

# Możliwości inżynierii mineralnej w badaniach nad przygotowaniem węgla do zgazowania naziemnego w gazogeneratorze fluidalnym

## Potential of mineral engineering in coal preparation to ground gasification in fluidized bed gas generator



Dr inż. Tomasz Gawenda<sup>\*)</sup>



Dr inż. Damian Krawczykowski<sup>\*)</sup>



Dr hab. Jolanta Marciniak-Kowalska, prof. AGH<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule przedstawiono wyniki badań nad przygotowaniem węgla do procesu zgazowania w gazogeneratorze fluidalnym. W oparciu o analizy składu ziarnowego i chemicznego węgla wybranych do badań, dokonano analizy efektywności procesów rozdrabniania w różnych urządzeniach i oceny pracy różnych urządzeń rozdrabniających pod kątem rozkładu parametrów jakościowych węgla, co umożliwiło dobór urządzeń oraz warunków rozdrabniania i klasyfikacji węgla. Opracowano procedury optymalizacji produkcji paliwa – węgla przeznaczonego do procesu zgazowania fluidalnego. Przedstawiono innowacyjne rozwiązania układów technologicznych przygotowania węgla (rozdrabniania i wzbogacania węgla) na drodze przeróbki mechanicznej dla procesu zgazowania węgla w złożu fluidalnym.

**Abstract:** This paper presents the results of study on coal preparation to gasification process conducted in the fluidized bed gas generator. On the basis of the particle size distribution and chemical composition of coals selected for the research, the analysis of comminution efficiency was performed for various devices, and the evaluation of their operation was made considering distribution of coal qualitative parameters. That allowed to select proper devices and conditions for coal comminution and classification. The procedures of fuel – coal destined to the fluidized gasification process – production optimization were elaborated. The innovative solutions of technological systems of coal preparation (comminution and beneficiation) were presented by mechanical processing of coal gasification in the fluidized bed.

### Słowa kluczowe:

kruszarki, rozdrabnianie, zgazowanie, wzbogacanie, sucha separacja węgla

### Key words:

crushers, comminution, gasification, beneficiation, dry coal separation

## 1. Wprowadzenie

Współczesne technologie zgazowania węgla, tzw. technologie III generacji są innowacyjne, co związane jest z wykorzystaniem np. powstającego w układzie czynnika zgazowującego CO<sub>2</sub> i z intensyfikacją procesu, ale i ze sposobem przygotowania surowca do przeróbki chemicznej w celu osiągnięcia jego wysokiej reaktywności. Procesy zgazowania węgla w zależności od przyjętej technologii zgazowania paliwa narzucają sposób przygotowania węgla, np. rozdrobnienie

węgla, oraz charakterystyczne ściśle określone właściwości fizykochemiczne węgla [17, 18]. W wyniku prac badawczych prowadzonych w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w ramach zadania badawczego „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez NCBR w ramach programu „Zaawansowane technologie pozyskania paliw”, zostały określone wartości parametrów kluczowych, istotnych i dodatkowych dla węgla kamiennego i węgla brunatnego. Zapewnienie i dotrzymanie wartości tych parametrów związane jest także (poza naturalnymi właściwościami geochemicznymi węgla) z przygotowaniem węgla do zgazowania.

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie

## 2. Znaczenie procesów przeróbczych węgla kamiennego a wymagania jakościowe węgla wykorzystywanych do procesu zgazowania

Proces przygotowania musi być optymalny, tzn. należy uzyskać paliwo o możliwie wysokiej reaktywności (zdolności węgla do przemian termochemicznych w procesie zgazowania) przy jak najniższych kosztach jego pozyskania ze złoża i na drodze przeróbki mechanicznej. Na tym etapie podejmowane są decyzje, w jaki sposób i jakimi metodami należy realizować operacje przygotowania i wzbogacania węgla do zgazowania, by spełnione były kryteria ekonomiczne i jakościowe. Pamiętać też należy, że wartość opałową węgla kamiennego można podwyższyć w operacjach rozdrabniania i wzbogacania, poprzez usunięcie substancji mineralnej zewnętrznej, występującej jako oddzielne luźne wtarcenia, konkretne, wypełniające spękania. Substancja mineralna wewnętrzna pochodzi z nieorganicznych substancji roślin węglotwórczych, tworzy z substancją organiczną węgla homogeniczną mieszaninę i nie może być usunięta za pomocą działań fizycznych [13]. Wysoka zawartość chloru w węglach może być pochodzenia naturalnego lub antropogenicznego – z wód obiegowych procesów wzbogacania. Dlatego też prowadzono wstępne badania procesu wzbogacania na sucho węgla przeznaczonych do procesu zgazowania. Obniżenie zawartości chloru w węglu jest istotne ze względu na wzrost korozyjności urządzeń wynikających z właściwości chloru [8].

Odsiarczanie węgla kamiennych przed procesem zgazowania można uzyskać poprzez operacje wzbogacania, w których można usunąć część związków nieorganicznych siarki od 50 do 70 % siarki całkowitej. Natomiast siarki organicznej zawartej w węglu nie można usunąć z węgla na drodze operacji przeróbczych, w przypadku zgazowania wejdzie ona w skład powstających gazów procesowych, co jest zjawiskiem wysoce niekorzystnym [16].

Instalacje układów technologicznych przeróbki mechanicznej rozdrabniania, klasyfikacji czy wzbogacania mają zastosowanie w procesach przeróbczych różnych kopalni użytecznych. Jakość otrzymywanych produktów zależy głównie od prawidłowego doboru maszyn i urządzeń współpracujących w instalacji zależnie od rodzaju przerabianego surowca. Zakładając konkretny proces technologiczny zwykle bierzemy pod uwagę charakterystyki pracy poszczególnych rodzajów maszyn, które zależne są między innymi od właściwości fizyko-mechanicznych surowca oraz wielkości parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych maszyn. Okazuje się jednak, że na uzyskiwanie pożądaných produktów (o najwyższej jakości) wpływ ma także sposób prowadzenia procesu technologicznego (ilość stadiów rozdrabniania, cykle technologiczne, odsiewanie, sterowanie strumieniami przepływu materiału do wybranych maszyn itp.) [6].

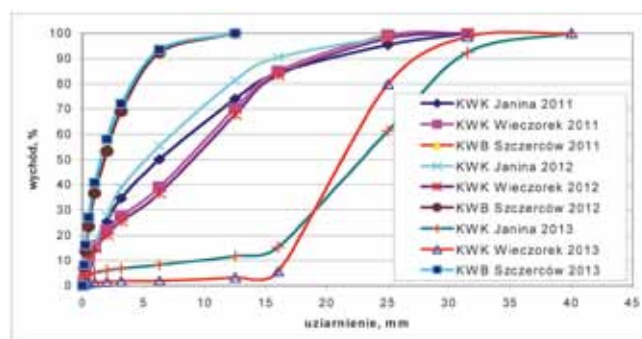
## 3. Analiza składu ziarnowego węgla wybranych do badań

Surowy materiał wykorzystany do badań był dostarczony przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w trzech etapach i pochodził z trzech kopalń, tj: KWK „Janina”, KWK „Wieczorek”, KWB „Bełchatów” Pole Szczerców. Na rysunku 1 zaprezentowano krzywe składu ziarnowego węgla z trzech etapów badawczych, tj. 2011 (lipiec), 2012 (kwiecień), 2013 (brunatny – kwiecień, kamienne – wrzesień).

Próby węgla kamiennych z KWK „Janina” i „Wieczorek” z dwóch etapów badawczych 2012-2013 odznaczały się podobnym zakresem uziarnienia 0-31,5 mm. Jednak próby węgla „Janina” różniły się między sobą drobniejszym uziarnieniem ok. 10 % w zakresie klas drobniejszych 0-15 mm,

a największa różnica wzrosła do 20 % w stosunku do węgla z KWK „Wieczorek”. Natomiast próby węgla kamiennych dostarczonych w 2013 roku odznaczały się znacznie grubszym uziarnieniem w klasie 16-40 mm, przy czym uziarnienie węgla poniżej 16 mm wynosiło około 15 % dla próby z KWK „Janina” i około 5 % dla próby z KWK „Wieczorek”.

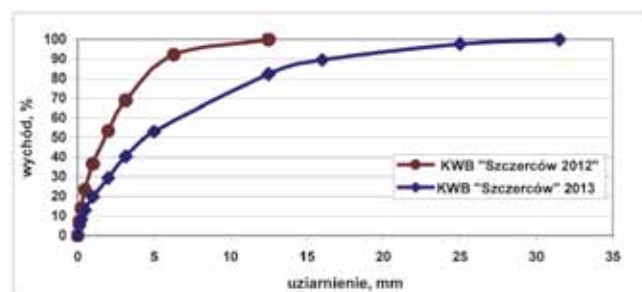
Węgłe kamienne pochodzące z różnych kopalń mogą charakteryzować się bardzo zróżnicowanymi właściwościami fizyko-mechanicznymi (podatność na rozdrabnianie, zwiększoność wg Protodiakonowa, wskaźnik Hardgrove’a itp.), które należy brać osobno pod uwagę przy projektowaniu układów technologicznych produkcji określonych frakcji do procesu zgazowania.



