



MICHAŁ MAZUREK*, ANNA MANOWSKA*, RAFAŁ JENDRUŚ*

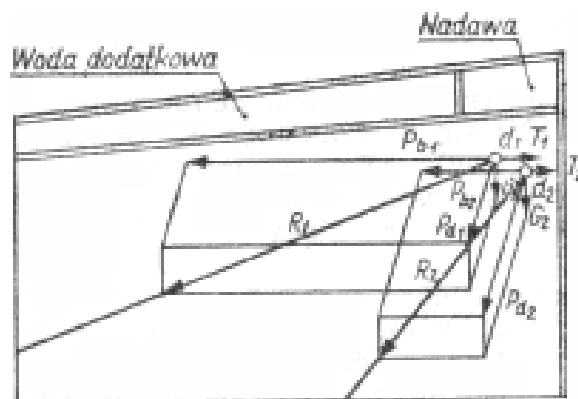
Laboratoryjno-statystyczna analiza wpływu wybranych parametrów technologicznych stołu koncentracyjnego na proces wzbogacania mułu węglowego

Wprowadzenie

Stoły koncentracyjne stosowane są w procesach wzbogacania kopaliny stałych od ponad 100 lat. Najczęściej stosowana konstrukcja stołów koncentracyjnych przedstawia się w postaci nachylonej płyty o kształcie prostokąta bądź też rombu; istnieją także inne konstrukcje stołów stosowane obecnie z powodzeniem w światowym przemyśle przeróbki kopaliny (De Korte 2010; Honaker i in. 2010), które w krajowej branży przerobczej nie znalazły jak dotąd zastosowania. Główną zaletą stołów koncentracyjnych jest ich wysoka dokładność rozdzielania, bardzo prosta budowa, jak i niskie koszty eksploatacji. Przedział uziarnienia wzbogacanych kopaliny na stołach koncentracyjnych waha się w granicach 6–0 mm. Najczęściej stoły koncentracyjne wykorzystuje się do wzbogacania złota, srebra, rud cynkowo-olowiowych, piasków szklarskich oraz węgla. Jednakże z uwagi na niską wydajność, sięgającą około 12 Mg/h, nie są one stosowane w polskim górnictwie węglowym. Proces wzbogacania na stole koncentracyjnym opiera się na wykorzystaniu przepływu laminarnego strumienia wody roboczej (przepływu, w którym płyn przepływa w równoległych warstwach bez zakłóceń pomiędzy warstwami) w celu rozdzielania drobno uziarnionego materiału zróżnicowanego pod względem gęstości. Powierzchnia stołu może być gładka lub też rowkowana

* Dr inż., Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Gliwice; e-mail: michal.mazurek@polsl.pl

(listewkowa) w zależności od wielkości ziaren rozdzielanego materiału. Na skutek działania sił: ciężkości G , bezwładności P , tarcia T i siły naporu wody P_d , zachodzi zjawisko rozwarstwienia się ziaren według ich ciężarów właściwych; graficzny obraz działania wyżej wymienionych sił na wzbogacany materiał pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat działania stołów koncentracyjnych
 Źródło: Poradnik Górnika 1976

Fig. 1. Concentrating table function diagram
 Source: Poradnik Górnika 1976

Najbardziej korzystne warunki do prowadzenia procesu rozdziału na stole koncentracyjnym zachodzą wówczas, gdy występują duże różnice w gęstościach pomiędzy ziarnami użytecznymi a skałą płoną sięgające nawet 4 do 5 g/cm³. Wpływ na zachowanie się ziaren znajdujących się w strudze wody, która spływa po płycie stołu koncentracyjnego, wywierają następujące czynniki (Blaschke i in. 2001):

- ◆ gęstość ziaren,
- ◆ kształt ziaren,
- ◆ współczynnik tarcia pomiędzy ziarnami a powierzchnią płyty stołu,
- ◆ grubość spływającej warstwy wody,
- ◆ lepkość wody,
- ◆ chropowatość płyty stołu,
- ◆ nachylenie płyty stołu.

Zakłady przeróbki mechanicznej kopalni, wchodzące w skład kopalń węgla kamiennego, wytwarzają różnorakie produkty handlowe, tzw. sortymenty (tj. grube, średnie, drobne oraz miały i inne), charakteryzujące się określoną wartością użytkową dla potencjalnego użytkownika. Na skutek produkcji wyżej wymienionych sortymentów powstają pewne ilości najdrobniejszych ziarn węglowych w klasie 1–0 mm, zwane mułami, które charakteryzują się stosunkowo niską wartością opałową, wysoką zawartością popiołu i wilgoci (Grudziński 2005; Blaschke 2011; Hycnar 2003; Borowski i Hycnar 2013). W przeszłości

muły węglowe uznawane były za odpad i lokowano je w tzw. osadnikach mułowych lub też łączono z odpadami popłuczkowymi i kierowano na składowiska; obecnie zauważa się zainteresowanie ze strony koncernów energetycznych pozyskaniem mułów jako paliwa do spalania w paleniskach fluidalnych (Hycnar i Bugajczyk 2004; Hycnar i in. 2005; Hycnar 2006). Muły węglowe powstające na drodze procesów przerobczych posiadają pewien potencjał energetyczny, który należy umiejętnie wykorzystać (Baic i Blaschke 2010; Blaschke i in. 2011). Wydzielenie substancji węglowej poprzez proces wzbogacania stanowi pewien sposób odzysku energii. Problematyka zasobności i potencjału energetycznego dotycząca krajowych mułów węglowych została scharakteryzowana w pracach (Blaschke 2001; Sobko i in. 2011a, Sobko i in. 2011b; Szpyrka i Lutyński 2012, Lutyński i in. 2012; Blaschke i Baic 2012, Blaschke i in. 2012). Wydzielenie substancji węglowej poprzez proces wzbogacania to jedna z metod odzysku energii. W związku z powyższym przeprowadzono badania idące w kierunku poprawy jakości krajowych mułów węglowych, wykorzystując w tym celu stół koncentracyjny i warunkując jego pracę względem wybranych parametrów technologicznych.

1. Charakterystyka materiału przeznaczonego do badań

Podstawowym problemem dla poprawności badania statystycznego w przeróbce surowców mineralnych jest poprawne pobranie próbki, zgodnie z celem i zadaniami prowadzonego badania. Próbka pobierana do badań powinna być losowa i reprezentatywna, tzn. dobrana w taki sposób, aby jedynie przypadek decydował o tym, który element populacji generalnej wchodzi do próbki oraz żeby jej struktura pod względem badanej cechy nie różniła się istotnie od struktury populacji generalnej i stanowiła podstawę do poprawnego wnioskowania (Tumidajski 1993).

Materiał przeznaczony do badań został pobrany poprzez losowanie zależne, co oznacza, że losowanie próbki było bez zwracania każdego wylosowanego elementu populacji generalnej, tak że jeden element populacji może zostać wylosowany do próbki tylko jeden raz.

