

*Daniel Zbroński\**

## MŁYNY POWIETRZNO-STRUMIENIOWE STOSOWANE W PRZERÓBCE WYBRANYCH MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH

---

### 1. Wprowadzenie

Z procesem rozdrabniania mamy do czynienia w wielu ważnych gałęziach gospodarki, m.in. w górnictwie, energetyce, hutnictwie, budownictwie, farmaceutyce oraz w przemyśle chemicznym, kosmetycznym i spożywczym. Rozdrabnianiu podlegają właściwie wszystkie kopaliny użyteczne, minerały, rudy metali i tworzywa oraz substancje budowlane, chemiczne i wykorzystywane w produkcji żywności.

Dynamiczny rozwój wielu dziedzin techniki obserwowany od lat na świecie spowodował wyraźny wzrost zapotrzebowania na produkty o wysokim stopniu rozdrobnienia. W celu sprostania tym oczekiwaniom konieczne stało się stosowanie nowoczesnych technologii mechanicznej przeróbki materiałów ziarnistych, które gwarantowałyby uzyskanieżądanego uziarnienia produktu, przy jednoczesnym zmniejszeniu energochłonności procesu. Warunki te spełniają młyny powietrzno-strumieniowe, które w porównaniu z innymi typami urządzeń rozdrabniających charakteryzuje:

- wysoki stopień uzyskiwanego rozdrobnienia,
- czystość produktu,
- małe zużycie energii,
- niski poziom hałasu,
- znikome zużycie materiałów,
- niewielkie gabaryty urządzenia.

Zagadnienia związane z pozyskiwaniem drobnych produktów rozdrabniania w młynach powietrzno-strumieniowych są przedmiotem wielu analiz teoretycznych i badań doświadczalnych [1–9, 16]. Głównym ich celem jest optymalizacja procesu rozdrabniania i klasyfikacji, ustalenie wpływu istotnych parametrów procesu na uzyskany produkt oraz prognozowanie jego składu ziarnowego.

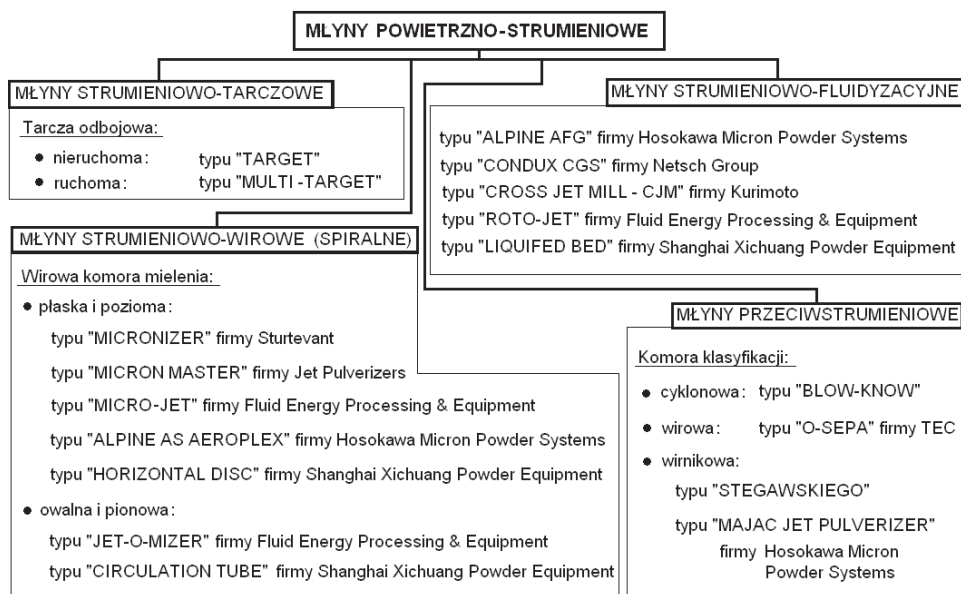
---

\* Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Częstochowa

## 2. Budowa i zasada działania wybranych młynów powietrzno-strumieniowych

Dążenie do zaspokojenia popytu przemysłowego na materiały bardzo drobne stało się źródłem dynamicznego rozwoju technologii powietrzno-strumieniowych.

Pośród znanych konstrukcji młynów powietrzno-strumieniowych można wyróżnić cztery zasadnicze grupy: młyny strumieniowo-tarczowe, młyny strumieniowo-wirowe, młyny przeciwstrumieniowe i młyny strumieniowo-fluidyzacyjne [4]. Klasyfikację tych młynów przedstawiono na rysunku 1, zaś charakterystykę wybranych ich typów podano poniżej. Różnica między młynami wynika ze sposobu realizacji procesu rozdrabniania, zestawienia konstrukcyjnego układu mielőko-klasyfikującego i zastosowań przyjętych przez producenta młyna [10–17].