Rys. 1. Dystrybuanty krzywych składu ziarnowego prób węgla dostarczonych do badań w okresie 2011-2013 [19]

Fig. 1. Cumulative distribution functions of size composition curves of coal samples supplied for the study in 2011-2013 [19]

Węgiel brunatny z KWB Pole Szczerców był znacznie drobniejszy od węgla kamiennych, tj. o uziarnieniu 0-12,5 mm. Dostarczone próby w trzech okresach charakteryzowały się podobnym składem ziarnowym (rys. 1), ale węgiel dostarczony w drugim półroczu 2013 roku charakteryzował się uziarnieniem 0-31,5 mm (rys. 2), co świadczy o dużej zmienności urobku pod względem rozkładu wielkości uziarnienia. Gdyby układ technologiczny przeróbki mechanicznej węgla miał produkować węgiel do zgazowania w klasie 0-5 mm, to taka duża zmienność wychodów frakcji odsiewanej na przesiewaczu wstępnym wynosząca co najmniej od 53-85% oraz zmiana maksymalnego uziarnienia nadawy będzie niekorzystnie oddziaływać na stabilność proces rozdrabniania. W celu stabilizacji procesu przed kruszarką (młynem) muszą się znajdować zbiorniki buforowe.



Rys. 2. Dystrybuanty krzywych składu ziarnowego węgla brunatnego dostarczonego do badań [19]

Fig. 2. Cumulative distribution functions of size composition curves of brown coal supplied for the study [19]

#### 4. Analiza efektywności procesów rozdrabniania w różnych urządzeniach

##### 4.1. Dobór urządzeń oraz warunków rozdrabniania i klasyfikacji

Celem badań doświadczalnych była optymalizacja procesu rozdrabniania węgla w wybranych kruszarkach (młynach) oraz ich klasyfikacja w celu przygotowania produktów o wymaganym uziarnieniu do procesu zgazowania prowadzonego w warunkach laboratoryjnych na Wydziale Paliw i Energii AGH. Eksperymenty zostały przeprowadzone w laboratoriach:

- Katedry Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców AGH (kruszarki: szczękowe, walcowa, wirnikowa nożowa typu Shreder),
- Katedry Systemów Wytwarzania Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH (kruszarki/młyny: wirnikowa nożowa i wirnikowa młotkowa),
- Firmy SBM Mineral Processing (Laakirchen, Austria) (kruszarka wirnikowa listwowa).

Główną ideą badań było zbadanie możliwości uzyskiwania produktów rozdrabniania o uziarnieniu poniżej 2 mm oraz poniżej 5 mm, z przeznaczeniem do procesu zgazowania w gazogeneratorze fluidalnym lub, jeżeli zachodziłaby taka konieczność, do przygotowywania z nich określonych mieszanek o różnych zakresach udziału wąskich klas drobnych.

Do oceny efektów procesów kruszenia i przesiewania węgla użyto wskaźników technologicznych, takich jak stopień rozdrobnienia i udziały poszczególnych klas ziarnowych (wychody), zawartości nadziarna i podziarna [2, 12, 14].

Wszystkie badania składają się z etapów i są kontynuacją poprzedzonych wcześniejszych badań w poszczególnych urządzeniach prowadzonych od 2009 roku w ramach projektu NCBR pt.: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii”, część tematu badawczego nr 2.1.2. pt. Badania wzbogacania węgla na drodze przeróbki mechanicznej”.

Zatem program badawczy obejmował testowanie różnych układów technologicznych rozdrabniania i klasyfikacji (nadsobnych, posobnych, mieszanych, megaukładów wielostadialnych, jednostadialnych, otwartych i zamkniętych) z wykorzystaniem różnych rodzajów kruszarek i młynów.

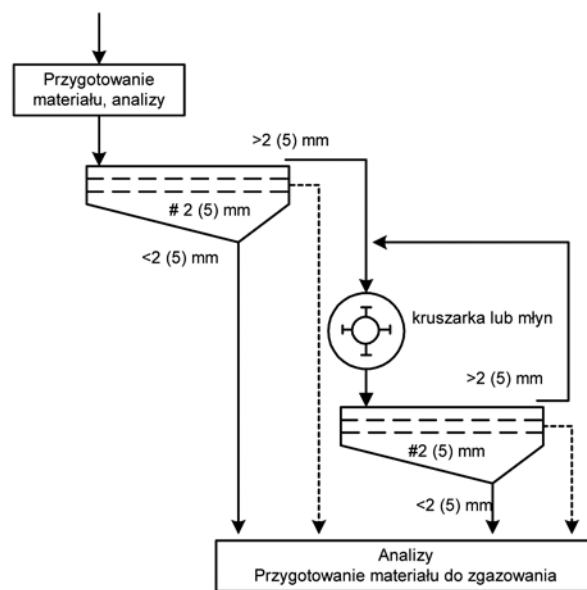
Problematyka badawcza obejmowała zakres badań podstawowych (wstępnych) oraz zaawansowanych. Na podstawie wstępnych badań został wytypowany najkorzystniejszy układ technologiczny z zawrotem materiału zgodnie z schematem zaprezentowanym na rysunku 3.

##### 4.2. Tematyka badawcza oraz najważniejsze wnioski

Procesy badawcze w głównej mierze dotyczyły optymalizacji procesu kruszenia i klasyfikacji węgla do procesu zgazowania przy użyciu wspomnianych maszyn rozdrabniających [7, 11, 19].

Analizując cały zakres badawczy dla wszystkich rodzajów kruszarek warto podkreślić, że przy doborze urządzeń rozdrabniających w warunkach przemysłowych należy kierować się następującymi zasadami:

- do rozdrabniania węgla kamiennych korzystniej jest wykorzystywać elementarne działania kruszące, takie jak udar w połączeniu ze zgniataniem i niewielkim ścieraniem, np. kruszarki udarowe młotkowe lub kombinowane (młotkowo-walcowe)
- ścinanie korzystnie jest stosować dla węgla brunatnego (suchego lub wilgotnego), który może być nawet włóknisty, a więc korzystniej jest zastosować kruszarkę wirni-



Rys. 3. Schemat przygotowania węgla do zgazowania (opracowanie własne)

Fig. 3. Scheme of coal preparation for gasification (own elaboration)

kową nożową, ponieważ uzyskuje się w niej największy stopień rozdrobnienia i wychód klasy drobnej,

- kruszarki szczękowe w warunkach przemysłowych przy produkcji drobnoziarnistych węgla mogą być nieefektywne ze względu na układ kinematyczny elementów roboczych co będzie się wiązało z nieefektywnym rozdrabnianiem (duży zawrót węgla w obiegu zamkniętym). Kruszarki szczękowe nie nadają się do rozdrabniania wilgotnych materiałów oraz miękkich i włóknistych, jak węgiel brunatny.

Oceniając proces klasyfikacji sitowej należy zwrócić uwagę na występowanie zwiększonej ilości podziarna w drobnych klasach, które jest związane z trudnością niedosiewania się materiału na sitach o małych rozmiarach oczek, co jest powszechnym problemem procesu klasyfikacji. Natomiast interesującym zjawiskiem są duże różnice podziarna, jakie się uzyskuje dla materiałów przesiewanych na tym samym sicie, ale pochodzących z różnych procesów rozdrabniania. Okazuje się, że węgiel po kruszarkach walcowych przesiewa się najgorzej i jest to związane z kształtem uzyskiwanych ziarn. Podobne zależności uzyskiwano dla miękkiego wapienia jurajskiego, gdzie badano rozkład kształtów ziaren wg klasyfikacji Zingga uzyskanych w analizatorze AWK 3D.

Warto zatem zwrócić uwagę na to, że produkty po kruszarkach walcowych będą dominować w ziarna nieforemne (dyski, walce, klingi). Ziarna płaskie mają większą podatność na rozdrabnianie niż foremne, dlatego należy wziąć pod uwagę, że produkty bogate w takie ziarna będą ulegać znacznemu samorozdrobnieniu (degradacji) w trakcie przesypów i transportu paliwa do procesu zgazowania.

W badaniach zaawansowanych szczególną uwagę poświęcono najkorzystniejszym urządzeniom i najbardziej przydatnym w procesie przygotowania węgla do procesu zgazowania. Badania dotyczyły:

- wpływu wilgotności węgla brunatnego na efekty rozdrabniania w kruszarce wirnikowej nożowej typu Shreder oraz młynach wirnikowych nożowych i młotkowych,
- badania wpływu prędkości obrotowej elementów roboczych na efekty rozdrabniania węgla brunatnego w młynach wirnikowych nożowych oraz młotkowych,

– efektów rozdrabniania węgla kamiennego w młynie wirnikowym młotkowym.

Zgodnie z prezentowanymi w literaturze [4, 5] badaniami do rozdrabniania węgla brunatnych a zwłaszcza surowców włóknistych (słoma) wykorzystuje się kruszarki (młyny) wirnikowe młotkowe lub wirnikowe wyposażone w wał wielonożowy gwarantujący rozdrobnienie, co najmniej o rząd wielkości większe niż w innych kruszarkach. Rozdrobnienie struktur włóknistych węgla brunatnego, słomy czy drewna wymaga użycia maszyn wyposażonych w zestawy wielonożowe pozwalające na rozdrabnianie surowca do rozmiarów poniżej kilku mm w procesie cięcia swobodnego, który gwarantuje dużą wydajność procesu rozdrabniania w urządzeniach o niewielkich gabarytach.