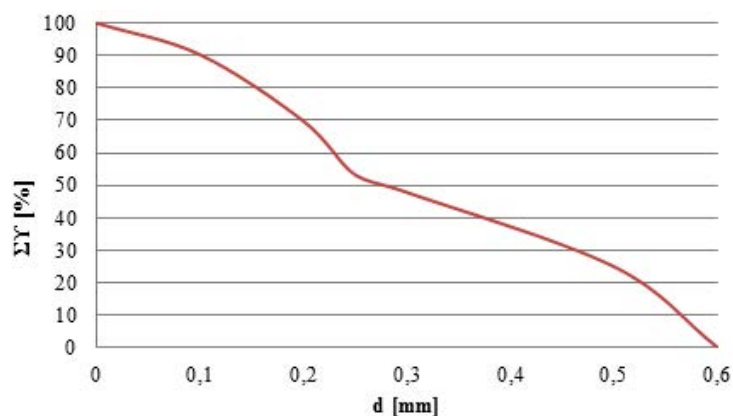
Badaniu poddano muł węglowy pochodzący z osadnika mułowego zlokalizowanego na terenie jednej z kopalni Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, co stanowiło zbiór elementów, które mają przynajmniej jedną właściwość wspólną, kwalifikującą je do jednego zbioru oraz przynajmniej jedną właściwość, ze względu na którą elementy te mogą różnić się między sobą. Materiał surowy przeznaczony do badań poddano suszeniu w temperaturze około 30°C. Wyszuszony materiał charakteryzował się wyraźną czarną barwą. Przygotowaną próbkę materiału poddano analizie sitowej, mającej na celu określenie wychodów poszczególnych klas ziarnowych. Analizę przeprowadzono na sucho, wykorzystując zestaw sit o następujących średnicach: 0,6 mm, 0,5 mm, 0,3 mm, 0,25 mm, 0,2 mm, 0,1 mm. Wyniki analizy sitowej przedstawiono w tabeli 1 i wykreślono na ich podstawie krzywą składu ziarnowego, co pokazano na rysunku 2.

Tabela 1. Zestawienie klas ziarnowych i wychodów badanego materiału

Table 1. Summary of grain with a size and yields of the test material

Klasa ziarnowa d [mm]	Wychód wagowy Y [g]	Wychód procentowy Y [%]	Suma wychodu ΣY [%]
0,6–0,5	151,8	24,95	24,95
0,5–0,3	139,4	22,92	47,87
0,3–0,25	32,6	5,36	53,23
0,25–0,2	100,9	16,59	69,82
0,2–0,1	124,8	20,52	90,33
< 0,1	58,8	9,67	100,00

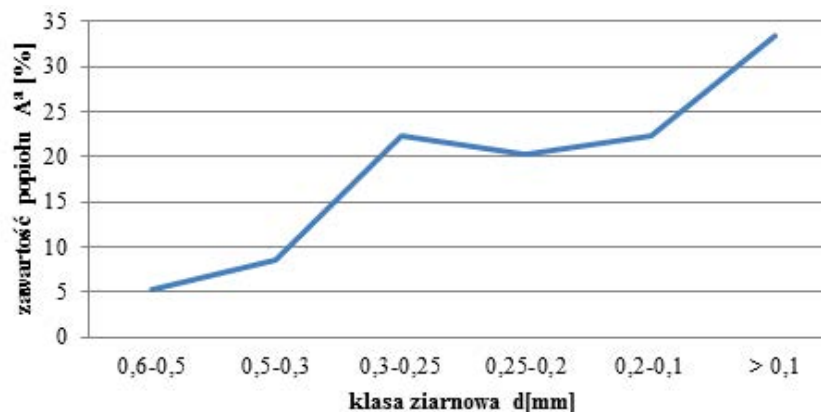
Źródło: opracowanie M. Mazurek



Rys. 2. Krzywa składu ziarnowego analizowanego mułu surowego (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 2. Size distribution curve of the analyzed raw sludge (M. Mazurek elaboration)

Analizując przebieg krzywej składu ziarnowego zauważyć można, że badany muł stanowi klasy ziarnowe o w miarę zbliżonych wychodach rzędu 20 do około 25%, tylko w dwóch przypadkach następuje znaczne odstępstwo od wyżej przedstawionego przedziału: klasa 0,3–0,25 mm stanowi tylko 5,36%, a klasa <0,1 mm stanowi 9,36%. Otrzymane klasy ziarnowe poddano analizie jakościowej w celu określenia zawartości popiołu. Na rysunku 3 przedstawiono zapocielenie badanych klas, z których wyraźnie wynika, że najwyższą zawartość popiołu zawiera klasa <0,1 mm. W pozostałych przypadkach zauważa się znaczną rozbieżność w zawartości popiołu, sięgającą od 5 do około 22%. Można także zauważyć swoistą zależność: zmniejszanie się średnicy ziaren badanego materiału przekłada się na wzrost substancji mineralnej w stosunku do ziaren czystego węgla.



Rys. 3. Zawartość popiołu w badanych klasach ziarnowych (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 3. The ash content in the analyzed grain size (M. Mazurek elaboration)

2. Metodyka badań

Badania zostały przeprowadzone w skali laboratoryjnej na stole koncentracyjnym typu WILFLEY. Literatura branżowa (Błaszke W. i Błaszke S. 2001; Błaszczński i in. 2001; Błaszczński 2002; Stępiński 1964) podaje, że do wzbogacania mułów węglowych zaleca się stosowanie płyty stołu o powierzchni gładkiej, nachylonej pod kątem od 1–2,5°, natomiast w przeprowadzonych badaniach celowo zastosowano płytę rowkowaną oraz ustalono losowo kąt nachylenia płyty na $\beta = 6^\circ$ chcąc zbadać wpływ tych parametrów technologicznych na wyniki rozdziału, a co się z tym wiąże na wartość użytkową otrzymanych produktów wzbogacania. Zagęszczenie materiału kierowanego na stół wynosiło $\rho = 300 \text{ g/dm}^3$, jako zmienny parametr, w odniesieniu do którego prowadzono badania, przyjęto częstotliwość skoków płyty roboczej stołu wynoszącą kolejno: $f = 240 \text{ 1/min}$, $f = 230 \text{ 1/min}$, $f = 220 \text{ 1/min}$, $f = 210 \text{ 1/min}$. Ilość wody dodatkowej podawanej na płytę stołu wynosiła $1,25 \text{ dm}^3/\text{min}$. Pobieranie produktów ze stołu odbywało się po 60 sekundach od otwarcia zaworu podającego materiał; czas ten był potrzebny do utworzenia na stole ustabilizowanego wachlarza różnicującego badany muł pod względem wymiarowym jak i gęstościowym. Produkty wzbogacania odbierano kolejno do ośmiu pojemników. Otrzymane produkty zostały następnie wysuszone w suszarce, po czym poddano je analizie jakościowej na zawartość popiołu i siarki. Należy także wspomnieć, że materiał kierowany na stół koncentracyjny nie został uprzednio poddany procesowi odmulania. Czynność tę pominięto celowo, aby sprawdzić jak podwyższona zawartość ilów wpłynie na proces rozdziału.

3. Wyniki badań

Wyniki badań jakie otrzymano podczas wzbogacania mułu surowego zamieszczono w tabelach 2–5.

Tabela 2. Wyniki badań mułu surowego w klasie <0,6 mm dla częstotliwości skoków płyty roboczej stołu $f = 240$ 1/min

Table 2. Results of research of the raw silt with a size of <0,6 mm for the stroke frequency of table $f = 240$ 1/min

Numer pojemnika	Masa produktu [g]	Wychód procentowy Y [%]	Suma wychodu ΣY [%]	Zawartość popiołu A^a [%]	Zawartość siarki
Produkt 1	40	1,22	1,22	3,06	0,45
Produkt 2	114	3,49	4,71	4,65	0,48
Produkt 3	198	6,06	10,77	6,38	0,45
Produkt 4	559	17,11	27,88	7,91	0,45
Produkt 5	767	23,48	51,36	9,43	0,43
Produkt 6	581	17,78	69,15	9,64	0,41
Produkt 7	580	17,75	86,90	12,00	0,42
Produkt 8	428	13,10	100,00	47,29	0,90

Źródło: opracowanie M. Mazurek.

Tabela 3. Wyniki badań mułu surowego w klasie <0,6 mm dla częstotliwości skoków płyty roboczej stołu $f = 230$ 1/min

Table 3. Results of research of the raw silt with a size of <0,6 mm for the stroke frequency of table $f = 230$ 1/min

Numer pojemnika	Masa produktu [g]	Wychód procentowy Y [%]	Suma wychodu ΣY [%]	Zawartość popiołu A^a [%]	Zawartość siarki
Produkt 1	39	1,42	1,42	4,65	0,50
Produkt 2	221	8,02	9,44	7,23	0,49
Produkt 3	351	12,74	22,18	7,70	0,48
Produkt 4	746	27,08	49,26	8,10	0,45
Produkt 5	622	22,58	71,83	10,41	0,49
Produkt 6	255	9,26	81,09	11,39	0,46
Produkt 7	217	7,88	88,97	12,34	0,47
Produkt 8	304	11,03	100,00	53,04	0,94

Źródło: opracowanie M. Mazurek.

