

Daniel Zbroński, Aleksandra Górecka-Zbrońska**

WPŁYW PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ WIRNIKA KLASYFIKATORA PRZEPLÝWOWEGO NA OSIĄGI MŁYNA STRUMIENIOWO-FLUIDYZACYJNEGO

1. Wprowadzenie

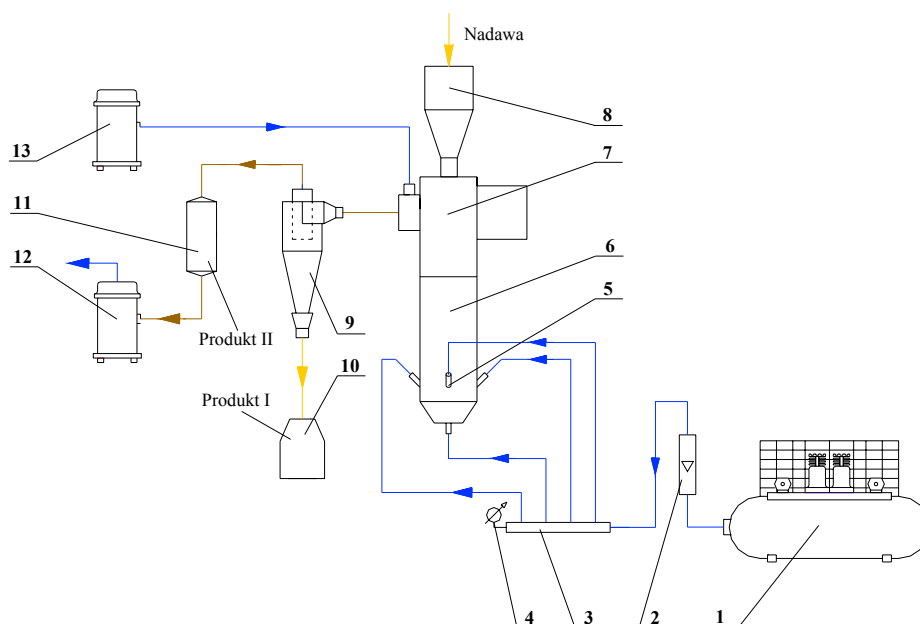
Obserwowany w ostatnich latach wzrost zainteresowania nowoczesnymi technologiami mechanicznej przeróbki materiałów wynika z konieczności zapewnienia ekologicznie bezpiecznego przetwarzania: substancji pochodzenia mineralnego, organicznego, przemysłowych materiałów technologicznych oraz materiałów i surowców odpadowych [5, 8, 11]. Stosowane obecnie technologie nie zawsze umożliwiają uzyskanieżądanego efektu końcowego. Dlatego też podejmowane w tym względzie działania zmiierzają głównie do poszukiwania takich warunków pracy przemysłowych urządzeń rozdrabniających, które z jednej strony zapewnią gwarantowane parametry i czystość uziarnienia otrzymanych produktów mielenia, a z drugiej strony umożliwią zmniejszenie energochłonności procesu i poprawę wymagań dotyczących ochrony środowiska naturalnego [6]. W ostatnich latach duże nadzieje wiąże się z badaniami procesu rozdrabniania materiałów ziarnistych w warunkach wysokoenergetycznej warstwy fluidalnej. Proces ten polega na wytworzeniu ogniska zderzeń przeciwstrumieni powietrznych w nieruchomej warstwie, inicjującego powstanie i utrzymanie stanu fluidyzacji burzliwej w komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. W dolnej strefie warstwy fluidalnej występuje stan fluidyzacji pulsacyjnej, w górnej zaś — stan fluidyzacji fontannowej. W strefie fluidyzacji pulsacyjnej powstają obszary pęcherzy gazowych i aglomeratów ziarnowych, które intensyfikują mieszanie i rozdrabnianie ziaren. Natomiast w strefie fluidyzacji fontannowej obserwuje się unoszenie ziaren w obszarze dużych prędkości w rdzeniu komory, a następnie grawitacyjne opadanie grubszych ziaren w strefie małych prędkości w pobliżu ścian, bądź trwałe porywanie drobnych ziaren do układu separacji zewnętrznej przez strumień przepływającego powietrza. Taki rozkład stref fluidyzacji zapewnia powstanie wysokoenergetycznej warstwy fluidalnej, która gwarantuje efektywne rozdrabnianie badanego materiału ziarnistego [15–17].

* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa

Młyny strumieniowo-fluidyzacyjne stosowane są w wielu gałęziach przemysłu od ponad 15 lat (przemysł farmaceutyczny, chemiczny, spożywczy, przeróbki minerałów itp.). Produkowane są one przez firmy, takie jak: Netzsch, Hosokawa-Alpine i Kurimoto. W odniesieniu do innych typów młynów strumieniowych urządzenia te wykazują następujące korzyści: wysoki stopień rozdrobnienia, małe zużycie energii, niska emisja szumu, niskie zużycie materiałów i niewielkie gabaryty urządzenia [13]. Jednakże projektowanie i przewidywanie osiągnięć tego typu urządzeń w dużej mierze oparte jest na złożonych badaniach eksperymentalnych, które prowadzone są między innymi: w Niemczech [1, 11, 13], we Francji [2, 3], w Wielkiej Brytanii [12], w USA [4], w Japonii [14], w Chinach [18] i w Polsce [6, 7, 10, 15–17]. Głównym celem badań jest ustalenie wpływu istotnych parametrów na uzyskany produkt mielenia oraz optymalizację procesu rozdrabniania i klasyfikacji.

2. Stanowisko badawcze

Eksperymentalny charakter badań wymagał przygotowania stanowiska badawczego oraz opracowania odpowiedniej metodyki pomiarów [15]. Próby rozdrabniania przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 — sprężarka tłokowa, 2 — rotametr, 3 — kolektor powietrza roboczego, 4 — manometr sprężysty, 5 — dysze powietrzne, 6 — komora mielenia, 7 — przepływowy klasyfikator wirnikowy, 8 — zbiornik zasypowy nadawy, 9 — cyklon, 10 — zbiornik produktu mielenia I, 11 — filtr tkaninowy (produkt mielenia II), 12 — urządzenie wyciągowe, 13 — dodatkowe urządzenie tłoczące

Podstawowym elementem stanowiska jest laboratoryjny młyn strumieniowo-fluidyzacyjny służący do drobnego rozdrabniania materiałów ziarnistych. Strumienie powietrza zasilające stanowisko badawcze generowane są jako: powietrze robocze — przez sprężarkę tłokową 1 oraz powietrze uszczelniające — przez dodatkowe urządzenie tłoczące 13. Nadawa materiału ziarnistego o ustalonej granulacji podawana jest grawitacyjnie ze zbiornika zasywowego 8 do cylindrycznej komory mielenia młyna 6. W komorze ulega ona intensywnej fluidyzacji za pośrednictwem zespołu dysz powietrznych 5 koncentrycznie wdmuchujących strumienie powietrza. Pomiar strumienia objętości powietrza roboczego umożliwia rotometr 2, zaś pomiar nadciśnienia — manometr sprężysty 4. Symetryczna konstrukcja kolektora powietrznego 3 zapewnia jednakowy rozdział powietrza na poszczególne dysze. Klasyfikator przepływowy 7 dzięki możliwości automatycznej regulacji prędkości obrotowej wirnika zapewnia wstępny rozdział produktu na klasę drobną (unoszoną do cyklonu) oraz klasę grubą (nawracaną do komory mielenia) na poziomie żądanego ziarna granicznego. W cyklonie 9 następuje rozdział dwufazowej mieszaniny, wypływającej z klasyfikatora na strumień produktu mielenia I, kierowany do zbiornika odbiorczego 10 oraz strumień zapyłonego powietrza roboczego, kierowany do filtra tkaninowego 11 (produkt mielenia II). Produkty mielenia I i II stanowią całkowity produkt mielenia strumieniowo-fluidalnego. Podciśnienie w układzie zapewnia urządzenie wyciągowe 12.