Procesom rozdrabniania w młynie nożowym został poddany węgiel brunatny o nadawie 2-20 mm o wilgotnościach 15, 20, 25, 30 % oraz naturalnej wilgotności 46 % w celu uzyskania produktu 0-2 mm oraz węgla brunatny o nadawie 5-20 mm o tych samych, wcześniej wymienionych, wilgotnościach w celu uzyskania produktu 0-5 mm. Wydzielone wąskie klasy po analizach składu ziarnowego zostały poddane analizom chemicznym.

Również w młynie młotkowym procesom rozdrabniania zostały poddane próby węgla brunatnego o nadawie 5-20 mm o podobnych parametrach wilgotności jak dla młyna nożowego, aby uzyskać produkt 0-5 mm.

Największym uzyskiem (wychodem) klas poniżej 1 mm i 2 mm odznaczała się próba węgla o wilgotności naturalnej (46 %), która osiągnęła odpowiednio około 80 i 100 % wychodu przy ruszcie młyna nożowego 2 mm. Oznacza to, że taki węgiel brunatny najlepiej się rozdrabnia w młynie nożowym w zakresie przygotowywania materiału do zgazowania o drobnym uziarnieniu do 2 mm. Podobne efekty uzyskano dla kruszarki wirnikowej nożowej typu Shreder we wcześniejszych badaniach (2012 rok) [6].

Dla obu rodzajów młynów z rusztem 5 mm wychody (uzyski) <5 mm uzyskano na poziomie prawie 100 % dla wszystkich prób węgla o wilgotności naturalnej (złożowej). Dla pozostałych wilgotnych prób 15÷30 % wychody są podobne i przekraczają wartość 80 %, przy czym dla młyna młotkowego wartość ta była największa (85 %) (tablica 1).

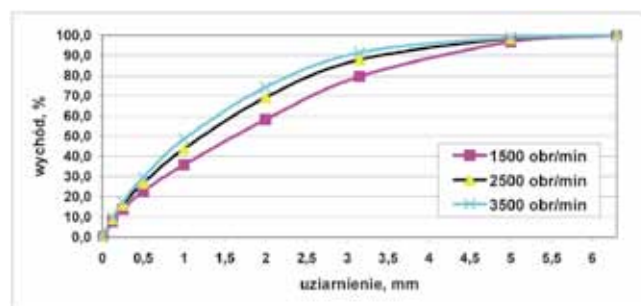
Stwierdzono, że wilgotność w badanym przedziale 15÷30 % nie wpływa tak znacząco na efekty rozdrabniania przy produkcji klasy 0-5 mm, jak przy produkcji klasy 0-2 mm, ale taki węgiel gorzej się rozdrabnia niż węgiel z wilgotnością naturalną złożową. Dlatego w procesie przeróbki mechanicznej węgla należałoby składować urobek na placu zadaszonym w celu ochrony przed zawodnieniem. Także suszenie węgla w procesie wstępnym przed procesami przesiewania i rozdrabniania jest ekonomicznie i technologicznie nieuzasadnione.

Porównując wyniki analiz z próbami węgla brunatnych rozdrabnianych w młynie nożowym i młotkowym w tych samych warunkach (prędkość 2500 obr/min, wielkość ruszta 5 mm i uziarnienie nadawy 5-20 mm) należy podkreślić, że oba młyny pracują podobnie, ale ze względu na wysoką zmien-

ność wielkości uziarnienia nadawy węgla oraz wilgotność kruszarki (młyny) młotkowe utrzymywałyby stabilniejszy proces rozdrabniania (tabl. 1).

W przeprowadzonych testach rozdrabniania wykonano także badania wpływu prędkości obrotowej wirnika młyna nożowego i młotkowego na efekty rozdrabniania. Liczby obrotowe wirnika obu młynów wynosiły 1500, 2500 i 3500 na minutę, natomiast biorąc pod uwagę większą przydatność zastosowania młyna nożowego do produkcji klasy 0-2 mm, a młyna młotkowego dla klasy grubszej 0-5 mm, zastosowano w tych młynach ruszta o rozmiarach oczek odpowiednio 2 mm dla noży i 5 mm dla młotków.

Na rysunku 4 przykładowo zestawiono krzywe składu ziarnowego węgla brunatnego rozdrabnianego przy różnych prędkościach obrotowych wirnika w młynie młotkowym.



Rys. 4. Dystrybuanty krzywych składu ziarnowego produktów węgla brunatnego „Szczerców” uzyskanych po rozdrobnieniu w młynie młotkowym o różnych liczbach obrotowych wirnika [19]

Fig. 4. Cumulative distribution functions of size composition curves of brown coal products “Szczerców” obtained after comminution in a beater mill with different numbers of rotor revolution [19]

Na rysunku 5 zaprezentowano krzywe składu ziarnowego produktów węgla kamiennych z KWK „Janina” i „Wieczorek” rozdrobnionych w młynie młotkowym przy liczbie 2500 obr/min.

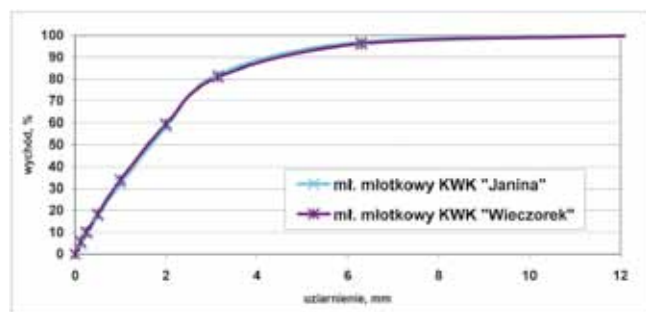
Węgiel kamienny jako twardszy surowiec od węgla brunatnego cechuje się nieco większym ziarnem maksymalnym dochodzącym do 12 mm oraz paru procentową różnicą udziałów wychodów poszczególnych klas. Na rysunku 6 zestawiono porównanie stopni rozdrobnienia dla węgla kamiennych i brunatnego uzyskanych przy liczbie obrotowej 2500. Okazuje się, że 90-procentowy stopień rozdrobnienia dla węgla kamiennych, który wyniósł około 3 jest niższy od stopnia rozdrobnienia dla węgla brunatnego (około 8), natomiast 10-procentowe stopnie rozdrobnienia dla węgla kamiennych są większe i wynoszą około 25 a dla węgla brunatnego 19. Z tego wynika, że węgiel kamienny może ulegać łatwiej nadmiernemu przekruszeniu (pyleniu) w drobniejszych klasach ziarnowych. Dlatego nasuwa się bardzo istotny wniosek, że

Tablica 1. Zestawienie efektów rozdrabniania węgla brunatnego w różnych urządzeniach [19]

Table 1. Summary of results of brown coal comminution in different devices [19]

Kruszarka/młyn	Produkt, mm	Wilgotność naturalna 46%			Wilgotność 30%		
		S <sub>10</sub>	S <sub>90</sub>	uzysk <2 mm, %	S <sub>10</sub>	S <sub>90</sub>	uzysk <2 mm, %
shreder	0-2	-	-	-	5	4	50
nożowy	0-2	56	10	100	5	4	51
nożowy	0-5	27	6	89	14	5	81
młotkowy	0-5	28	6	89	20	6	85





Rys. 5. Charakterystyka składu ziarnowego produktów węgla kamiennych z KWK „Janina” i „Wieczorek” rozdrobnionych w młynie młotkowym przy liczbie 2500 obr/min [19]

Fig. 5. Characteristics of size composition of hard coal products from “Janina” and “Wieczorek” coal mines crushed in a beater mill by 2500 rpm [19]

regulacja zmiany prędkości obrotowej w młynach przemysłowych będzie stanowić ważny parametr optymalizacji procesu rozdrabniania węgla kamiennych i brunatnych. Sterowanie prędkością obrotową pozwoli dostosować proces rozdrabniania do zmienności uziarnienia nadawy, stworzy możliwość sterowania zawrotem materiału w odpowiedniej ilości, tak aby nie przekruszyć zanadto węgla oraz umożliwić efektywniejsze podsuszenie węgla.

Przykładowo zmniejszając prędkość obrotową wirnika można zwiększyć zawrót produktów do ponownego rozdrabniania, a więc dopasować rozkład uziarnienia materiału do potrzeb tworzenia mieszanek do procesu zgazowania. W warunkach przemysłowych operacja procesu rozdrabniania w wybranych urządzeniach rozdrabniających wirnikowych powinna być zoptymalizowana za pomocą testów doświadczalnych.

#### 4.3. Procedura optymalizacji produkcji węgla przeznaczonego do procesu zgazowania fluidalnego

Celem założeń procedury badań jest sposób optymalizacji uzyskiwania produktów węgla kamiennego i brunatnego przeznaczonych do zgazowania fluidalnego, tak aby nie produkować nadmiernej ilości pyłów mających wpływ na niewłaściwy proces zgazowania oraz możliwość wystąpienia wybuchu.

Procedura badań powinna uwzględniać przeprowadzenie testów w wytypowanym urządzeniu, które ma być stosowane zgodnie z przyjętymi kartami technologii [9]. Najczęściej takie procedury ustalają producenci maszyn i technologii wg własnej wiedzy, jednakże w ramach szerszych badań na życzenie klienta mogą uwzględnić dodatkowe procedury. Dopuszcza się przeprowadzenie procedury badań dla kruszarek innych



Rys. 6. Stopień rozdrobnienia dla węgla kamiennych i brunatnego [19]

Fig. 6. Fineness of hard and brown coals [19]

firm o podobnym działaniu i budowie, jeżeli takie urządzenia miałyby być alternatywnie stosowane lub porównywane.