Tabela 4. Wyniki badań mułu surowego w klasie < 0,6 mm dla częstotliwości skoków płyty roboczej stołu $f = 220$ 1/min

Table 4. Results of research of the raw silt with a size of < 0,6 mm for the stroke frequency of table $f = 220$ 1/min

Numer pojemnika	Masa produktu [g]	Wychód procentowy Y [%]	Suma wychodu ΣY [%]	Zawartość popiołu A^a [%]	Zawartość siarki
Produkt 1	23,1	1,08	1,08	6,17	0,49
Produkt 2	116,4	5,44	6,52	7,44	0,48
Produkt 3	181,5	8,48	15,00	8,25	0,47
Produkt 4	455,6	21,29	36,28	8,72	0,45
Produkt 5	427,6	19,98	56,26	10,49	0,44
Produkt 6	242,3	11,32	67,58	11,54	0,46
Produkt 7	323,4	15,11	82,69	14,75	0,47
Produkt 8	370,5	17,31	100,00	54,80	0,91

Źródło: opracowanie M. Mazurek.

Tabela 5. Wyniki badań mułu surowego w klasie < 0,6 mm dla częstotliwości skoków płyty roboczej stołu $f = 210$ 1/min

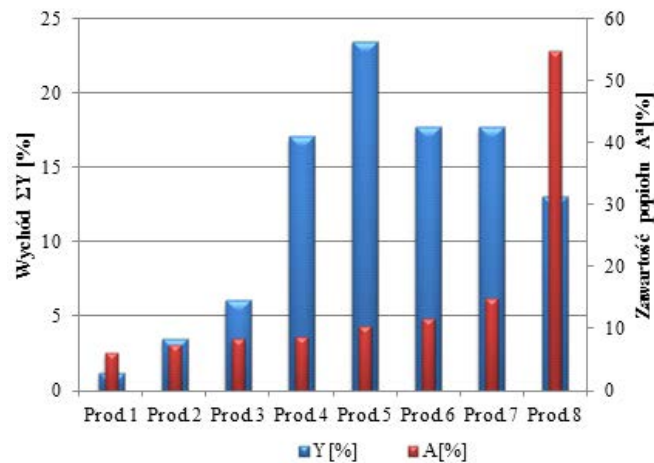
Table 5. Results of research of the raw silt with a size of < 0,6 mm for the stroke frequency of table $f = 210$ 1/min

Numer pojemnika	Masa produktu [g]	Wychód procentowy Y [%]	Suma wychodu ΣY [%]	Zawartość popiołu A^a [%]	Zawartość siarki
Produkt 1	30,5	1,54	1,54	7,23	0,49
Produkt 2	92,9	4,70	6,25	7,97	0,48
Produkt 3	222,8	11,28	17,53	8,38	0,47
Produkt 4	389,6	19,72	37,25	10,43	0,45
Produkt 5	383,0	19,39	56,64	10,88	0,44
Produkt 6	298,0	15,09	71,73	13,23	0,46
Produkt 7	307,8	15,58	87,31	17,67	0,45
Produkt 8	250,6	12,69	100,00	60,82	0,91

Źródło: opracowanie M. Mazurek.

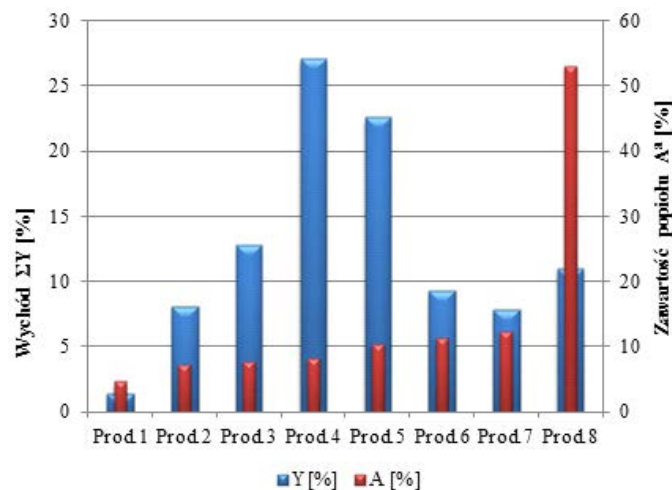
Otrzymane produkty wzbogacania przeanalizowano pod kątem zawartości popiołu i siarki, czyli tzw. parametrów balastowych. Analizy jakościowe przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami PN-80/G-04512/Az1:2002 i PN-G-04584:2001.

Analizując powyższe tabele zauważa się, że najniższa zawartość popiołu występuje dla częstotliwości skoków płyty stołu $f = 240$ 1/min kolejno w produktach 1 i 2 (koncentraty), w miarę zmniejszania częstotliwości skoku płyty pogarsza się jakość otrzymanych produktów wzbogacania, najwyższe zawartości popiołu występują dla wszystkich przepro-



Rys. 4. Wychody i zawartość popiołu badanego materiału dla częstotliwości skoku płyty stołu $f = 240$ 1/min (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 4. The yield and the ash content of the test material for the stroke frequency of table $f = 240$ 1/min (M. Mazurek elaboration)

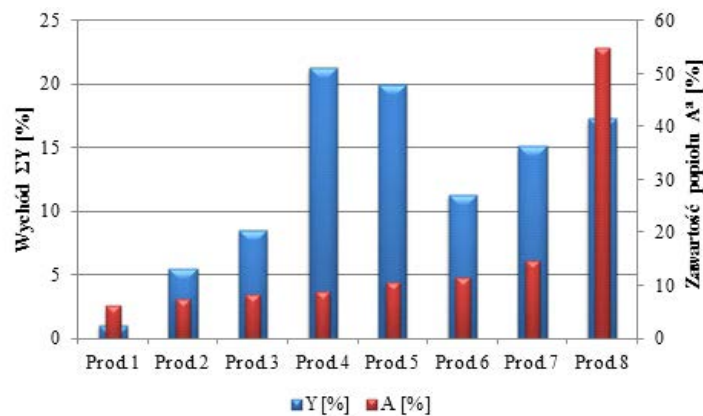


Rys. 5. Wychody i zawartość popiołu badanego materiału dla częstotliwości skoku płyty stołu $f = 230$ 1/min (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 5. The yield and the ash content of the test material for the stroke frequency of table $f = 230$ 1/min (M. Mazurek elaboration)

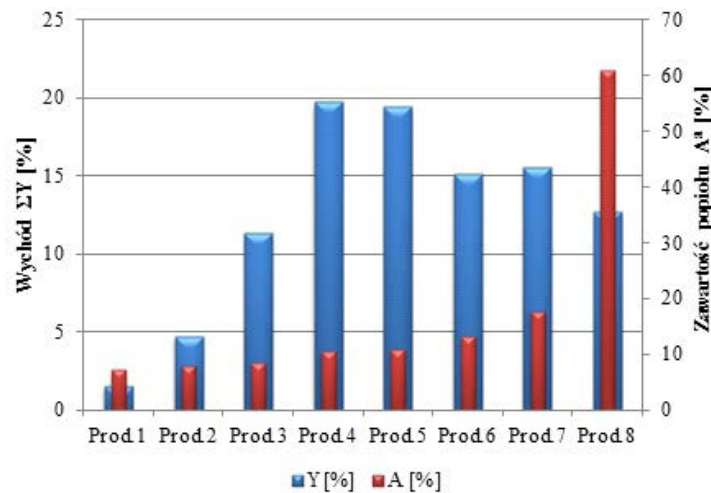
wadzonych prób w produkcie 8 (odpadzie), różnica w ich zawartości dla dwóch skrajnych częstotliwości skoku płyty ($f = 240$ 1/min – $f = 210$ 1/min) wynosi około 13,5%.

