w Ruchu „Jas-Mos” pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- zawartość siarki we wszystkich produktach i odpadach zakładu przeróbki mechanicznej nie przekroczyła w żadnym przypadku 0,65%, co wskazuje na jej nieznaczące występowanie w górotworze,
- 66 ppb jest maksymalną stwierdzoną zawartością rtęci w badanych koncentratów węglowych,
- rtęć jest skumulowana w odpadach z kruszarki bębnowej oraz osadzarki (jej zawartość wynosi około 150 ppb),
- w urobku znajdują się skały o odmiennym stopniu koncentracji rtęci, przez co jej redukcja będzie silnie związana z bieżącą charakterystyką węgla surowego. Wysokie stężenie rtęci zostało stwierdzone w gruboziarnistych piaskowcach odseparowanych w kruszarce bębnowej.

2.7. Bilans produktów i odpadów

Pomiary węgla posłużyły do wykonania bilansu redukcji zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla handlowego. Tabela 21. przedstawia ładunek zanieczyszczeń obliczony na podstawie szacunkowego obciążenia węzłów przeróbki mechanicznej oraz wychodu produktów procesów wzbogacania. Dane dotyczące masy nadawy, produktów oraz odpadów zostały przyjęte dla teoretycznego wydobycia 10 000 Mg brutto.

Tabela 21. Ładunek siarki i rtęci w oparciu o dane dot. węzłów produkcyjnych Ruchu „Jas-Mos”.

Lp.	Opis	Masa [Mg]	Masa – udział [%]	Ładunek rtęci [g]	Ładunek siarki [Mg]
1	Węgiel surowy (urobek)	10000	100	520	31,00
2	Odpad kruszarka Bradford	200	2	29	0,06
3	Nadawa do osadzarki	7000	70	443	23,80
4	Koncentrat z osadzarki	5000	50	271	21,00
5	Odpady z osadzarki	800	8	124	0,80
6	Nadawa do wzbogacalnika DISA	2800	28	113	5,04
7	Koncentrat z DISA	2100	21	73	7,14
8	Odpady z DISA	700	7	34	0,63
9	Nadawa na flotację	1200	12	59	4,92
10	Flotokoncentrat po odwadnianiu	800	8	53	3,36
11	Odpady flotacyjne	200	2	16	0,82
12	Odzysk części stałych z zawiesiny wodno-mułowej (prasy filtracyjne)	150	2	8	0,60
13	Produkt handlowy	7900	79	504	38,71

Źródło: opracowanie własne.

Szacunkowe wartości zostały wskazane po konsultacjach z kierownictwem zakładu przeróbki mechanicznej Ruchu „Jas-Mos”. Iloczyn masy poszczególnych produktów i

odpadów pozwolił na dalszą ocenę ładunku zanieczyszczeń i jego redukcji. Liczby porządkowe poszczególnych pomiarów odpowiadają numeracji punktów na schemacie zawartym na rysunku 26. Na podstawie dostępnych informacji sporządzono kilka wariantów bilansu migracji zanieczyszczeń w produkcji węgla w Ruchu „Jas-Mos”. Pierwszy z nich dotyczył zmian parametrów jakościowych bez uwzględnienia masy przepływu produktów i odpadów.

Obliczenia wykonane na podstawie węgla surowego i handlowego

Najbardziej oczywistym sposobem zbilansowania redukcji zanieczyszczeń jest porównanie ich zawartości w nadawie oraz wyjściowym produkcie handlowym zakładu górniczego. Dodatkowo w analizie wzięto pod uwagę zawartość węgla całkowitego. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tabeli 22.

Tabela 22. Zmiana zawartości węgla oraz zanieczyszczeń na wejściu i wyjściu zakładu przeróbki mechanicznej Ruchu „Jas-Mos”.

	A ^d [%]	TC ^d [%]	S _t ^d [%]	Hg ^d [ppb]
Węgiel surowy	14,27	76	0,31	52
Węgiel handlowy	5,99	84,27	0,49	64
Zmiana zawartości	-58%	+11%	+25%	+19%

Źródło: opracowanie własne.

Pobór prób został wykonany podczas eksploatacji jednej ściany wydobywczej, co jak zostało wcześniej podkreślone mogło wpłynąć na zmianę charakterystyki wzbogacalności nadawy. Na podstawie porównania wejścia i wyjścia – można zauważyć znaczące obniżenie zawartości popiołu. Wraz z koncentracją węgla pierwiastkowego rośnie stężenie siarki, co jest zgodne z obserwacją w poprzednim rozdziale. Zawartość rtęci w węglu handlowym nieznacznie rośnie do poziomu 64 ppb. Wzrost może wynikać z bardzo niskiego zapopielenia nadawy w zakładzie przeróbczym w czasie wykonania pomiaru. Inne źródła wskazują na zawartość rtęci w węglu handlowym KWK „Jas-Mos” na poziomie 40 ppb. Obie wartości są niskie w stosunku do średniej wynoszącej około 100 ppb dla polskiego górnictwa.

Obliczenia wykonane na podstawie wejść i wyjść procesu wzbogacania węgla w płuczce cieczy ciężkiej

Bilans migracji został przeprowadzony dla wejść i wyjść poszczególnych procesów wzbogacania z uwzględnieniem strumienia produktów oraz odpadów. Tabela 23. przedstawia zmiany zawartości zanieczyszczeń w procesach wzbogacania w płuczce DISA.

Tabela 23. Zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach wzbogacania w płuczce cieczy ciężkiej.

	A ^d [%]	TC ^d [%]	S _t ^d [%]	Hg ^d [ppb]
Nadawa	51,4	39,73	0,18	40,5
Koncentrat	5,36	85,32	0,34	34,7
Odpad	83,6	10,03	0,09	48,6
Zmiana zawartości (odpad)	+63%	-75%	-50%	+20%
Zmiana zawartości (koncentrat)	-90%	+115%	+89%	-14%

Źródło: opracowanie własne.

Wzbogacanie w cieczach ciężkich pozwala na znaczące zmniejszenie zapopielenia urobku do poziomu około 5%. W okresie poboru prób gęstość rozdziału wynosiła 1,5 kg/dm³. Zauważa się niewielkie zmniejszenie zawartości rtęci o około 14% w stosunku do nadawy oraz

zdecydowaną koncentrację siarki w produkcie handlowym. Obecność 10% węgla pierwiastkowego w odpadzie (w przypadku wzbogacania dwuproduktowego) wskazuje na stosunkowo niewielką ilość przerostu w pokładzie.

W odniesieniu do danych zawartych w tabeli 23. można stwierdzić, że trójproduktowy reżim wzbogacania pozwoliłby na zwiększenie produkcji netto o mniej niż 1%. Z drugiej strony 10% zawartości węgla w odpadzie może teoretycznie doprowadzić do pożaru endogenicznego składowiska.

Obliczenia wykonane na podstawie wejść i wyjść procesu wzbogacania węgla w osadzarkach

Wyniki analizy fizyko-chemicznej dla procesów wzbogacania w osadzarkach zostały przedstawione w tabeli 24.

Tabela 24. Zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach wzbogacania w osadzarkach.

	A ^d [%]	TC ^d [%]	Sr ^d [%]	Hg ^d [ppb]
Nadawa	14,5	75,68	0,34	63,3
Koncentrat	6,28	84,32	0,42	54,2
Odpad	78	13,82	0,1	155
Zmiana zawartości (odpad)	+436%	-82%	-71%	+144%
Zmiana zawartości (koncentrat)	-57%	+11%	+76%	-14%

Źródło: opracowanie własne.

Procesy separacji w osadzarkach doprowadziły do odpocielenia nadawy do wartości około 6% oraz koncentracji ładunku siarki w przyszłym produkcie handlowym. W odpadach znalazło się około 14% węgla pierwiastkowego najpewniej ze względu na większą obecność przerostów we frakcji oraz imperfekcję procesu. Również zawartość rtęci była znacząco większa niż w przypadku odpadów z płuczki cieczy ciężkiej. W przypadku prowadzenia trójproduktowego wzbogacania w osadzarkach istniałaby możliwość zwiększenia wydobywania węgla netto do kilku procent. Niewykluczone jednak, że przerosty zawierałyby bardzo wysoki ładunek rtęci.

Flotacja

W tabeli 25. przedstawiono zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach flotacji zawiesiny będącej produktem odwadniania koncentratów płuczki cieczy ciężkiej oraz osadzarek.

Tabela 25. Zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach flotacji.

	A ^d [%]	TC ^d [%]	Sr ^d [%]	Hg ^d [ppb]
Nadawa	14,3	76,07	0,41	49,2
Koncentrat	7,08	81,87	0,42	66,4
Odpad	54,8	34,19	0,41	81,7
Zmiana zawartości (odpad)	+282%	-55%	0%	+66%
Zmiana zawartości (koncentrat)	-50%	+8%	0%	+35%

Źródło: opracowanie własne.

W procesie flotacji dochodzi do zmniejszenia zawartości popiołu do około 7%, natomiast zaw. siarki pozostaje niezmienną w stosunku do nadawy. Odpady flotacyjne w omawianym przypadku składają się w około 35% z węgla pierwiastkowego, znajduje się w nich także znacznie więcej rtęci niż w przypadku nadawy. Zastanawiającym faktem

pozostaje wyższa koncentracja rtęci w koncentracie niż w węglu surowym, co może być spowodowane dużą zmiennością jej charakterystyki.

Bilans oparty na przepływie ładunku zanieczyszczeń do produktów i odpadów

Dane uzyskane w Ruchu „Jas-Mos” dotyczące dziennej produkcji umożliwiły także stworzenie bilansu opartego na ładunku zanieczyszczeń w produktach handlowych oraz odpadach. Za pomocą aproksymacji wskazano teoretyczną zawartość rtęci przy różnym stopniu zapopielenia urobku. Współczynnik R^2 o wartości 0,41 wskazuje na niezadowalające dopasowanie wyników, jednakże pozwala na określenie skali problemu. Korzystając z proporcji określono masę poszczególnych produktów oraz odpadów z zachowaniem poszczególnych wartości udziałów procentowych.

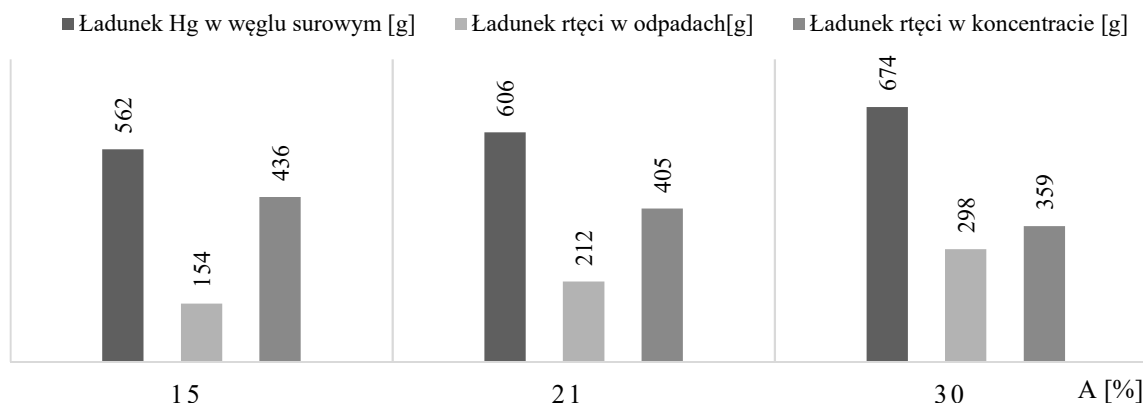
Na tym etapie opracowania uznano, że skuteczności wzbogacania pozostaje niezmienna i nie zależy od zapopielenia nadawy. Tabele 26. oraz 27. przedstawiają szacunkowy ładunek siarki oraz rtęci w odniesieniu do różnych poziomów zapopielenia urobku. Obliczenia zostały wykonane dla wydobywania dobowego wynoszącego 10 000 Mg brutto.

Tabela 26. Prognoza zawartości rtęci w produktach i odpadach przy danej zawartości popiołu w urobku.

Popiół [%]	Wartość aproksymacji rtęci [ppb]	Ładunek rtęci w węglu surowym [g]	Ładunek rtęci w odpadzie [g]	Redukcja wg odpadu	Ładunek rtęci w koncentracie [g]	Suma ładunku rtęci w odpadzie i koncentracie [g]
15	56	562	154	27%	436	590
21	61	606	212	35%	405	617
30	67	674	298	44%	359	657

Źródło: opracowanie własne.

Można się spodziewać, że zwiększenie zawartości skały płonnej w urobku wpłynie na zwiększenie przepływu zanieczyszczeń takich jak np. rtęć. Skuteczność redukcji rtęci zależy przede wszystkim od zapopielenia urobku. Należy pamiętać, że jest to ładunek wprowadzony do środowiska. Zaprezentowana w ostatniej kolumnie suma masy rtęci w odpadach i koncentracie jest zbliżona dla jej wartości w węglu surowym, co świadczy o wiarygodności pozyskanych danych dot. produkcji w zakładzie. Na rysunku 33. dodatkowo zaprezentowano strumień ładunku rtęci.



Rysunek 33. Ładunek rtęci w odpadach oraz w produkcie handlowym przy danym stopniu zapopielenia urobku.

Źródło: opracowanie własne.

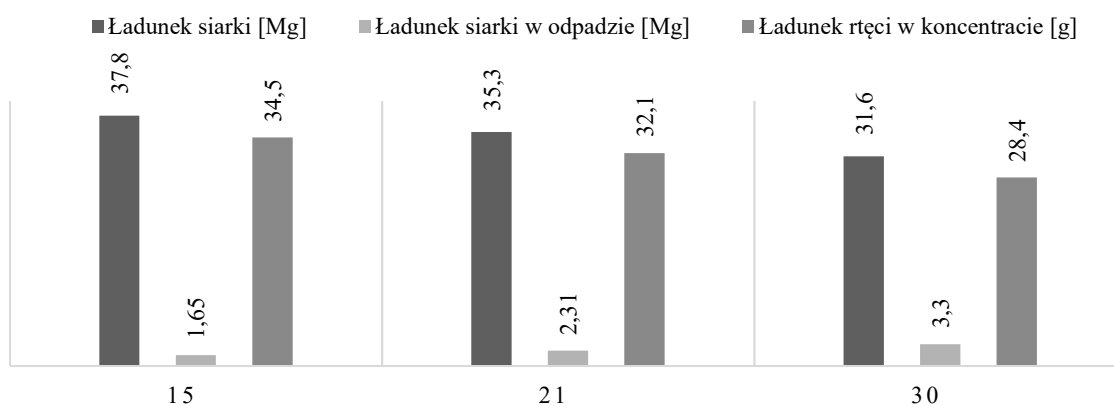
W obliczeniach wzięto pod uwagę wszystkie rodzaje odpadów oraz produktów, włącznie z odzyskiem zawiesiny z odwadniania flotokonzentratu. Dokładne obliczenia potencjału mechanicznej przeróbki węgla będzie wymagało wzięcia pod uwagę znacznie większej gamy czynników chociażby takich jak: imperfekcja procesu oraz wskazania frakcji, w której ładunek rtęci jest największy. Tabela 27. zawiera prognozę zawartości siarki w odniesieniu do danego zapopielenia urobku. W tym przypadku współczynnik determinacji wynosił 0,77, co jest wartością zupełnie zadowalającą.

Tabela 27. Prognoza zawartości rtęci w produktach i odpadach przy danej zawartości popiołu w urobku.

Popiół [%]	Ładunek siarki w węglu surowym [Mg]	Ładunek siarki w odpadzie [Mg]	Redukcja wg odpadu	Ładunek siarki w koncentracie [Mg]	Suma ładunku siarki w odpadzie i koncentracie [g]
15	37,8	1,65	4%	34,5	36,15
21	35,3	2,31	7%	32,1	34,41
30	31,6	3,3	10%	28,4	31,74

Źródło: opracowanie własne.

Zawartość siarki w produktach handlowych Ruchu „Jas-Mos” wynosi około 0,3-0,4%. Pomimo stosunkowo niskiej zawartości tego pierwiastka – w procesach przeróbki mechanicznej praktycznie nie następuje jego separacja. Suma ładunków siarki w odpadzie i koncentracie jest zbliżona do ładunku w węglu surowym. Rysunek 34. Zawiera odpowiadający wykres dla redukcji ładunku siarki w procesie produkcji węgla handlowego.



Rysunek 34. Ładunek siarki w odpadach oraz w produkcie handlowym przy danym stopniu zapopielenia urobku.

Źródło: opracowanie własne.

Wykres jasno wskazuje na znikomą skuteczność odsiarczania węgla kamiennego przy wykorzystaniu standardowych metod wzbogacania. Jest to spowodowane dominacją występowania siarki w substancji organicznej, nie zaś w mineralnej. Potencjał redukcji zanieczyszczenia siarką będzie ograniczony praktycznie do jej występowania w przerostach.

3. PRODUKCJA WĘGLA HANDLOWEGO UWZGLĘDNIAJĄCA REDUKCJĘ ZANIECZYSZCZEŃ – MODEL PROCESU

3.1. Budowa modelu – szczegółowe badania urobku

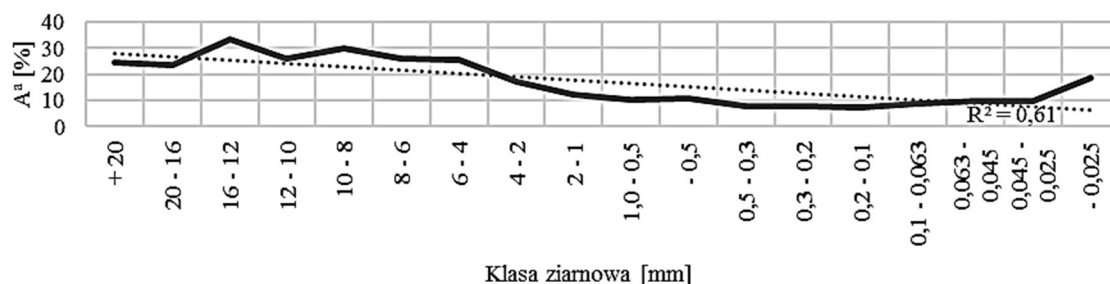
Badania przeprowadzone w Ruchu „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” wskazały istotny wpływ przeróbki mechanicznej na redukcję rtęci w węglu handlowym. W przypadku siarki możliwości są silnie ograniczone przez jej koncentrację w lekkiej frakcji organicznej. Wydaje się, że rtęć w znacznie większym stopniu koncentruje się w substancji mineralnej, nie zaś organicznej. Na podstawie wyników trudno jest określić rzeczywisty potencjał redukcji rtęci oraz siarki w przypadku zmiany parametrów procesu. Nieznana pozostaje zawartość zanieczyszczeń w różnych frakcjach densymetrycznych, których separacja stanowi jeden z elementów wzbogacania węgla kamiennego. W związku z tym zdecydowano o przeprowadzeniu kompleksowych badań densymetrycznych nadawy zakładu przerobczego. Uznano, że do budowy modelu procesu produkcji węgla uwzględniającego redukcję wybranych zanieczyszczeń konieczne jest przeprowadzenie:

- charakterystyki technologicznej mialu surowego (0-20 mm),
- charakterystyki technologicznej mułu surowego (0-0,5 mm),
- analizy densymetrycznej dla całego zakresu uziarnienia.

Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie spójnych zaleceń dla zakładu górniczego wraz z modelem wspomagającym redukcję wybranych zanieczyszczeń, w którym wykorzystano również wyniki poprzednich badań.