W kartach technologii została wytypowana kruszarka młotkowa dwuwirnikowa typu NOVOROTOR II (zwana przez producenta Hazemag młynem młotkowym). Kruszarka posiada możliwość regulacji prędkości obrotowej obu wirników oraz wielkości szczeliny wylotowej rusztu.

Ze znanych testów pilotażowych oraz badań przemysłowych wynika, że zmienne parametry pracy kruszarki pozwalają dostosować urządzenie do jakości wymaganych produktów i właściwości fizyko-mechanicznych surowca. W przypadku rozdrabniania węgla przy ruszcie 6 mm i prędkości obrotowej 30÷40 1/min, 90 % produktu będzie się mieścić w przedziale uziarnienia 0-5 mm, co oznacza, że do zawrotu będzie zwracane co najmniej około 10 % produktu nadsitowego w klasie 5-7 mm. W uzyskanym produkcie 0-5 mm będzie się znajdować około 15 % pyłów <0,5 mm i około 2÷4 % pyłów <0,1 mm. W przypadku optymalizacji procesu rozdrabniania i zwiększenia rozkładu uziarnienia w zakresie grubszych ziaren można zmniejszyć prędkość obrotową wirników do 25 1/min i dokonać zwiększenia zawrotu niedokruszonego materiału.

Procedura badań eliminacji nadmiernej ilości ziaren drobnych produktów rozdrabniania węgla uwzględni następujące czynności:

1. przygotowanie odpowiedniej ilości prób reprezentatywnej nadawy o masach po ok. 100 kg o znanym składzie granulometrycznym (ewentualnie kształcie ziaren);
2. wykonanie testów rozdrabniania przy minimalnej prędkości obrotowej wirnika (25 1/min) przy różnych wielkościach oczek rusztu (3, 4, 5, 6 mm) wraz z klasyfikacją produktów przy ziarnie podziałowym 5 mm w układzie zamkniętym;
3. wykonanie analiz granulometrycznych produktów (ewentualnie kształtu ziaren);
4. obliczenie wielkości zawrotu produktu (tj. ustalenie ilości krążącego węgla w obiegu kruszarka-klasyfikator co ma związek z przerobem, czyli wydajnością układu);
5. ustalenie wielkości rozkładu uziarnienia produktu zwłaszcza pyłów poniżej 0,1 mm;
6. kolejne wykonanie cykli testów rozdrabniania przy zwiększonej prędkości obrotowej wirnika (większej niż 25 1/min) przy różnych wielkościach oczek rusztu (3, 4, 5, 6 mm) wraz z klasyfikacją produktów przy ziarnie podziałowym 5 mm w układzie zamkniętym;
7. ustalenie zależności wychodów produktów poniżej 0,1 mm od zmiany prędkości obrotowej wirników i wielkości oczka rusztu.
8. ewentualnie ustalenie zależności kształtu ziaren w rozkładzie uziarnienia np. wg klasyfikacji Zingga od zmiany prędkości obrotowej wirników i wielkości oczka rusztu.

Dalsze postępowanie związane z dostarczeniem produktów węglowych do gazogeneratora powinno uwzględniać rodzaj transportu stosowanego w instancji zgazowującej łącznie ze sposobem podawania mieszanki węglowej. Procedura badań powinna uwzględniać zmianę destrukcji ziaren wywołanych czynnikami mechanicznymi występującymi podczas transportu (np. mechanicznego, pneumatycznego, hydraulicznego) na skutek tarcia, zgniatania ziaren, przesypania itp. W ocenie należy uwzględnić przyrost pyłów po przetransportowaniu węgla w odniesieniu do stanu pierwotnego przed transportem, czyli produktu wyjściowego z instalacji technologicznej rozdrabniania i klasyfikacji.

Warto uwzględnić także w ocenie destrukcji wielkości uziarnienia produktów kształt ziaren, który ma kluczowy wpływ na wytrzymałość.

## 5. Ocena pracy różnych urządzeń rozdrabniających pod kątem rozkładu parametrów jakościowych badanych węgli

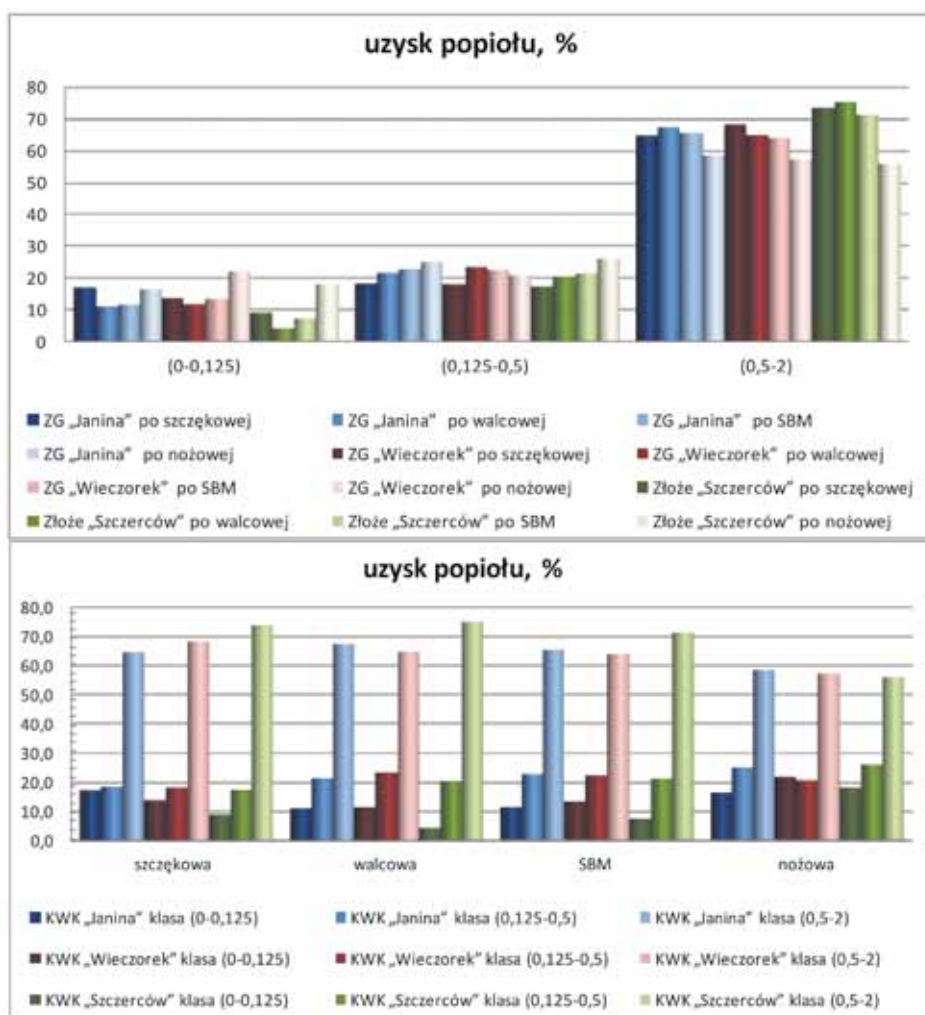
W niniejszym rozdziale oceniono przydatność badanych kruszarek do produkcji wysokoreaktywnych węgli w zakresie uziarnienia poniżej 2 mm na drodze selektywnego ich rozdrabniania, przeznaczonych do zgazowania w ciśnieniowym reaktorze ze złożem fluidalnym.

Badania nad wzrostem reaktywności węgla energetycznych pochodzących z ZG „Janina” i ZG „Wieczorek” oraz węgla brunatnego ze złoża Szczerców, na drodze selektywnego ich kruszenia realizowano w kruszarkach laboratoryjnych: szczękowej, walcowej, wirnikowej nożowej typu Shreder oraz udarowej listwowej SBM. Reaktywność węgla oceniano poprzez wyniki analiz elementarnych wąskich klas ziarnowych produktów kruszenia. Analizowano w nich zawartość popiołu, siarki, azotu, wodoru, węgla oraz ciepło spalania. Wyniki analiz podano w tablicy 2.

Do pełnej oceny pracy kruszarek pod kątem ich przydatności do produkcji węgla w określonych klasach ziarnowych o odpowiednich parametrach jakościowych wykorzystano wskaźnik uzysku parametrów jakościowych węgla. Wyniki przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 7, 8, 9.

