

Damian Krawczykowski, Aldona Krawczykowska**

WPŁYW GĘSTOŚCI SUROWCA NA BILANSOWANIE PRODUKTÓW KLASYFIKACJI HYDRAULICZNEJ W HYDROCYKLONACH W OPARCIU O WYNIKI LASEROWYCH ANALIZ UZIARNIENIA**

1. Wstęp

Artykuł jest efektem kontynuacji badań dotyczących przydatności laserowych analiz granulometrycznych do bilansowania produktów klasyfikacji materiałów drobnoziarnistych [1]. Wstępne wyniki badań wykazały, że jest możliwość bilansowania produktów klasyfikacji materiałów drobnoziarnistych w hydrocyklonach pomimo różnej dokładności laserowych analiz granulometrycznych poszczególnych strumieni materiałowych. Ponadto bilans produktów klasyfikacji powinien być oparty o udziały procentowe najdrobniejszych klas ziarnowych, które metodą laserową określane są z dużą dokładnością.

Aktualne badania mają na celu zweryfikowanie wpływu gęstości materiału na wyniki laserowych analiz granulometrycznych, a tym samym na możliwość dokładnego bilansowania produktów klasyfikacji.

Podobnie jak w poprzednich badaniach, dokładność analiz laserowych charakteryzowana była współczynnikiem zmienności w dla udziałów poszczególnych klas ziarnowych w produktach, natomiast powtarzalność wyników pomiarów nie była analizowana z uwagi na określoną przez producenta urządzenia precyzję pomiaru na poziomie $< 1,5\%$ [4].

2. Doświadczenia i analizy

Do badań wykorzystano surowce różniące się gęstością: węgiel o średniej gęstości — $1,45 \text{ g/cm}^3$, porfir — $2,78 \text{ g/cm}^3$, baryt — $4,45 \text{ g/cm}^3$ o zbliżonych składach ziarnowych

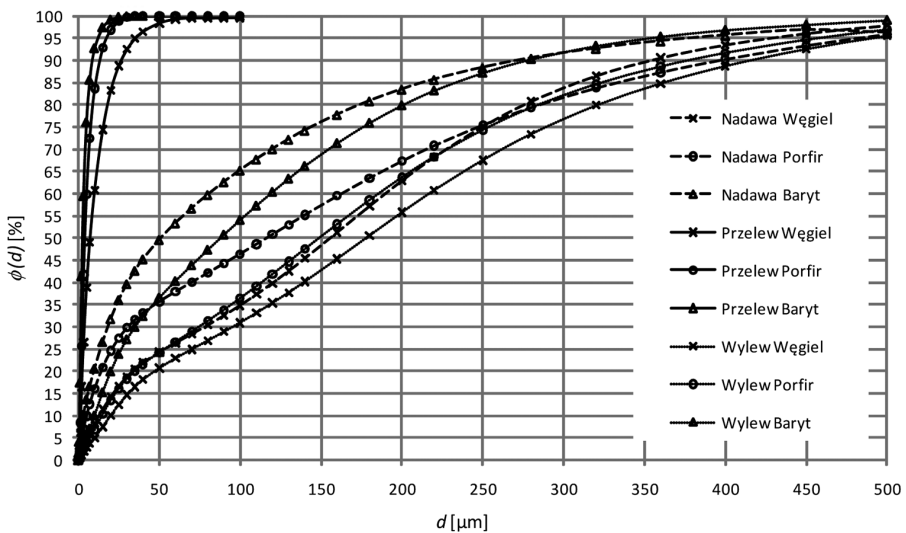
* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Publikację przygotowano w ramach pracy statutowej 11.11.100.276

(0+600 μm). Zawiesiny powyższych surowców poddano serii klasyfikacji w hydrocyklonie laboratoryjnym o średnicy części cylindrycznej 30 mm (artykuł nie dotyczył badania warunków klasyfikacji).

Dla każdego z surowców wykonano po dwa doświadczenia (1, 2) różniące się warunkami klasyfikacji. Dla każdego doświadczenia, z nadaw oraz produktów klasyfikacji (wylewów i przelewów) pobierano po 3 reprezentatywne próbki do analiz granulometrycznych. Łącznie więc wykonano 54 laserowe analizy granulometryczne.

Na rysunku 1 podano uśredniony skład ziarnowy badanych produktów.