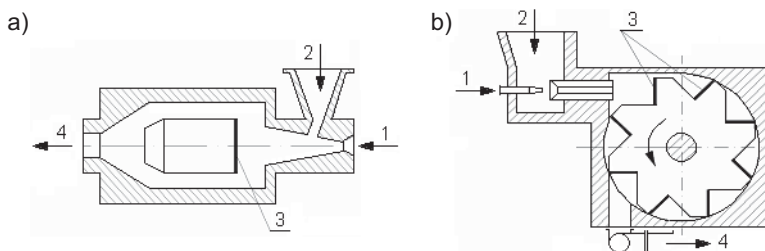


Rys. 1. Klasyfikacja powietrzno-strumieniowych technologii rozdrabniania materiałów ziarnistych

### 2.1. Młyny strumieniowo-tarczowe

W młynach strumieniowo-tarczowych mieszanka dwufazowa (powietrze i nadawa) zostaje gwałtownie przyspieszona i skierowana na umieszczoną w komorze mielenia tarczę odbojową. W zależności od sposobu zamocowania i liczby zastosowanych tarcz odbojowych rozróżnia się konstrukcje młynów: typu „TARGET” – z nieruchomą tarczą odbojową umieszczoną w centralnej części komory mielenia oraz typu „MULTI-TARGET” – z ruchomymi tarczami odbojowymi, wykonanymi w odpowiedni sposób na obwodzie łopatek wirnika.

Najbardziej rozpowszechnioną konstrukcją jest młyn typu „TARGET” (rys. 2a), w którym strumień mieszaniny dwufazowej uderza w pojedynczą tarczę. Konstrukcją bardziej zaawansowaną jest młyn typu „MULTI-TARGET” (rys. 2b), w którym strumień nadawy (2) transportowany przez powietrze (1) trafia na wirujące tarcze (3), skąd po rozdrobnieniu produkt (4) wraz z powietrzem zostaje odprowadzony do układu zewnętrznej separacji [3].



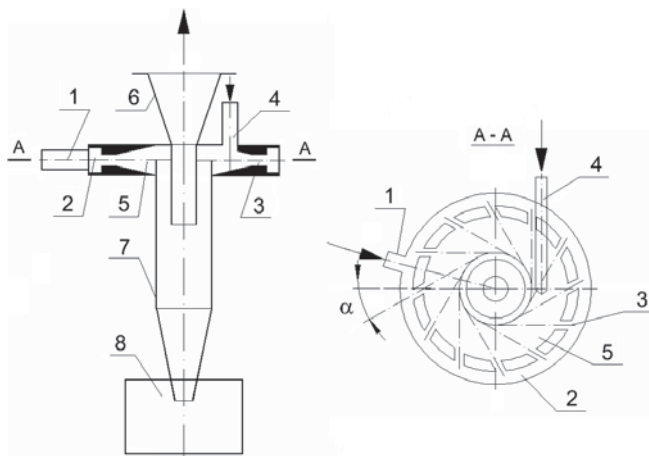
**Rys. 2.** Konstrukcja młyna strumieniowo-tarczowego: a) typu „TARGET” z nieruchomą tarczą odbojową; b) typu „MULTI-TARGET” z wirującymi tarczami odbojowymi; 1 – doprowadzenie powietrza, 2 – doprowadzenie nadawy, 3 – tarcza odbojowa, 4 – odprowadzenie produktu

## 2.2. Młyny strumieniowo-wirowe

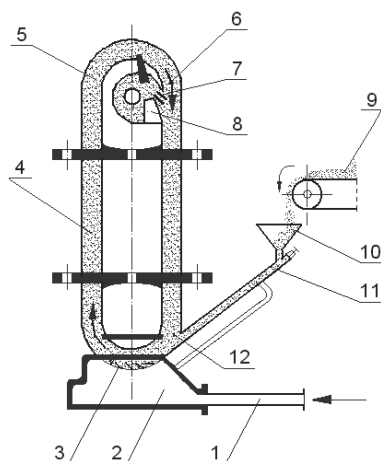
W młynach strumieniowo-wirowych nadawa rozdrabniana jest w wyniku ścierania ziaren poruszających się ruchem wirowym. W zależności od budowy i usytuowania wirowej komory mielenia rozróżnia się dwie konstrukcje młynów: z płaską, poziomą komorą mielenia i z owalną, pionową komorą mielenia (poszczególne typy młynów pokazano na rysunku 1).

W młynie strumieniowo-wirowym typu „MICRONIZER” (rys. 3) powietrze doprowadzane jest przewodem (1) do kolektora (2) zasilającego poszczególne dysze zbieżne (3), gdzie rozpręża się, osiągając prędkość dźwięku, a następnie wpływa do komory mielő-kasyfikującej (5), zasilanej nadawą za pomocą strumienicy (4). Osie dysz są nachylone pod kątem do kierunku promieniowego, co sprawia, że umieszczona w centralnej części komory dwufazowa mieszanina zostaje wprowadzona w ruch wirowy. Ziarna mieszaniny wirują z różną intensywnością: największą prędkość zawirowania osiągają warstwy bliskie punktom przecięcia strumieni wypływających z poszczególnych dysz, a najmniejszą – ziarna znajdujące się na ścianach komory. Równoległe z procesem przemiału w przestrzeni komory zachodzi proces klasyfikacji, będący wynikiem krzywoliniowego ruchu ziaren w dośrodkowym przepływie powietrza. Taka sytuacja pozwala na koncentryczne usytuowanie cyklonu (7) w komorze i oddzielanie powstałego produktu, zatrzymanego w zbiorniku (8), od powietrza wypływającego przewodem (6).