Szczegółowa analiza wyników z analiz chemicznych, technicznych i elementarnych badanych węgli w wąskich klasach ziarnowych oraz ich ocena statystyczna pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- węgiel z KWK „Janina” jest najsilniej zasiarczony szczególnie po uwolnieniu najpewniej ziaren pirytu w procesie kruszenia w klasie 0-0,125 mm,
- w węglu kamiennym z KWK „Wieczorek” i brunatnym ze złoża Szczerców” obserwowany jest równomierny rozkład zawartości siarki w wąskich klasach ziarnowych,
- podczas kruszenia węgla kamiennych substancja mineralna koncentruje się w najdrobniejszych klasach ziarnowych,
- podczas kruszenia węgla brunatnych substancja mineralna koncentruje się równomiernie w poszczególnych klasach ziarnowych,
- podczas selektywnego kruszenia węgla do uziarnienia < 2 mm zdecydowanie najwyższe uzyski popiołu osiągnęte są w klasie najgrubszej (0,5÷2 mm) – średnio  $\epsilon = 65,7\%$ , a najniższe w klasie najdrobniejszej (0÷0,125 mm) – średnio  $\epsilon = 12,5\%$ ,
- podczas selektywnego kruszenia węgla do uziarnienia < 2 mm zdecydowanie najwyższe uzyski siarki osiągnęte są w klasie najgrubszej (0,5÷1 mm) – średnio  $\epsilon = 67,7\%$ , a najniższe w klasie najdrobniejszej (0÷0,125 mm) – średnio  $\epsilon = 10,6\%$ ,

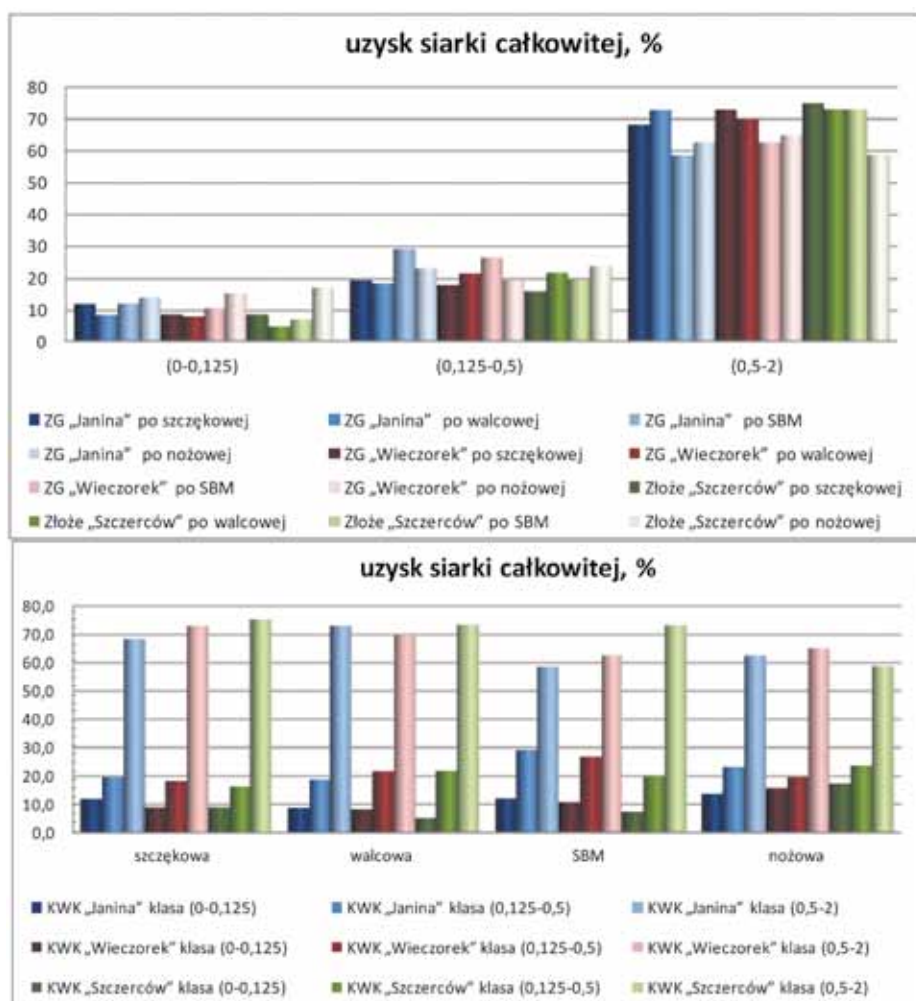


Rys. 7. Wyniki uzysków popiołu w klasach ziarnowych dla węgla z poszczególnych kruszarek (opracowanie własne)

Fig. 7. Results of ash output in size grade for coal from particular crushers (own elaboration)

**Tablica 2. Wybrane parametry ilościowo-jakościowe węgla po rozdrobieniu w poszczególnych klasach ziarnowych (opracowanie własne)****Table 2. Selected quantitative and qualitative parameters of coals after comminution in particular size grades (own elaboration)**

Węgiel Kruszarka	klasy ziarnowe, mm	Wychód,%	Popiół,%	Siarka,%	Azot,%	Węgiel,%	Wodór,%	Ciepło spalania kJ/kg
ZG „Janina” Szczękowa	(0-0,125)	8,2	25	2,36	0,78	50	2,94	19545
	(0,125-0,5)	15,5	14,1	2,02	0,94	57,6	3,42	22651
	(0,5-2)	76,2	10,3	1,44	0,94	60,1	3,81	23695
	(0-2)	100,0	12,10	1,61	0,93	58,88	3,68	23191
ZG „Janina” Walcowa	(0-0,125)	4,9	29,2	2,41	0,63	47,1	2,78	18290
	(0,125-0,5)	16,9	16,5	1,5	0,9	55,4	3,33	21744
	(0,5-2)	78,2	11,2	1,27	0,97	59,6	3,61	23513
	(0-2)	100,0	12,98	1,36	0,94	58,28	3,52	22958
ZG „Janina” Listwowa SBM	(0-0,125)	7,0	19,64	2,71	0,82	51,8	3,34	20609
	(0,125-0,5)	25,3	10,72	1,8	0,94	58,9	3,92	23736
	(0,5-2)	67,7	11,57	1,35	0,97	59,8	4,06	24019
	(0-2)	100,0	11,92	1,56	0,95	59,01	3,97	23708
ZG „Janina” Nożowa Shreder	(0-0,125)	9,3	25,1	1,97	0,9	50,8	3,12	19844
	(0,125-0,5)	20,4	17,6	1,5	0,91	54,8	3,25	21730
	(0,5-2)	70,2	12	1,17	1,03	58,9	3,66	23395
	(0-2)	100,0	14,37	1,31	0,99	57,31	3,53	22723
ZG „Wieczorek” Szczękowa	(0-0,125)	7,6	16,1	0,5	1,17	66,9	4,07	26872
	(0,125-0,5)	18,1	8,8	0,43	1,47	73,6	4,57	29874
	(0,5-2)	74,3	8,2	0,42	1,48	74,7	4,54	30236
	(0-2)	100,0	8,91	0,43	1,45	73,91	4,51	29914
ZG „Wieczorek” Walcowa	(0-0,125)	7,0	17,9	0,47	1,24	65,2	3,71	26280
	(0,125-0,5)	19,7	12,8	0,44	1,35	69,9	4,3	28599
	(0,5-2)	73,3	9,6	0,38	1,44	72,9	4,63	29732
	(0-2)	100,0	10,81	0,40	1,41	71,77	4,50	29267
ZG „Wieczorek” Listwowa SBM	(0-0,125)	8,9	15,63	0,6	1,27	68,8	4,07	26840
	(0,125-0,5)	26,4	8,9	0,5	1,46	75,9	4,86	30075
	(0,5-2)	64,7	10,38	0,48	1,44	74,6	4,86	29790
	(0-2)	100,0	10,46	0,50	1,43	74,42	4,79	29602
ZG „Wieczorek” Nożowa Shreder	(0-0,125)	13,2	20,6	0,47	1,12	62,6	3,65	25070
	(0,125-0,5)	18,3	14,1	0,43	1,26	68,7	4,22	27982
	(0,5-2)	68,5	10,4	0,38	1,37	72,2	4,48	29636
	(0-2)	100,0	12,42	0,40	1,32	70,29	4,32	28731
Złoże Szczerców Szczękowa	(0-0,125)	8,5	19,4	0,78	0,47	41,44	3,12	16249
	(0,125-0,5)	16,3	19,5	0,74	0,4	41,41	3,07	15968
	(0,5-2)	75,1	18	0,75	0,37	42,36	3,13	16416
	(0-2)	100,0	18,36	0,75	0,38	42,13	3,12	16329
Złoże Szczerców Walcowa	(0-0,125)	4,4	18,90	0,89	0,45	51,09	3,68	20399
	(0,125-0,5)	21,5	19,35	0,81	0,48	45,08	3,29	17879
	(0,5-2)	74,0	20,70	0,78	0,42	41,57	3,23	16313
	(0-2)	100,0	20,33	0,79	0,43	42,75	3,26	16831
Złoże Szczerców Listwowa SBM	(0-0,125)	6,9	20,25	0,84	0,65	43,7	3,15	16649
	(0,125-0,5)	20,3	20,43	0,78	0,56	41,7	3,48	15984
	(0,5-2)	72,8	19,04	0,8	0,54	42,2	3,38	16220
	(0-2)	100,0	19,41	0,80	0,55	42,20	3,38	16202
Złoże Szczerców Nożowa Shreder	(0-0,125)	16,7	21	0,86	0,31	43,00	3,36	16986
	(0,125-0,5)	24,6	20,7	0,81	0,33	43,11	3,4	17158
	(0,5-2)	58,7	18,7	0,83	0,34	44,52	3,61	17618
	(0-2)	100,0	19,58	0,83	0,33	43,92	3,52	17400



Rys. 8. Wyniki uzysków siarki całkowitej w klasach ziarnowych dla węgla z poszczególnych kruszarek (opracowanie własne)

Fig. 8. Results of total sulfur output in size grades for coal from particular crushers (own elaboration)

- porównując pracę badanych kruszarek pod kątem rozkładu substancji mineralnej w klasach ziarnowych można stwierdzić, że w klasie najdrobniejszej najwyższe uzyski popiołu i siarki oraz pierwiastków energotwórczych osiąga się w kruszarce nożowej; w klasie pośredniej w kruszarce SBM, (szczególnie wysokie wartości uzysku siarki), natomiast dla klasy najgrubszej najwyższe wartości uzysków daje kruszarka szczękowa wraz z walcową, a zdecydowanie najniższe kruszarka nożowa.
- pod względem uwalniania skały płonnej oraz siarki z węgla najbardziej stabilnie w całym zakresie uziarnienia pracuje kruszarka nożowa,
- w zakresie uzysków pierwiastków energotwórczych wysoką stabilnością pracy charakteryzuje się kruszarka szczękowa.