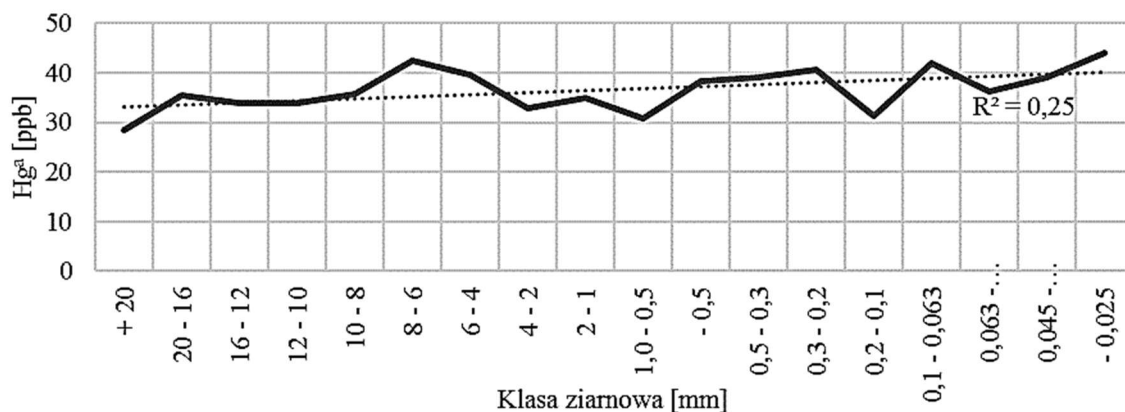
Na przełomie lutego i marca 2016 roku po uzyskaniu zgody Zarządu Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA pobrano próby około 1000 kg nadawy do płuczki ciężkiej oraz 160 kg nadawy na osadzarki. Próbką została pobrana zgodnie z zaleceniami normy ISO 7936, dotyczącej oznaczania i przedstawiania charakterystyk wzbogacania grawitacyjnego [97]. Ze względu na utrudniony dostęp do przesypu nadawy do płuczki cieczy ciężkiej – pobór próbki okazał się skomplikowanym przedsięwzięciem. Dla uzyskania wiarygodnych wyników wzbogacalności oraz analizy sitowej masa pobranego węgla została zwiększona znacząco powyżej wymagań normy. Analiza sitowa i densymetryczna, a następnie fizyko-chemiczna pozwoliły na znacznie szersze spojrzenie na problem redukcji zanieczyszczeń w węglu handlowym. Szczegółowe wyniki analizy zostały zawarte w załącznikach opracowania. Najistotniejsze zależności zostały zaprezentowane w formie graficznej poniżej. Rysunek 35. przedstawia zawartość popiołu w węglu surowym w klasach ziarnowych poniżej 20 mm będących nadawą na osadzarki.

Zapopielenie urobku zmniejsza się wraz ze spadkiem rozmiarów ziarn, co nie jest typową obserwacją [2]. Dopiero w ziarnach o wymiarach poniżej 0,1 mm zauważa się wzrost zawartości popiołu. Średnia zawartość popiołu wynosząca 16,4% jest wartością niską dla mialu surowego. Badany urobek cechował się dużą czystością. Rysunek 36. zawiera dane dotyczące zawartości siarki w tym samym urobku.



Rysunek 35. Zawartość popiołu w danej klasie ziarnowej.

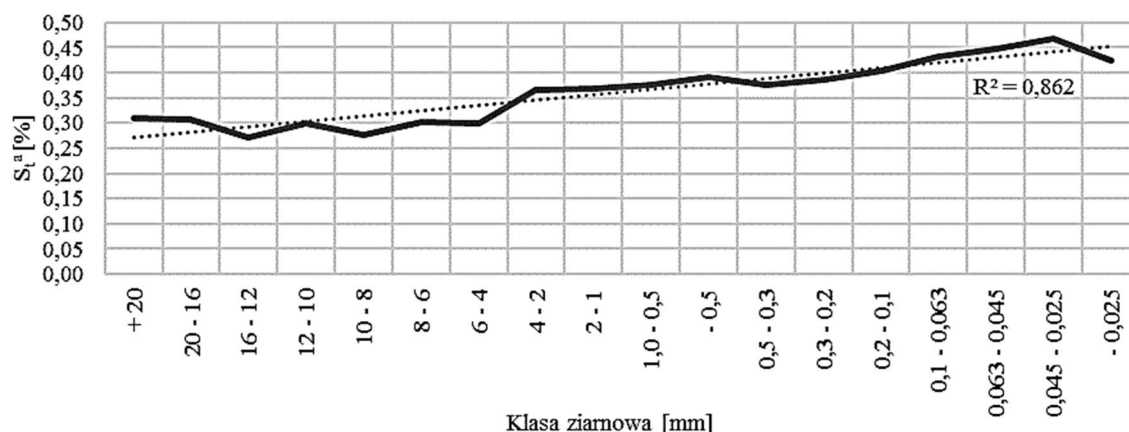
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 36. Zawartość siarki całkowitej w danej klasie ziarnowej.

Źródło: opracowanie własne.

Wraz ze spadkiem średnicy ziarn nadawy następuje zdecydowany wzrost zawartości siarki, co jest zjawiskiem wskazywanym w literaturze [7]. Żadna klasa ziarnowa nie cechuje się jednak stężeniem siarki przekraczającym 0,5%, co i tak jest wartością bardzo niską. W badanym urobku widoczny wzrost zasiarczenia jest obserwowany dopiero poniżej ziarn o średnicy 2 mm. Rysunek 37. Przedstawia odpowiadający wykres dotyczący rtęci.

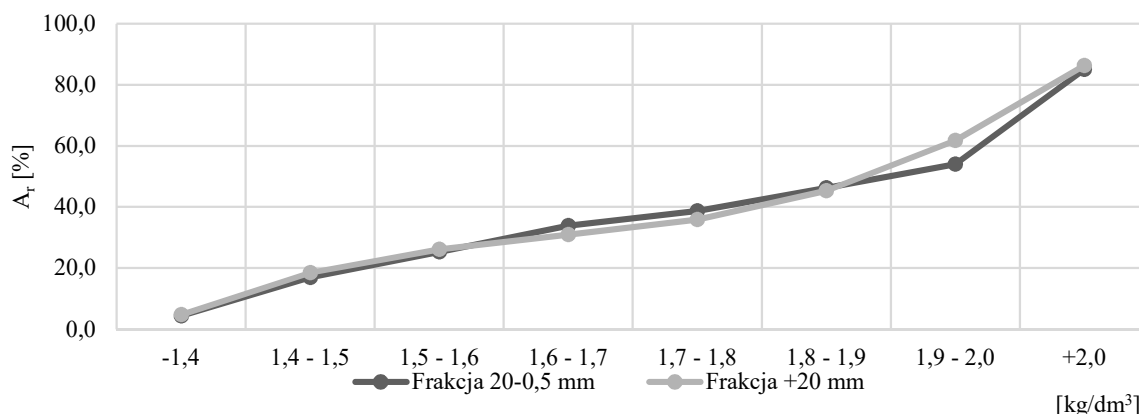


Rysunek 37. Zawartość rtęci w danej klasie ziarnowej.

Źródło: opracowanie własne.

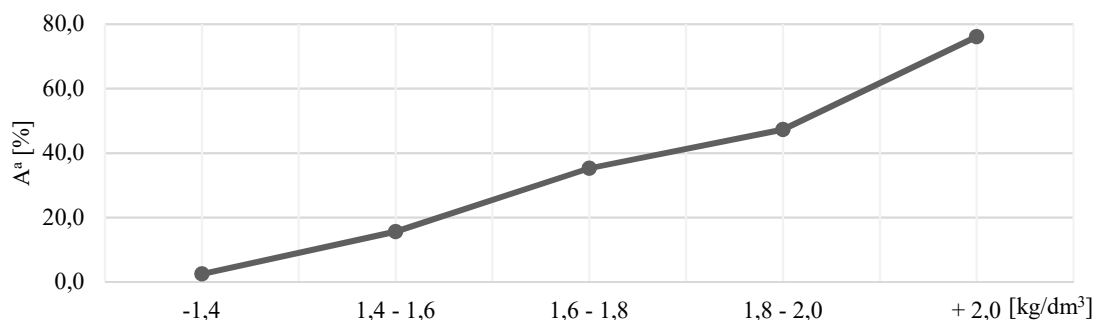
W badanej próbie nie zauważa się silnego wzrostu zawartości rtęci wraz ze spadkiem rozmiarów ziarn urobku. Zgodnie z wcześniej przeprowadzonymi pomiarami dot. zawartości rtęci – zawartość siarki jest z nią ujemnie skorelowana.

Najwięcej danych użytecznych dla budowy modelu procesu produkcji węgla z uwzględnieniem redukcji wybranych zanieczyszczeń można wyciągnąć z przeprowadzonych analizy gęstościowej nadawy. Badania zostały wykonane w trzech klasach ziarnowych: +20 mm, 20-0,5 mm, 0,5-0,025 mm (otrzymana w wyniku odsiania nadawy do płuczki cieczy ciężkich oraz osadzarek – przedstawiona na osobnym diagramie). Rysunek 38. oraz 39. zawierają dane dotyczące wzrostu zawartości popiołu wraz ze wzrostem gęstości frakcji.



Rysunek 38. Zawartość popiołu w danej klasie ziarnowej.

Źródło: opracowanie własne.

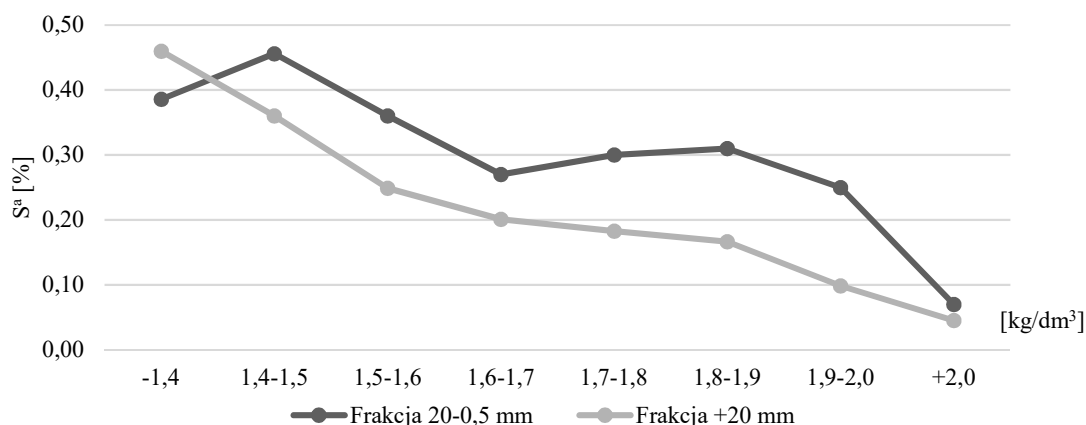


Rysunek 39. Zawartość popiołu we frakcji 0,5-0,025 mm.

Źródło: opracowanie własne.

W Ruchu „Jas-Mos” do produkcji węgla handlowego stosowane są frakcje densymetryczne jedynie o gęstości do około 1,6 kg/dm³ ze względu na niskie zapopielenie dopuszczalne przez odbiorców. W zależności od zapopielenia koncentratu możliwe jest zwiększanie lub zmniejszenie ciężaru wzbogacania dla zwiększenia uzysku produktu lub poprawy jego jakości. Wydzielenie przerostu o gęstości o 1,6 do 2,0 kg/dm³ było praktykowane dla produkcji mieszanek energetycznych.

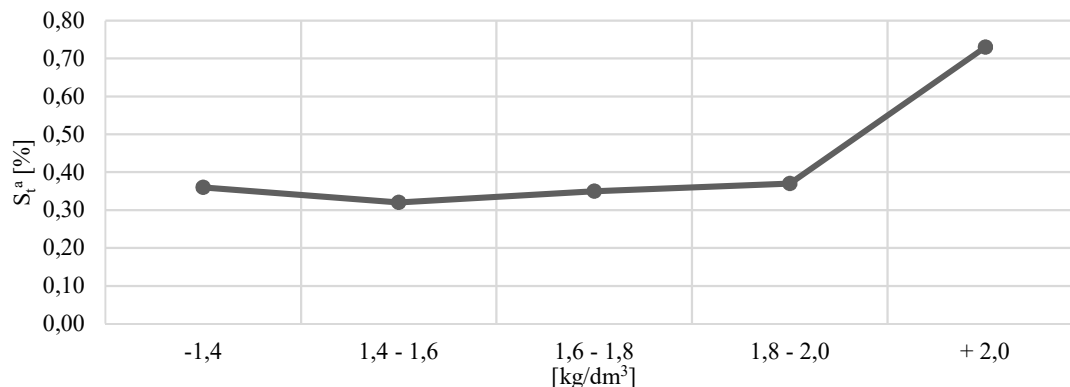
Przyrost zawartości popiołu wraz ze wzrostem gęstości jest mniejszy niż w przypadku dwóch poprzednich frakcji. Ze względu na trudności technologiczne – frakcja ta nie jest wzbogacana grawitacyjnie, lecz flotacyjnie. Na podstawie wychodu frakcji (Załącznik 5.) można stwierdzić, że węgiel niewzbogacony zawierałby jedynie 7,9% popiołu. Warto dodać, że nadawa na flotację jest już węglem pośrednio wzbogaconym w poprzednich procesach. Rysunek 40. Przedstawia zawartość siarki we frakcjach densymetrycznych urobku.



Rysunek 40. Zawartości siarki w danej frakcji densymetrycznej.

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku węgla gruboziarnistego oraz mialu można zaobserwować spadek zawartości siarki wraz ze spadkiem średnicy. Współczynnik R^2 dla frakcji powyżej 20 mm wynosi aż 0,93. Obserwacja jest zbieżna z wnioskami zawartymi w poprzednim rozdziale dotyczącymi występowania siarki w lekkiej frakcji organicznej. W przypadku wzbogacania w osadzarkach oraz płuczce cieczy ciężkiej potencjał odsiarczania jest ograniczony wyłącznie do przerostów, gdyż w skale płonnej siarka praktycznie nie występuje. Rysunek 41. dotyczy zawartości siarki we frakcji mułowej.

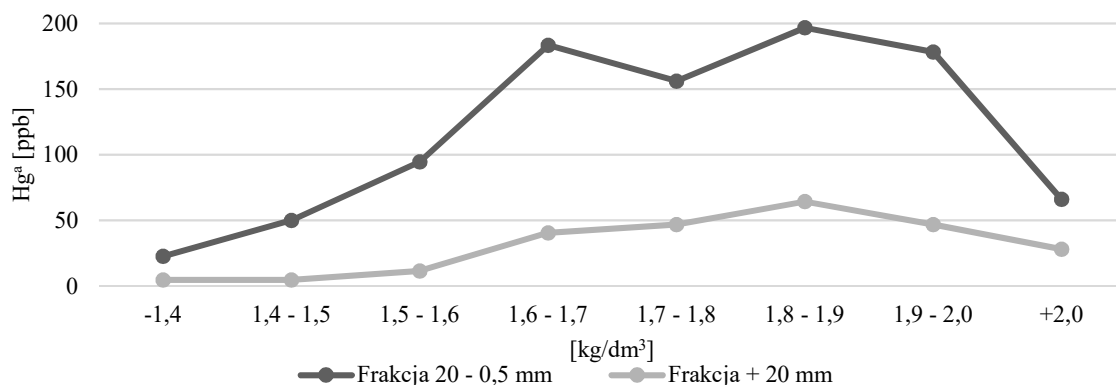


Rysunek 41. Zawartość siarki we frakcji 0,5-0,025 mm.

Źródło: opracowanie własne.

Zawartość siarki do gęstości 2 kg/dm³ oscyluje pomiędzy 0,3 a 0,4%. Powyżej tej gęstości zasiarczenie wzrasta średnio do poziomu 0,75%. Można zaobserwować odmienną charakterystykę skały płonnej niż w przypadku poprzedniego wykresu. Rysunek 42. przedstawia wykres zależności zawartości rtęci w zależności w danych klasach ziarnowych.

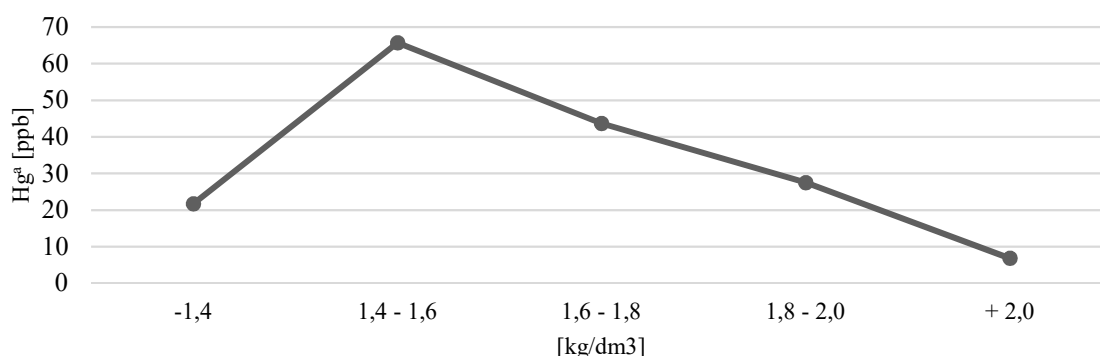
W przypadku frakcji 20-0,5 mm największe stężenie rtęci w węglu kamiennym występuje w przerostach o gęstości pomiędzy 1,6 do 2 kg/dm³. W przypadku ich znaczącej zawartości w urobku – mogą być przyczyną zauważalnego zanieczyszczenia tym pierwiastkiem produktu handlowego. Półprodukt w przypadku trójproduktowego reżimu wzbogacania będzie silnie zanieczyszczony związkami rtęciowymi.



Rysunek 42. Zawartość rtęci w danej frakcji densymetrycznej.

Źródło: opracowanie własne.

W odniesieniu do badań wydaje się, że produkt handlowy z KWK „Budryk” w tabeli 17. (rozdział 2.3.) jest w istocie frakcją przerostową. Czysta substancja węglowa niekoniecznie jest silnie zanieczyszczona rtęcią. Rysunek 43. przedstawia zależność zawartości rtęci od gęstości urobku dla frakcji 0,5-0,025 mm.



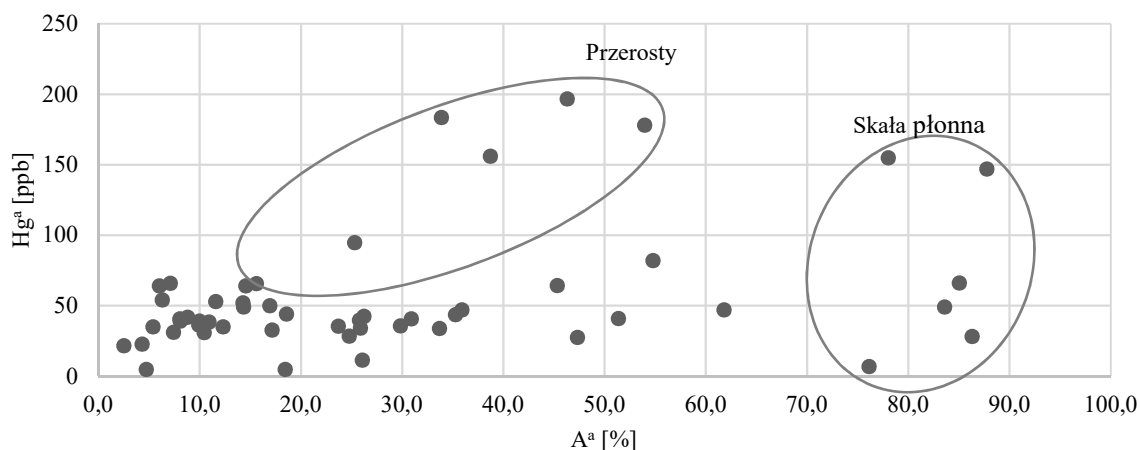
Rysunek 43. Zawartość rtęci we frakcji 0,5-0,025 mm.

Źródło: opracowanie własne.

Frakcja mułowa cechuje się znacznie niższą zawartością rtęci. Wzbogacanie flotacyjne nie jest tożsame z separacją opartą na gęstości nadawy.

W węglu KWK „Jas-Mos” zaobserwowano kumulację związków rtęci w odpadach. Uszczegółowienie badań pozwoliło na stwierdzenie, że ma to związek z ich wysokim stężeniem w przerostach. Potencjał redukcji siarki jest silnie ograniczony przez jej koncentrację we frakcjach lekkich. Wyjątkiem są jedynie najdrobniejsze ziarna mułowe oraz jej ciężkie frakcje. Redukcja siarki standardowymi metodami wzbogacania wydaje się znikoma w omawianym przypadku oraz ograniczona praktycznie jedynie do przerostów.