Rys. 1. Średnie uziarnienie badanych produktów

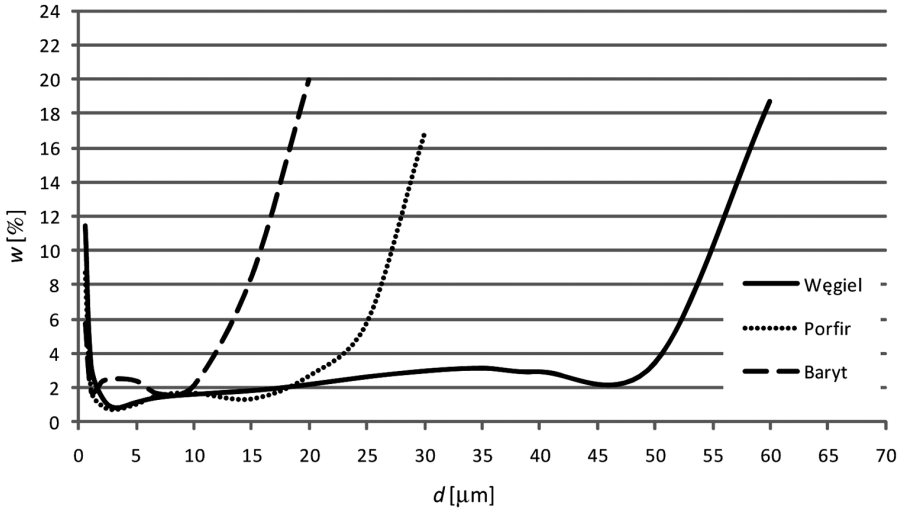
3. Analiza wyników badań

3.1. Analiza współczynników zmienności

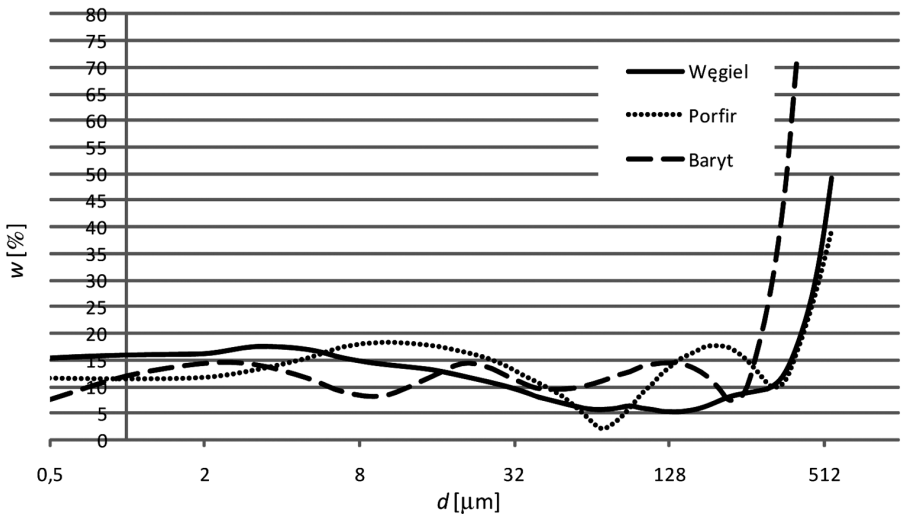
W celu wykazania wpływu gęstości materiałów na dokładność laserowych analiz granulometrycznych, obliczono podstawowe parametry statystyczne: odchylenia standardowe s oraz współczynniki zmienności v dla udziałów klas ziarnowych w poszczególnych produktach. Przykładowo na rysunkach 2–4 pokazano uśrednione wartości współczynników zmienności dla nadaw, wylewów i przelewów poszczególnych surowców.

Analiza powyższych wykresów (rys. 2–4) potwierdza wcześniejszą interpretację wyników opublikowanych w artykule [1]. Wskazuje, że dokładność analiz mierzona współczynnikiem zmienności różni się dla poszczególnych klas ziarnowych w produktach klasyfikacji. Ponownie najwyższymi wartościami współczynników zmienności charakteryzowały się nadawy i wylewy, a najniższymi przelewy. Zakres uziarnienia przelewów w stosunku do