## 6. Innowacyjne rozwiązanie układów technologicznych przygotowania węgla na drodze przeróbki mechanicznej dla procesu zgazowania ze złożem fluidalnym

### 6.1. Technologia rozdrabniania i klasyfikacji

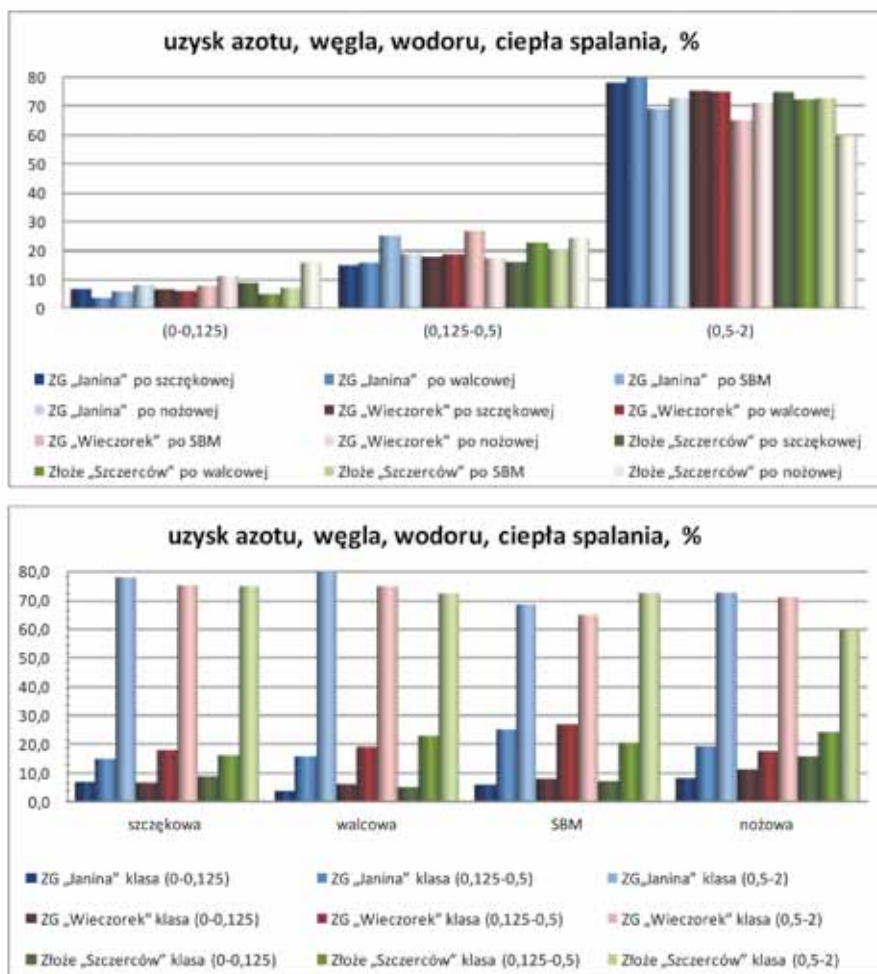
Technologia przygotowania węgla na drodze przeróbki mechanicznej do procesu zgazowania opiera się na wykorzy-

staniu nowych rozwiązań technologicznych znanych dłużej niż 3 lata, ale o rozprzestrzenieniu mniejszym niż 15 % na świecie i w Polsce.

Zasadniczym elementem inwestycyjnym omawianej instalacji jest obiekt wyposażony w urządzenie do rozdrabniania, suszenia i klasyfikacji przerabianych produktów. Jednym z głównych elementów tej instalacji jest nowoczesna kruszarka młotkowa dwuwirnikowa typu NOVOROTOR II, której każdy wirnik napędzany jest osobnym silnikiem a poprzez zainstalowanie falowników możliwa jest ciągła bezstopniowa regulacja ich prędkości obrotowej w zakresie 25÷55 1/min. Drugim parametrem, który można zmieniać w tej kruszarce to wielkość szczeliny wylotowej rusztu z zakresie od 2÷6 mm. Zmienne parametry pracy kruszarki pozwalają dostosować urządzenie do jakości wymaganych produktów i właściwości fizyko-mechanicznych surowca [21].

Innowacyjność instalacji polega na sposobie prowadzenia procesu rozdrabniania. Znamioną cechą elementarnego procesu kruszenia jest udar elementami roboczymi kruszarki, tj. młotkami o rozdrabniany materiał, następnie udar i ścieranie materiału o płyty odbojowe kruszarki oraz dodatkowy wzajemny udar i ścieranie się materiału o siebie. W wyniku procesu rozdrabniania energia mechaniczna kruszenia zużywana jest na likwidację oddziaływań międzycząsteczkowych ziarn,





Rys. 9. Uśrednione wyniki uzysków azotu, węgla, wodoru, ciepła spalania w klasach ziarnowych dla węgla z poszczególnych kruszarek (opracowanie własne)

Fig. 9. Averaging results of output of nitrogen, coal, hydrogen, heating of combustion in size grades for coal from particular crushers (own elaboration)

gdzie następuje rozpad skały na drobne cząstki (pyły) oraz zamiana energii mechanicznej na ciepło, które jest spożytkowane. W takiej kruszarce to zjawisko mechanicznej aktywacji jest bardzo korzystne, gdyż w jej gardzieli następuje proces suszenia poprzez wprowadzanie gazów suszących o temp. do 700 °C wytwarzanych w generatorze gorących gazów. Temu zjawisku towarzyszy także mieszanie się materiału (ze względu na zawrót z klasyfikatora pneumatycznego grubszego produktu) wraz z wprowadzaną nową porcją surowca do kruszarki, dzięki czemu uzyskuje się produkty jednorodne wskutek tarcia i zderzeń ziaren i mieszania się ziaren węgla. Materiał po uzyskaniu odpowiednich wymiarów opuszcza kruszarkę przez ruszt i kierowany jest do klasyfikacji pneumatycznej.

Innowacyjna kruszarka udarowa krusząco-susząca dwuwirnikowa Novorotor II w Polsce do rozdrabniania węgla kamiennego czy brunatnego nie została jeszcze wykorzystana, natomiast jest używana do produkcji mączek wapiennych.

Jedną z najistotniejszych zalet kruszarki młotkowej jest jej bardzo niska energochłonność. Producent Hazemag&EPR podaje, że dla rozdrabniania węgla kamiennego zużycie energii wynosi 3÷4 kWh/Mg, a dla węgla brunatnego 4÷8 kWh/Mg [15], co przy rozdrabnianiu węgla w młynach pionowych wentylatorowych lub misowo-kulowych jest o połowę niższa.

Opis układu technologicznego został przedstawiony w Kartach technologii [9,19] przygotowania węgla brunatnego i kamiennego o uziarnieniu 0(0,5)-5 mm na drodze przeróbki mechanicznej dla procesu zgazowania ze złożem fluidalnym. Przykładowy układ technologiczny procesu rozdrabniania i klasyfikacji dla węgla kamiennego zaprezentowano na rysunku 10. Podstawową charakterystykę instalacji przedstawiono w tablicy 3

## 6. Technologia wzbogacania na sucho węgla kamiennego

W pracy [19] omówiono trzy metody wzbogacania surowego urobku węglowego bez użycia wody. Pierwszą z dostępnych metod jest prowadzenie procesu na stole koncentracyjnym pneumatycznym typu FGX-1. Takie urządzenie zostało zakupione od producenta chińskiego Tangshan Shenzou Machinery Co. Ltd. przez Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego dla swego Oddziału Zamiejscowego Centrum Gospodarki Odpadami i Zarządzania Środowiskowego w Katowicach. Badania Instytutu pozwoliły zdobyć doświadczenie w prowadzeniu procesu rozdziału oraz opracować metodykę badawczą dla optymalnego odzysku frakcji kamiennych z urobku węglowego. Przykładowo



Rys. 10. Schemat blokowy technologii przygotowania węgla kamiennego o uziarnieniu < 5 mm do procesu zgazowania [19]

Fig. 10. Block diagram of the preparation technology of hard coal with graining < 5 to the gasification process [19]

Tablica 3. Charakterystyka instalacji rozdrabniania i klasyfikacji dla węgla brunatnego i kamiennego [9]  
Table 3. Characteristics of comminution system and classification of hard and brown coal

Parametry	Węgiel brunatny	Węgiel kamienny
Koszt orientacyjny inwestycji, zł	54 567 000	40 815 000
Zużycie energii całej instalacji, kWh/Mg	23,9	9,0
Koszty eksploatacyjne instalacji (energia + elementy robocze), zł/Mg	8,8	3,5
Koszty zużycia oleju opałowego, zł/Mg	291,0	62,5
Razem koszty eksploatacyjne całej instalacji, zł/Mg	299,8	66,0
Powierzchnia zabudowy całej instalacji, m <sup>2</sup>	500	500
Uziarnienie nadawy, mm	0-31,5	0-40
Wilgotność całkowita nadawy, %	51	16-22
Ciepło spalania, MJ/kg	8,1	21,5-22
Podatność przemiałowa Hardgrovea	-	53
Zawartość popiołu, %	11,6	3-9
Zawartość siarki, %	<1,1	<1,2
Uziarnienie produktu, mm	0(0,5)-5	0(0,5)-5
Wilgotność całkowita produktu, %	< 4	< 4

na próbie pochodzącej z jednego z zakładów górniczych o uziarnieniu 8-25 mm wychód koncentratu węgla wyniósł ok. 84 % przy zawartości popiołu w koncentracie około 25 % i 84 % w odpadach (tabl. 4) [1,3].