Wychody masowe poszczególnych produktów wzbogacania i odpowiadającą im zawartość balastu (popiołu) w odniesieniu do przyjętej częstotliwości skoku płyty stołu przedstawiono kolejno na rysunkach 4–7. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki analizy jakościowej



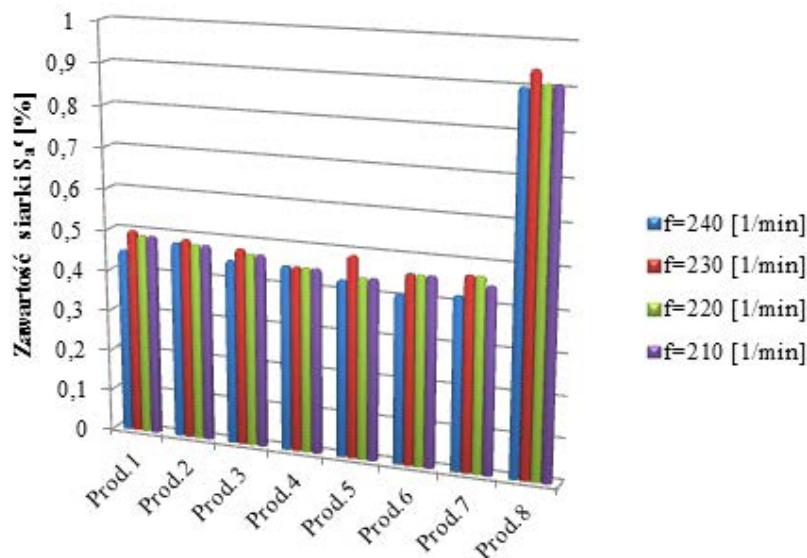
Rys. 6. Wychody i zawartość popiołu badanego materiału dla częstotliwości skoku płyty stołu $f = 220$ 1/min (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 6. The yield and the ash content of the test material for the stroke frequency of table $f = 220$ 1/min (M. Mazurek elaboration)



Rys. 7. Wychody i zawartość popiołu badanego materiału dla częstotliwości skoku płyty stołu $f = 210$ 1/min (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 7. The yield and the ash content of the test material for the stroke frequency of table $f = 210$ 1/min (M. Mazurek elaboration)



Rys. 8. Zawartość siarki w badanym materiale dla różnych częstotliwości skoku stołu (opracowanie R. Jendruś)

Fig. 8. Sulphur content in test material for different stroke frequency of table (R. Jendruś elaboration)

na zawartość siarki dla badanego mułu w zależności od zmian częstotliwości skoku płyty stołu (tab. 2–5). Badania pokazały, że zmiany częstotliwości skoku płyty nie wpływają znacznie na zmiany zawartości siarki w kolejnych produktach wzbogacania. Ponadto zauważa się, że w danym przypadku prowadzono badania na materiale nisko zasiarczonym.

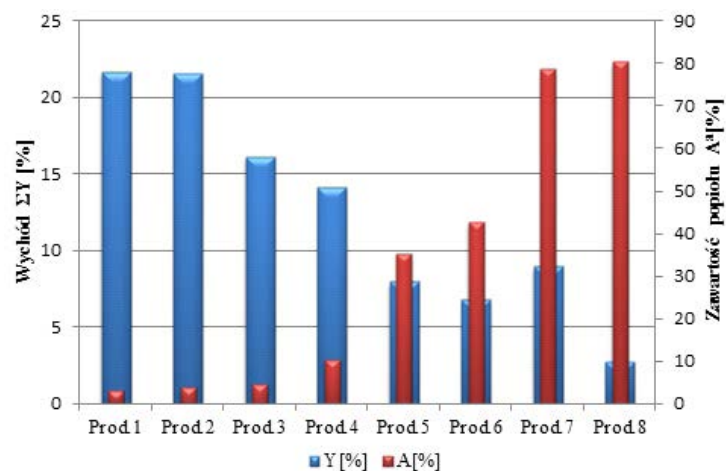
Analizując wychody poszczególnych produktów w kolejnych pojemnikach, zauważa się znikomy wpływ zmniejszania częstotliwości skoku płyty stołu na uzyski masowe kolejnych produktów rozdziału (wychody poszczególnych produktów wzbogacania dla kolejnych prób są zbliżone). Biorąc pod uwagę fakt, iż wychody uzyskanych koncentratów występują w niewielkich ilościach, zawartość popiołu w półprodukcie (produkt 3–7) oscyluje w granicach kilkunastu procent oraz zapopielenie opadów wynosi średnio około 53%. Stwierdza się, że wzbogacanie materiału uprzednio nie odmulonego wpływa negatywnie na proces rozdziału (podwyższona ilość ilów w badanym materiale spowodowała zwiększenie lepkości cieczy jak i jej gęstości, co przyczyniło się do zaburzenia trajektorii ruchu wzbogaczanych ziaren na płycie stołu). Wątpliwa staje się również wielkość kąta nachylenia płyty stołu przyjęta do badań. Uważa się, że skrócony został czas przebywania materiału na stole, a co za tym idzie prawidłowy rozdział pod względem wielkościowym i gęstościowym badanego mułu. Dla przykładu, w tabeli 6 przedstawiono dane uzyskane podczas wzbogacania badanego mułu surowego przy parametrach optymalnych według (Blaschke W. i Blaschke S. 2001), tj.: kąt nachylenia płyty $\beta = 3^\circ$, zagęszczenie materiału $\rho = 400 \text{ g/dm}^3$, częstotliwość skoku płyty $f = 300 \text{ 1/min}$. Obraz graficzny przedstawionych danych tabelarycznych pokazano na rysunku 9.

Tabela 6. Wyniki badań mułu surowego w klasie < 0,6 mm dla parametrów optymalnych

Table 6. Results of research the raw silt with a size of < 0,6 mm for optimal parameter

Numer produktu	Wychód procentowy	Suma wychodu	Zawartość popiołu
	Y [%]		ΣY [%]
Produkt 1	21,69	21,69	3,01
Produkt 2	21,55	43,24	3,95
Produkt 3	16,15	59,39	4,72
Produkt 4	14,12	73,51	10,32
Produkt 5	7,97	81,48	35,38
Produkt 6	6,81	88,29	42,75
Produkt 7	8,94	97,23	78,6
Produkt 8	2,77	100	80,3

Źródło: opracowanie M. Mazurek.



Rys. 9. Wychody i zawartość popiołu badanego materiału dla optymalnych parametrów technologicznych (opracowanie M. Mazurek)

Fig. 9. The yield and the ash content of the test material for optimal technology parameters (M. Mazurek elaboration)

Analizując dane zawarte w tabeli 6 przedstawione w postaci graficznej (rys. 9) stwierdza się, że prowadzenie procesu wzbogacania mułu węglowego przy zastosowaniu optymalnych parametrów technologicznych przekłada się na uzyskanie koncentratów o niskiej

zawartości balastu (popiołu) i wychodach rzędu 20%; w kolejnych produktach rozdziału zauważa się swoistą prawidłowość prowadzenia procesu wzbogacania na stole koncentracyjnym, polegającą na wzroście zawartości popiołu w półproduktach (produkt 5 i 6) i odpadach (produkt 7 i 8) oraz ich stosunkowo niskie wychody. W związku z powyższym zauważa się znaczne różnice w wychodach uzyskanych produktów wzbogacania, jak i charakteryzujących je parametrach jakościowych, w stosunku do wyników badań przedstawionych w tabelach 2–5; fakt ten wyraźnie wskazuje na wpływ wybranych (niezalecanych) parametrów technologicznych na przebieg procesu wzbogacania mułu.