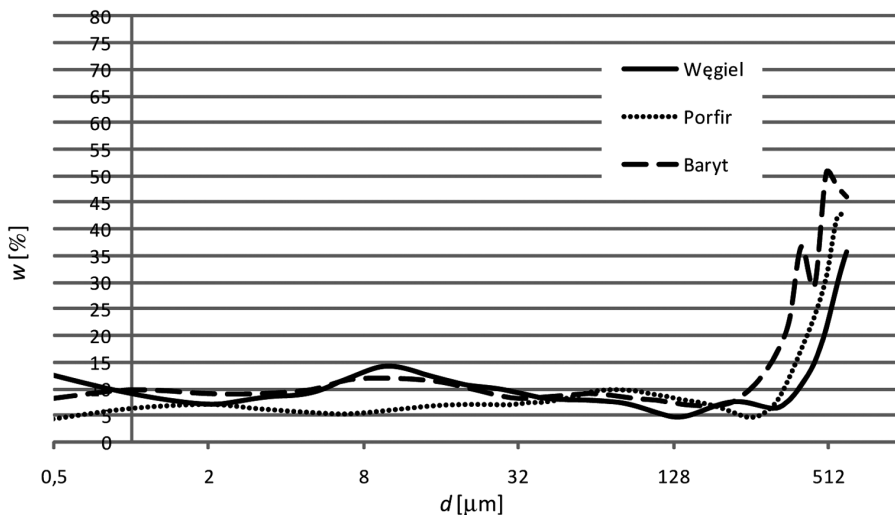
nadaw i wylewów był dużo węższy, dlatego też dokładność analiz granulometrycznych przelewów okazała się najwyższa. Ma to bezpośredni związek z metodą pomiarową (dyfrakcja światła) wykorzystywaną w analizie laserowej. Powstające podczas analizy dyfraktogramy pochodzące od mierzonych ziaren wzajemnie się zakłócają (nakładają się), utrudniając analizę. Problem ten omawiany był we wcześniejszym artykule autora [1].



Rys. 2. Rozkład średnich wartości współczynników zmienności udziałów poszczególnych klas ziarnowych w analizowanych przelewach



Rys. 3. Rozkład średnich wartości współczynników zmienności udziałów poszczególnych klas ziarnowych w analizowanych nadawach



Rys. 4. Rozkład uśrednionych wartości współczynników zmienności udziałów poszczególnych klas ziarnowych w analizowanych wylewach

Również nie bez znaczenia, na niższą wartość współczynników zmienności w klasach ziarnowych przelewów, jest wpływ reprezentatywności próbek do analiz pod względem uziarnienia. Trudniejszym zadaniem jest reprezentatywne pobranie próbek charakteryzujących się szerokim zakresem wielkości ziaren (np. nadaw) lub próbek z przewagą ziaren grubych, które łatwo ulegają segregacji (np. wylewów), aniżeli próbek drobnoziarnistych o stosunkowo wąskim zakresie uziarnienia (np. przelewów).

We wszystkich przypadkach współczynniki zmienności dla klas ziarnowych z zakresu ziaren skrajnie grubych ($> d_{90}$) osiągają wysokie wartości, co w oczywisty sposób wynika z przypadkowości pomiaru nielicznej populacji ziaren skrajnych, który to pomiar obarczony jest dużymi błędami. Ta interpretacja dotyczy również pomiaru ziaren skrajnie drobnych w przelewach. Odnosząc się natomiast do zaobserwowanych w nadawach i wylewach niższych w stosunku do przelewów wartości współczynników zmienności dla klas skrajnie drobnych ($0 \div 1 \mu\text{m}$) należy stwierdzić, że z powodu mniejszej populacji ziaren tej klasy w nadawach i wylewach oraz granicznego zakresu pomiarowego urządzenia dla tych ziaren, analiza laserowa w takim zakresie uziarnienia charakteryzowała się ograniczoną czułością pomiaru [3, 4].

Analizując natomiast wpływ gęstości surowca na dokładności granulometrycznych analiz laserowych, nie zaobserwowano istotnych różnic w wartościach współczynników zmienności, jedynie dla próbek barytu współczynniki w klasach wykazywały nieznacznie większą zmienność.

3.2. Obliczenia bilansujące

Bilans produktów klasyfikacji w hydrocyklonach oparty został na powszechnie wykorzystywanym w procesach klasyfikacji ziarnowej prawie zachowania masy, wyrażonym układem równań bilansowych:

$$\begin{cases} \gamma_P + \gamma_W = 1 \\ \gamma_P \cdot a_{Pi} + \gamma_W \cdot a_{Wi} = 100 \cdot a_{Ni} \end{cases} \Rightarrow \gamma_P = \frac{100(a_{Ni} - a_{Wi})}{(a_{Pi} - a_{Wi})}$$

gdzie:

γ_P, γ_W — wychody procentowe odpowiednio: przelewu i wylewu;
 a_{Pi}, a_{Wi}, a_{Ni} — procentowe udziały i -tych klas ziarnowych odpowiednio w: przelewie, wylewie, nadawie.