Tablica 4. Wyniki analizy odkamieniania węgla surowego na stole pneumatycznym FGX-1 [1, 3, 19]

Table 4. Analysis results of raw coal descaling on the FGX-1 dry separator [1, 3, 19]

	Wychód, %	Zawartość popiołu, %
Nadawa	100	39,5
Koncentrat	84	25
Odpad*	14	84

\*) bilans nie uwzględnia analizy produktu przejściowego

\*) the balance does not include the analysis of in-process materials

Druga metoda odkamieniania surowego urobku węglowego w kruszarce bębnowej Bradford, która znana jest od lat, może być rozwiązaniem alternatywnym dla grubego uziarnienia urobku stosowana na dole kopalni.

Na uwagę zasługuje trzecia metoda odkamieniania. Firma Comex Polska, która opracowała innowacyjny system suchej separacji surowego urobku węglowego w separatorze z systemem sortującym typu CXR opartym na analizie rentgenowskiej przeprowadziła testy w skali półtechnicznej między innymi na węglu z KWK „Ziemowit”, a także na węglu z KWK „Wieczorek” o uziarnieniu 8-50 mm na zlecenie AGH w ramach zadania badawczego dotyczącego przygotowania węgla do procesu zgazowania w gazogeneratorze fluidalnym.

Wyniki rozdziału zaprezentowano w tablicy 5. Pomijając klasę ziarnową poniżej 8 mm, materiał został podzielony na produkt (koncentrat) i odpad w stosunku odpowiednio

93,4 % i 6,6 %. Proces separacji zapewnił uzysk koncentratu na poziomie około 72 %, przy możliwie osiąganey wydajności od 25-40 Mg/h [20].

W pracy [10] badano także proces separacji węgla pochodzącego z KWK „Sobieski”. Dla klasy ziarnowej 8-10 mm uzyskano 76 % koncentrat o zawartości popiołu 16 % a dla klasy ziarnowej 20-120 mm uzyskano 97 % koncentrat węglowy o zawartości popiołu 0,3 %.

**Tablica 5. Wyniki analizy separacji węgla surowego z KWK „Wieczorek” w separatorze CXR-1000 [19]**

**Table 5. Results of raw coal separation analysis at “Wieczorek” mine in the separator CXR-1000 [19]**

	Wychód, %	Zawartość popiołu, %
Nadawa	100	11,6
Koncentrat	93,4	9,5
Odpad	6,6	42,5

Urządzenie składa się z układu podającego nadawę o możliwym zakresie uziarnienia od 8 do 300 mm, zaawansowanego układu analizy oraz układu odrzucającego. Nadawa rozprawdzana jest na przenośniku wibracyjnym oraz równomiernie przekazywana na przenośnik taśmowy. Na przenośniku taśmowym następuje analiza obrazu oparta na promieniowaniu rentgenowskim. Następnie materiał poddawany jest analizie optycznej przy wylocie z taśmociągu. Na podstawie kompleksowej analizy rentgenowskiej i optycznej podjęta zostaje decyzja, według której materiał albo grawitacyjnie spada do bliższego wylotu albo zostaje odrzucony przez mechanizm odrzucający wykorzystujący dysze pneumatyczne lub sterowane pneumatycznie łopatkę mechaniczną (rys. 11).

Analiza obrazu zarówno z kamery, jak i czujnika rentgenowskiego jest bardzo zaawansowana i kompleksowa. Każda cząstka analizowana jest pod względem intensywności kolorów w poszczególnych pasmach światła widzialnego, jak i podczerwieni. Obraz z czujnika rentgenowskiego jest również analizowany pod kątem układu linii odzwierciedlających zmiany gęstości i rodzaju materiału w prześwietlanych obiektach. Zastosowanie nowoczesnych metod filtracji, włącznie z filtrami FFT (*Fast Fourier Transformation*), pozwala rozpoznać nawet niewielkie różnice w separowanym materiale.

System OSX-CXR wymaga niższych nakładów inwestycyjnych nawet o 40 %, lecz jego ogromnym atutem są bardzo niskie koszty eksploatacyjne od 6÷10 razy mniejsze od tradycyjnych metod wzbogacania grawitacyjnego węgla. Wynika to z niewielkiej ilości ruchomych elementów roboczych, braku

cieczy ciężkiej i jej rekuperacji w przypadku wzbogacania gruboziarnistych węgla, jak w płuczkach ziarnowych oraz braku wody w przypadku wzbogacania drobnoziarnistych węgla, jak w osadzarkach, a także braku pomp dla cieczy ciężkiej i układu wodno-mułowego. System do oceny gęstości materiału i jego rozdziału nie wymaga różnic w prędkościach opadania ziaren w ośrodku ciekłym, ponieważ wykorzystuje promienie Rentgena oraz własności optyczne materiału.

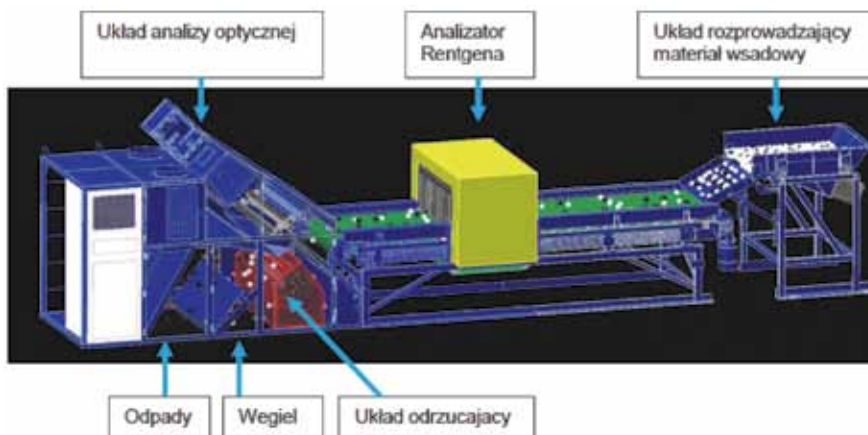
W przypadku produkcji paliwa do procesu zgazowania uzyskuje się mieszanki o mniejszej wilgotności, co również obniża koszty podczas suszenia węgla w obiegu rozdrabniania i klasyfikacji. Jest to pierwszy na rynku separator wykorzystujący tak szeroką gamę jednocześnie analizowanych parametrów.

Technologia umożliwia stworzenie konfiguracji urządzeń w układzie szeregowo-równoległym dla różnych klas wielkości uziarnienia węgla. Układ równoległy (ilościowy) niezbędny jest do podniesienia wydajności procesu, natomiast układ szeregowy (jakościowy) do podniesienia jakości końcowych produktów. Wydajność jednej linii technologicznej może wynosić od kilkudziesięciu do 500 Mg/h. Uzysk węgla przekracza 97 %.

## 7. Podsumowanie

Procesy przerobcze węgla, takie jak rozdrabnianie, klasyfikacja i wzbogacanie, odgrywają olbrzymią rolę w przygotowaniu węgla do procesu zgazowania, ponieważ są w stanie doprowadzić węgiel do wymaganego uziarnienia oraz obniżyć w nim ilość występujących zanieczyszczeń.

Analiza efektywności pracy różnych układów technologicznych rozdrabniania i klasyfikacji oraz urządzeń wykazała, że najkorzystniejszym układem przygotowującym węgiel zarówno kamienny, jak i brunatny do procesu zgazowania fluidalnego na drodze przeróbki mechanicznej będzie układ jednostadialny wyposażony w kruszarkę (młyn) udarową młotkową pracującą z klasyfikatorem w obiegu zamkniętym. Ponieważ próby dostarczane do badań charakteryzowały się zmiennymi parametrami zwłaszcza pod względem uziarnienia, zaproponowano, aby przed takim układem zamkniętym rozdrabniania i przesiewania był zainstalowany dodatkowy przesiewacz odsiewający drobny materiał poniżej 2(5) mm. Zastosowanie innowacyjnej kruszarki młotkowej dwuwirnikowej jest najkorzystniejszym rozwiązaniem, z tego względu, że posiada ona m.in. możliwość płynnej regulacji prędkości obrotowej wirników dostosowując parametry pracy do wy-



**Rys. 11. Schemat działania separatora typu Comex CXR-OSX [10,19]**

**Fig. 11. Scheme of Comex CXR-OSX separator operation**

maganego uziarnienia produktów oraz może jednocześnie podsuszać materiał podczas pracy, co ma istotne znaczenie w przypadku rozdrabniania węgla brunatnego oraz klasyfikacji mechanicznej lub pneumatycznej.