3. Cel, zakres i metodyka badań

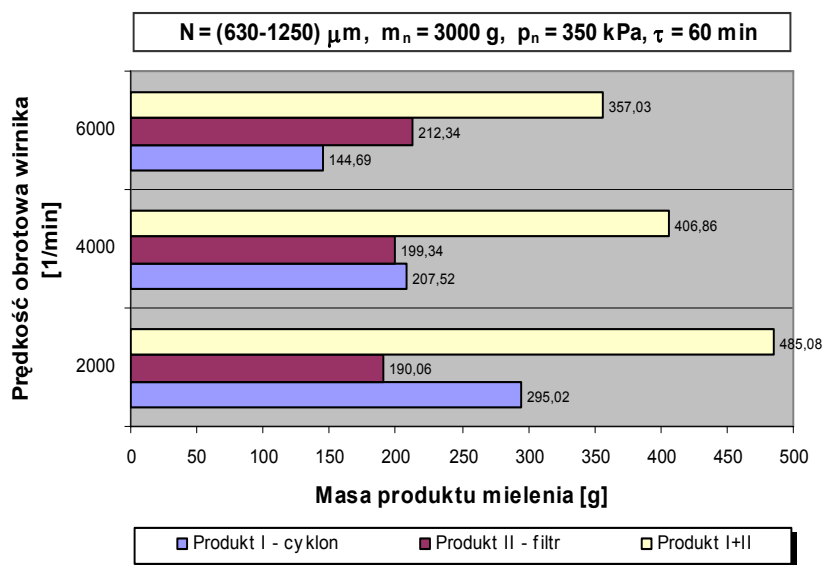
Celem podjętych badań było ustalenie wpływu wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego na uzyskaną wydajność młyna i uziarnienie produktu mielenia. Przyjęta metodyka badań eksperymentalnych obejmowała: właściwy dobór i przygotowanie materiału ziarnistego, ustalenie zakresu i sposobu realizacji prób rozdrabniania oraz wyznaczenie średnich składów ziarnowych nadawy i produktów mielenia. Do badań użyto kamienia wapiennego pochodzącego z Kopalni Wapienia „Czatkowice” w Krzeszowicach, charakteryzującego się dużą podatnością na rozdrabnianie i szerokim zastosowaniem w przemyśle. W celu uzyskania nadawy o uziarnieniu $630\div 1250\ \mu\text{m}$ (oznaczonej symbolem N) kamień wapienny przesiano za pomocą zestawu znormalizowanych sit wykorzystując wstrząsarkę mechaniczną firmy Retsch. Podczas badań poszczególne próbki nadawy o masie $m_n = 3000\ \text{g}$ poddawano okresowemu procesowi rozdrabniania na stanowisku młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Badania przeprowadzono dla wstępnie dobranych parametrów: optymalna konfiguracja dysz powietrznych (3 dysze pochylone pod kątem 30° do poziomu, równomiernie rozmieszczone na obwodzie komory mielenia i 1 dysza umieszczona pionowo od dołu) [10], strumień objętości powietrza roboczego $V = 80\ \text{m}^3/\text{h}$, nadciśnienie powietrza roboczego $p_n = 350\ \text{kPa}$, prędkości obrotowe wirnika klasyfikatora przepływowego: $n = 2000\ \text{1/min}$, $4000\ \text{1/min}$ i $6000\ \text{1/min}$ oraz okresy rozdrabniania $\tau_1 = 0\div 30\ \text{min}$ i $\tau_2 = 30\div 60\ \text{min}$. Ponadto, zmierzono także parametry otoczenia: ciśnienie $p_{or} = 995\ \text{hPa}$, temperaturę $t_{or} = 25^\circ\text{C}$ i wilgotność powietrza $\varphi_{or} = 55\%$. Przebieg poszczególnych prób rozdrabniania był następujący. Porcję nadawy N o znanej masie początkowej m_n wsypywano