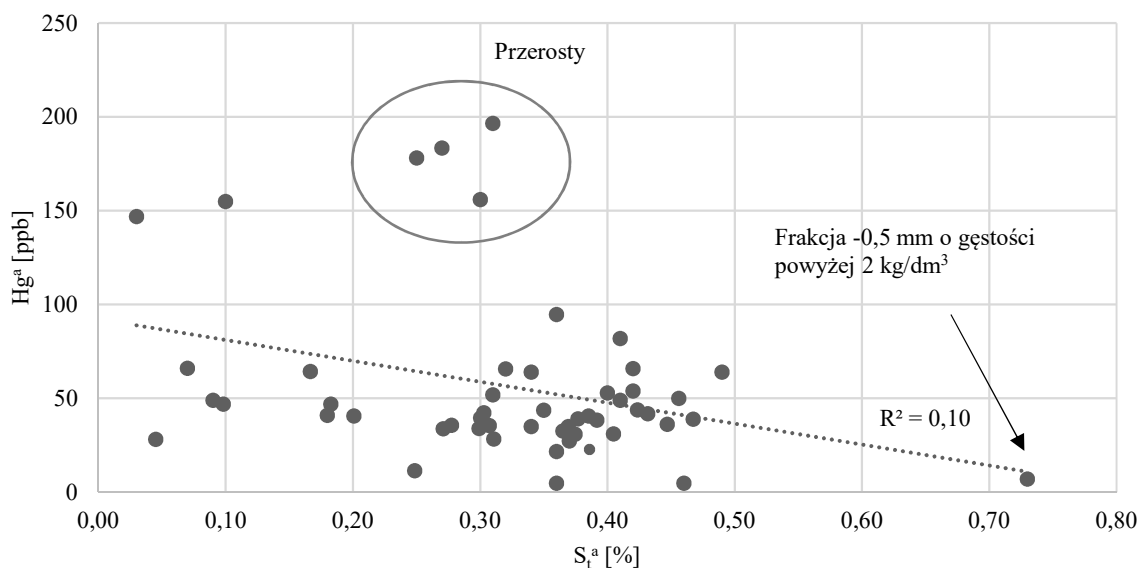
Dzięki przeprowadzonym badaniom uzyskano 51 wyników zawartości siarki, rtęci oraz popiołu w węglu surowym, produktach i odpadach Ruchu „Jas-Mos”. Pozwalają na wyciągnięcie kluczowych wniosków odnośnie prowadzenia produkcji węgla z uwzględnieniem redukcji wybranych zanieczyszczeń. Rysunek 44. przedstawia zależność pomiędzy zawartością popiołu a rtęcią w badanym urobku.



Rysunek 44. Zawartość rtęci i popiołu w badanym urobku Ruchu „Jas-Mos”.

Źródło: opracowanie własne.

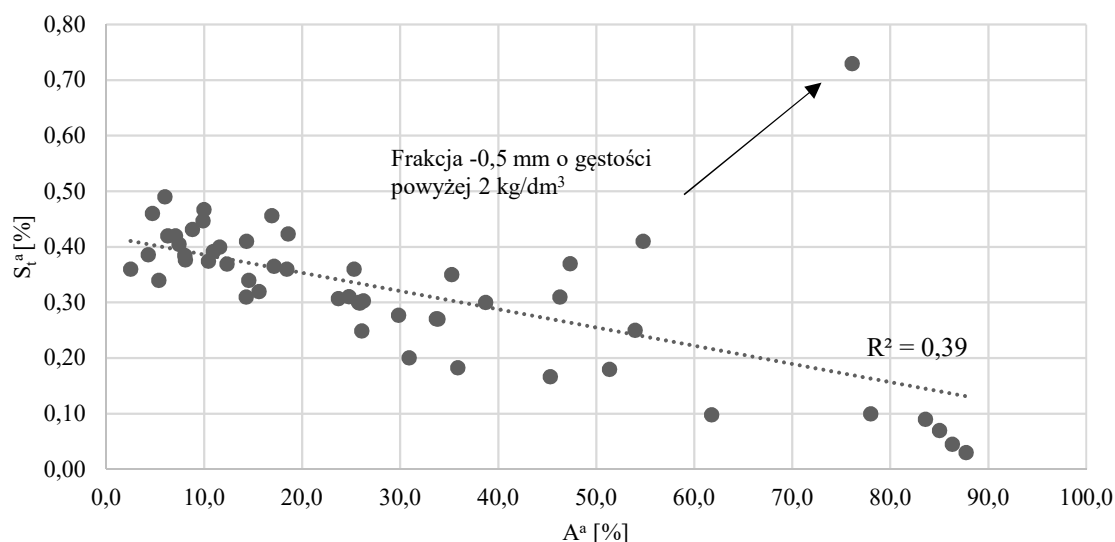
Największa zawartość rtęci w urobku występuje w przerostach frakcji 0,5-20 mm oraz w niektórych skałach płonnych – najprawdopodobniej w piaskowcu. W przypadku wprowadzenia regulacji dotyczących emisji rtęci – koniecznością może okazać się separacja przerostów oraz maksymalne odpopielenie urobku. Będzie to się wiązało ze spadkiem produkcji netto. Rysunek 45. przedstawia zależność pomiędzy występowaniem rtęci oraz siarki w urobku.



Rysunek 45. Zawartość rtęci i siarki w badanym urobku Ruchu „Jas-Mos”.

Źródło: opracowanie własne.

W badanych złożach siarka i rtęć nie są ze sobą powiązane. W przypadku silnie zasiarczonego mułu węglowego – zawartość rtęci wynosi jedynie 7 ppb. Jednoczesna redukcja siarki i rtęci nie jest możliwa metodami przeróbki mechanicznej. Rysunek 46. przedstawia zależność pomiędzy popiołem a siarką w badanym urobku.



Rysunek 46. Zawartość popiołu i siarki w badanym urobku Ruchu „Jas-Mos”.

Źródło: opracowanie własne.

Węgiel kamienny z Ruchu „Jas-Mos” cechuje się niską zawartością siarki skoncentrowaną we frakcji organicznej oraz wyjątkowo niskim stężeniem rtęci znajdującej się we frakcji mineralnej. Po usunięciu frakcji -0,5 mm o gęstości powyżej 2 kg/dm³ współczynnik $R^2 = 0,75$ – jest to dowód na niski stopień występowania siarki w substancji mineralnej.

3.2. Problem redukcji zanieczyszczeń w procesach wydobywania węgla

Podejście procesowe w inżynierii produkcji zakłada podjęcie działań w całym cyklu wytwarzania dla poprawy efektu końcowego. Dla zakładu górniczego jakością urobku jest oczywistą determinantą parametrów handlowych późniejszego produktu. Dotyczy to zwłaszcza przypadku braku wzbogacania danej frakcji ziarnowej. Badania pilotażowe przeprowadzone w ZG „Siltech” pozwoliły na dokonanie obserwacji, że urobek o niskim zapopieleniu zawiera niewielkie stężenie rtęci. Wysoka zawartość rtęci w piaskowcu (190 ppb), a stosunkowo niska w łupku przywęglowym (około 40 ppb) stwierdzona w pokładach grupy 500 uniemożliwia dokładne prognozowanie zawartości rtęci w produkcie handlowym na podstawie zapopielenia urobku. Badania produktów handlowych wskazały na duży rozstęp zawartości popiołu, siarki oraz rtęci w węglu kamiennym – rozdział 2.3. W świetle szczegółowych badań przeprowadzonych w Ruchu „Jas-Mos” – ocena potencjału wytwarzania czystego węgla na podstawie jakości samego produktu handlowego wydaje się nie mieć pełnego uzasadnienia.

W rozdziale 2.4. podczas oceny poszczególnych operacji wzbogacania – wskazano na wysokie stężenie rtęci w odpadach oraz szczególnie w przerostach. Na podstawie bilansu wykonanego wg pomiarów wykonanych w Ruchu „Jas-Mos” uznano, że redukcja zanieczyszczeń rtęci zależy głównie od zapopielenia urobku. Uzyskane wyniki z dwóch serii badań pozwalają na opracowanie zbioru zaleceń dla zakładu górniczego wspomagających produkcję czystego węgla. Ze względu na dwuproduktowy reżim wzbogacania w osadzarkach oraz w cieczech ciężkich nie było możliwości wskazania frakcji, w których występuje koncentracja rtęci. Druga seria badań pozwoliła na wyciągnięcie większej ilości wniosków, które umożliwiają wskazanie źródeł pochodzenia zanieczyszczeń produktu końcowego.

Na problem redukcji niepożądanych substancji w procesie produkcji węgla handlowego należy spojrzeć holistycznie – ich usunięcie dopiero w zakładzie przeróbki mechanicznej oznacza konieczność zagospodarowania skały płonnej na powierzchni lub zawrócenia do podziemi. Ze względu na ograniczoną skuteczność wzbogacania spowodowaną imperfekcją procesów należy zmierzać do jak najmniejszego zanieczyszczenia urobku. Koordynacja działań w całym ciągu procesów może pozwolić na widoczną poprawę jakości produktów handlowych. Rekomendacje dla zakładu górniczego zostały zawarte w tabeli. 28.

Tabela 28. Kierunki wspomagania redukcji zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla na etapie jego eksploatacji.

Obszar	Zalecenie	Skutek wprowadzenia	Przeszkody w implementacji
Udostępnienie złoża oraz roboty przygotowawcze	Rozważyć wprowadzenie innych systemów eksploatacji niż ścianowe	Możliwe zmniejszenie ilości skały płonnej urobku.	Brak infrastruktury, brak praktyki przemysłowej
Eksploatacja	Prowadzić dobór kompleksów ścianowych do warunków geologiczno-górnictwowych	Zwiększenie wychodu klas gruboziarnistych	Ograniczona ilość maszyn i urządzeń
	Zwrócić uwagę na problem urabiania spągu i stropu	Wyższa skuteczność wzbogacania.	Zmienność warunków geologiczno-górnictwowych
	Rozważyć możliwość wstępnego odkamieniania urobku pod ziemią	Zmniejszenie szybkości zużycia maszyn i urządzeń	Technologia w fazie koncepcyjnej
Odstawa	Starać się odseparować strumienia urobku od skały płonnej (roboty w kamieniu)	Wyższa skuteczność wzbogacania	Skomplikowana organizacja, częściowa likwidacja odstawy szynowej. Częsty brak osobnych podziemnych zbiorników urobku i skały płonnej.
	Dążyć do zmniejszenia ilości przesypów w odstawie	Redukcja zjawiska kruszenia się urobku Zwiększenie wychodu klas gruboziarnistych	Znaczące odległości pól eksploatacyjnych od szybów wydobywczych
Organizacja	Zapobiegać przedostawaniu się odpadów technologicznych do urobku	Wyższa skuteczność wzbogacania	Trudności w utylizacji odpadów

Źródło: opracowanie własne.

Celem autorów nie jest opracowanie nowych technologii eksploatacji węgla kamiennego, jednakże zwrócenie uwagi na kwestię powiązania jakości nadawy oraz późniejszego produktu handlowego. Problematyka ta została poruszona w niewielu publikacjach naukowych. Zdaniem autorów w branży górniczej kwestia omawiana jest sporadycznie. Ostatnie doniesienia dot. próby zwiększenia wychodu frakcji gruboziarnistych węgla energetycznego poprzez zmianę technologii eksploatacji mogą być właściwą okazją do dyskusji na wymieniony temat. Podstawowym problemem związanym z zanieczyszczeniem urobku w polskim górnictwie węgla kamiennego jest ograniczony potencjał technologiczny wzbogacania węgla energetycznego. W przypadku węgla koksującego obecność skały płonnej, ciał obcych oraz innych niepożądanych składników jest czynnikiem utrudniającym produkcję czystego produktu handlowego. Ścianowy system eksploatacji poza niezaprzeczalną zaletą w postaci wysokiej szybkości eksploatacji powoduje silne zanieczyszczenie urobku poprzez urabianie skały płonnej oraz opady stropu.

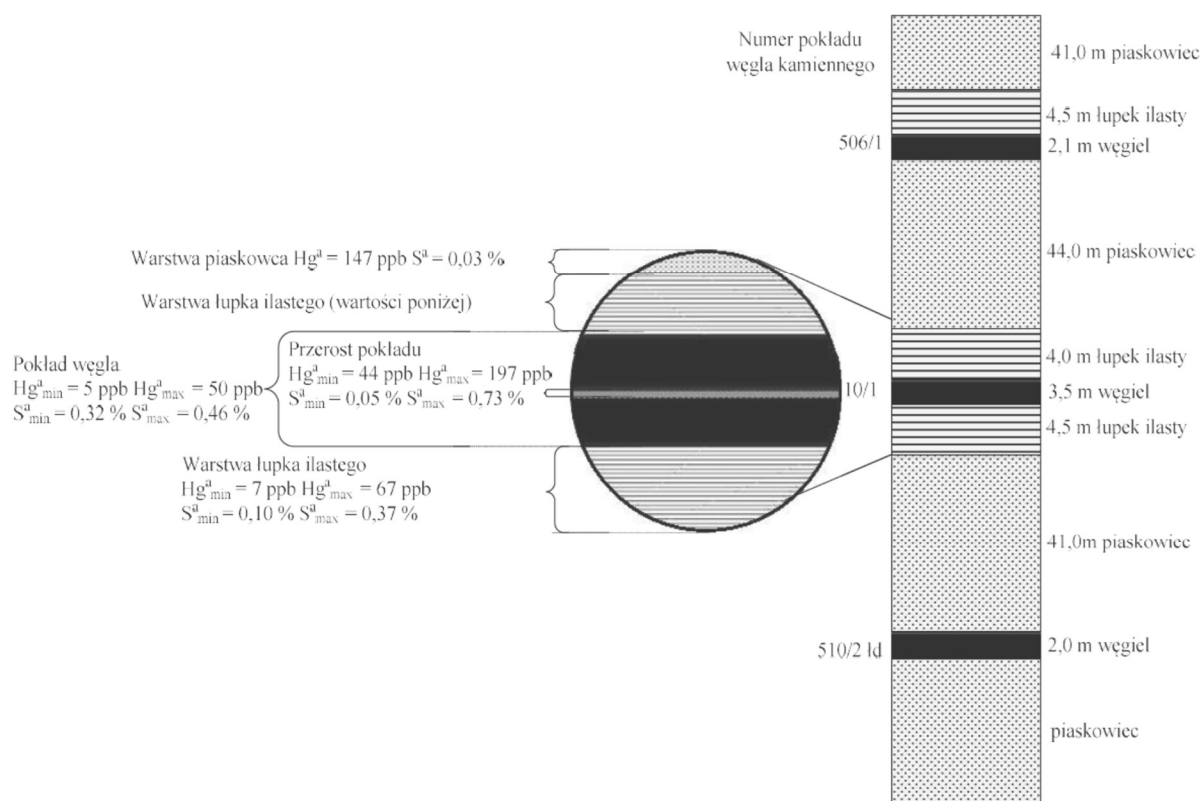
Uproszczenie systemu odstawy urobku oraz odpadów z robót korytarzowych przyniosło niewątpliwe oszczędności w zakresie utrzymania infrastruktury dołowej, jednakże najprawdopodobniej przyczynia się do obniżenia jakości produktu finalnego. Znacząca odległość ciągów odstawy taśmowej oznacza zwiększenie ilości przesypów, które z kolei powodują kruszenie się urobku na frakcje drobniejsze, których wzbogacanie jest mniej skuteczne. Szczególną grupą zanieczyszczeń urobku są odpady technologiczne powodujące zaburzenie procesów wzbogacania: mączka wapienna, emulsja olejowa, pianki uszczelniające poliuretanowe, środki chemiczne. Pracownicy zakładu przeróbki mechanicznej wskazywali powyższe zanieczyszczenia jako powody okresowych trudności technologicznych w utrzymaniu właściwych parametrów jakościowych.

Zawartość rtęci w odpadach analizowanych w pierwszej serii badań wydaje się być wyższa niż wynikałoby to z wychodu silnie zanieczyszczonych przerostów w odpadzie (druga seria). W stosunku do substancji węglowej w badanym przypadku – są to wartości o wiele większe. Zdecydowana część publikacji naukowych dotyczących problemu rtęci skupia się na występowaniu jej w produkcie oraz odpadzie bez wskazania parametrów wzbogacania. Wyniki sugerują możliwość występowania rtęci w znaczącym stężeniu nie tylko w przerostach, ale również w skale płonnej. Problem oddziałuje na rentowność przemysłu górniczego oraz niepotrzebnie zwiększa aspekt środowiskowy gospodarczego wykorzystania węgla kamiennego.

W obliczu nowych regulacji dotyczących emisji rtęci wtórne zanieczyszczenie popiołem urobku powinno zostać możliwie zredukowane. Kolejną trudnością będzie dostosowanie gospodarki oraz przekonanie odbiorców do użytkowania czystszej węgla kamiennego. Na podstawie dostępnych danych można wskazać źródło części ładunku rtęci w produkcie handlowym. W omawianym Ruchu „Jas-Mos” w maju 2016 roku eksploatowane były 4 pokłady węgla kamiennego – 1 należący do warstw rudzkich (415/1-2) oraz 3 do siodłowych (505/2, 510/2 łd, 510/1). Rysunek 47. Przedstawia przykładową analizę profilu litologicznego pod kątem występowania zanieczyszczeń. Na ilustracji nie została zachowana skala miąższości poszczególnych warstw.

W eksploatowanych złożach w Ruchu „Jas-Mos” nie istnieje problem zawartości siarki w skale płonnej, która znacząco podnosiłaby ładunek tego pierwiastka. Warstwa łupka ilastego nie została przebadana przez autorów w wymienionym zakładzie, jednakże ze względu tendencje tej skały do kruszenia się można przypuszczać, że występuje w znaczącej ilości w odpadach. W omawianym przypadku wydaje się, że to skała płonna będzie podnosić zawartość rtęci w produkcie handlowym niż ją rozrzedzać.

Zawartość rtęci w skale płonnej pozostaje słabo określona. W związku z tym jedynym racjonalnym zaleceniem na etapie procesów wydobywczych pozostaje próba wdrożenia szeregu działań w celu zmniejszenia zapozielenia urobku. Dla pełnego określenia ładunku zanieczyszczeń w danych minerałach konieczne byłoby przeprowadzenie szczegółowych badań geologicznych. Dokładna analiza ilościowa problemu zanieczyszczeń w węglu handlowym na podstawie przy dostępnych danych nie jest możliwa.



Rysunek 47. Profil litologiczny fragmentu warstw karbońskich pola górniczego Ruchu „Jas-Mos” wraz z zawartością siarki oraz rtęci.

Źródło: opracowanie własne.

3.3. Model procesów technologicznych mechanicznej przeróbki węgla

Przeprowadzone badania urobku, produktów i odpadów w Zakładzie Przeróbki Mechanicznej Ruchu „Jas-Mos” umożliwiły kompleksową analizę problemu migracji wybranych zanieczyszczeń. Omówione wyniki analizy wzbogacalności urobku pozwalają na wstępne wspomaganie decyzji w zakresie redukcji wybranych zanieczyszczeń w produkcji handlowym.

W oparciu o istniejące idee modelowania rozdziału węgla kamiennego opracowano prototyp symulacji zakładu przeróbki mechanicznej. Ze względu na koncepcyjny charakter modelu uznano, że arkusz kalkulacyjny będzie narzędziem wystarczającym dla wstępnego wspierania decyzji w zakresie wzbogacania węgla kamiennego z uwzględnieniem redukcji wybranych zanieczyszczeń. Model został oparty o następujące założenia:

- w procesie produkcji węgla kamiennego parametry jakościowe ograniczono do najważniejszych zanieczyszczeń tj.: siarki, rtęci oraz popiołu,
- parametry sterowania sprowadzono do gęstości rozdziału przy separacji metodami grawitacyjnymi,
- skuteczność wzbogacania flotacyjnego można jedynie oszacować na podstawie wyników wejść i wyjść procesu – brak stosowania odczynników zmniejsza możliwości sterowania głębokością wzbogacania,
- zakład ma możliwość wytwarzania jedynie dwóch produktów: podstawowego – mieszanki kruszonego węgla grubego, produktów wzbogacania w osadzarkach oraz

flotacji oraz tzw. sedymentu (odzysk drobnych ziarn z odwadniania flotokoncentratu),

- zawartość zanieczyszczeń w danych frakcjach densymetrycznych pozostaje stała,
- istnieje możliwość zmiany wychodów klas ziarnowych oraz densymetrycznych.

Jak dotąd problem rtęci w węglu kamiennym nie był przedmiotem modelowania. Zadaniem autorów było stworzenie narzędzia wspierającego ruch zakładu górniczego jako całości. W rozdziale opisano kolejne kroki prowadzące do budowy narzędzia.

Dane do budowy modelu

Ze względu na silne uwęglenie pokładów węgla ortokoksowego uznano, że najniższa gęstość urobku może wynosić $1,3 \text{ kg/dm}^3$, a najwyższa $2,75 \text{ kg/dm}^3$ (piaskowiec). Gęstość czystej substancji węglowej jest uzależniona od zawartości części lotnych. W Obliczeniach pominięto gęstość znacznie cięższych minerałów np. pirytu, który przy wzbogacaniu grawitacyjnym nie powinny znaleźć się w produkcie handlowym. Oszacowanie ich wychodu w urobku byłoby również trudne ze względu na brak przeprowadzonych badań w tym kierunku. W celu określenia zawartości zanieczyszczeń w nadawie o danej gęstości wykorzystano analizy wzbogacalności zawarte w załącznikach 4., 5., 6., 10. oraz w tabelach 20. oraz 21. (rozdział 2.6. i 2.7.). Krok zmiany gęstości nadawy ustalono na $0,01 \text{ kg/dm}^3$ (najmniejsza zmiana nastawy w płuczce cieczy ciężkiej). Zakres gęstości podzielono na 146 równych odcinków (od $1,3 \text{ kg/dm}^3$ do $2,75 \text{ kg/dm}^3$).