4. Ilościowo-jakościowa weryfikacja procesu wzbogacania mułu węglowego w ujęciu statystycznym

Na podstawie analizy danych zawartych w tabelach 2–5 zauważyć można, że zwiększanie częstotliwości skoków płyty roboczej stołu koncentracyjnego wpływa pozytywnie na proces rozdziału badanego mułu. Rozważania te dotyczą badania kilku zmiennych rozpatrując ewentualną ich zależność. Do tego celu można wykorzystać analizę korelacyjną (Bolszew i Smirnow 1965; Hustrulid i Kuchta 2006). Podobna problematyka przedstawiona została w pracach (Dobosz 2001; Niedoba 2013a, 2013b; Tumidajski 1992). Mając zdefiniowane dwa parametry, takie jak częstotliwość skoków płyty roboczej stołu oraz zawartość popiołów w poszczególnych produktach wzbogacania, można zbadać ich współzależność. Sformułowano zatem hipotezę głoszącą, że brak jest korelacji między tymi zmiennymi, tj. $H_0: \rho = 0$, wobec hipotezy alternatywnej, będącej zaprzeczeniem tego przypuszczenia. Obliczono współczynnik korelacji zgodnie ze wzorem, dla każdego pojemnika (produktu wzbogacania) oddzielnie (Czaplicki 2011; Manowska 2010, 2012):

$$R_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

- ☞ \bar{x} – jest średnią arytmetyczną zmiennej X , oszacowanej na podstawie pobranej próby; zmienna ta określa zawartość popiołu dla poszczególnych pojemników,
 \bar{y} – jest średnią arytmetyczną zmiennej Y , oszacowanej na podstawie pobranej próby; zmienna ta określa częstotliwość skoków płyty roboczej stołu koncentracyjnego.

Wyniki zestawiono w tabeli 7.

Dla sprawdzenia hipotezy można wybrać statystykę t , określoną wzorem (Czaplicki 2011; Manowska 2010, 2012; Barow 1975), która ma rozkład t -Studenta o $n - 2$ stopniach swobody:

$$t = \frac{R_{XY}}{\sqrt{1 - R_{XY}^2}} \sqrt{n - 2}$$

Wyniki obliczeń zawiera tabela 8.

Tabela 7. Obliczenie współczynnika korelacji dla każdego pojemnika

Table 7. Calculation of the correlation coefficient for every container

Częstotliwość skoków płyty roboczej stołu	Produkt wzbogacania						
	produkt 1	produkt 2	produkt 3	produkt 4	produkt 5	produkt 6	produkt 7
240 1/min	3,06	4,65	6,38	7,91	9,43	9,64	12,00
230 1/min	4,65	7,23	7,70	8,10	10,41	11,39	12,34
220 1/min	6,17	7,44	8,25	8,72	10,49	11,54	14,75
210 1/min	7,23	7,97	8,38	10,43	10,88	13,23	17,67
R_{XY}	-0,99611	-0,88627	-0,92562	-0,92167	-0,92716	-0,96053	-0,95591

Źródło: opracowanie A. Manowska.

Tabela 8. Statystyka *t*-Studenta

Table 8. *t*-Student statistic

	Produkt wzbogacania						
	produkt 1	produkt 2	produkt 3	produkt 4	produkt 5	produkt 6	produkt 7
Statystyka <i>t</i> -Studenta	-15,98	-2,71	-3,46	-3,36	-3,50	-4,88	-4,60

Źródło: opracowanie A. Manowska.

Z tablic rozkładu *t*-Studenta dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ i $n - 2$ stopni swobody należy odczytać wartość krytyczną. Jeżeli z porównania obliczonej wartości t z wartością krytyczną t_α otrzyma się nierówność $|t| \geq t_\alpha$, wówczas hipotezę H_0 o braku korelacji między zmiennymi należy odrzucić na korzyść hipotezy alternatywnej. W przeciwnym przypadku brak jest podstaw do odrzucenia sprawdzanego przypuszczenia (Moore i McCabe 1999; Secomski 1970).

Hipoteza alternatywna jest sformułowana jednostronnie, więc obszar krytyczny jest jednostronny. Jest on określony przez zależność:

$$P(t \leq -t_{2\alpha}) = \alpha$$

Jeżeli przyjęto $\alpha = 0,05$, to dla 2 stopni swobody i prawdopodobieństwa $2\alpha = 0,10$ wartość krytyczna odczytana z tablic rozkładu t -Studenta wynosi $t_{0,10;2} = 2,920$. Ponieważ zachodzi $t_{empiryczne1,3,4,\dots,8} < -2,92 = -t_{0,10;2}$ (tzn. wartość statystyki z próby znajduje się w obszarze krytycznym), hipotezę o braku zależności pomiędzy badanymi zmiennymi należy odrzucić na korzyść hipotezy alternatywnej, co oznacza, że na podstawie analizy danych zawartych w tabelach 2–7 zauważyć można, że zwiększanie częstotliwości skoków płyty roboczej stołu koncentracyjnego wpływa pozytywnie na proces rozdziału badanego mułu.

Jednakże dla Produktu 2 hipotezy zerowej nie można odrzucić, gdyż zachodzi $t_{empiryczne2} > -2,92 = -t_{0,10;2}$. Należy zatem określić przyczynę fizyczną takiego stanu; prawdopodobnie wynika to z błędu odbioru Produktu 2 z płyty stołu po procesie rozdziału.

Można również założyć, że wartość współczynnika korelacji dla Produktu 2, po wykluczeniu błędów odbioru, wynosi $-0,92$. Wartość ta jest bliska wartości empirycznej wynoszącej $-0,89$. Przyjęto zatem weryfikowaną hipotezę, $H_1: \rho = -0,92$. Wówczas nie można posługiwać się statystyką t . Należy skorzystać z innej zmiennej określonej jako (Czaplicki 2014):

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+R}{1-R}$$

która ma asymptotyczny rozkład normalny, o wzorze (Czaplicki 2014):

$$N \left[\frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)}; \frac{1}{\sqrt{n-3}} \right]$$

Rozkład zmiennej jest szybkozbieżny, co pozwala na korzystanie z niej przy małych n .

Hipotezę należy odrzucić, jeśli obliczona wartość statystyki Z' przekracza liczbę k_α spełniającą warunek

$$P\{|Z'| \geq k_\alpha\} = \alpha$$

↪ k_α jest kwantylem rzędu α standaryzowanego rozkładu normalnego.

Zakładając, że sprawdzana hipoteza jest prawdziwa, dokonano standaryzacji zmiennej (Czaplicki 2014):

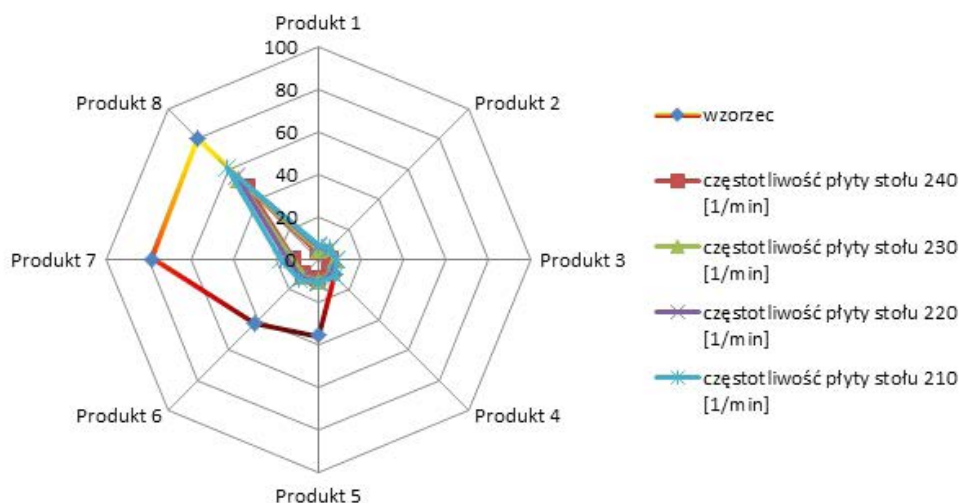
$$Z' = \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{1+R}{1-R} - \frac{1}{2} \ln \frac{1-\rho}{1+\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)}}{\frac{1}{\sqrt{n-3}}}$$

Z obliczeń otrzymano $Z' = 0,42$. Dla $\alpha = 0,05$ k_{α} wynosi 1,96. Ponieważ obliczone Z' nie spełnia warunku $|Z'| \geq 1,96$, więc nie ma powodu do odrzucenia hipotezy głoszącej, iż $\rho = 0,92$. Dla takiej wartości współczynnika korelacji wychodzi również istotność statystyczna w teście t -Studenta.