do komory mielenia młyna, uruchamiano klasyfikator wirnikowy do żądanej wartości prędkości obrotowej n i sprężarkę tłokową do ustalonej wartości nadciśnienia powietrza roboczego p_n . Na końcu włączano urządzenie wyciągowe i dodatkowe urządzenie tłoczące, uszczelniające wirnik klasyfikatora. Po każdej próbie rozdrabniania stanowisko badawcze było wyłączane i czyszczone. Zmielony materiał z komory młyna oraz ze zbiornika pod cyklonem i z filtra tkaninowego ważono na elektronicznej wadze laboratoryjnej AD 2000 firmy Axis z dokładnością do 0,01 g, a następnie w całości poddawano analizie granulometrycznej na przesiewaczu sitowym AS 200 Control firmy Retsch. Pomiary składu ziarnowego przeprowadzono w oparciu o obowiązującą normę PN-71/C-04501 [9], określającą warunki i sposób wykonania analizy sitowej substancji ziarnistej na sucho. Wyznaczone masy i rozkłady ziarnowe poszczególnych produktów mielenia umożliwiły ocenę jakości i skuteczności przeprowadzonych prób rozdrabniania.

4. Wyniki badań

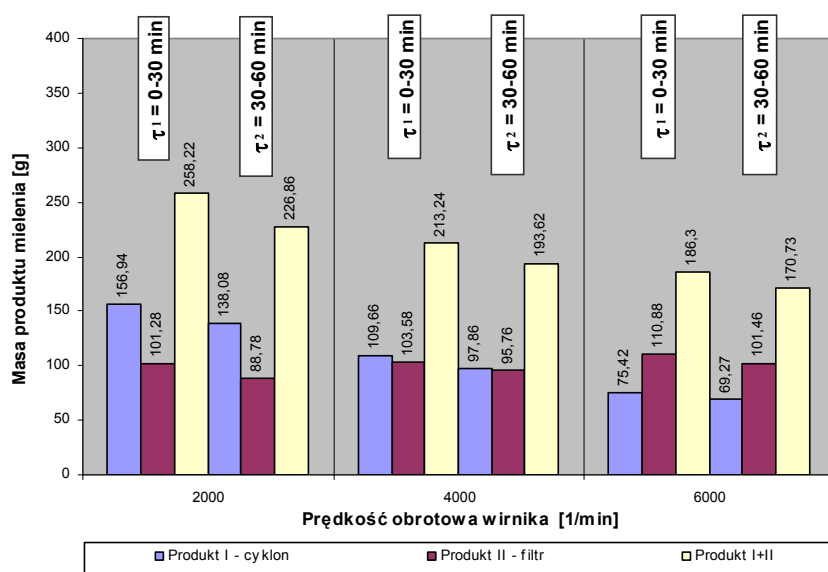
4.1. Wpływ prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora na wydajność młyna

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki pomiaru masy produktu mielenia, pochodzącego z cyklonu i z filtra, otrzymanych po czasie $\tau = 60$ min rozdrabniania próbek nadawy kamienia wapiennego.



Rys. 2. Wyniki pomiaru masy produktu mielenia kamienia wapiennego otrzymanego przy zmianie wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego po czasie $\tau = 60$ min