Obliczenie regresji funkcji zmiany zawartości zanieczyszczeń

W celu określenia zawartości zanieczyszczeń w nadawie o danej gęstości wykorzystano analizy wzbogacalności zawarte w załącznikach 4., 5., 6. Założono, że zawartość zanieczyszczeń w połowie badanego przedziału jest równa średniej. Na tej podstawie w arkuszu kalkulacyjnym wyznaczono linie trendu wykorzystując dopasowanie funkcji liniowej, potęgowej lub wykładniczej. Tabela 29. przedstawia wybrane wzory regresji dla obliczenia zawartości zanieczyszczeń przy danej gęstości.

Tabela 29. Płuczka cieczy ciężkiej – wzory regresji.

Parametr	Przedział	Wzór	R ²	Frakcja
Popiół	Pełny	$y = -19,74x^2 + 149,26x - 159,55$	0,99	+20 mm
Siarka	Pełny	$y = 1,4732x^{-3,861}$	0,99	
Rtęć	1,3-1,48	$y=5$	1	
	1,49-1,93	$y = -1734,7x^3 + 8544,5x^2 - 13816x + 7359,9$	0,97	
	1,94-2,75	$y = 570,99x^{-3,613}$	0,99	

Źródło: opracowanie własne.

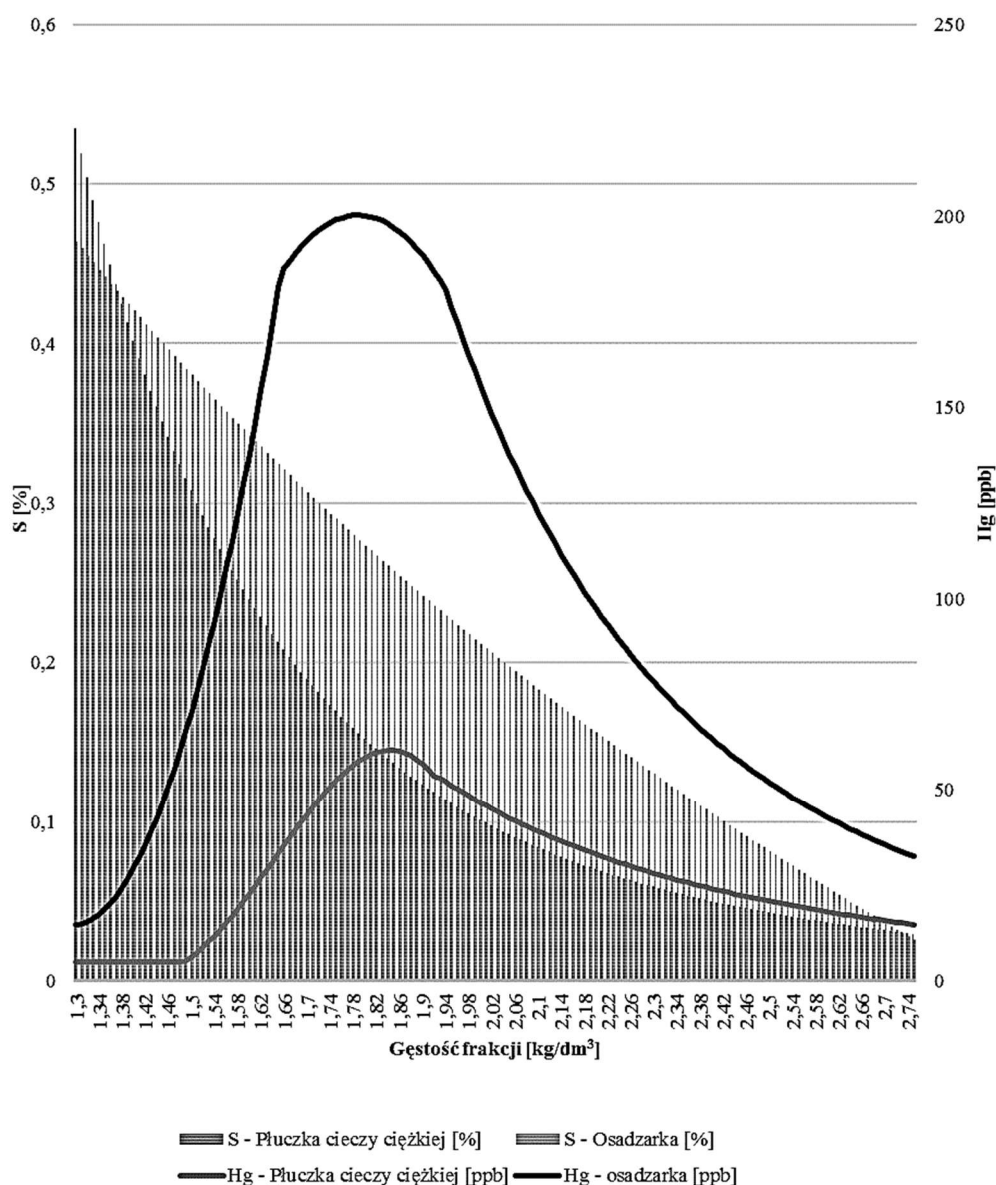
Zależność pomiędzy zawartością popiołu a gęstością nadawy, jak również siarki zostały określone przez jedną funkcję dla całego przedziału. W przypadku rtęci w związku ze stałą wartością w „czystym węglu”, znacznym wzrostem jej zawartości w przerostach oraz gwałtownym spadkiem w skale płonnej konieczne było wyznaczenie trzech pomocniczych przedziałów dla otrzymania wysokiej wartości R². W przypadku osadzarki problem ten rozwiązano w podobny sposób, co zostało zaprezentowane w tabeli 30.

Tabela 30. Osadzarka – wzory regresji.

Parametr	Zakres	Wzór	R ²	Frakcja
Popiół	Pełny	$y = 134,78\ln(x) - 34,873$	1	0,5-20 mm
Siarka	Pełny	$y = -0,585\ln(x) + 0,6174$	1	
Rtęć	1,3-1,65	$y = 1305,3x^2 - 3373,7x + 2194,4$	1	
	1,65-1,95	$y = -850x^2 + 3040x - 2517,9$	1	
	1,95-2,75	$y = 4682,7x^{-4,912}$	1	

Źródło: opracowanie własne.

Dla rtęci przy wyznaczeniu zależności od gęstości zdecydowano o pominięciu jednostkowego pomiaru dla gęstości 1,75 = 154 ppb (zakres 1,6-1,7 kg/dm³), która była niezgodna z trendem. Po wyznaczeniu właściwych funkcji przystąpiono do obliczenia zawartości zanieczyszczeń dla danej gęstości. Rysunek 48. przedstawia wykres zawartości siarki oraz rtęci przy danej gęstości urobku.



Rysunek 48. Siarka całkowita oraz rtęć w urobku w funkcji gęstości.

Źródło: opracowanie własne.

Zespół wykresów jasno obrazuje, że problem zawartości rtęci w urobku dotyczy przede wszystkim obecności przerostów oraz skały płonnej w urobku. Rtęć w czystym urobku zawarta jest w ilości znacznie poniżej tła geochemicznego. Kolejnym etapem budowy modelu było obliczenie imperfekcji procesów wzbogacania.

Imperfekcja oraz parametry wzbogacania

Skuteczność wzbogacania określana jest mianem imperfekcji. Formuła pozwalająca na otrzymanie jej wartości została zaczerpnięta z publikacji dotyczących symulacji zakładu wzbogacania węgla, zawierających także moduły kreślenia krzywych rozdziału [57, 78]. Uzysk danej frakcji densymetrycznych przy danej gęstości może być obliczany wg wzoru:

$$f(r_i r_r) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{tgh} \left[\frac{0,5493}{E_p} (r_i - r_r) \right]$$

r_r – gęstość rozdziału

r_i – gęstość frakcji

f_i – liczba rozdziału dla i-tej frakcji gęstościowej

E_p – rozproszenie prawdopodobne

Rozproszenie prawdopodobne jest równe:

$$\text{Dla osadzarki } E_p = I(r_r - 1)$$

$$\text{Dla płuczki cieczy ciężkiej } E_p = I r_r$$

Funkcja służy do określenia liczby rozdziału – wartości prawdopodobieństwa z jaką dana frakcja densymetryczna znajdzie się w koncentracie przy danej gęstości rozdziału oraz dokładności separacji. Im większa wartość imperfekcji – tym większe prawdopodobieństwo, na to że pożądana frakcja znajdzie się w odpadzie – i na odwrót, że niepożądana frakcja trafi do produktu.

Obliczenia

Podstawowym celem modelu procesu produkcji węgla jest wskazanie zawartości danych zanieczyszczeń przy określonych nastawach wzbogacalników, uzysku produktów oraz odpadów. Poprzez iloczyn liczby rozdziału oraz wychodu danej frakcji otrzymano udział procentowy frakcji, który jest koncentratem procesu.

$$\gamma_p = f_i * \gamma_i$$

γ_i – wychód frakcji [%]

γ_p – udział procentowy frakcji densymetrycznej, który jest koncentratem

Dla dalszych celów obliczeń dla każdego z omawianych zanieczyszczeń (popiołu, siarki, rtęci) określono ładunek zanieczyszczeń w danej klasie densymetrycznej – wartość bezwymiarowa.

$$L_p = \gamma_p * C$$

L_p – ładunek zanieczyszczeń we frakcji

C – zawartość zanieczyszczeń [%], [ppb]

Po dodaniu kolejnych ładunków danego zanieczyszczenia otrzymano ładunek skumulowany.

$$L_{sk} = \sum_n L_{pn}$$

L_{sk} – ładunek skumulowany

Kumulacja kolejnych udziałów procentowych frakcji, która jest koncentratem, pozwoliła na obliczenie zawartości danego zanieczyszczenia w produkcie handlowym.

$$\gamma_{p\ sk.} = \sum_n \gamma_p$$

$\gamma_{p\ sk.}$ – udział procentowy frakcji skumulowany

$$\frac{L_{sk}}{\gamma_{p\ sk.}} = C_{produktu}$$

Wartości dla odpadów zostały obliczone jako odwrotność uzysku produktu. Dalsze obliczenia są tożsame.

$$\gamma_o = (1 - f_i) * \gamma_i$$

γ_i – wychód frakcji [%]

γ_o – udział procentowy frakcji densymetrycznej, który jest odpadem

Zmiana nastaw oraz dokładności wzbogacania wpływa na uzysk oraz parametry jakościowe otrzymanego produktu oraz odpadów. Rysunek 49. przedstawia osobny arkusz służący do ustalenia gęstości rozdziału oraz ewentualnej zmiany wartości procentowych wychodów nadaw do poszczególnych wzbogacalników w odniesieniu do masy węgla surowego. Ładunek zanieczyszczeń ustalany jest wg podanego wydobycia brutto. Istnieje możliwość wyboru gęstości rozdziału w przedziale 1,35-2 kg/dm³ oraz określenia imperfekcji od 0,01 do 0,30. Wyniki redukcji zanieczyszczeń w procesie flotacji zostały ustalone „na sztywno” ze względu na brak przeprowadzonych badań flotowalności. Model umożliwia wykonanie oceny zawartości wybranych zanieczyszczeń na podstawie wykonanych badań. Warto zauważyć, że suma kontrolna nie jest równa wydobyciu brutto ze względu na wzięcie pod uwagę odcieku z odwadniania flotokonzentratu, którego nie uda się odzyskać w prasach filtracyjnych. Rysunek 50. przedstawia tabelę wyników wzbogacania, obejmującą produkty oraz odpady. Szczegółowe omówienie wyników kalkulacji znajduje się w rozdziale 3.5.

Model procesu produkcji węgla handlowego uwzględniający redukcję wybranych zanieczyszczeń - beta KWK "Borynia-Zofiówka-Jastrzębie" Ruch "Jas-Mos"		
1. Moduł wejścia		
Określ wydobyte brutto	10000	Mg
2. Moduł płuczki cieczy ciężkiej dwuproduktowej		
Określ gęstość rozdziálu	1,5	kg/dm ³
Określ imperfekcję wzbogacalnika	0,04	
3. Moduł osadzarki dwuproduktowej		
Określ gęstość rozdziálu	1,5	kg/dm ³
Określ imperfekcję wzbogacalnika	0,15	
4. Moduł flotacji		
Wyłączone	wylaczony	
Wejście (w stanie suchym)	1200	Mg
* woda słona - ograniczone sterowanie		
5. Moduł odzysku sedymentu		
Mieszać z produktem podstawowym?	TAK	
7. Moduł wejść/wyjść		
Węgiel surowy (urobek)	100,0%	wartość ustalona w zakładzie górniczym
Odpady z kruszarki Bradford	2,0%	wartość ustalona w zakładzie górniczym
Nadawa do osadzarki	50,0%	wartość ustalona w zakładzie górniczym
Nadawa do wzbogacalnika DISA	28,0%	wartość ustalona w zakładzie górniczym
Nadawa na flotację	1200	12% urobku Mg
Flotokoncentrat po odwadnianiu	60%	* wejścia na flotację
Odpady flotacyjne	15%	* wejścia na flotację
Odzysk sedymentu	10,00%	* wejścia na flotację (wg wydobywania brutto)

Rysunek 49. Arkusz sterowania parametrami wzbogacania.

Źródło: Opracowanie własne.

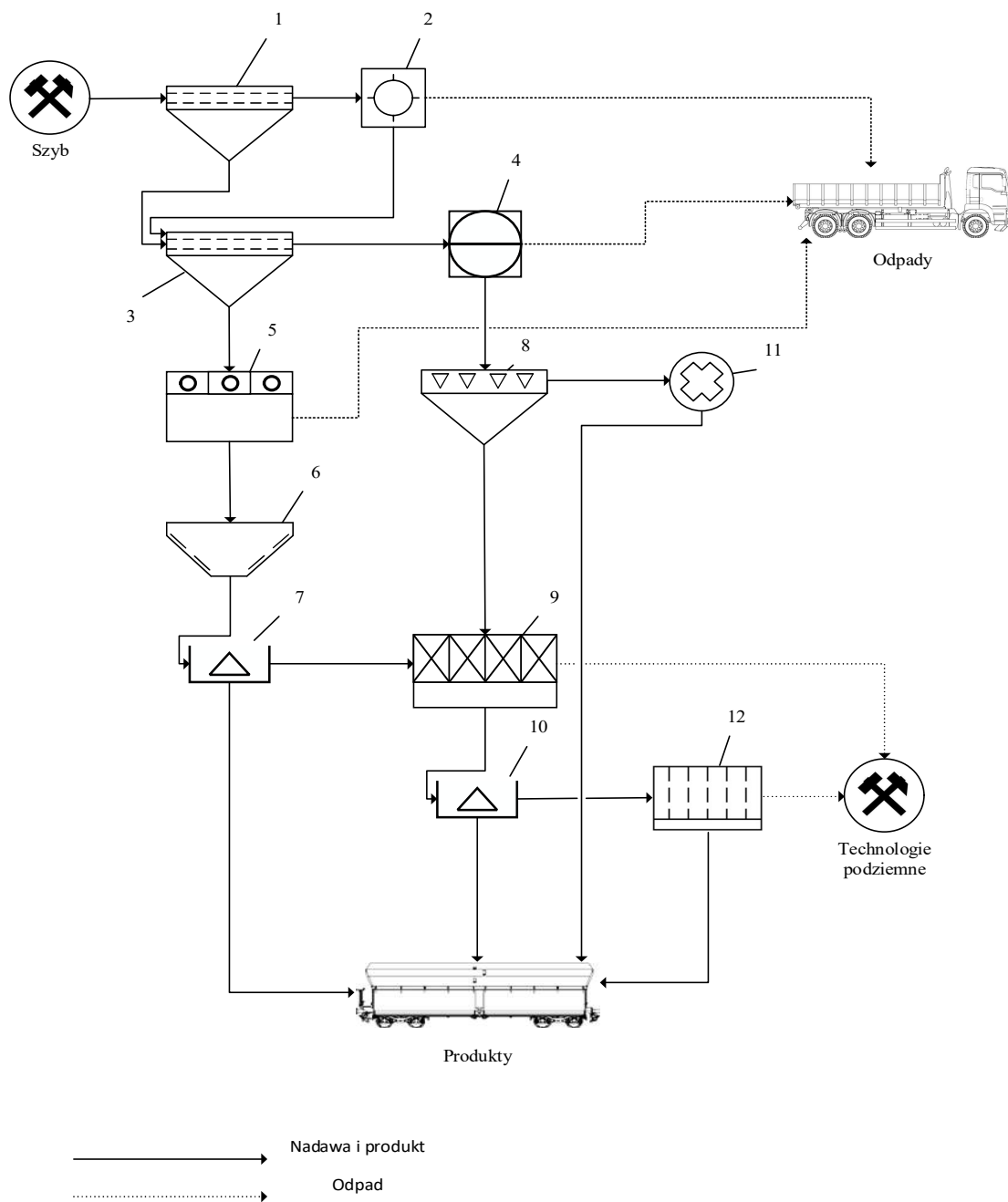
Produkt	Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]
1. Płuczka cieczy ciężkiej	1559	5,99%	0,47%	5,1	93,44	7,25	7,93
2. Osadzarka	4374	5,33%	0,44%	20,4	233,28	19,37	89,15
3. Flotacja	840	7,08%	0,42%	66,4	59,47	3,53	55,78
4. Sedymet	180	11,56%	0,40%	53,0	20,81	0,72	9,54
Produkt handlowy	6953	5,85%	0,44%	23,4	407,00	30,87	162,39
Odpad	Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]
1. Kruszarka bębnowa	200	87,74%	0,03%	146,90	175,48	0,06	29,38
2. Płuczka cieczy ciężkiej	1241	73,60%	0,09%	27,14	913,64	1,13	33,70
3. Osadzarka	1426	53,44%	0,23%	77,98	761,95	3,34	111,19
4. Flotacja	180	54,77%	0,41%	81,70	98,59	0,74	14,71
Suma odpadu	3047			Suma	1949,66	5,27	188,97
Suma kontrolna	10001						

Rysunek 50. Tabela wyników modelowania procesu produkcji węgla.

Źródło: opracowanie własne.

3.4. Mapa procesów oraz możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń w procesach produkcji węgla kamiennego

Zgodnie z opracowanym modelem produkcji węgla handlowego wskazano możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń w procesach wzbogacania w Ruchu „Jas-Mos”. Zmiany w procesie technologicznym mogłyby wpłynąć na zwiększenie potencjału redukcji wybranych zanieczyszczeń Rysunek 51. przedstawia uproszczoną mapę procesów zakładu oraz maszyny i urządzenia wskazane w tabeli 31.



Rysunek 51. Mapa procesów Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla Ruchu „Jas-Mos”.

Źródło: opracowanie własne.

Ruch „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” wyposażony jest w płuczki dwuproduktowe, co uniemożliwia wytwarzanie dwóch produktów o różnym stopniu zanieczyszczenia. W obecnej sytuacji trudno jest przewidzieć – jaki poziom zawartości rtęci będzie konkurencyjnym na rynku w przypadku wprowadzenia norm emisyjnych. W przypadku bardzo wysokiej zawartości rtęci w przerostach – możliwe jest, że zanieczyszczony nimi węgiel nie znajdzie nabywcy. W razie potrzeby uzyskania bardzo wysokich parametrów handlowych można byłoby produkować węgiel koksujący z ograniczonego zakresu sortymentów. Instalacja sit o innych średnicach oczek w kruszarce bębnowej oraz przesiewaczach spowodowałyby zmianę strumienia nadawy do innych procesów. Obecnie w ZMPW Ruchu „Jas-Mos” nie

stosuje się odczynników flotacyjnych przez co sterowanie procesem wzbogacania mułów jest ograniczone do zmian nastaw maszyny.

Tabela 31. Możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń oraz potencjalne zmiany w procesie technologicznym Ruchu „Jas-Mos”.