Poniżej w tabeli 1 podano wyniki obliczeń bilansowych w klasach ziarnowych, natomiast wyniki obliczeń bilansowych dla produktów klasyfikacji poszczególnych surowców w postaci wychodów przelewów (γ_P) obliczono na podstawie wybranych najdrobniejszych klas ziarnowych (wartości zaznaczone pogrubioną czcionką).

Uśrednione wyniki wychodów produktów dla poszczególnych doświadczeń porównano z wychodami określonymi eksperymentalnie na podstawie mas próbek wylewów i przelewów. Wyniki wychodów wraz z odchyleniami standardowymi oraz błędami przedstawiono w tabeli 2.

Wyniki obliczeń bilansowych przedstawione w tabelach 1 i 2 potwierdzają możliwość względnie dokładnego określenia wychodów produktów klasyfikacji w hydrocyklonach. Bilans ten musi być jednak oparty o udziały procentowe klas ziarnowych w zakresie uziarnienia przelewów ($d_{5\%} \div d_{80\%}$), które metodą laserową określane są z dużą dokładnością. Jak wynika z analizy wychodów przelewów obliczonych dla poszczególnych klas ziarnowych (tab. 1), są to udziały ziaren od 1 do około 10 μm . W tym zakresie uziarnienia wychody przelewów γ_P dla poszczególnych surowców, obliczone na podstawie powyższego wzoru bilansowego, wykazują stabilne wartości (tab. 1).

Nie zaobserwowano istotnego wpływu gęstości surowca na dokładność bilansowania produktów klasyfikacji, jedynie wychód przelewu obliczony dla węgla w pierwszym doświadczeniu obarczony jest zdecydowanie większym błędem (12,7%). Pozostałe błędy bilansowania wychodów są na zadowalającym poziomie 3,6–7,9%. Przyczyną błędów mogą być różnice w kształtach ziaren poszczególnych surowców, które mogą wpływać na wyniki granulometrycznych analiz laserowych, a także sposób wyznaczania wychodów na bazie danych empirycznych. Wychody obliczane były na podstawie mas próbek produktów klasyfikacji. Wyznaczenie wychodów objętościowych (na podstawie objętości próbek) mogłoby wpłynąć na zmniejszenie błędów bilansowania, gdyż byłyby bardziej skorelowane z zastosowaną metodą pomiarową uziarnienia (dyfrakcja światła).

TABELA 1

Wychody przelewów obliczone na podstawie wyników analiz granulometrycznych dla poszczególnych surowców w obu doświadczeniach (1, 2)

d, [μm]	Węgiel		Porfir		Baryt	
	1	2	1	2	1	2
	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]
0,5	9,2	2,2	19,9	10,6	19,1	11,4
1	9,3	2,4	15,1	7,2	16,1	7,9
2	9,9	2,6	14,5	6,8	15,2	7,2
3,15	10,2	2,8	14,5	7,5	15,1	7,5
5	9,9	2,7	15,2	8,1	16,3	8,4
7	9,5	2,4	17,1	8,6	19,2	10,1
10	9,6	2,0	20,5	9,0	27,0	16,9
15	9,9	0,1	28,7	8,1	111,6	-3,7
20	9,0	-5,8	54,5	16,6	-46,4	0,6
25	6,7	-17,7	-480,5	6,3	-24,4	0,3
30	3,4	-43,6	-32,6	4,5	-20,2	-0,3
35	-4,2	-181,5	-11,6	3,3	-18,0	-1,0
40	-36,2	97,9	-6,6	2,6	-14,3	-1,5
50	31,5	29,0	-0,9	3,8	-8,8	-1,2
60	10,0	7,4	5,4	6,5	-0,3	1,2
70	2,5	0,3	9,8	9,2	8,0	5,2
80	-3,2	-5,0	12,8	11,7	14,5	8,8
90	-7,4	-8,1	15,3	13,7	19,5	12,2
100	-11,6	-10,8	18,0	15,9	24,1	15,5
110	-14,2	-12,7	19,8	17,3	27,2	18,1
120	-17,1	-13,9	21,6	18,7	29,8	20,3
130	-15,8	-14,8	23,2	20,0	32,2	22,2
140	-15,7	-15,0	24,6	21,0	33,6	23,4
160	-14,6	-14,2	26,4	21,9	36,1	25,5
180	-12,2	-12,8	27,8	22,3	37,9	26,6

TABELA 1 cd.