Na ich podstawie stwierdzono, że wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego spowodował znaczny spadek wydajności młyna, objawiający się zmniejszeniem całkowitej masy produktu mielenia (I + II) w czasie oraz wyraźny spadek skuteczności separacji cyklonu (produkt I) i nieznaczny wzrost skuteczności separacji filtra (produkt II). Wywołane to było wzrostem liczby ziaren nawracanych do komory mielenia, które poprzednio przy niższych wartościach prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora opuszczały komorę, trafiając z cyklonu do zbiornika produktu mielenia I. Jak widać wyraźnie na rysunku 2 dla wartości prędkości obrotowej $n = 2000$ 1/min i $n = 4000$ 1/min większa część całkowitej masy produktu mielenia została wytrącona w cyklonie, natomiast dla prędkości obrotowej $n = 6000$ 1/min więcej produktu zostało zatrzymane w filtrze. Oznacza to, że przy rosnącej wartości prędkości obrotowej wirnik klasyfikatora nie pozwalał wydostawać się grubym ziarnom z komory mielenia, lecz zawracał je z powrotem do ponownego rozdrobnienia. Przepuszczał on natomiast najdrobniejsze ziarna, które porywane przez ciąg urządzenia wyciągowego przechodziły przez cyklon i ostatecznie zatrzymywane były w filtrze.

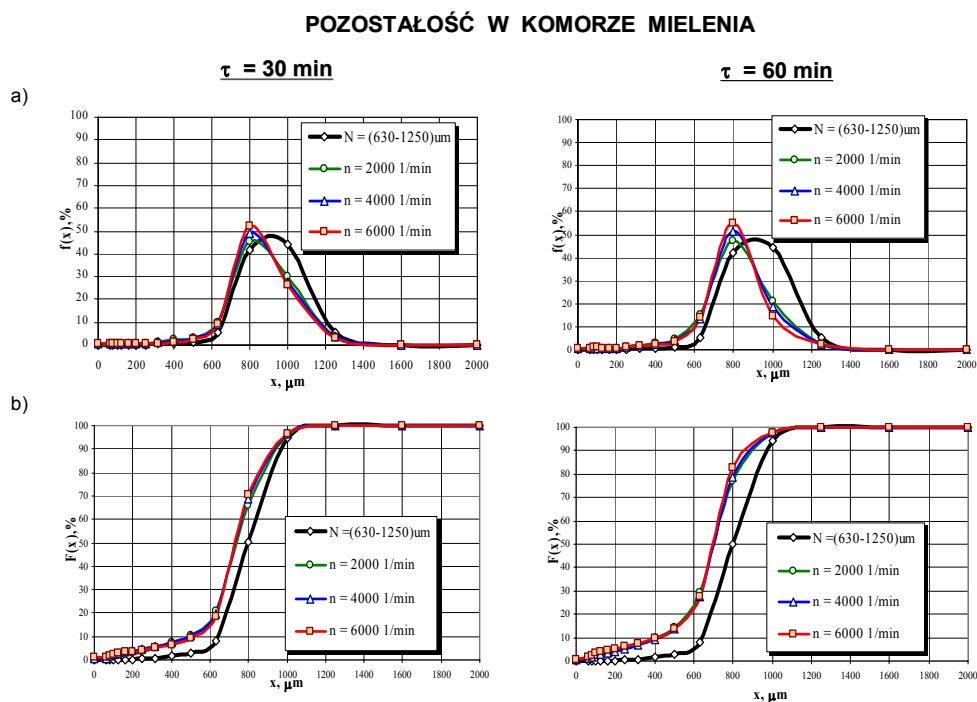


Rys. 3. Zestawienie wyników pomiaru masy produktu mielenia kamienia wapiennego otrzymanych przy zmianie wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego po okresie mielenia $\tau_1 = 0\div 30$ min i $\tau_2 = 30\div 60$ min

Ponadto na podstawie uzyskanych wyników (rys. 3) stwierdzono, że czas trwania próby rozdrabniania kamienia wapiennego wpływa na wydajność młyna. Dla wszystkich badanych próbek wydajność młyna była wyższa w pierwszym okresie mielenia ($\tau_1 = 0\div 30$ min), niż w kolejnym ($\tau_2 = 30\div 60$ min). Oznacza to, że w początkowym okresie zachodziło szybsze rozdrabnianie ziaren kamienia wapiennego, który wówczas posiadał więcej nierówności i pęknięć powierzchniowych.