Kolejnym etapem analizy jest określenie wpływu parametrów technologicznych stołu koncentracyjnego na proces wzbogacania, a co się z tym wiąże – na zmianę wartości użytkowej produktów finalnych. W tym celu określono wzorzec, czyli produkty wzbogacania uzyskane przy zalecanych teoretycznych parametrach technologicznych rozdziału dla ziaren drobnych na stole koncentracyjnym (Błaszczński i in. 2001). Zawartość popiołu w poszczególnych wzorcowych produktach wzbogacania przedstawiono poniżej:

- ◆ produkt 1 – 3,01
- ◆ produkt 2 – 3,95
- ◆ produkt 3 – 4,72
- ◆ produkt 4 – 10,32
- ◆ produkt 5 – 35,38
- ◆ produkt 6 – 42,75
- ◆ produkt 7 – 78,60
- ◆ produkt 8 – 80,30.

Chcąc zobrazować powiązania pomiędzy wzorcem a uzyskanymi produktami wykorzystano miary odległości. W literaturze dotyczącej badań statystycznych jest wiele dostępnych miar odległości pomiędzy obiektami, jak odległość euklidesowa, odległość miejska (Manhattan, City block), odległość Czebyszewa, czy odległość potęgowa (Aczel 2010). W przypadku badań dotyczących obliczenia odległości między obiektami w przestrzeni



Rys. 10. Porównanie otrzymanych produktów z teoretycznym wzorcem (opracowanie A. Manowska)

Fig. 10. Comparison of produced half products with theoretical model (A. Manowska elaboration)

wielowymiarowej najbardziej bezpośrednim sposobem jest obliczenie odległości euklidesowej, zgodnie z zależnością (Aczel 2010):

$$d_m(x, \mu) = \sqrt{(x_1 - \mu_1)^2 + \dots + (x_n - \mu_n)^2}$$

↪ μ_i – wzorzec,

x_i – poszczególne produkty rozdziału mułu dla częstotliwości skoku płyty stołu.

Należy zauważyć, że na odległość euklidesową duży wpływ mają różnice jednostek między wymiarami, na podstawie których te odległości są wyliczane. W przypadku przeprowadzonego badania empirycznego uzyskane wyniki pomiarów są w tych samych jednostkach co zdefiniowany wzorzec. Zatem odległość euklidesową wyliczono opierając się na surowych danych, a nie na podstawie danych standaryzowanych.

Dokonano obliczeń dla wszystkich częstotliwości skoku płyty stołu. Obliczenia wykonano w oprogramowaniu Matlab 7.1, a wyniki zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Odległość euklidesowa wyznaczona dla częstotliwości skoku płyty stołu

Table 8. Euclides distance determined for the stroke frequency of table

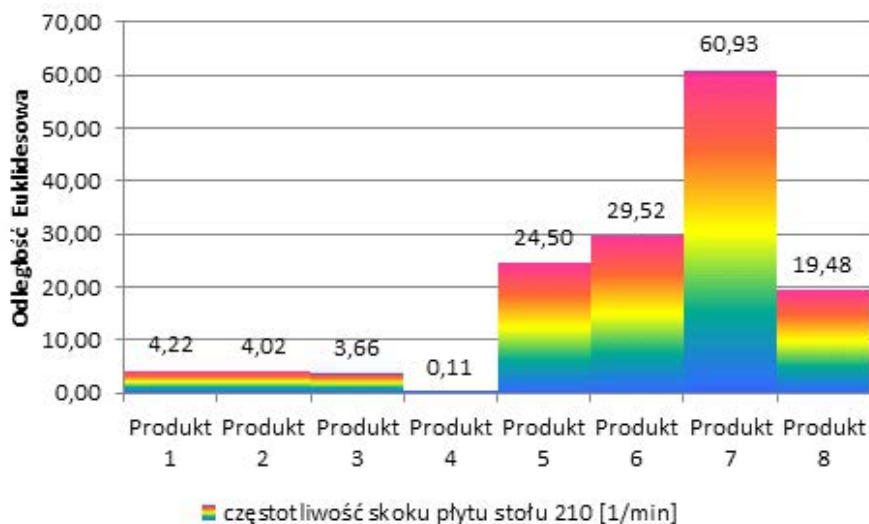
Częstotliwość skoku płyty stołu 1/min	Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3	Produkt 4	Produkt 5	Produkt 6	Produkt 7	Produkt 8
240	0,05	0,70	1,66	2,41	25,95	33,11	66,60	33,01
230	1,64	3,28	2,98	2,22	24,97	31,36	66,26	27,26
220	3,16	3,49	3,53	1,60	24,89	31,21	63,85	25,50
210	4,22	4,02	3,66	0,11	24,50	29,52	60,93	19,48

Źródło: opracowanie A. Manowska.

Odległości pomiędzy obiektami dla poszczególnych częstotliwości skoku płyty stołu została zobrazowana na wykresach (rys. od 11 do 14), które sporządzono dla każdej częstotliwości skoku płyty stołu oddzielnie.

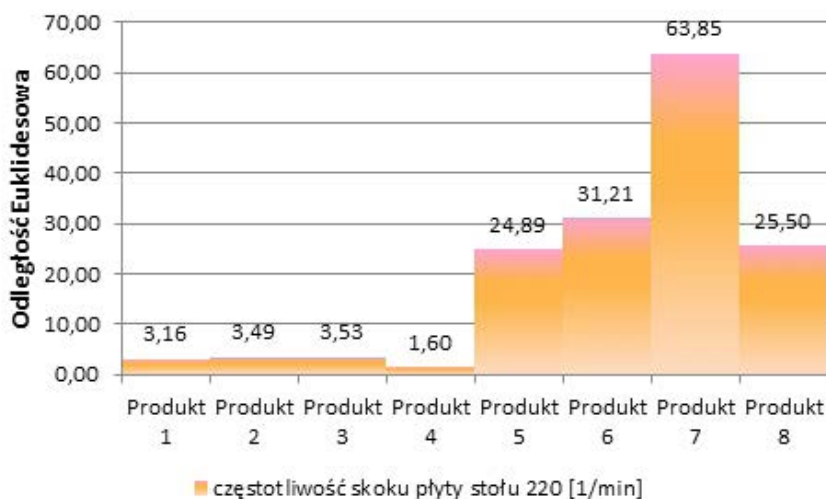
Na podstawie sporządzonych wykresów (rys. 11–14) stwierdza się, że produkty 1–4 można uznać za koncentraty, gdyż są one zbliżone do wzorca (tab. 6), natomiast produkty 5–7 są silnie zanieczyszczone frakcjami ubocznymi (ziarnami kamienia). Zatem z wyżej przedstawionych analiz można odczytać efektywność (dokładność) procesu wzbogacania, czyli stopień zawartości balastu w poszczególnych produktach wzbogacania.