Na bazie zaproponowanej w kartach technologii tego typu kruszarki, została opisana procedura badań i sposób optymalizacji uzyskiwania produktów węgla kamiennego i brunatnego przeznaczonych do zgazowania fluidalnego, tak aby nie produkować nadmiernej ilości pyłów mających wpływ na niewłaściwy proces zgazowania.

Badania zaprezentowane w niniejszym artykule także dotyczyły oceny przydatności różnych kruszarek do produkcji wysokoreaktywnych węgli w zakresie uziarnienia poniżej 2 mm. Szczegółowa analiza wyników z analiz chemicznych, technicznych i elementarnych badanych węgli w wąskich klasach ziarnowych oraz ich ocena statystyczna pozwoliła wyciągnąć m.in. takie wnioski, że węgiel z KWK „Janina” jest najsilniej zsiarzony szczególnie po uwolnieniu ziaren pirytu w procesie kruszenia w klasie 0-0,125 mm, natomiast w węglu kamiennym z KWK „Wieczorek” i brunatnym ze złoża Szczerców obserwowany jest równomierny rozkład zawartości siarki w wąskich klasach ziarnowych. Zauważono, że podczas kruszenia węgla kamiennych substancja mineralna koncentruje się w najdrobniejszych klasach ziarnowych, a w przypadku węgla brunatnych koncentruje się równomiernie w poszczególnych klasach ziarnowych.

Porównując pracę badanych kruszarek pod kątem rozkładu substancji mineralnej w klasach ziarnowych można stwierdzić, że w klasie najdrobniejszej najwyższe uzyski popiołu i siarki oraz pierwiastków energotwórczych osiąga się w kruszarce nożowej; w klasie pośredniej w kruszarce udarowej listwowej (szczególnie wysokie wartości uzysku siarki), natomiast dla klasy najgrubszej najwyższe wartości uzysków daje kruszarka szcękowa wraz z walcową, a zdecydowanie najniższe kruszarka nożowa.

W artykule przedstawiono także innowacyjne metody suchej separacji urobku węglowego, które pozwalają na wzbogacanie węgla bez użycia wody. Ma to ogromne znaczenie dla ochrony środowiska naturalnego oraz obniżenia kosztów inwestycyjno-eksploatacyjnych. W przypadku produkcji paliwa do procesu zgazowania uzyskuje się mieszanki o mniejszej wilgotności, co również obniża koszty podczas suszenia węgla w obiegu rozdrabniania i klasyfikacji, czy nawet transportu.

Przeprowadzone badania w separatorze optycznym i rentgenowskim firmy Comex dla surowego węgla z KWK „Wieczorek” o uziarnieniu 8-50 mm wykazały, że w procesie suchej separacji możliwe jest uzyskanie około 72 % koncentratu węglowego o zawartości popiołu 9,5 %. Natomiast dla frakcji węglowej 8-10 mm pochodzącej z KWK „Sobieski” uzyskano 76 % koncentrat o zawartości popiołu 16 % a dla frakcji 20-120 mm uzyskano 97 % koncentrat węglowy o zawartości popiołu 0,3 %. Efektywność procesu separacji w głównej mierze, poza właściwościami surowego węgla, zależą od przyjętego rodzaju układu technologicznego. Za pomocą wielostopniowej separacji w układzie szeregowo-równoległym można podnosić jakość i wydajność uzyskiwanych koncentratów węglowych.

Również badania przeprowadzone przez Centrum Gospodarki Odpadami i Zarządzania Środowiskowego na pneumatycznym stole koncentracyjnym typu FGX-1 pozwoliły między innymi dla surowego urobku węglowego o uziarnieniu 8-25 mm uzyskać około 84 % wychód koncentratu węgla przy zawartości popiołu około 25 % w koncentracji i 84 % w odpadach.

*Praca została wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.*

## Literatura

1. *Baic I., Blaschke W., Góralczyk S., Sobko W., Szafarczyk J.:* Odkamienianie urobku węglowego metodą suchej separacji; KOMEKO 2013 – Innowacyjne i Przyjazne dla Środowiska Techniki i Technologicznej Przeróbki Surowców Mineralnych – Bezpieczeństwo – Jakość – Efektywność – Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice, marzec 2013, ISBN 978-83-60708-71-2, str. 99÷108.
2. *Blaschke S.:* Przeróbka mechaniczna kopalni cz. I. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1982
3. *Blaschke W., Baic I.:* Wykorzystanie powietrznych stołów koncentracyjnych do otrzymywania substytutów kruszyw metodą deshalingu, *Kruszywa*, 3, 2013, s. 48÷50
4. *Dzik T., Mięso R.:* Investigation of the resistance force in the process of cutting cereal straw: short communication. *Polish Journal of Environmental Studies*. ISSN 1230-1485, 2007 vol. 16 no. 3B 104-106
5. *Dzik T., Mięso R.:* Research on energy absorption in the process of cutting cereal straws: short communication. *Polish Journal of Environmental Studies*. ISSN 1230-1485, 2007 vol. 16 no. 3B 107÷109
6. *Gawenda T., Marciniak-Kowalska J.:* Analiza efektów rozdrabniania w kruszarkach wirnikowych węgla przeznaczonych do zgazowania. *Przeгляд Górnicy*, 2/2013 s.232-238, Wyd. SłiTG, Katowice 2013
7. *Gawenda T.:* Produkcja surowców mineralnych o wąskim zakresie uziarnienia w dwustadialnym zamkniętym układzie rozdrabniania i klasyfikacji, *Górnictwo i Geologia: kwartalnik*; ISSN 1896-3145, t. 6 z. 2 s. 39–48. Bibliogr. s. 47, Wyd. AGH, Kraków, 2011
8. *Hardy T., Kordylewski W., Mościcki K.:* Zagrożenie korozją chlorkową w wyniku spalania i współspalania biomasy w kotłach, *Archiwum spalania*, vol. 9, nr3/4, s. 181÷195, 2009
9. Karty rozwiązania innowacyjnego „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”, sprawozdanie z cz. tematu badawczego pt. *Badania wzbogacania węgla na drodze przeróbki mechanicznej* praca niepublikowana 2010-2014
10. *Kolacz J., Gawenda T.:* Separacja po nowemu. Innowacyjne rozwiązanie odkamieniania i wzbogacania węgla kamiennego na sucho. *Surowce i Maszyny Budowlane*; Wyd. BMP Racibórz, ISSN 1734-7998. — 2013 nr 4 s. 30÷35.
11. *Marciniak-Kowalska J., Krawczykowski D., Gawenda T.:* Research over improvement of reactivity of chosen coals destined to gasification. *Polish Journal of Environmental Studies*; ISSN 1230-1485. 2012 vol. 21 no. 5A s. 297÷299.
12. *Naziemiec Z., Gawenda T.:* Badanie procesu kruszenia z zamkniętym obiegiem materiału. *Kruszywa mineralne: surowce – rynek – technologie – jakość. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*; ISSN 0324-9670; nr 119. Seria: Konferencje; nr 48. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Konferencja 18–20 kwietnia 2007, Szklarska Poręba 2007
13. *Ney R.:* Surowce mineralne Polski – Surowce energetyczne – węgiel kamienny, węgiel brunatny, wyd. PPGSMiE PAN, Kraków, 1996.
14. *Pudło W.:* Procesy kruszenia i mielenia. *Poradnik Górnika*, t. 5. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1976
15. *Rakemann W., Zibulski H.D.:* Die Hazemag-Versuchsanlage, *Aufbereitungstechnik* 39 (1998) nr 10, s 507÷517
16. *Sablik J., Wawrzynkiewicz W.:* „Wpływ siarki organicznej na jakość węgla energetycznych”, *Inżynieria Mineralna*, nr1-6, str. 11÷21, 2001



17. *Sobolewski A., Chmielniak T., Topolnicka T., Giesa N.*: Dobór węgla do zgazowania w ciśnieniowym reaktorze fluidalnym, Karbo nr 1, str. 28÷38, 2013a
18. *Sobolewski A., Chmielniak T., Topolnicka T., Świerza G.*: Charakterystyka polskich węgla w aspekcie ich przydatności do procesu zgazowania, Przegląd Górniczy nr 2, str. 174÷183, 2013b
19. Sprawozdanie projekt NCBR pt.: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii”, sprawozdanie z cz. tematu badawczego pt. Badania wzbogacania węgla na drodze przeróbki mechanicznej” praca niepublikowana 2010-2014
20. *Szewczuk A., Progorowicz J.*: Raport z badań na zlecenie AGH “Testy separacji niewzbogaconego węgla o rozmiarze 8-50 mm przy wykorzystaniu separatora typu Comex CXR-1000” Kraków 2013
21. *Zibulski H.D.*: Forschung, Entwicklung und verfahrenstechnische Untersuchungen – Die Hazemag-Versuchsanlage, Aufbereitungstechnik 50 (2009) nr 5, s 20÷32



Zadanie badawcze „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