4.2. Wpływ prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora na skład ziarnowy produktu mielenia

Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono wyniki z analiz składu ziarnowego produktu mielenia pozostałego w komorze młyna, wytrąconego w cyklonie (produkt I) i zatrzymanego w filtrze (produkt II). Na ich podstawie stwierdzono, że wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego spowodował wyraźne różnice w uziarnieniu produktu mielenia. Niezależnie od przyjętej wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora zaobserwowano zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 1000 μm w produkcie pozostałym w komorze mielenia. Największemu rozdrobnieniu uległy ziarna nadawy o rozmiarach z zakresu 1000÷1250 μm , które w trakcie trwania procesu przechodziły do sąsiednich klas ziarnowych, głównie zasilając klasę 500÷800 μm (rys. 4).

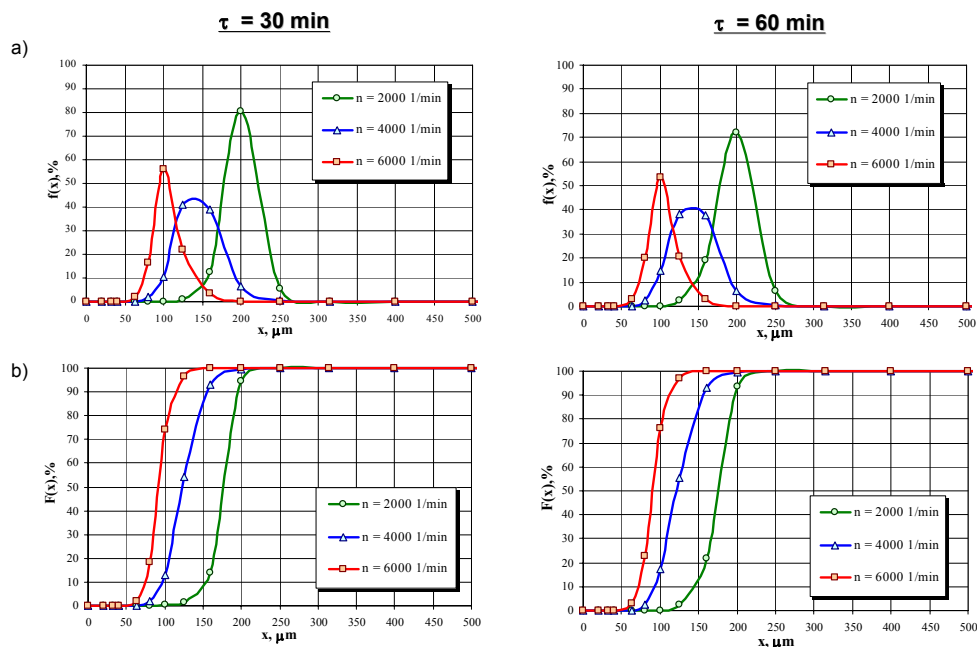


Rys. 4. Skład ziarnowy produktu mielenia próbek nadawy N (630÷1250) μm kamienia wapiennego, pozostałego w komorze mielenia młyna po czasie $\tau = 30 \text{ min}$ i $\tau = 60 \text{ min}$ dla parametrów procesu: $m_n = 3000 \text{ g}$, $p_n = 350 \text{ kPa}$, $n = 2000 \text{ 1/min}$, $n = 4000 \text{ 1/min}$ i $n = 6000 \text{ 1/min}$:
a) rozkład różniczkowy $f(x)$; b) rozkład całkowity $F(x)$

Wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora spowodował, że komorę opuszczał coraz drobniejszy produkt mielenia. Zaobserwowano zdecydowany wzrost udziału masowego ziaren poniżej 100 μm w produkcie mielenia I, wytrąconym w cyklonie oraz

wzrost udziału masowego ziaren poniżej 40 μm w produkcie mielenia II, zatrzymanym w filtrze. Jednakże, otrzymane produkty I i II nie mieściły się w zakresie żądanego uziarnienia poniżej 100 μm . Wytrącone w cyklonie ziarna poniżej 100 μm stanowiły: dla prędkości obrotowej $n = 6000$ 1/min – (74÷78)% całego produktu I, dla prędkości obrotowej $n = 4000$ 1/min – (12÷18)%, zaś dla prędkości obrotowej $n = 2000$ 1/min – nie występowały (rys. 5).