Ilość frakcji ubocznych oraz wielkość odchyień otrzymanych produktów wzbogacania od wzorca wyraża właśnie obliczona odległość euklidesowa. Odległość ta wyraźnie charak-



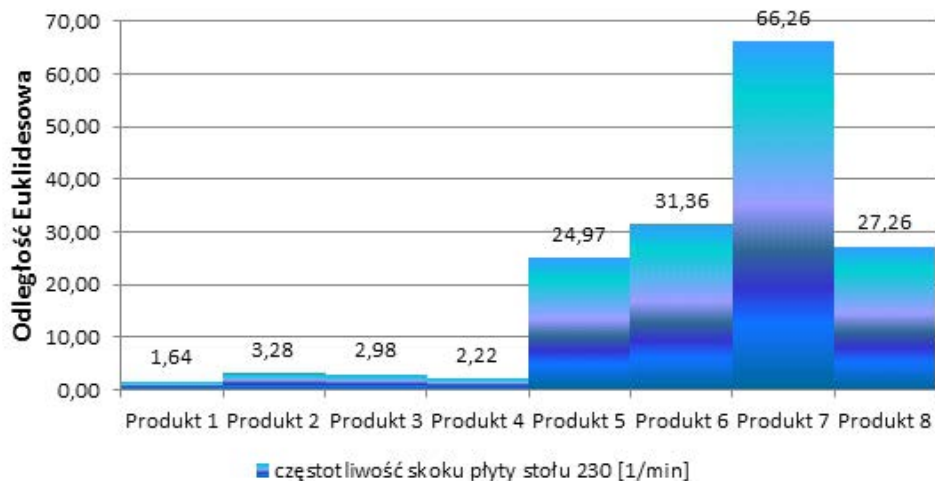
Rys. 11. Wykres odległości produktów od wzorca dla częstotliwości skoku płyty stołu 210 1/min (opracowanie A. Manowska)

Fig. 11. Histogram for the stroke frequency of table 210 1/min (A. Manowska elaboration)



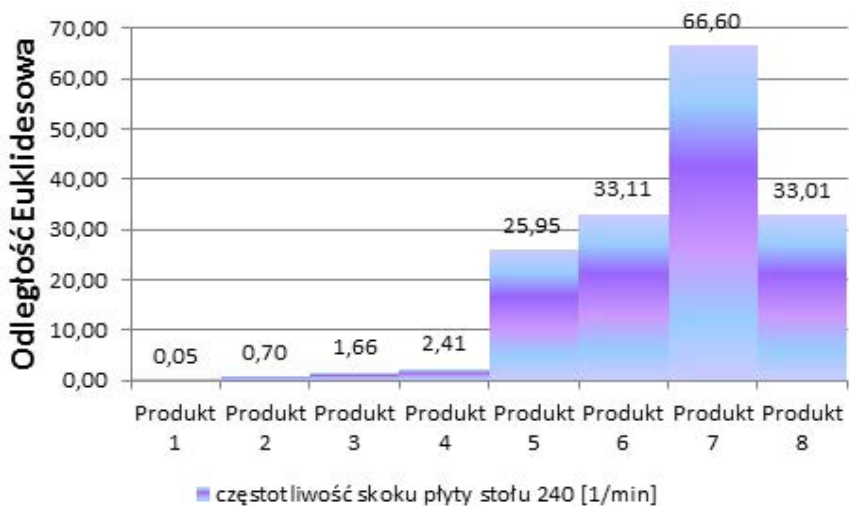
Rys. 12. Wykres odległości produktów od wzorca dla częstotliwości skoku płyty stołu 220 1/min (opracowanie A. Manowska)

Fig. 12. Histogram for the stroke frequency of table 220 1/min (A. Manowska elaboration)



Rys. 13. Wykres odległości produktów od wzorca dla częstotliwości skoku płyty stołu 230 1/min (opracowanie A. Manowska)

Fig. 13. Histogram for the stroke frequency of table 230 1/min (A. Manowska elaboration)



Rys. 14. Wykres odległości produktów od wzorca dla częstotliwości skoku płyty stołu 240 1/min (opracowanie A. Manowska)

Fig. 14. Histogram for the stroke frequency of table 240 1/min (A. Manowska elaboration)

teryzuje stopień dokładności pracy maszyny. Ze sporządzonych wykresów można z kolei określić rozkład prawdopodobieństwa efektywności procesu wzbogacania i określać prawdopodobne rozproszenie lub niedokładność rozdziału.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że obniżanie częstotliwości skoku płyty stołu powoduje pogorszenie jakości produktów wzbogacania badanego mułu węglowego. Podejrza się także, że na wyniki rozdziału wpływały inne czynniki, tj. duży kąt nachylenia płyty stołu oraz brak odmulenia materiału przed skierowaniem do wzbogacania. Dowodem naukowym postawionych hipotez jest analiza zależności oraz analiza odległości euklidesowej produktów od teoretycznego wzorca. Uzyskane wyniki potwierdzają tezy założone w artykule, a otrzymane produkty wzbogacania można przykładowo wykorzystać jako dodatek do tzw. mieszanek energetycznych lub jako jeden z komponentów używanych do produkcji pelletów, czy też brykietów. Należy także pamiętać, że badania przeprowadzono na stole laboratoryjnym o niewielkich rozmiarach, zatem wzbogacanie w skali przemysłowej powinno przynieść znacznie lepsze rezultaty. Można zatem przypuszczać, że zastosowanie materiału odmulonego, jak i ustalenie prawidłowego nachylenia płyty stołu oraz dobór optymalnej częstotliwości skoku płyty stołu, spowoduje uzyskanie lepszych jakościowo produktów. Uzyskane efekty wzbogacania wyznaczają kierunek dalszych badań nad doбором optymalnych czynników wzbogacania mułów surowych na stołach koncentracyjnych.

LITERATURA

- Aczel, A.D. 2010. *Statystyka w zarządzaniu*. Warszawa: Wydawnictwo PWN.
- Baic, I. i Blaschke, W. 2010. Identyfikacja mułów węglowych i strategia rozwoju technologicznego w zakresie ich gospodarczego wykorzystania. Rozdział w monografii *Paliwo – bezpieczeństwo środowisko. Innowacyjne Techniki i Technologie* Instytut Techniki Górniczej KOMAG. Gliwice.
- Blaschke, S. 2001. *Przeróbka mechaniczna kopalni*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.
- Blaschke, W. i Blaschke, S. 2001. *Technika wzbogacania grawitacyjnego. Stoły koncentracyjne*. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Blaschke, W. 2001. Określenie wartości mułów węglowych zdeponowanych w osadnikach ziemnych. *Rocznik Ochrona Środowiska* t. III. s. 23/1–13, Koszalin.
- Baic i in. 2011 – Baic, I., Blaschke, W. i Grudziński, Z. 2011. Wstępne badania nad możliwością przewidywania parametrów jakościowych odpadów powstających w procesach wzbogacania węgla kamiennych. *Rocznik Ochrona Środowiska* t. XIII. Koszalin.
- Blaschke i in. 2012 – Blaschke, W., Baic, I. i Sobko, W. 2012. Inwentaryzacja funkcjonujących i zamkniętych osadników mułów węglowych. *Czasopismo techniczne* 150–153, Kraków.
- Blaschke, W. 2011. Problem głębokości wzbogacania węgla kamiennego energetycznego przed jego użytkowaniem w energetyce. *XXV Konferencja „Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej”*, Zakopane.
- Blaschke, W. i Baic, I. 2012. Problematyka depozytów mułów węglowych w Polsce. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 3, Kraków.