Numer na mapie procesów	Maszyna / urządzenie	Możliwości sterowania		Możliwe zmiany technologii
		Technologiczne	Organizacyjne	
1	Stacja przygotowania węgla (200 mm)	-	-	Zmiana średnicy oczek w sitach
2	Kruszarka bębnowa Bradford (120 mm)	-	-	
3	Przesiewacz (20 mm)	-	-	
4	Dwuproduktowa płuczka cieczy ciężkiej	Zmiana gęstości rozdziału	Wydzielenie produktu	Wzbogacanie trójproduktowe
5	Osadzarka dwuproduktowa			
6	Sita odwadniające			
7	Wirówka odwadniająco-wibracyjna			
8	Przesiewacz odwadniający	-		
9	Flotownik	Dozowanie odczynników flotacyjnych	Wydzielenie produktu	-
10	Wirówka sedymentacyjno-filtracyjna	-	-	-
11	Kruszarka koncentratu	-	-	-
12	Prasa filtracyjna	-	Wydzielenie produktu	-

Zródło: opracowanie własne.

3.5. Weryfikacja modelu

Zgodność z analizą densymetryczną

Wyniki uzyskane w modelu zostały porównane z analizą densymetryczną, w oparciu o którą został opracowany. Z powodu faktu, że zawartość zanieczyszczeń w zależności od gęstości nadawy uzyskiwana jest dzięki krzywym aproksymacji – istnieją różnice pomiędzy wynikiem modelu a wartościami stwierdzonymi w badaniach. Dokonano przykładowego porównania zawartości ww. substancji przy gęstości rozdziału równej 1,6 kg/dm³ oraz po pominięciu imperfekcji (tabela 32.).

Tabela 32. Porównanie wskazań zawartości zanieczyszczeń w modelu oraz badaniach densymetrycznych.

		A [%]	S [%]	Hg [ppb]
Płuczka cieczy ciężkiej - produkt	Model	6,63	0,46	5,30
	Pomiar	6,15	0,45	5,10
	Różnica	8%	2%	4%
Płuczka cieczy ciężkiej - odpad	Model	78,90	0,07	28,85
	Pomiar	82,10	0,06	30,00
	Różnica	4%	11%	4%
Osadzarka - produkt	Model	5,73	0,44	21,71
	Pomiar	5,11	0,39	25,02
	Różnica	12%	14%	13%
Osadzarka - odpad	Model	73,40	0,0015	97,68
	Pomiar	0,76	0,0011	88,50
	Różnica	4%	31%	10%

Zródło: opracowanie własne.

Stwierdzono, że model cechuje się wystarczającą zgodnością z badaniami densymetrycznymi. Dla uzyskania lepszego dopasowania funkcji do warunków rzeczywistych założono, że zawartość siarki w skale płonnej wynosi 0,03% (na podstawie wyników wskazanych w tabeli 20. – rozdział 2.6.). Znaczące różnice występują przy śladowych ilościach

siarki w odpadach ze wzbogacania w osadzarkach. Dla celów określenia możliwości prognozowania wybranych zanieczyszczeń w produktach dopasowanie jest wystarczające.

Zgodność z badaniami węgla handlowego

Produkty Ruchu „Jas-Mos” były obiektem kilku analiz, w których stwierdzono, że zawartość rtęci zawiera się pomiędzy 33,2 a 47,4 ppb [76]. W literaturze dostępne są również zawartości średnie wynoszące 37 oraz 40 ppb rtęci w węglu surowym [13, 80]. Zapopielenie podstawowego produktu handlowego wynosi 5,5-9%. Zawartość siarki 0,46-0,59, przy średniej 0,56. Zawartości te są zbliżone do parametrów jakościowych węgla handlowego oferowanego przez Jastrzębską Spółkę Węglową [127]. W oparciu o inne wyniki badań przeprowadzono weryfikację modelu. Dla celów weryfikacji modelu uznano, że wartość imperfekcji dla separatora cieczy ciężkiej wynosi 0,04, zaś osadzarki 0,15 [11]. Obliczenia wykonano dla produkcji brutto 10 000 Mg. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 33.

Tabela 33. Wyniki modelowania dla gęstości rozdziału 1,6 kg/dm³.

Produkt	Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]
1. Płuczka cieczy ciężkiej	1632	6,61%	0,46%	5,5	107,88	7,49	8,90
2. Osadzarka	4593	5,75%	0,44%	22,1	263,97	20,26	101,51
3. Flotacja	840	7,08%	0,42%	66,4	59,47	3,53	55,78
4. Sedymet	180	11,56%	0,40%	53,0	20,81	0,72	9,54
Produkt handlowy	7245	6,24%	0,44%	24,3	452,13	31,99	175,73
Odpad	Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]
1. Krusząka bębnowa	200	87,74%	0,03%	146,90	175,48	0,06	29,38
2. Płuczka cieczy ciężkiej	1168	76,96%	0,08%	28,01	899,20	0,90	32,72
3. Osadzarka	1208	60,56%	0,20%	81,84	731,26	2,45	98,83
4. Flotacja	180	54,77%	0,41%	81,70	98,59	0,74	14,71
Suma odpadu	2756			Suma	1904,53	4,15	175,64
Suma kontrolna	10001						

Źródło: opracowanie własne.

Dla podanej gęstości rozdziału uzyskano koncentrat węgla koksującego o zapopieleniu 6,24 %, zasilaczeniu 0,44 % oraz zawartości rtęci 24 ppb, a więc znacznie niższej niż wskazuje pomiar o najniższej wartości. W związku z tym spróbowano zwiększyć gęstość rozdziału dla uzyskania węgla o podobnym stopniu zanieczyszczenia rtęcią. Przy gęstości rozdziału wynoszącej 2 kg/dm³ – czyli przy urobku uzyskano wyniki wskazane w tabeli 34.

Tabela 34. Wyniki modelowania dla gęstości rozdziału 2 kg/dm³.

Produkt	Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]
1. Płuczka cieczy ciężkiej	1830	10,78%	0,43%	8,8	197,30	7,85	16,17
2. Osadzarka	5033	8,06%	0,43%	28,6	405,64	21,70	143,93
3. Flotacja	840	7,08%	0,42%	66,4	59,47	3,53	55,78
4. Sedymet	180	11,56%	0,40%	53,0	20,81	0,72	9,54
Produkt handlowy	7883	8,67%	0,43%	28,6	683,23	33,79	225,42
Odpad	Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]
1. Krusząka bębnowa	200	87,74%	0,03%	146,90	175,48	0,06	29,38
2. Płuczka cieczy ciężkiej	970	83,47%	0,06%	26,23	809,78	0,54	25,45
3. Osadzarka	767	76,86%	0,13%	73,54	589,59	1,01	56,41
4. Flotacja	180	54,77%	0,41%	81,70	98,59	0,74	14,71
Suma odpadu	2117			Suma	1673,43	2,35	125,94
Suma kontrolna	10001						

Źródło: opracowanie własne.

Frakcja densymetryczna [kg/dm ³]	Wychód [%]		min. %	maks. %
-1,4	64,42	Frakcja 1	55	80
1,4-1,5	13,00	Frakcja 2+3	5	15
1,5-1,6	1,54	Frakcja 4+5+6+7+8	15	30
1,6-1,7	1,80			
1,7-1,8	1,26			
1,8-1,9	5,01			
1,9-2,0	3,53			
2-	9,44			
SUMA	100	SUMA	100	

Rysunek 52. Moduł losowy występowania klas densymetrycznych w urobku.

Źródło: opracowanie własne.

Po zwiększeniu zawartości popiołu do 8,67 % w produkcie handlowym możliwe było uzyskanie koncentratu o zawartości rtęci 29 ppb, która jest zbliżona do najniższego znanego pomiaru wykonanego dla węgla handlowego. Biorąc pod uwagę wyniki badań densymetrycznych wskazane w załączniku 4., 5., 6. stwierdzono, że urobek cechował się wyjątkowo dobrą charakterystyką wzbogacalności. Założono zatem, że uzyskanie węgla o wyższej zawartości rtęci będzie prawdopodobne w przypadku zmiany wychodu poszczególnych frakcji gęstościowych. Podjęto próbę symulacji zjawiska za pomocą dodatkowego modułu losowego opracowanego w arkuszu kalkulacyjnym. Został on przedstawiony na rysunku 52.

Za pomocą dodatkowego modułu opartego na losowaniu wychodu frakcji przy założonych wartościach maksymalnych i minimalnych wykonano symulację produkcji węgla handlowego dla urobku o zmiennej wzbogacalności. Tabela 35. zawiera przykładowe wyniki wychodu.

Tabela 35. Wyniki wychodu frakcji oraz parametry jakościowe produktu handlowego.

Frakcja densymetryczna [kg/dm ³]		Wychód frakcji [%]		
		Los 1	Los 2	Los 3
-1,4		45,18	55,04	37,77
1,4-1,5		13,65	11,62	12,83
1,5-1,6		5,54	15,43	11,38
1,6-1,7		12,68	5,71	9,57
1,7-1,8		14,05	5,29	7,55
1,8-1,9		3,04	1,6	2,5
1,9-2,0		0,93	1,34	5,53
2-		4,93	3,97	12,87
Produkt handlowy	Uzysk [Mg]	6858	7990	6005
	A [%]	9,59	9,52	10,97
	S [%]	0,42	0,42	0,41
	Hg [ppb]	34,9	30,8	38,1

Źródło: opracowanie własne.

Rozwarstwienia pokładu oraz zaburzenia geologiczne mogą wpływać na zmianę wychodu frakcji densymetrycznych, a tym samym powodować wahania parametrów jakościowych produktu handlowego. Symulacja zmian wychodu frakcji przeprowadzona w modelu pokazała, że ww. zjawiska mogą przyczyniać się do zwiększenia ładunku rtęci w węglu handlowym. W przypadku znacznego zwiększenia gęstości rozdziału lub stanu awaryjnego może nastąpić wzrost zawartości rtęci do kilkudziesięciu ppb. W zaprezentowanych wynikach losowania warto zauważyć zwiększoną zawartość popiołu, który jest bezpośrednio związany ze wzrostem ładunku rtęci. W przypadku klas ziarnowych powyżej 0,5 mm wydaje się, że wzrost gęstości rozdziału będzie powodował niewielkie zmniejszenie stężenia siarki w węglu handlowym.

Zgodność z badaniami I serii

Badania wykonane w Ruchu „Jas-Mos” dla celów budowy bilansu opisane w rozdziale 2.6. wskazały na nieznacznie wyższą zawartość rtęci w urobku węgla kamiennego $Hg^d = 53$ ppb, przy niskim zapopieleniu wynoszącym około 14%, co pozwala stwierdzić, że to najprawdopodobniej przerost spowodował zwiększenie wartości tego parametru. Dodatkowo stwierdzone wysokie stężenie rtęci w gruboziarnistym piaskowcu pozwala przypuszczać, że ładunek rtęci w skale płonnej nie jest równomierny. Obecność 64 ppb rtęci w produkcie handlowym jest trudna do wytłumaczenia na podstawie jej obecności w przerostach.

Jak zostało to wcześniej wspomniane badania były prowadzone w momencie funkcjonowania jednej ściany eksploatacyjnej. W przypadku zmieszania strugi urobku z pokładów o wyższej zawartości rtęci – z niższą (patrz załącznik 4., 5., 6., 9., 10.) możliwe jest uzyskanie najczęściej wskazywanych wyników wzbogacania w granicach 33-45 ppb. Ogólna wartość redukcji na poziomie 30-50% w normalnym ruchu zakładu wydaje się być zgodna z wynikami modelu.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W monografii podjęto próbę rozwiązania problemu naukowego redukcji wybranych zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla handlowego. Analiza źródeł literaturowych pozwoliła na stwierdzenie, że minimalizacja ładunku siarki oraz rtęci jeszcze na etapie wytwarzania paliw pozwoli na zmniejszenie emisji wynikającej z użytkowania węgla kamiennego. Do tej pory nie opracowano jednak kompleksowego modelu procesu produkcji węgla kamiennego uwzględniającego redukcję tych zanieczyszczeń.

Dla celów budowy prototypowego modelu dokonano przeglądu literatury z zakresu: ochrony środowiska, eksploatacji oraz przeróbki węgla kamiennego, geochemii, problematyki modelowania procesów przemysłowych. Podsumowanie badań zostało opracowane w odniesieniu do poszczególnych elementów metodyki, zaprezentowanych na rysunku 1. Tabela 36. zawiera podsumowanie etapów realizacji opracowania wraz z osiągniętymi efektami.

Tabela 36. Podsumowanie efektów przeprowadzonych badań

Etap	Problem	Efekt
Studia literaturowe	Zanieczyszczenia w węglu kamiennym	- określono podstawowe parametry handlowe węgla kamiennego oraz jego zanieczyszczenia, - dokonano analizy problematyki występowania zanieczyszczeń w węglu kamiennym oraz możliwości ich redukcji w procesie produkcyjnym, - stwierdzono, że problem zawartości rtęci w węglu handlowym nie został do tej pory rozwiązany, - uzasadniono konieczność poszukiwania korelacji rtęci z innymi parametrami węgla kamiennego (zwłaszcza zawartością siarki)
	Aktualne i projektowane regulacje w zakresie emisji rtęci	- dokonano analizy potencjalnego wpływu aktów wykonawczych Konwencji Minamata na polski przemysł górniczy oraz użytkowników węgla kamiennego, - uznano rtęć za prawdopodobny parametr handlowy w przyszłości, - uzasadniono konieczność rozpoznania możliwości redukcji rtęci w procesie jego wydobycia oraz przeróbki
	Teoria i praktyka przeróbki węgla kamiennego	- określono podstawowe zadania przeróbki mechanicznej węgla, - przeprowadzono inwentaryzację polskich zakładów przeróbki mechanicznej węgla kamiennego pod kątem zakresu wzbogacania, - uznano eksploatację węgla kamiennego oraz jego przeróbkę za pierwszy etap czystych technologii węglowych, - wykonano analizę możliwości sterowania jakością produktu poprzez nastawy wzbogacalników
	Zawartość rtęci w produktach górnictwa węgla kamiennego	- określono formy występowania rtęci oraz jej korelacji z innymi substancjami w węglu kamiennym, - dokonano analizy światowych wyników dotyczących skuteczności redukcji rtęci w węglu kamiennym w procesach jego przeróbki, - wskazano na prawdopodobny związek korelacji rtęci z siarką oraz popiołem w węglu kamiennym
	Eksploatacja złóż	- przeprowadzono analizę możliwości ograniczenia ładunku zanieczyszczeń w węglu surowym, - omówiono czynniki wpływające na obecność skały płonnej w urobku
	Reżim produkcji węgla kamiennego	- oceniono wpływ zakresu wzbogacania na jakość produktów handlowych zakładu górniczego, - dokonano analizy możliwości wydzielenia półproduktów (przerostów) we wzbogacalnikach w celu poprawy jakości produktu podstawowego
Problematyka	Uzasadnienie konieczności opracowania modelu redukcji zawartości rtęci w węglu	- wskazano na brak narzędzi wspierających produkcję węgla o zmniejszonej zawartości rtęci w oparciu o standardowe technologie przeróbki mechanicznej, - stwierdzono brak dostatecznego rozpoznania problematyki koncentracji rtęci w węglu kamiennym dla celów sterowania jej ładunkiem

	Możliwości sterowania ładunkiem rtęci w procesie przeróbki węgla	- określono możliwości zmiany ładunku rtęci w procesie wzbogacania węgla kamiennego poprzez zmianę nastaw wzbogacalników oraz zastosowanie standardowych technologii przeróbki mechanicznej, - wskazano przyszłe parametry sterowania w modelu produkcji węgla handlowego z uwzględnieniem redukcji wybranych zanieczyszczeń
	Możliwości sterowania ładunkiem rtęci w procesie eksploatacji podziemnej	- określono prawdopodobny wpływ czynników geologiczno-górnich na zanieczyszczenie węgla surowego związkami rtęci, - opracowano kierunki wspomagania redukcji zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla na etapie jego eksploatacji
	Wpływ reżimu produkcji (produkty/odpady, przerosty)	- uzasadniono konieczność zbadania poszczególnych frakcji densymetrycznych urobku w celu zlokalizowania koncentracji rtęci oraz innych zanieczyszczeń, - wskazano na racjonalność wyboru zakładu przeróbki mechanicznej o pełnym zakresie wzbogacania dla celów budowy modelu
Badania własne	Badania możliwości ograniczenia ładunku rtęci w procesie wydobywania oraz przeróbki węgla kamiennego	- wykonano bilans redukcji rtęci w węglu handlowym w oparciu o infrastrukturę polskich kopalń węgla kamiennego, - na podstawie badań pilotażowych w ZG „Siltech” w celu zbadania zależności pomiędzy zawartością skały płonnej w urobku a zawartością rtęci stwierdzono związek zawartości popiołu i rtęci w urobku, - dokonano analizy wyników badań węgla handlowego JSW SA pozwoliły na stwierdzenie zależności pomiędzy zasiarczeniem, zapozieleniem oraz zawartością rtęci, - przeprowadzono badania wejść i wyjść procesów wzbogacania pozwoliły na stwierdzenie istotnej redukcji ładunku rtęci przy okazji produkcji węgla spełniającego wymagania branży koksowniczej, - opracowano szczegółowy bilans zanieczyszczeń w produktach i odpadach ZPMW Ruchu „Jas-Mos”, - przeprowadzono analizę sitową oraz densymetryczną nadawy do płuczki cieczy ciężkiej oraz osadzarki – stwierdzono koncentrację rtęci w przerostach i skale płonnej oraz koncentrację siarki w frakcji organicznej
Budowa modelu	Założenia do budowy modelu	- określono szczegółowość modelu, - wyznaczono funkcje aproksymujące dla zmiany gęstości frakcji oraz zawartości popiołu, siarki oraz rtęci. - opracowano model imperfekcji wzbogacalników
	Baza danych dot. zawartości rtęci w węglu kamiennym	opracowano bazę około 80 wyników dot. zawartości rtęci, siarki i popiołu węgla surowego, produktów i odpadów pochodzących z Ruchu „Jas-Mos”
	Budowa modelu redukcji zawartości rtęci w węglu handlowym	opracowano prototypowy model produkcji węgla handlowego z uwzględnieniem redukcji zanieczyszczeń, którego wyniki są oparte na wynikach analiz densymetrycznych, fizyko-chemicznych oraz mapie procesów zakładu przeróbki mechanicznej Ruchu „Jas-Mos”
Weryfikacja modelu	Weryfikacja modelu	- przeprowadzono weryfikację modelu w oparciu o wyniki badań densymetrycznych, wyniki badań węgla handlowego, - wprowadzono dodatkowy moduł losowania wychodu klas densymetrycznych dla określenia możliwości wystąpienia danego stężenia zanieczyszczeń
	Zalecenia dla zakładu górniczego	opracowano ogólne zalecenia dla zakładu górniczego w odniesieniu do przyszłych regulacji emisji rtęci
	Kierunki dalszych badań	wskazano możliwości poprawy funkcjonalności modelu procesu produkcji węgla handlowego uwzględniającego redukcję wybranych zanieczyszczeń

Zródło: opracowanie własne.

WNIOSKI

W opracowaniu monograficznym przyjęto tezę, że „Istnieje możliwość obniżenia ładunku siarki i rtęci w węglu handlowym przy wykorzystaniu opracowanego modelu uwzględniającego dostępne technologie wydobywania i wzbogacania węgla”. Na podstawie badań literaturowych, licznych badań fizyko-chemicznych oraz pełnej analizy densymetrycznej nadawy do wzbogacalników zbudowano model, który w pełni uzasadnił postawioną tezę. Wszystkie wskazane cele zostały zrealizowane.

Praca jest oryginalnym rozwiązaniem problemu badawczego, jakim była budowa narzędzia wspomagającego redukcję zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla. Opracowanie stanowi istotny dowód na możliwość redukcji rtęci w procesach wzbogacania węgla oraz przyczynek do sterowania jej zawartością w produktach handlowych. Znajomość występowania rtęci w górotworze pozwala na uznanie jej za przewidywalny parametr jakościowy.