PRODUKT Z CYKLONU

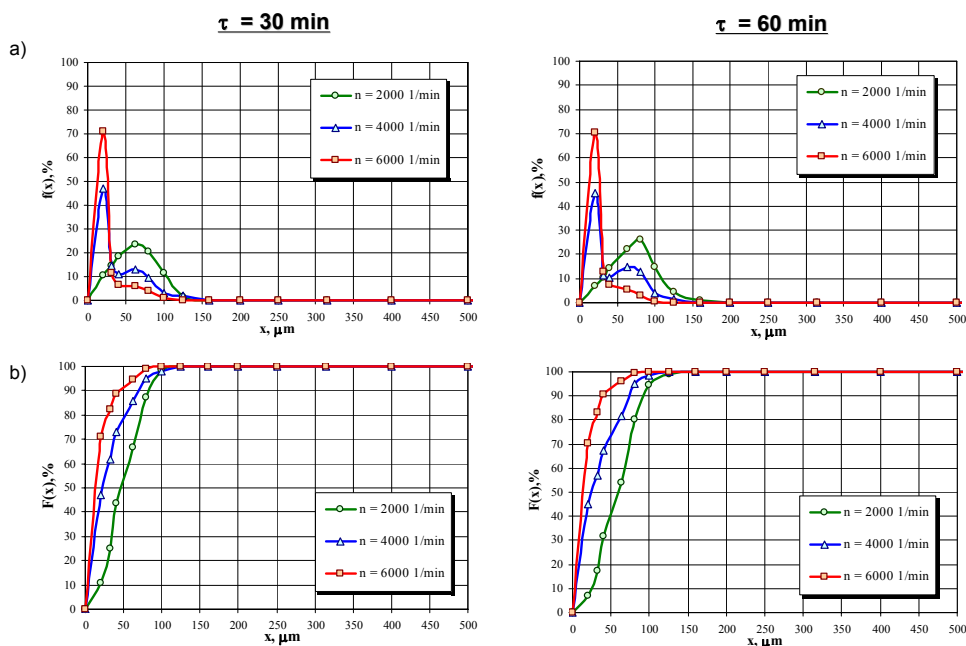


Rys. 5. Skład ziarnowy produktu mielenia próbek nadawy N (630÷1250) μm kamienia wapiennego, wytrąconego w cyklonie (produkt I) po czasie $\tau = 30$ min i $\tau = 60$ min dla parametrów procesu: $m_n = 3000$ g, $p_n = 350$ kPa, $n = 2000$ 1/min, $n = 4000$ 1/min i $n = 6000$ 1/min:
a) rozkład różniczkowy $f(x)$; b) rozkład całkowity $F(x)$

Obecność w produkcie I nadziarna o rozmiarze większym niż 100 μm dyskwalifikuje taki produkt z punktu widzenia zastosowanej technologii przerobczej, dlatego też konieczny jest nawrót tych ziaren z powrotem do komory mielenia, w celu ich dalszego rozdrobnienia. Uzyskanie ziaren poniżej 40 μm możliwe było już dla wartości prędkości obrotowej $n = 2000$ 1/min i stanowiło (32÷44)% całego produktu II, dla prędkości obrotowej $n = 4000$ 1/min – (68÷72)%, zaś dla prędkości obrotowej $n = 6000$ 1/min aż (89÷91)% (rys. 6).