- Błaszczński i in. 2001 – Błaszczński, S., Szpyrka, J. i Świerkot-Kopała, A. 2001. Badania odsiarczania mulów krajowych węgla energetycznych wybranymi metodami grawitacyjnymi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo* z. 250, Gliwice.
- Błaszczński, S. 2002. Wybrane technologie wzbogacania grawitacyjnego materiałów bardzo drobno uziarnionych. *Inżynieria Mineralna*. Zeszyt Specjalny nr 1(7), Kraków.
- Borowski, G. i Hycnar, J.J. 2013. Utilization of Fine Coal Waste as a Fuel Briquettes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. USA.
- Bolszew, L.N. i Smirnow, N.W. 1965. *Таблицы математической статистики*. Наука, Москва 1965.
- Czaplicki, J.M. 2011. *Elementy statystyki matematycznej w inżynierii górniczej i robotach ziemnych*. Wyd. Pol. Śl. Czaplicki, J.M. 2014. *Statistics for Mining Engineering*. CRC Press, London.
- De Korte, G.J. 2010. Coal preparation research in South Africa. *Proceedings of XVI International Coal Preparation Congress*. Lexington.
- Dobosz, M. 2001. Statystyczna analiza wyników badań. Warszawa: Wyd. Exit.
- Grudziński, Z. 2005. Analiza porównawcza jakości mulów węgla kamiennego pochodzących z bieżącej produkcji i zdeponowanych w osadnikach ziemnych. *Rocznik Ochrona Środowiska* t. III. Koszalin.
- Honaker i in. 2010 – Honaker, R.Q. Luttrell, G. i Mohanty, M. 2010. Coal preparation research in the USA. *Proceedings of XVI International Coal Preparation Congress*. Lexington.
- Hustrulid, W. i Kuchta, M. 2006. *Open pit mine. Planning and design*. Vol. 1. *Fundamentals*. Taylor & Francis. London.
- Hycnar J.J. 2003. *Aktualizacja bilansu jakościowego i ilościowego wybranych mulów węglowych*. Ecocoal Haldex, Katowice.
- Hycnar J.J. Bugajczyk M. 2004. Kierunki racjonalnego zagospodarowania drobnoziarnistych odpadów węglowych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 7, z. spec. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Hycnar i in. 2005 – Hycnar, J.J., Foltyn, R., Okulski, T. i Blaschke, S.A. 2005. Kierunki energetycznego wykorzystania drobnoziarnistych odpadów z wydobycia i wzbogacania węgla kamiennego. *VII Konferencja Naukowa „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”*. Politechnika Koszalińska. Koszalin–Ustronie Morskie.
- Hycnar, J.J. 2006. Paleniska fluidalne przykładem racjonalnego rozwiązywania problemu odpadów. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 9, z. spec., Kraków.
- Lutyński i in. 2012 – Lutyński, A. Baic, I. i Lutyński, M. 2012. Potencjał energetyczny zdeponowanych mulów węglowych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 3, Kraków.
- Manowska, A. 2010. *Prognozowanie wielkości sprzedaży węgla kamiennego dla grupy kopalń*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, s. 170–175, Gliwice.
- Manowska, A. 2012. *Planowanie wielkości produkcji na podstawie statystycznej analizy szeregu czasowego wielkości sprzedaży węgla kamiennego na rynku krajowym*. s. 267–282. Bielsko-Biała: Wyd. Akademii Techniczno-Humanistycznej.
- Moore, D.S. i McCabe, G.P. 1999. *Introduction to the Practice of Statistics*. New York: W. H. Freeman
- Niedoba, T. 2013a. Statistical analysis of the relationship between particle size and particle density of raw coal. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 49 (1), s. 175–188.
- Niedoba, T. 2013b. Elementy metodologii stosowania dwu- i wielowymiarowych rozkładów właściwości materiałów uziarnionych do opisu wzbogacania węgla. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 29(2), s. 155–172.
- Poradnik Górnika*. 1976. Tom V. Katowice: Wyd. Śląsk.
- Secomski, K. 1970. *Podstawowe elementy studiów prognostycznych*. Wykład o podstawach prognozowania. PAN, Komitet Badań i Prognoz „Polska 2000”, Warszawa
- Sobko i in. 2011a – Sobko, W., Baic, I. i Blaschke, W. 2011a. Depozyty mulów węglowych – inwentaryzacja i identyfikacja ilościowa. *Rocznik Ochrona Środowiska* t. XIII, s. 1405–1416, Koszalin.
- Sobko i in. 2011b – Sobko W. Baic I. Blaschke W. Lutyński A. Szpyrka J. 2011(b). Inwentaryzacja oraz analiza jakościowa zdeponowanych w środowisku mulów węglowych. *XXV Konferencji z cyklu: Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej. Surowce – Energia – Efektywność*. Zakopane.

- Szpyrka, J. i Lutyński, A. 2012. Badanie wzbogacania depozytów mułów węglowych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 3, Kraków.
- Stępiński, W. 1964. *Wzbogacanie grawitacyjne*. Warszawa: PWN.
- Tumidajski, T. 1992. Wybrane problemy stochastycznej analizy własności materiałów uziarnionych i procesów przeróbki surowców mineralnych. *Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo* t. 159, Kraków.

Polskie normy

- PN-80/G-04512/Az1:2002. Oznaczanie zawartości popiołu w węglu kamiennym.
- PN-G-04584:2001. Oznaczanie zawartości siarki całkowitej w węglu kamiennym.

**LABORATORYJNO–STATYSTYCZNA ANALIZA WPLYWU
WYBRANYCH PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH
STOŁU KONCENTRACYJNEGO NA PROCES WZBOGACANIA MUŁU WĘGLOWEGO**

Słowa kluczowe

wzbogacanie grawitacyjne, stół koncentracyjny, muły węglowe, analiza statystyczna

Streszczenie

Stoły koncentracyjne należą do grupy najstarszych i najdokładniejszych wzbogacalników grawitacyjnych o bardzo szerokim spektrum zastosowania. W krajowym przemyśle węgla kamiennego stosowane były głównie do wzbogacania antracytu. Przeprowadzone badania dowodzą, że można je również wykorzystać do wzbogacania drobno uziarnionych węgli kamiennych. W artykule przedstawiono rezultaty wzbogacania mułów węglowych na stole koncentracyjnym typu WILFLEY; uzyskane wyniki pokazują, że wzbogacanie mułów przy wykorzystaniu stołów koncentracyjnych umożliwia wytworzenie koncentratów i półproduktów węglowych o zadawalających parametrach jakościowych, w których zawartość popiołu waha się w granicach od kilku do kilkunastu procent. Wzajemne powiązanie między składem rzeczywistym a procesem wzbogacania określono na podstawie analizy zależności. Analiza korelacyjna pozwoliła określić istotność statystyczną pomiędzy parametrami technologicznymi procesu wzbogacania a otrzymanymi parametrami jakościowo-ilościowymi produktów, co pozwala prawidłowo prowadzić proces technologiczny wzbogacania wybranej kopaliny. Proces wzbogacania badanego mułu przeprowadzono, przyjmując najbardziej niekorzystne parametry konstrukcyjne, tzn. wykorzystując płytę rowkowaną; kąt nachylenia płyty wynosił 6°, ponadto analizowany materiał nie został odmulony.

**LABORATORY AND STATISTICAL ANALYSIS OF CHOSEN CONCENTRATING TABLE
TECHNOLOGICAL PARAMETERS INFLUENCE ON COAL SLUDGE ENRICHMENT PROCESS**

Key words

gravitational enrichment, concentrating table, coal sludge statistical analysis

Abstract

Concentrating tables are a group of one of the oldest and most precise gravitational concentrators with a broad spectrum of application. They were used mainly for the anthracite enrichment process in the domestic coal industry. Conducted research prove that they can be also used for the enrichment of fine grained coals types. The article discusses the results of coal sludge enrichment using WILFLEY concentration tables, as the results obtained show that coal sludge enrichment using these concentration tables allows for the production of coal concentrates and half-products of satisfying quality parameters, the ash content of which varies between several and a dozen or so percent. The reciprocal connection between the actual contents and enrichment process has been determined based on a dependency analysis between the changing characteristics. The correlation analysis allowed for an evaluation of the dependencies between the technological parameters of the enrichment process and the obtained qualitative-quantitative parameters results, which allows the given mineral enrichment process to perform correctly. The enrichment process of the studied sludge has been performed using the most unfavorable construction parameters i.e. using sulcate plate, its inclination angle remained at 6°, furthermore studied material has not been hyphenated.