Wnioski szczegółowe

W oparciu o przeprowadzone badania opracowano poniższe wnioski szczegółowe:

- opracowanie w pełni funkcjonalnego modelu procesu produkcji węgla handlowego z uwzględnieniem redukcji wybranych zanieczyszczeń jest możliwe i pozwoli na podejmowanie racjonalnych decyzji w zakresie dostosowania produktu do nowych wymagań środowiskowych,
- zakres wzbogacania, nastawy maszyn przeróbki mechanicznej oraz reżim technologiczny zakładu istotnie warunkują zawartość rtęci i siarki w produktach handlowych,
- pełny potencjał redukcji rtęci w polskim węglu kamiennym poprzez wzbogacanie istnieje jedynie w zakładach górniczych wydobywających węgiel koksujący,
- krzywe zawartości rtęci w odniesieniu do gęstości frakcji wykonane na podstawie przeprowadzonych badań w Ruchu „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” wskazują na jej silną koncentrację w przerostach oraz skale płonnej, przez co w tym przypadku możliwa jest jej redukcja poprzez standardowe technologie przeróbki mechanicznej,
- zawartość siarki w węglu ww. zakładu jest związana z substancją organiczną, a więc istnieje jedynie potencjał obniżenia jej ładunku,
- rtęć jest sterowalnym parametrem handlowym węgla kamiennego, pomimo braku dostępnych metod ciągłego pomiaru jej zawartości w toku procesu produkcyjnego w zakładzie górniczym,
- opracowany model wskazuje na możliwość dostosowania reżimu produkcji węgla kamiennego w odniesieniu do występowania rtęci we frakcji organicznej, mineralnej oraz przerostach,
- określenie potencjału redukcji rtęci na podstawie jej zawartości w produktach handlowych danego zakładu górniczego jest nieuzasadnione, gdyż zawartość rtęci nie jest zależna linowo od zawartości popiołu i siarki,
- opracowany model wskazuje na możliwość produkcji węgla handlowego o zawartości rtęci poniżej 30 ppb w Ruchu „Jas-Mos”,
- w omawianym przypadku skuteczność redukcji ładunku rtęci w węglu handlowym wynosi od 40% do 70% w zależności od gęstości rozdziału oraz imperfekcji wzbogacalników,
- przeróbka węgla kamiennego jest istotnym obszarem czystych technologii węglowych.

Działania doskonalące

Dla poprawy funkcjonalności modelu procesu produkcji węgla handlowego z uwzględnieniem redukcji zanieczyszczeń należy:

- szczegółowo doprecyzować wychód frakcji gęstościowych,
- przeprowadzić badania flotowalności w przypadku zakładów prowadzących wzbogacanie w pełnym zakresie uziarnienia (w kalkulacji uznano, że skuteczność redukcji pozostaje stała),
- wprowadzić dodatkowe parametry jakościowe (wilgoć, wartość opałową lub inne) oraz moduł obliczeniowy ceny produktu i kosztu zagospodarowania odpadów przy danych parametrach jakościowych,
- rozbudować bazę danych dotyczącą węgla kamiennego z innych zakładów górniczych dla umożliwienia produkcji mieszanek spełniających dane parametry jakościowe.

Zalecenia dla zakładu górniczego

Część badawcza pozwala na wskazanie zaleceń dla zakładu górniczego, które mogą okazać się przydatne w przypadku wprowadzenia programu redukcji emisji rtęci:

- należy dążyć do jak najmniejszego wtórnego zanieczyszczenia urobku w procesie eksploatacji podziemnej,
- rozważyć wprowadzenie trójproduktowego reżimu wzbogacania w celu wytwarzania węgla o bardzo wysokiej czystości oraz wydzielenia frakcji zawierających znaczący ładunek rtęci,
- należy dążyć do zwiększenia skuteczności separacji produktów i odpadów poprzez zmniejszenie imperfekcji wzbogacalników,
- przeprowadzić analizę ekonomiczną modernizacji zakładu przeróbki mechanicznej węgla dla zwiększenia zakresu wzbogacania (jeśli nie występuje),
- przeprowadzić pełne badania wzbogacalności urobku z eksploatowanych złóż pozwalające na wskazanie koncentracji zanieczyszczeń w górotworze.

LITERATURA

- [1] Akers D.: *Precombustion control option for air toxics*. Fuel and Energy Abstracts, vol. 37(3), 1996.
- [2] Aleksa H., Dyduch F., Wierzchowski K.: *Chlor i rtęć w węglu i możliwości ich obniżenia metodami przeróbki mechanicznej*, Górnictwo i Geoinżynieria, r. 31, z. 3/1, 2007, s. 35-48.
- [3] Bęben A.: *M jak muł, Z jak zakaz*, Trybuna Górnicza, 11 kwietnia 2015.
- [4] Beckers R., Heidemeier J., Hiliges F.: *Kohlekraftwerke im Fokus der Quecksilberstrategie*, Umwelt Bundesamt, 2012.
- [5] Biały W.: *Zasoby węgla kamiennego – urabialność pokładów węglowych*, Gliwice: P.A. Nova SA, 2014.
- [6] Blaschke St.: *Technologia i technika przeróbki mechanicznej kopalin użytecznych*, tom 1, Stalinogród: Wydawnictwo Górniczno-Hutnicze, 1954.
- [7] Blaschke W., Baic I.: *Problematyka depozytów mułów węglowych w Polsce*, Polityka energetyczna, tom 15, z. 3, 2012, s. 211-219.
- [8] Blaschke W., Blaschke S., Aleksa H., Wierzchowski K.: *Analiza wpływu dokładności wzbogacania (imperfekcja) na wartość produkcji węgla energetycznego*, Polityka energetyczna, tom 11, z. 1, 2008, s. 89-99.
- [9] Blaschke W., Linh N., Czarny G.: *Ekonomiczne kryterium wyboru sposobu wzbogacania mialów węgla koksowego*, Polityka energetyczna, tom 12, z. 2, 2009, s. 29-40.
- [10] Blaschke W.: *Problem produkcji czystych węgli jako źródła wytwarzania czystej energii*, Międzynarodowa Konferencja Przyszłość węgla w gospodarce świata i Polski, Katowice, 2004, s. 170-177.
- [11] Blaschke W.: *Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne*, Kraków: Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2009.
- [12] Blaschke W.: *Technologie czystego węgla rozpoczynają się od wzbogacania*, Polityka energetyczna, tom 1, z. 2, 2008, s. 7-13.
- [13] Bojakowska I., Sokołowska G.: *Rtęć w kopalinach wydobywanych w Polsce jako potencjalne źródło zanieczyszczeń środowiska*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, nr 394, Sosnowiec, 2001, s. 5-53.
- [14] Burczyk A., Bukowski Z.: *Ekologiczne aspekty stosowania węgla kamiennych. Problem rtęci w węglach kamiennych*, <http://www.labportal.pl> [dostęp 01.01.2016]
- [15] Central Institute of Mining & Fuel Research, *Assessment of the Mercury Content in Coal fed to Power Plants and study of Mercury Emissions from the Sector in India*, 2014.
- [16] *Chemia – encyklopedia dla wszystkich*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [17] Chodyncka L., Gabzdyl W., Kapuściński T.: *Mineralogia i petrografia dla górników*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1985.
- [18] Chugh Y.P., Moharana A., Patwardhan A.: *Dilution in underground coal mining in USA – impacts on production, processing and waste disposal*, International Seminar on Mineral Processing Technology, New Delhi, India, 2010, s. 10-20.

- [19] Cierpisz S.: *Automatyczna regulacja procesu wzbogacania węgla w osadzarkach*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
- [20] Cierpisz S.: *Pomiary jakości węgla – pomiary i sterowanie*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.
- [21] Cierpisz St., Pielot J., Heyduk A., Joostberens J.: *Komputerowe modele symulacyjne przebiegu procesów wzbogacania węgla*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.
- [22] Climate and Pollution Agency, *The mercury problem: Reducing and eliminating mercury pollution in Norway*, Oslo, 2010.
- [23] *Coal methodology and specification guide*, <http://www.platts.com/methodology-specifications/coal> [dostęp 01.05.2016]
- [24] Cordya P., Veigaa M., Saliha I. et al.: *Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution*, Science of The Total Environment, vol. 410–411, 2011, s. 154-160.
- [25] Dąbrowski J.M., Ashton P. J., Murray K. et al.: *Anthropogenic mercury emissions in South Africa: Coal combustion in power plants*, Atmospheric Environment, vol. 42(27), 2008, s. 6620-6626.
- [26] Diehl S.F., Goldhaber M.B., Hatch J.R.: *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, vol. 59(3-4), 2004, s. 193-208.
- [27] Drzymała J.: *Podstawy mineralurgii*, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2009.
- [28] Dubiński J., Pyka I., Wierchowski K.: *Stan aktualny i niektóre aspekty poprawy jakości węgla użytkowanego w energetyce zawodowej*, Przegląd górniczy, tom 66, 2011, s. 46-52.
- [29] Dubiński J., Turek M., Aleksa H.: *Postęp w technologii i technice przeróbki mechanicznej węgla w polskich kopalniach*, Maszyny Górnicze, vol. 24(2), 2006, s. 12-20.
- [30] Dziok T., Strugała A., Rozwadowski A. et al.: *Zmiany zawartości rtęci w węglu kamiennym w procesie jego wzbogacania*, Polityka Energetyczna, tom 17, z. 4, 2014, s. 277-288.
- [31] Dziok T., Strugała A., Rozwadowski A.: *Badania zawartości rtęci w węglu – uwagi dotyczące prezentacji wyników*, Polityka Energetyczna, tom 16, z. 13, 2013, s. 273-283.
- [32] Dziok T., Strugała S., Rozwadowski A., Rozwadowska T.: *Possibilities of mercury content reduction in hard coal. Poland*, Paliwa i energia XXI wieku, (red.:) Jodłowski G.S., Kraków: Wydawnictwo Naukowe „Akapit”, 2014, p. 25-34.
- [33] Finkelman R.B.: *Modes of occurrence of trace elements in coal*, U.S. Geological Survey Open-File Report, 1981, s. 81-99.
- [34] Frużyński A.: *Kopalnie węgla kamiennego w Polsce*, Łódź: Wydawnictwo Księży Młyn, 2012.
- [35] Fuchs H., Mielniczuk L., Włodarczyk K.: *Sterowanie jakością węgla kamiennego w kopalni podziemnej*, Kraków: Szkoła Eksploatacji Podziemnej, 2005.

- [36] Głodek A., Pacyna J.M.: *Mercury emission from coal-fired power plants in Poland*, Atmospheric Environment, vol. 43(35), 2009, s. 5668-5673.
- [37] Główny Instytut Górnictwa, *Karta scenariuszy rozwoju technologicznego. Przeróbka węgla energetycznych. Wzbogacanie węgla w pełnym zakresie uziarnienia*, 2008.
- [38] Główny Urząd Statystyczny, *Zużycie paliw i nośników energii w 2013 roku*, 2014.
- [39] Granite E., Pennline H., Senior C.: *Mercury Control: for Coal-Derived Gas Streams*, Weinheim (Niemcy): Wiley-VCH, 2014.
- [40] Gray J.E. (red.): *Geologic studies of mercury by the U.S. Geological Survey*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2003.
- [41] Harada M.: *Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution*, Critical Reviews in Toxicology, vol. 25(1), 1995, s. 1-24.
- [42] Hławiczka S., Cenowski M.: *Systematyka procesów antropogennych generujących odpady stale zawierające rtęć*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, tom 16, nr 1, 2013, s. 125-140.
- [43] Hławiczka S.: *Rtęć w środowisku atmosferycznym*, Zabrze: Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, 2008.
- [44] Honysz J.: *Górnictwo*, tom 1, Katowice: Wydawnictwo Śląsk, 2011.
- [45] <http://balamara.com.pl/>, [dostęp 01.05.2016]
- [46] International Energy Agency, *Emissions reduction through upgrade of coal-fired power plants*, 2014.
- [47] Kawatra S.K., Eisele T.C.: *Pyrite recovery mechanisms in coal flotation*, International Journal of Mineral Processing, vol. 50(3), 1996, pp. 187-201.
- [48] King R.P.: *Modelling & simulation of mineral processing systems*, Woburn (Stany Zjednoczone): Butterworth-Heinemann, 2001.
- [49] Kłojzy-Karczmarczyk B., Mazurek J.: *Badania zawartości rtęci w węglach przeznaczonych dla odbiorców indywidualnych*, Polityka Energetyczna, tom 16, z. 4, 2013, s. 151-160.
- [50] Kłojzy-Karczmarczyk B., Mazurek J.: *Rtęć w gruntach w otoczeniu wybranych składowisk odpadów górnictwa węglowego*, Polityka Energetyczna, tom 13, z. 2, 2010, s. 245-251.
- [51] Kłojzy-Karczmarczyk B., Mazurek J.: *Studies of mercury content in selected coal seams of the Upper Silesian Coal Basin*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 29, z. 4, 2013, s. 95-106.
- [52] KOBiZE, *Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO w układzie klasyfikacji SNAP i NFR*, 2015.
- [53] Kolker A., Senior C., Alphen C. et al.: *Mercury and trace element distribution in density separates of a South African Highveld (#4) coal: Implications for mercury reduction and preparation of export coal*, International Journal of Coal Geology, February 2016.
- [54] Kolker A., Senior C.L., van Alphen C.: *Collaborative studies for mercury characterization in coal and coal combustion products in Republic of South Africa*, U.S. Geological Survey Open-File Report, 2014.
- [55] *Komunikaty Agencji Rozwoju Przemysłu: Polski Rynek Węgla 2015-2016*, <http://www.polskirynekwegla.pl/> [dostęp 01.05.2016]

- [56] Konopacka Ż.: *Flotacja mechaniczna*, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [57] Kostorz I.: *Wpływ modelu wzbogacania grawitacyjnego na parametry ilościowo-jakościowe jego produktów*, XIII Konferencja Automatyzacja Procesów Przeróbki Kopalin, Jaworze, 2007, s. 91-96.
- [58] Kot J.: *Doświadczenia z użytkowania instalacji odzysku części stałych z zawiesiny wodno-mułowej zawierającej ziarna o wymiarach wyłącznie <25 um w KWK „Jas-Mos”*, XXI Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków, 2012.
- [59] Kowalczyk J., Strzelec G.: *Jastrzębska Spółka Węglowa SA – jakość produkcji i technologia wzbogacania węgla*, Inżynieria Mineralna, r. 5, nr 2, 2004, s. 28-44.
- [60] Krabbenhoft D., Schuster P.: *Glacial ice cores reveal a record of natural and anthropogenic atmospheric mercury deposition for the last 270 years*, U.S. Geological Survey, 2002.
- [61] Kryj K., Szafarczyk J., Baic I.: *Problem ekonomicznych skutków urabiania pozapokładowej skały płonnej*, Rocznik Ochrona Środowiska, tom 13, 2011, s. 1835-1845.
- [62] Kucharzyk A.: *Polsko-Węgierska Spółka Akcyjna „Haldex” – technologia zakładów przeróbki mechanicznej odpadów pogórnich*, Inżynieria Mineralna, r. 5, nr 2, 2004, s. 60-64.
- [63] Kurczabiński L., Łój R.: *Pozycja Katowickiego Holdingu Węglowego SA na rynku komunalno-bytowym*, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, nr 78, 2010, s. 107-114.
- [64] Kurczabiński L.: *Węgiel kamienny w sektorze komunalno-bytowym*, VII Ekoenergetyczna Konferencja – Aktywizacja gminy za pomocą innowacyjnej energetyki rozproszonej, Gliwice, 2010, s. 6-10.
- [65] Kurus K., Białecka B.: *Analiza możliwości zarządzania ładunkiem rtęci w węglu kamiennym – artykuł przeglądowy*, Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji: Środowisko i Bezpieczeństwo, Gliwice: PA NOVA SA, 2013, s. 145-153.
- [66] Kurus K., Białecka B.: *Assessment of mercury load reduction capabilities in the hard coal preparation process*, 15th SGEM Conference proceedings. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Albena, Bułgaria, 2015, s. 591-598.
- [67] Kurus K., Białecka B.: *Możliwości i ograniczenia redukcji ładunku rtęci na etapie produkcji węgla kamiennego w Polsce*, Systemy wspomagania w inżynierii produkcji: Jakość i Bezpieczeństwo, Gliwice: PA NOVA SA, 2015, s. 90-98.
- [68] Laskowski T. et al.: *Poradnik górnika*, tom 5, Katowice: Wydawnictwo Śląsk, 1976.
- [69] Laskowski T., Błaszczński S., Ślusarek M.: *Wzbogacanie kopalin w cieczach ciężkich*, Katowice: Wydawnictwo Śląsk, 1979.
- [70] Łój R., Kurczabiński L.: *Jakość węgla z KHW SA*, Przegląd Górniczy, tom 66, 2011, s. 19-25.
- [71] Lorenz U., Grudziński Z.: *Zawartość rtęci jako potencjalny czynnik ograniczający wartość użytkową węgla kamiennego i brunatnego*, Górnictwo i Geoinżynieria, tom 31, z. 3/1, 2007, s. 335-349.
- [72] Łuszczkiewicz A.: *Wzbogacalność węgla kamiennego na podstawie rozdziału w cieczach jednorodnych. Instrukcje do ćwiczeń z przeróbki kopalin*,

- <http://www.minproc.pwr.wroc.pl/zpkio/pdf/PrzerKopLab/labPK06.pdf> [dostęp 01.05.2016]
- [73] Lutyński A., Szpyrka J.: *Zagospodarowanie drobnoziarnistych odpadów ze wzbogacania węgla kamiennego*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, tom 34, z. 4/1, 2010, s. 155-164.
- [74] Macedonia J.: *Summary of EPA Power Sector Regulation: Air Toxics Standards*, Washington, 2012.
- [75] Markowski J., Markowski B.: *Analiza dostępności niezagospodarowanych złóż węgla*, XXII Konferencja: Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej, Ustroń, 2008, s. 149-155.
- [76] *Materiały projektu „Opracowanie bazy danych zawartości rtęci w krajowych węglach, wytycznych technologicznych jej dalszej redukcji wraz ze zdefiniowaniem benchmarków dla krajowych wskaźników emisji rtęci – Baza Hg”*, Główny Instytut Górnictwa, lata 2013-2015, materiały niepublikowane.
- [77] Micek E., Patyna I., Skawińska A.: *Wpływ zawartości siarki i chloru w węglu na zjawisko korozji w procesach spalania*, *Przegląd Górniczy*, tom 69, z. 3, 2013, s. 93-99.
- [78] Michalak M., Iwaszenko S., Wierzchowski K.: *Coal analyzer – modelowanie procesu wzbogacania węgla w osadzarce*, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, tom 50, nr 9, 2012, s. 18-22.
- [79] Michalska A., Białecka B.: *Zastosowanie techniki wysokotemperaturowego spalania sprzężonej z metodą „zimnych par” atomowej spektrometrii absorpcyjnej (CVAAS) do oznaczania rtęci w wybranych odpadach*. Aktualne Problemy Chemii Analitycznej. Katowice: Górnośląskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, 2008, s. 73-87.
- [80] Michalska A., Białecka B.: *Zawartość rtęci w węglu i odpadach górniczych*, *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa: Górnictwo i Środowisko*, vol. 3, 2012, s. 75-87.
- [81] Misiak J.: *Quality of coal from exploited seams in LW “Bogdanka” S.A. (Lublin Coal Basin)*, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 28, z. 4, 2012, s. 137-149.
- [82] *Nowe obowiązki w zakresie pomiarów emisji rtęci do powietrza*, <http://www.ce2.pl/blog/nowe-obowiazki-pomiary-emisji-rteci-do-powietrza/> [dostęp 01.05.2016]
- [83] Oleynik T.A., Sklyar L.V., Yegurnov O.: *Mercury in the coals of Donbass*, *Mineral Processing Technology*, XVI International Coal Preparation Congress, Lexington, Stany Zjednoczone, 2010, s. 641-647.
- [84] Olkusiński T.: *Porównanie zawartości rtęci w węglach polskich i amerykańskich*, *Polityka Energetyczna – zeszyt specjalny*, tom 10, z. 2, 2007, s. 603-611.
- [85] Olszewska D., Marcewicz-Kuba A.: *Wpływ rodzaju węgla kamiennego na wielkość emisji zanieczyszczeń gazowych*, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – zeszyt specjalny*, tom 23, z. 3, 2007, s. 199-205.
- [86] Osoba M.: *Odkamienianie urobku surowego węgla kamiennego*, *Górnictwo i Geologia*, tom 6, z. 2, 2011, s. 167-179.
- [87] Osoba M.: *Polskie osadzarki wodne pulsacyjne do wzbogacania surowców mineralnych*, *Inżynieria Mineralna*, 2014, r. 15, nr 2, s. 287-294.