Dalsze zwiększanie wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego z pewnością spowoduje uzyskanie jeszcze drobniejszego produktu mielenia, jednakże obniży to wyraźnie wydajność młyna i zwiększy energochłonność procesu strumieniowo-fluidalnego rozdrabniania.

PRODUKT Z FILTRA



Rys. 6. Skład ziarnowy produktu mielenia próbek nadawy N ($630 \div 1250$) μm kamienia wapiennego, zatrzymanego w filtrze (produkt II) po czasie $\tau = 30$ min i $\tau = 60$ min dla parametrów procesu: $m_n = 3000$ g, $p_n = 350$ kPa, $n = 2000$ 1/min, $n = 4000$ 1/min i $n = 6000$ 1/min:
a) rozkład różniczkowy $f(x)$; b) rozkład całkowity $F(x)$

5. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Możliwa jest skuteczna realizacja procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym, w wyniku której otrzymuje się produkt mielenia o uziarnieniu gwarantującym obecność w filtrze ponad 90% ziaren o rozmiarach poniżej $40 \mu\text{m}$.
- 2) Zastosowany w badaniach kamień wapienny charakteryzuje się dużą podatnością na rozdrabnianie. Badana klasa ziarnowa nadawy podlega skutecznej przeróbce w młynie z tym, że proces rozdrabniania poszczególnych próbek przebiega intensywniej w pierwszym okresie mielenia $\tau_1 = 0 \div 30$ min, niż w drugim $\tau_2 = 30 \div 60$ min.
- 3) Wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego przyczynia się do zmniejszenia wydajności młyna, co przejawia się wyraźnym spadkiem masy produktu I wytrąconego w cyklonie, przy nieznacznym wzroście masy produktu II zatrzymanego w filtrze.

- 4) Wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora dla przyjętych parametrów procesu wywołuje:
- w komorze mielenia — zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach w zakresie 500÷800 μm oraz uzyskiwanie produktu drobniejszego,
 - w cyklonie — wyraźny wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 100 μm ,
 - w filtrze — wyraźny wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm .

LITERATURA

- [1] Benz M., Herold H., Ulfik B.: *Int. J. Miner. Process.*, 44–45, 507–519, (1996)
- [2] Berthiaux H., Dodds J.A.: *Powder Technology*, 106, 78–97, (1999)
- [3] Godet-Morand L., Chamayou A., Dodds J.: *Powder Technology*, 128, 306–313, (2002)
- [4] Hogg R.: *Powder Technology*, 105, 135–140, 1999
- [5] Koch R., Noworyta A.: WNT, Warszawa 1992
- [6] Korzeń Z., Rink R.: *Mechanika*, 18, z. 11, 49–65, (1999)
- [7] Korzeń Z., Rink R., Konieczny A.: *ZN PŁ, Inż. Chem.*, 780, z. 22, 141–150, (1997)
- [8] Loffler E., Rausch J.: Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden 1992
- [9] PN-71/C-04501 – Analiza sitowa. Wytyczne wykonywania
- [10] Rink R., Konieczny A.: *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 13, 369–378, (1997)
- [11] Stuess M.: Springer - Lehrbuch, Berlin, Heidelberg, New York 1995
- [12] Tasirin S.M., Geldart D.: *Powder Technology*, 105, 337–341, (1999)
- [13] Vogel A.: *Powder Handling & Processing*, 3, nr 2, 129, 1991
- [14] Wang H., Ikeda T., Fukuda K., Yoshio M.: *J. Power Sour.*, 83, 141–147, (1999)
- [15] Zbroński D.: Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, 2005
- [16] Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., Otwinowski H., Urbaniak D.: *Materiały XIX Zjazdu Termodynamików*, Gdańsk — Sopot, 417–418, (2005)
- [17] Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., Otwinowski H., Urbaniak D.: *Powder Handling & Processing*, 17, nr 1, 32–39, (2005)
- [18] Zhang K., Zhang J., Zhang B.: *Powder Technology*, 132, 30–38, (2003)