200	-8,9	-10,7	28,8	21,9	39,0	26,9
220	-4,9	-7,9	29,0	20,7	39,7	26,6
250	0,9	-4,1	28,6	17,9	39,6	24,4
280	7,1	0,0	27,3	13,7	38,8	20,8
320	15,2	5,3	24,9	6,8	36,7	13,8
360	24,5	11,5	21,3	-3,3	33,3	1,7
400	32,4	16,7	17,4	-14,5	31,9	-15,8
450	40,2	22,4	12,8	-28,2	31,6	-1,4
500	47,6	28,0	7,7	-45,0	-13,5	-114,8
550	54,2	31,8	5,3	-66,2	-110,1	-141,8
600	64,9	50,0	3,4	-48,1	-184,3	-783,3

TABELA 2

Uśrednione wartości wychodów przelewów obliczone na podstawie udziału klas ziarnowych (bilans) oraz wyznaczone empirycznie

Statystyki	Węgiel		Porfir		Baryt	
	1	2	1	2	1	2
	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]	γ_p , [%]
Średnia z bilansu	9,7	2,5	15,3	7,9	16,4	7,7
Odchylenie standardowe	0,4	0,3	1,1	0,8	0,6	0,5
Średnia z eksperymentu	22,4	9,3	11,7	5,1	8,5	4,0
Odchylenie standardowe	0,5	0,6	0,8	0,7	0,9	1,1
Błąd bezwzględny	12,7	6,8	3,6	2,8	7,9	3,7

4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że:

- nie zaobserwowano istotnego wpływu gęstości materiału na dokładność analiz granulometrycznych wykonywanych metodą laserową;
- potwierdzono możliwość bilansowania produktów klasyfikacji w hydrocyklonach materiałów drobnoziarnistych w oparciu o wyniki laserowych analiz uziarnienia;

- bilans produktów powinien być oparty o udziały procentowe najdrobniejszych klas ziarnowych, które metodą laserową określane są z dużą dokładnością;
- dokładność laserowych analiz granulometrycznych poszczególnych strumieni materiałowych, wyrażona współczynnikiem zmienności udziałów klas ziarnowych, jest różna. Najdokładniej analizowane są przelewy, natomiast najmniejszą dokładnością pomiaru charakteryzują się nadawy. Różnice wynikają głównie z zastosowanej metody pomiarowej określania składu ziarnowego oraz z odmiennego rozkładu wielkości ziaren w klasyfikowanych strumieniach materiałowych;

Dokładność bilansowania produktów nie jest jednak stabilna, błędy wahają się od 2,8% do 12,7% i nie są skorelowane z gęstością surowców. Należy więc szukać przyczyn takiego stanu w innych czynnikach zakłócających. Dalsze prace powinny więc być ukierunkowane na badania dotyczące wpływu kształtu ziaren na dokładność granulometrycznych analiz laserowych.

Istotny wpływ na dokładność bilansowania może mieć również sposób szacowania wychodów oparty na danych empirycznych. Wychody powinny mieć charakter objętościowy, który jest tożsamy z objętościowymi udziałami klas ziarnowych określanymi w analizie laserowej.

LITERATURA

- [1] *Krawczykowski D., Trybalski K.*: Przydatność laserowych analiz uziarnienia do bilansowania produktów klasyfikacji w hydrocyklonie. UWN-D. AGH Górnictwo i Geoinżynieria, z 4, s.153–168, 2009
- [2] *Peszko B., Szymańska-Czaja M., Foszcz D.*: The dependence of the size distribution on the granulometric method of analysis. 5th Conference on Environment and mineral processing, s. 837–845, Ostrava, 2000
- [3] *Kordek J.*: Współczesne podejście do pomiarów granulometrycznych ziarn skrajnie drobnych. Technika i technologia w procesach wzbogacania surowców mineralnych i odpadowych, XXVI Krakowska Konferencja Naukowo-Techniczna Przeróbki Kopalni — Ustroń 1994, Oficyna Wydawnicza Jaxa, Kraków, 1994
- [4] Instrukcja obsługi laserowego miernika cząstek „Analysette 22”, materiały firmy Silesia Projekt, Katowice, 1994