- [88] Palarski J., Plewa F., Mysłek Z.: *Odzysk i unieszkodliwianie odpadów w górnictwie podziemnym*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
- [89] Państwowy Instytut Geologiczny, *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31.12.2014 r.*, 2015.
- [90] Paprotny Z., Wróbel Z., Sitko M.: *Technologia wzbogacania węgla i jakość produkcji – Kompania Węglowa SA*, Przegląd Górniczy, tom 67, nr 7-8, 2011, s. 26-36.
- [91] Pasieczna A.: *Rtęć w glebach obszarów zurbanizowanych Polski*, Przegląd Geologiczny, vol. 60(1), 2012, s. 46-58.
- [92] Paszcza H.: *Ocena stanu zasobów złóż węgla kamiennego w Polsce z uwzględnieniem parametrów jakościowych i warunków zalegania w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju*, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, nr 83, 2012, s. 147-162.
- [93] Pięta P.: *Clean Coal Technologies in every stage of coal production in Polish industry*, Mining Science, vol. 22(2), 2015, s. 113-124.
- [94] *PN-82/G-97002 Klasyfikacja węgla kamiennego wg typów*, 1982.
- [95] *PN-ISO 1170:2001 Węgiel i koks – Przeliczanie wyników analiz na różne stany*, 2001.
- [96] *PN-ISO 18283:2008 Węgiel kamienny I koks. Ręczne pobieranie próbek*, 2008.
- [97] *PN-ISO 7936:1999 Węgiel kamienny – Oznaczanie i przedstawianie charakterystyk wzbogacania grawitacyjnego. Ogólne wytyczne dotyczące aparatury i procedur*, 1999.
- [98] Probiez K., Strzałkowski P. et al.: *Zarys podziemnego górnictwa węgla kamiennego*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
- [99] *Process optimization guidance for reducing mercury emissions from coal combustion in power plants*, Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) Chemicals Branch, Genewa, 2010.
- [100] Pyka I., Wierzchowski K.: *Flotacja mulów węgla energetycznych sposobem poprawy efektywności produkcji węgla*, Inżynieria Mineralna, vol. 6(2), 2005, s. 23-34.
- [101] Pyka I., Wierzchowski K.: *Problemy z rtęcią zawartą w węglu kamiennym*, Geologia i Geoinżynieria, tom 34, z. 4/1, 2010, s. 241-249.
- [102] Pyka I., Wierzchowski K.: *Split of mercury between products of coal cleaning versus mercury emissions reduction*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, vol. 52(1), 2016, s. 193-203.
- [103] Pyka I., Wierzchowski K.: *Technological conditions of mercury content reduction in hard coal based on the rom coal from several polish collieries*, Archive of Mining Science, vol. 55(2), 2010, s. 349-367.
- [104] Sablik J.: *Flotacja węgla kamiennych*, Katowice: Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, 1998.
- [105] Seńczuk W.: *Toksykologia współczesna*, Warszawa: Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2012.
- [106] Skea J., Rubin E.: *A model of coal cleaning for sulfur emissions reduction*, Journal of the Air and Waste Management Association, vol. 37(2), 1987, s. 149-157.
- [107] Sloss L.L.: *Blending of coals to meet power station requirements*, Londyn (Wielka Brytania): IEA Clean Coal Centre, 2014.
- [108] Staja-Szlugaj K.: *Import węgla kamiennego do Polski*, Przegląd Górniczy, tom 70, z. 5, 2014, s. 32-38.

- [109] Szostek Z.: *Od někdejších třídíren uhli k moderním úpravárenským komplexům*, Hornictví včera, dnes a zítra, nr 21, 2011.
- [110] Tewalt S.J., Belkin H.E., SanFilipo J.R. *et al.*: *Chemical Analyses in the World Coal Quality Inventory, version 1*, U.S. Geological Survey Open File Report 2010-1196, 2010.
- [111] Tewalt S.J., Bragg L.J., Finkelman R.B.: *Mercury in U.S. coal – abundance, distribution and modes of occurrence*, U.S. Geological Survey, 2001.
- [112] The Virginia Center for Coal and Energy Research, The National Commission on Energy Policy, *Meeting Projected Coal Production Demands in the U.S.A. – upstream issues, challenges and strategies*, Bipartisan Policy Center, 2008.
- [113] Toole-O'Neil B., Tewalt S.J., Finkelman R.B., Akers D.J.: *Mercury Concentration in Coal – Unraveling the Puzzle*, Fuel, vol. 78(1), 1999, s. 47-54.
- [114] Tumidajski T., Gawenda T., Niedoba T., Saramak D.: *Kierunki zmian technologii przeróbki węgla kamiennego w Polsce*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 24, z. 1/2, 2008, s. 245-258.
- [115] U.S. Geological Survey, *Mercury in the environment*, U.S. Geological Survey Professional Paper, nr 713, 1970.
- [116] UNEP, *Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector of the Russian Federation*, Scientific Research Institute for Atmospheric Air Protection, Russia, 2011.
- [117] UNEP, *Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector*, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, China, 2011.
- [118] UNEP, *The Minamata Convention on Mercury: text and annexes*, Kumamoto, Japan, 2013.
- [119] UNEP: *Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport*, UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, 2013.
- [120] Uruski L., Gorecki J., Macherzyński M. *et al.*: *The ability of Polish coals to release mercury in the process of thermal treatment*, Fuel Processing Technology, vol. 140, 2015, s. 12-20.
- [121] Wichliński M., Kobyłecki R., Bis Z.: *Przegląd metod ograniczenia emisji rtęci w elektrowniach podczas spalania paliw stałych*, Polityka Energetyczna, tom 15, z. 4, 2012, s. 151-160.
- [122] Wierzchowski K., Pyka I.: *Korelacja zawartości rtęci i siarki całkowitej dla niektórych surowych węgla kamiennych wydobywanych w Polsce*, Górnictwo i Geoinżynieria, tom 34, z. 4/1, 2010, s. 293-302.
- [123] Wodarski K.: *Technologie eksploatacji resztkowych złóż węgla kamiennego*, Przegląd Górniczy, tom 68, nr 9, 2012, s. 190-194.
- [124] Wojnar K., Wisz J.: *Rtęć w polskiej energetyce*, Energetyka, r. 59, nr 4, 2006.
- [125] World Coal Association. Statistics 2014., <http://www.worldcoal.org/> [dostęp 01.05.2016]
- [126] World Health Organization, *Preventing disease through healthy environments, Exposure to mercury: A major public health concern*, 2007.
- [127] www.jsw.pl [dostęp 01.05.2016]

- [128] Yudovich Y.E., Ketris M.P.: *Mercury in coal: review, Part 1. Geochemistry*, International Journal of Coal Geology, vol. 62(3), 2006, s. 107-134.
- [129] Zagórowski J., Plutecki J., Niemiec G.: *Stan i perspektywy rozwoju Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA*, Wiadomości Górnicze, tom 64, nr 10, 2013, s. 538-549.
- [130] Zajusz-Zubek E., Koniecznyński J.: *Coal cleaning versus the reduction of mercury and other trace elements' emission from coal combustion processes*, Archives of Environmental Protection, tom 40, z. 1, 2014, s. 115-127.
- [131] Zakład Wzbogacania Miału w KWK „Piast” – broszura informacyjna, http://www.pemug.com.pl/pub/File/pemug_www.pdf [dostęp 11.05.2016]
- [132] Zheng L., Liu G., Chou C.L.: *Abundance and modes of occurrence of mercury in some low-sulfur coals from China*, International Journal of Coal Geology, vol. 73(1), 2008, s. 19-26.
- [133] Ziomber S., Strzelec G.: *Zakłady Przeróbki Mechanicznej Węgla Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA*, Przegląd Górniczy, tom 67, nr 7-8, 2011, s. 37-41.
- [134] Zorychta A., Chojnacki J., Krzyżowski A., Chlebowski A.: *Ocena możliwości wybierania reszkowych partii pokładów w polskich kopalniach węgla kamiennego*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 24, z. 1/2, 2008, s. 169-184.
- [135] Zwoździak J.: *Rtęć w węglu. Jak zmierzyć się z problemem?* http://energetyka.wnp.pl/rtec-w-weglu-jak-sie-zmierzyc-z-problemem,-7722_2_0_0.html [dostęp 11.05.2016]

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Metodyka opracowania monograficznego.	14
Rysunek 2. Obieg rtęci w przyrodzie.	18
Rysunek 3. Ocena źródeł światowej emisji rtęci.	19
Rysunek 4. Zużycie węgla kamiennego w polskiej gospodarce w 2013 roku.	20
Rysunek 5. Współczynnik determinacji dla pomiaru rtęci w węglu kamiennym dla różnych frakcji densymetrycznych.	23
Rysunek 6. Separator stały łopatkowy Disa 1.	34
Rysunek 7. Osadzarka trójproduktowa.	35
Rysunek 8. Przykład mapy procesów w zakładzie przeróbki mechanicznej węgla kamiennego.	39
Rysunek 9. Dwuparametrowa regulacja w układzie trójwymiarowym.	40
Rysunek 10. Moduł dopasowania krzywych wzbogacalności – przykład interfejsu modelu wzbogacania.	41
Rysunek 11. Zależność pomiędzy zawartością rtęci a popiołu dla prób pobranych w ZG „Siltech” wraz ze współczynnikiem R^2	48
Rysunek 12. Korelacja pomiędzy zawartością rtęci i siarki dla prób pobranych w ZG „Siltech”.	48
Rysunek 13. Korelacja pomiędzy zawartością siarki oraz popiołu dla prób pobranych w ZG „Siltech”.	48
Rysunek 14. Pochodzenie ładunku rtęci w węglu handlowym.	49
Rysunek 15. Obszary górnicze Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA.	50
Rysunek 16. Średnie zawartości w produktach handlowych zakładów górniczych – słupki błędów wskazują poziom ufności dla 95 % prawdopodobieństwa.	52
Rysunek 17. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości rtęci oraz węgla całkowitego w produkcie handlowym.	53
Rysunek 18. Współczynnik determinacji R^2 dla popiołu i rtęci.	54
Rysunek 19. Współczynnik determinacji R^2 dla wartości opałowej i rtęci.	54
Rysunek 20. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości siarki i rtęci.	54
Rysunek 21. Migracja zanieczyszczeń w procesie wzbogacania w cieczy ciężkiej. Wyniki dla próbek w stanie analitycznym.	55
Rysunek 22. Migracja zanieczyszczeń w procesie wzbogacania w osadzarkach. Wyniki dla próbek w stanie analitycznym.	56
Rysunek 23. Migracja zanieczyszczeń podczas wzbogacania flotacyjnego wraz z odwadnianiem i odzyskiem sedymentu. Wyniki dla próbek w stanie analitycznym.	57
Rysunek 24. Badania zmian zawartości zanieczyszczeń w procesach termicznego suszenia flotokoncentratu – pomiary przedstawione w stanie analitycznym.	58
Rysunek 25. Argumentacja wyboru zakładu górniczego dla celów modelowania.	59
Rysunek 26. Punkty pomiaru prób jakościowych w Ruchu „Jas-Mos”.	62
Rysunek 27. Współczynnik determinacji R^2 dla węgla całkowitego i rtęci.	64
Rysunek 28. Współczynnik determinacji R^2 dla węgla całk. i siarki całkowitej.	64
Rysunek 29. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości siarki i rtęci.	65
Rysunek 30. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości popiołu i siarki.	65
Rysunek 31. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości popiołu i rtęci.	66

Rysunek 32. Współczynnik determinacji R^2 dla zawartości popiołu i rtęci z pominięciem wejść i wyjść płuczki cieczy ciężkiej.	66
Rysunek 33. Ładunek rtęci w odpadach oraz w produkcie handlowym przy danym stopniu zapopielenia urobku.	70
Rysunek 34. Ładunek siarki w odpadach oraz w produkcie handlowym przy danym stopniu zapopielenia urobku.	71
Rysunek 35. Zawartość popiołu w danej klasie ziarnowej.	73
Rysunek 36. Zawartość siarki całkowitej w danej klasie ziarnowej.	73
Rysunek 37. Zawartość rtęci w danej klasie ziarnowej.	73
Rysunek 39. Zawartość popiołu we frakcji 0,5-0,025 mm.	74
Rysunek 38. Zawartość popiołu w danej klasie ziarnowej.	74
Rysunek 40. Zawartości siarki w danej frakcji densymetrycznej.	75
Rysunek 41. Zawartość siarki we frakcji 0,5-0,025 mm.	75
Rysunek 42. Zawartość rtęci w danej frakcji densymetrycznej.	76
Rysunek 43. Zawartość rtęci we frakcji 0,5-0,025 mm.	76
Rysunek 44. Zawartość rtęci i popiołu w badanym urobku Ruchu „Jas-Mos”.	77
Rysunek 45. Zawartość rtęci i siarki w badanym urobku Ruchu „Jas-Mos”.	77
Rysunek 46. Zawartość popiołu i siarki w badanym urobku Ruchu „Jas-Mos”.	78
Rysunek 47. Profil litologiczny fragmentu warstw karbońskich pola górniczego Ruchu „Jas-Mos” wraz z zawartością siarki oraz rtęci.	81
Rysunek 48. Siarka całkowita oraz rtęć w urobku w funkcji gęstości.	83
Rysunek 49. Arkusz sterowania parametrami wzbogacania.	86
Rysunek 50. Tabela wyników modelowania procesu produkcji węgla.	86
Rysunek 51. Mapa procesów Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla Ruchu „Jas-Mos”.	87
Rysunek 52. Moduł losowy występowania klas densymetrycznych w urobku.	90

SPIS TABEL

Tabela 1. Rtęć – właściwości fizyko-chemiczne.....	17
Tabela 2. Inwentaryzacja danych o zawartości rtęci w węglu kamiennym.	26
Tabela 3. Światowe badania dotyczące zawartości w węglu kamiennym – wybrane przykłady.	27
Tabela 4. Źródła oraz czynniki powodujące zanieczyszczenie urobku w ścianowym systemie eksploatacji.....	30
Tabela 5. Podstawowe operacje przeróbki mechanicznej węgla.	31
Tabela 6. Przeróbka węgla kamiennego na świecie.	31
Tabela 7. Czynne zakłady przeróbki kopalń węgla w 2014 roku.	32
Tabela 8. Możliwości sterowania jakością produktu wzbogacalnika cieczy ciężkiej.	34
Tabela 9. Charakterystyka sterowania jakością produktu osadzarki.....	35
Tabela 10. Charakterystyka sterowania jakością flotokonzentratu.	36
Tabela 11. Możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń, w tym rtęci w procesach wzbogacania węgla.....	37
Tabela 12. Ocena skuteczności redukcji rtęci w procesach przeróbki mechanicznej węgla kamiennego.....	37
Tabela 13. Ocena redukcji ładunku rtęci w różnych modelach wzbogacania węgla kamiennego.....	44
Tabela 14. Potencjał redukcji rtęci w przypadku zastosowania różnych modeli wzbogacania w polskim górnictwie na podstawie danych z roku 2013.....	45
Tabela 15. Wyniki analiz prób węgla z ZG „Siltech” – pokład 508.	47
Tabela 16. Charakterystyka zakładów górniczych Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA wg danych z 31 grudnia 2014.	51
Tabela 17. Badania węgla handlowego JSW SA oraz OKD a.s.	52
Tabela 18. Podstawowe informacje dotyczące Ruchu „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”.	60
Tabela 19. Szczegółowy opis zakładu przeróbki mechanicznej węgla Ruchu „Jas-Mos”.....	61
Tabela 20. Wyniki analizy fizyko-chemicznej prób pobranych w Ruchu „Jas-Mos”.....	63
Tabela 21. Ładunek siarki i rtęci w oparciu o dane dot. węzłów produkcyjnych Ruchu „Jas-Mos”.....	67
Tabela 22. Zmiana zawartości węgla oraz zanieczyszczeń na wejściu i wyjściu zakładu przeróbki mechanicznej Ruchu „Jas-Mos”.	68
Tabela 23. Zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach wzbogacania w płuczce cieczy ciężkiej.	68
Tabela 24. Zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach wzbogacania w osadzarkach.	69
Tabela 25. Zmiany zawartości zanieczyszczeń w węglu w procesach flotacji.	69
Tabela 26. Prognoza zawartości rtęci w produktach i odpadach przy danej zawartości popiołu w urobku.....	70
Tabela 27. Prognoza zawartości rtęci w produktach i odpadach przy danej zawartości popiołu w urobku.....	71

Tabela 28. Kierunki wspomaganie redukcji zanieczyszczeń w procesie produkcji węgla na etapie jego eksploatacji.....	79
Tabela 29. Płuczka cieczy ciężkiej – wzory regresji.....	82
Tabela 30. Osadzarka – wzory regresji.	83
Tabela 31. Możliwości sterowania ładunkiem zanieczyszczeń oraz potencjalne zmiany w procesie technologicznym Ruchu „Jas-Mos”.....	87
Tabela 32. Porównanie wskazań zawartości zanieczyszczeń w modelu oraz badaniach densymetrycznych.	88
Tabela 33. Wyniki modelowania dla gęstości rozdziału $1,6 \text{ kg/dm}^3$	89
Tabela 34. Wyniki modelowania dla gęstości rozdziału 2 kg/dm^3	89
Tabela 35. Wyniki wychodu frakcji oraz parametry jakościowe produktu.	90
Tabela 36. Podsumowanie efektów przeprowadzonych badań.....	92

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1. Analiza produktów próbek produktów handlowych z zakładów górniczych JSW SA

Zakład	n	$W_{cał}^i$ [%]		W_a [%]		W_f [%]		A^a [%]		V_a [%]		V_d [%]		Q_a [MJ/kg]		TC_2 [%]		H^a [%]		$S_{a,2}$ [%]		Cl_a [%]		$Hg_{cał}^a$ [ppb]					
		$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}$	R	$\bar{x}_{mean}$	$\bar{x}_{max}$	M	SD	CV	B _{1/2}
Borynia	5	8,8	3,9	1,2	0,3	9,7	3,7	8,6	2,2	19,9	0,3	22,1	0,4	29,45	0,33	81,5	2,4	4,53	0,72	0,63	0,06	0,12	0,04	78,9	167,4	133,5	33,4	26	42,9
Budryk	4	8,6	2,1	1,4	0,2	9,9	2,2	26,4	9,5	24,3	1,5	33,7	1,9	22,05	1,95	-	-	-	-	0,99	0,17	0,13	0,03	200,1	224,2	213,7	9,6	5	15,4
Jastrzębie	6	9,7	1,9	1,1	0,3	10,7	1,7	7,5	2,2	19	0,8	20,8	1	29,52	-	83,4	3,1	4,49	0,63	0,49	0,09	0,09	0,03	33,2	47,4	40,1	4,5	11	4,9
Knurow	10	6,6	0,4	1,8	2,3	7,6	1,9	15,3	21,2	27,1	0,4	32,5	0,6	-	-	79,5	1,6	4,93	0,78	0,72	0,23	0,16	0,07	61,1	182,6	120,2	46,9	39	34,8
Pniówek	6	7,2	1,5	1,4	0,3	7,6	1,3	12,5	3,2	21,4	0,8	24,9	1	28,17	0,44	79,1	3,6	4,65	0,78	0,65	0,07	0,13	0,05	103,6	163,6	131,4	20,3	16	22,2
Szczygłowice	11	6,6	2,2	1,6	1,1	8,2	2,5	14,6	22,4	26,1	2,1	31,4	2,5	-	-	80,2	3,7	4,92	0,56	0,61	0,38	0,18	0,08	43,3	88,2	64	14,6	23	10,2
Zofiówka	6	7,4	2,5	1,4	0,4	8,7	2,5	6,6	1,5	20,3	0,3	22,3	0,5	29,66	0,39	83,2	1,7	4,52	0,63	0,48	0,09	0,11	0,02	51,9	64,8	59,1	5,1	9	5,6
Dątkow (OKD)	6	7,5	2,9	1	0,2	8,4	2,7	7,3	1,1	20,8	1	22,7	1,1	-	-	82,9	1,8	4,6	0,7	0,39	0,01	-	-	30,8	47,6	39	6,9	18	7,6
ČSM (OKD)	5	5,9	3,4	1	0,3	6,9	3	5,6	0,2	20,3	0,1	21,7	0,2	-	-	84,6	0,9	4,63	0,31	0,46	0,1	-	-	30,6	62,3	48,6	12,1	25	15,6

Źródło: opracowanie własne na podstawie [76].

Załącznik 2. Charakterystyka technologiczna miazgi surowego 20-0 [mm].

Klasa ziarnowa [mm]	Wychód [kg]	Wychód [%]	Wartość skumulowana wychodu [%]	A ^a [%]	Średnia skumulowana A ^a [%]	S _a ^a [%]	Średnia zawartość A ^a [%]	Hg ^a [ppb]	Średnia zawartość Hg ^a [ppb]
+20	2,3	1,43	1,43	24,8	24,8	0,31	0,31	28	28
20-16	2,7	1,68	3,12	23,7	24,2	0,31	0,31	36	32
16-12	5,5	3,43	6,55	33,7	29,2	0,27	0,29	34	33
12-10	3,1	1,93	8,48	25,9	28,4	0,30	0,29	34	33
10-8	6	3,74	12,22	29,8	28,8	0,28	0,29	36	34
8-6	8,1	5,05	17,27	26,2	28,1	0,30	0,29	42	36
6-4	15,8	9,85	27,12	25,8	27,2	0,30	0,29	40	38
4-2	23,7	14,78	41,90	17,1	23,7	0,37	0,32	33	36
2-1	25,1	15,65	57,54	12,3	20,6	0,37	0,33	35	36
1,0-0,5	19,8	12,34	69,89	10,4	18,8	0,37	0,34	31	35
-0,5	48,3	30,11	100,00	10,9	16,4	0,39	0,36	38	36
Razem	160,4	100	-	16,42	-	0,36	-	36	-

Źródło: opracowanie własne

Załącznik 3. Charakterystyka technologiczna miazgi surowego -0,5 [mm].

Klasa ziarnowa [mm]	Wychód [kg]	Wychód [%]	Wartość skumulowana wychodu [%]	A ^a [%]	Średnia wartość A ^a [%]	S _z ^a [%]	Średnia zawartość A ^a [%]	Hg ^a [ppb]	Średnia zawartość Hg ^a [ppb]
0,5-0,3	69,2	18,41	18,41	8,1	8,1	0,38	0,38	39	39
0,3-0,2	60,7	16,15	34,57	8,0	8,1	0,39	0,38	41	40
0,2-0,1	69,0	18,35	52,92	7,4	7,8	0,40	0,39	31	37
0,1-0,063	36,5	9,72	62,64	8,8	8,0	0,43	0,40	42	38
0,063-0,045	17,8	4,75	67,39	9,9	8,1	0,45	0,40	36	38
0,045-0,025	26,7	7,09	74,48	10,0	8,3	0,47	0,41	39	38
-0,025	95,9	25,52	100,00	18,6	10,9	0,42	0,41	44	39
Razem	375,8	100	-	10,91	-	0,41	-	39	-

Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 4. Wyniki analizy gęstościowej frakcji 0,5-20 [mm].

Gęstość ziarn [kg/dm ³]	Zawartość [kg]	Wychód frakcji [%]	Wartość skumulowana wychodu [%]	A ^a we frakcji [%]	A ^a w koncentracie [%]	A ^a w odpadzie [%]	S ^a we frakcji [%]	S ^a w koncentracie [%]	S ^a w odpadzie [%]	Hg ^a we frakcji [ppb]	Hg ^a w koncentracie [ppb]	Hg ^a w odpadzie [ppb]
-1,4	75,5	78,93	78,93	4,3	4,3	65,4	0,39	0,39	0,17	23	23	85
1,4-1,5	2,3	2,36	81,28	16,9	4,7	71,5	0,46	0,39	0,14	50	23	89
1,5-1,6	1,7	1,78	83,07	25,3	5,1	76,3	0,36	0,39	0,11	95	25	88
1,6-1,7	1,0	1,04	84,11	33,8	5,5	79,1	0,27	0,39	0,10	184	27	82
1,7-1,8	0,9	0,98	85,08	38,7	5,8	81,8	0,30	0,39	0,09	156	28	77
1,8-1,9	0,6	0,67	85,75	46,3	6,2	83,4	0,31	0,38	0,08	197	30	72
1,9-2,0	0,7	0,72	86,48	53,9	6,6	85,0	0,25	0,38	0,07	178	31	66
+2,0	12,9	13,52	100,00	85,0	17,2		0,07	0,34		66	36	
Razem	95,6	100		17,2			0,34	-	-	36	-	-

Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 5. Wyniki analizy gęstościowej frakcji 0,5-0,025 [mm].

Gęstość ziarn [kg/dm ³]	Zawartość [kg]	Wychód frakcji [%]	Wartość skumulowana wychodu [%]	A ^a we frakcji [%]	A ^a w koncentracie [%]	A ^a w odpadzie [%]	S ^a we frakcji [%]	S ^a w koncentracie [%]	S ^a w odpadzie [%]	Hg ^a we frakcji [ppb]	Hg ^a w koncentracie [ppb]	Hg ^a w odpadzie [ppb]
-1,4	233,9	88,90	88,90	2,5	2,5	50,8	0,36	0,36	0,54	22	22	31
1,4-1,6	9,6	3,65	92,55	15,6	3,0	68,1	0,32	0,36	0,65	66	23	14
1,6-1,8	2,5	0,95	93,50	35,3	3,3	72,9	0,35	0,36	0,69	44	24	9
1,8-2,0	1,9	0,72	94,22	47,3	3,7	76,1	0,37	0,36	0,73	27	24	7
+2,0	15,2	5,78	100,00	76,1	7,9		0,73	0,38	0,00	7	23	
Razem	263,1	100		7,87			0,38	-	-	23	-	-

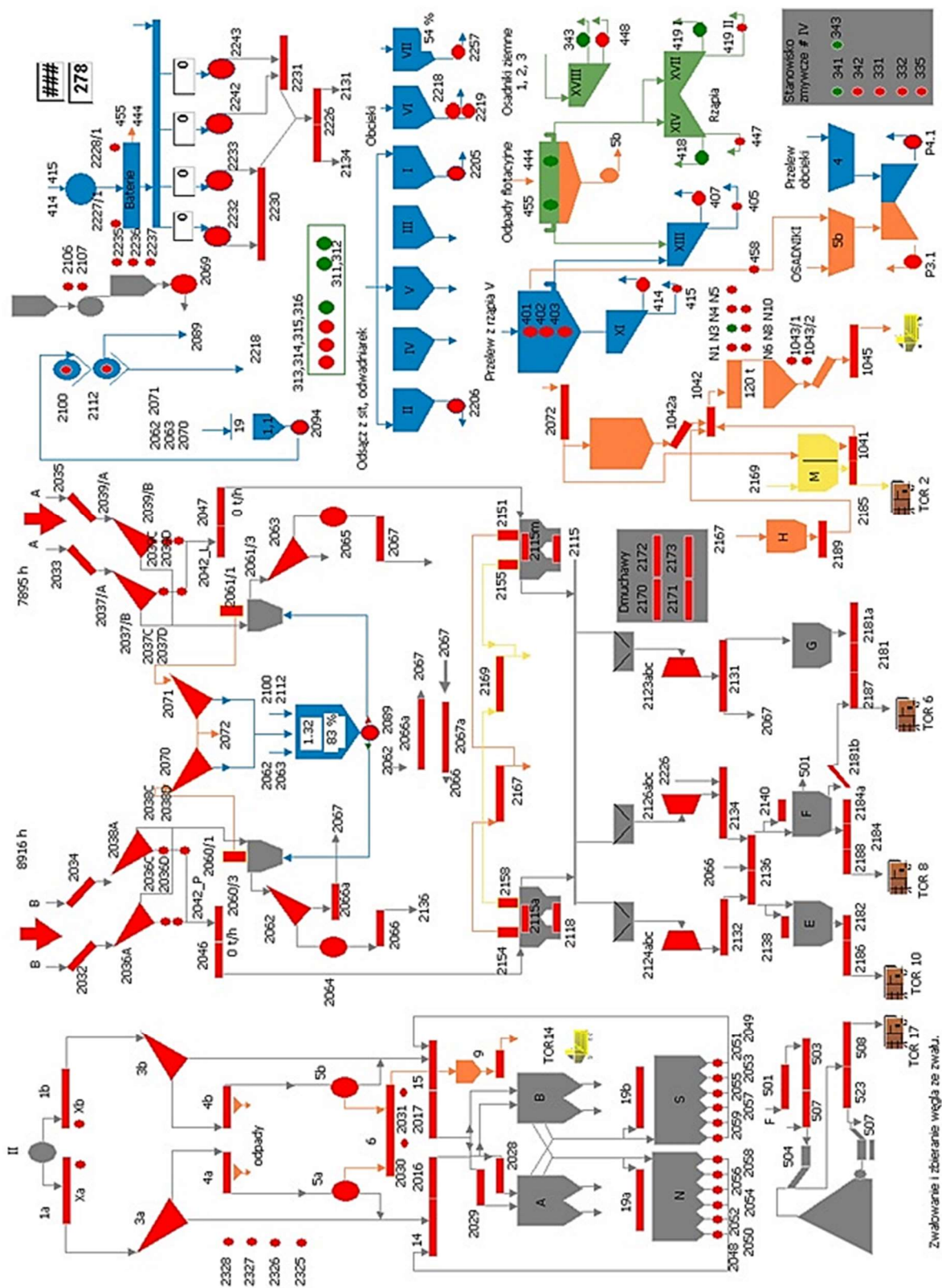
Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 6. Wyniki analizy gęstościowej frakcji +20 [mm]

Gęstość ziarn [kg/dm ³]	Zawartość [kg]	Wychód frakcji [%]	Wartość skumulowana wychodu [%]	A ^a we frakcji [%]	A ^a w koncentracie [%]	A ^a w odpadzie [%]	S ^a we frakcji [%]	S ^a w koncentracie [%]	S ^a w odpadzie [%]	Hg ^a we frakcji [ppb]	Hg ^a w koncentracie [ppb]	Hg ^a w odpadzie [ppb]
-1,4	544,10	54,33	54,33	4,7	4,7	75,5	0,46	0,46	0,08	5	5	28
1,4-1,5	28,70	2,87	57,20	18,4	5,4	79,3	0,36	0,45	0,07	5	5	29
1,5-1,6	21,60	2,16	59,36	26,1	6,1	82,1	0,25	0,45	0,06	11	5	30
1,6-1,7	12,50	1,25	60,61	30,9	6,7	83,7	0,20	0,44	0,05	41	6	30
1,7-1,8	10,20	1,02	61,62	35,9	7,1	85,0	0,18	0,44	0,05	47	6	29
1,8-1,9	6,50	0,65	62,27	45,3	7,5	85,7	0,17	0,44	0,05	64	7	29
1,9-2,0	9,60	0,96	63,23	61,8	8,4	86,3	0,10	0,43	0,05	47	8	28
+2,0	368,20	36,77	100,00	86,3	37,0		0,05	0,29		28	15	
Razem	1001,4	100		37,0			0,29	-	-	15	-	-

Źródło: opracowanie własne

Załącznik 7. Mapa synoptyczna Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla Ruchu „Jas-Mos”.



Źródło: Ruch „Jas-Mos” KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie”

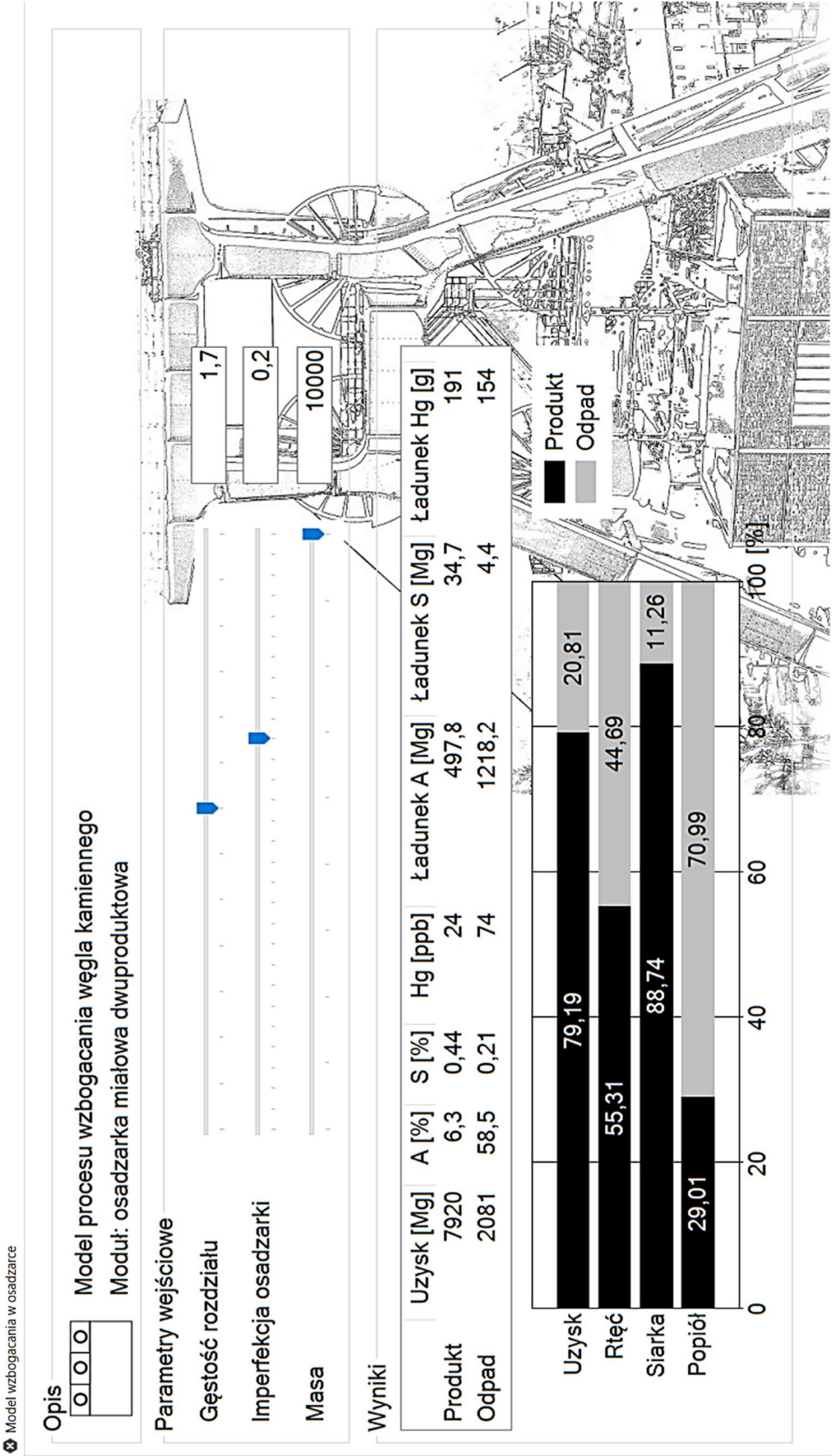
Załącznik 8. Model procesu produkcji węgla handlowego uwzględniający redukcję wybranych zanieczyszczeń – pełny zrzut arkusza kalkulacyjnego.

Model procesu produkcji węgla handlowego uwzględniający redukcję wybranych zanieczyszczeń - beta KWK "Borynia-Zofiówka-Jastrzębie" Ruch "Jas-Mos"										* Wychód klas ziarnowych został określony na podstawie badań oraz danych z zakładu górniczego									
1. Moduł wejścia										Produkt		Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]	
Określ wydobyte brutto										1. Płuczka cieczy ciężkiej	1559	5,99%	0,47%	5,1	93,44	7,25	7,93		
										2. Osadzarka	4374	5,33%	0,44%	20,4	233,28	19,37	89,15		
										3. Flotacja	840	7,08%	0,42%	66,4	59,47	3,53	55,78		
2. Moduł płuczki cieczy ciężkiej dwuproduktowej										4. Sedymet	180	11,56%	0,40%	53,0	20,81	0,72	9,54		
Określ gęstość rozdziłu										Produkt handlowy	6953	5,85%	0,44%	23,4	407,00	30,87	162,39		
Określ imperfekcję wzbogacalnika																			
										Odpad		Uzysk [Mg]	A [%]	S [%]	Hg [ppb]	Ładunek A [Mg]	Ładunek S [Mg]	Ładunek Hg [g]	
3. Moduł osadzarki dwuproduktowej										1. Kruszarka bębnowa	200	87,74%	0,03%	146,90	175,48	0,06	29,38		
Określ gęstość rozdziłu										2. Płuczka cieczy ciężkiej	1241	73,60%	0,09%	27,14	913,64	1,13	33,70		
Określ imperfekcję wzbogacalnika										3. Osadzarka	1426	53,44%	0,23%	77,98	761,95	3,34	111,19		
										4. Flotacja	180	54,77%	0,41%	81,70	98,59	0,74	14,71		
4. Moduł flotacji										Suma odpadu	3047			Suma	1949,66	5,27	188,97		
Wejście (w stanie suchym)										Suma kontrolna	10001								
* woda słona - ograniczone sterowanie																			
5. Moduł odzysku sedymentu																			
Mieszać z produktem podstawowym?																			
7. Moduł wejść/wyjść																			
Węgiel surowy (urobek)										Uzysk									
Odpady z kruszarki Bradford										Rtęć									
Nadawa do osadzarki										Siarka									
Nadawa do wzbogacalnika DISA										Popiół									
Nadawa na flotację																			
Flotokonzentrat po odwadnianiu																			
Odpady flotacyjne																			
Odzysk sedymentu																			

<

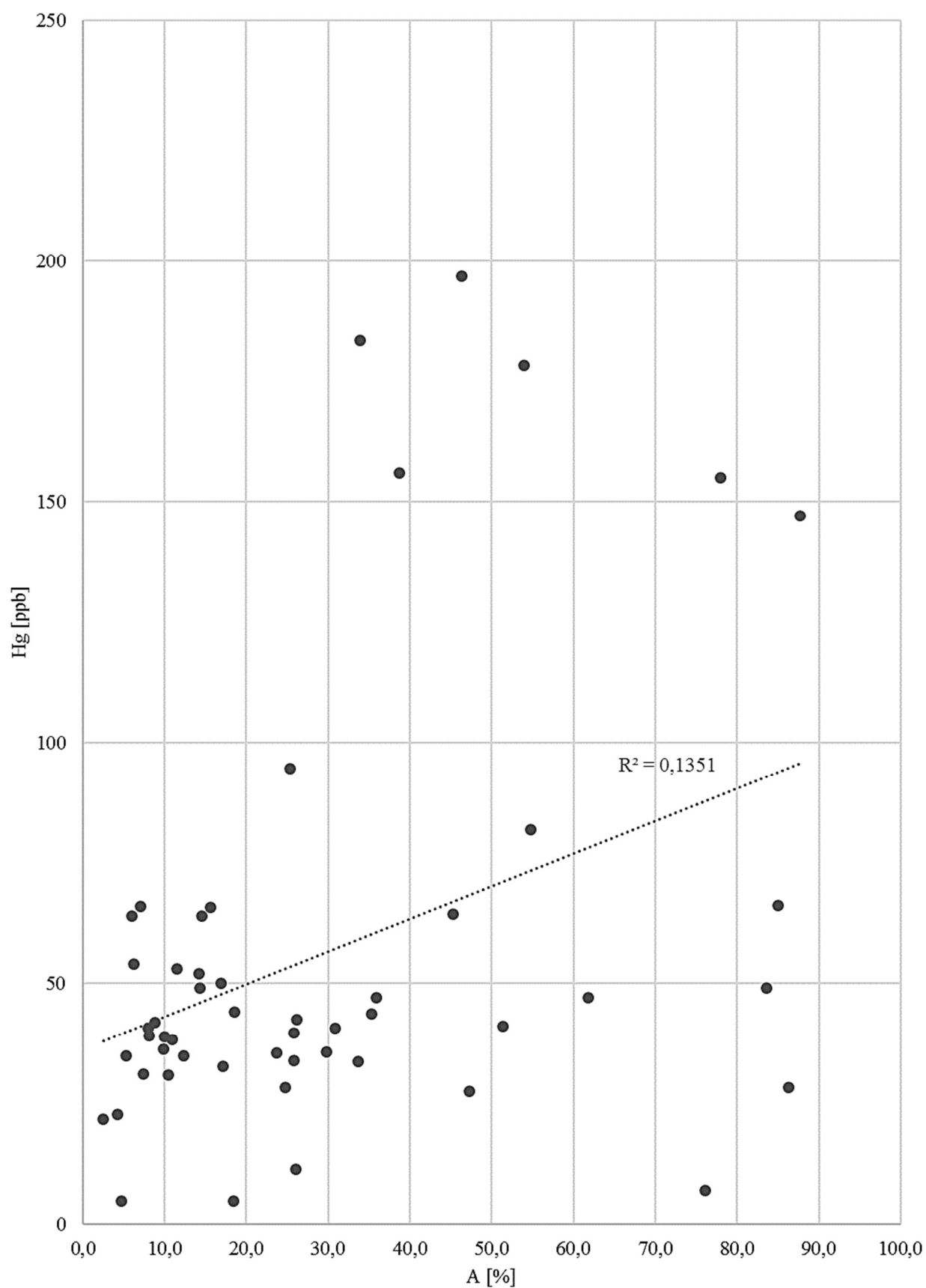
Źródło: Opracowanie własne.

Załącznik 9. Interfejs symulatora wzbogacania w osadzarce.



Źródło: opracowanie własne.

Załącznik 10. Korelacja zawartości popiołu oraz rtęci w badanych próbkach pochodzących z Ruchu „Jas-Mos”.



Wydawnictwo PA NOVA S.A.
ul. Górnych Wałów 42, 44-100 Gliwice, Poland
Ark. wyd. 6,2. Ark druk. 7,5.
Druk: PPHU Drukpol sp. j. ul. Kochanowskiego 27, 42-600 Tarnowskie Góry