W młynie strumieniowo-wirowym typu „JET-O-MIZER” (rys. 4) rozdrabnianie ziaren nadawy przebiega na zasadzie zderzeń wirowych oraz tarcia i hamowania ich ruchu na ścianie bocznej oraz zalegającej na niej frakcji niedomielonej, która odrzucana jest na ścianę boczną poprzez siłę odśrodkową ruchu wirowego. Ziarna o rozmiarze mniejszym od granicznego są wraz z powietrzem unoszone poprzez łopatki kierownicze klasyfikatora do zewnętrznego separatora układu (cyklon, filtr).



**Rys. 3.** Konstrukcja młyna strumieniowo-wirowego typu „MICRONIZER” z płaską i poziomo ustawioną wirową komorą mielenia: 1 – doprowadzenie powietrza, 2 – kolektor powietrza, 3 – dysze powietrzne, 4 – doprowadzenie nadawy, 5 – komora rozdrabniająco-klasyfikująca, 6 – odprowadzenie powietrza, 7 – cyklon, 8 – zbiornik produktu



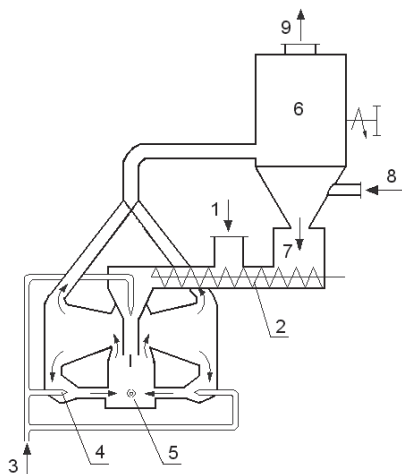
**Rys. 4.** Konstrukcja młyna strumieniowo-wirowego typu „JET-O-MIZER” z owalną i pionowo ustawioną wirową komorą mielenia: 1 – doprowadzenie powietrza, 2 – kolektor powietrza, 3 – dysze, 4 – wznoszący odcinek komory mielenia, 5, 6 – kolana nawrotne, 7 – klasyfikator żaluzjowy, 8 – odprowadzenie produktu, 9 – doprowadzenie nadawy, 10 – kosz zasypowy, 11 – strumienica zasilająca, 12 – strefa zderzeń wirowych ziaren

### 2.3. Młyny przeciwstrumieniowe

W młynach przeciwstrumieniowych rozdrabnianie ziaren nadawy odbywa się w wyniku zderzeń przeciwbieżnych strumieni dwufazowych w komorze mielenia. W zależności

od rodzaju zastosowanej w młynie komory klasyfikacji różni się trzy konstrukcje: młyn z cyklonową, wirową lub wirnikową komorą klasyfikacji (poszczególne typy młynów pokazano na rysunku 1).

W młynie przeciwstrumieniowym typu „BLOW-KNOW” (rys. 5) powietrze (3) doprowadzone jest do trzech dysz (4): dwóch umieszczonych przeciwsośnie i jednej na górze komory mielenia (5). W układzie tym doprowadzenie nadawy (1) następuje poprzez ślimak podający (2) umieszczony nad górną dyszą. Po zmieleniu materiał wraz z powietrzem trafia do cyklonu (6), z którego grubsze ziarna, poprzez zsyp części niezmielonych (7), trafiają ponownie na podajnik ślimakowy do komory mielenia. Króćcem (8) doprowadzone jest dodatkowe powietrze do cyklonu, które przepływając przez niego porywa drobny produkt (9), kierując go do układu filtra.

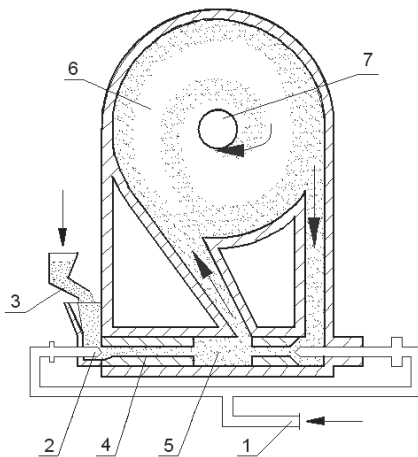


**Rys. 5.** Konstrukcja młyna przeciwstrumieniowego typu „BLOW-KNOW” z cyklonową komorą klasyfikacji: 1 – doprowadzenie nadawy, 2 – ślimak podający, 3 – doprowadzenie powietrza, 4 – dysze powietrzne, 5 – komora mielenia, 6 – cyklon, 7 – zsyp części niezmielonych, 8 – doprowadzenie dodatkowego powietrza, 9 – odprowadzenie produktu

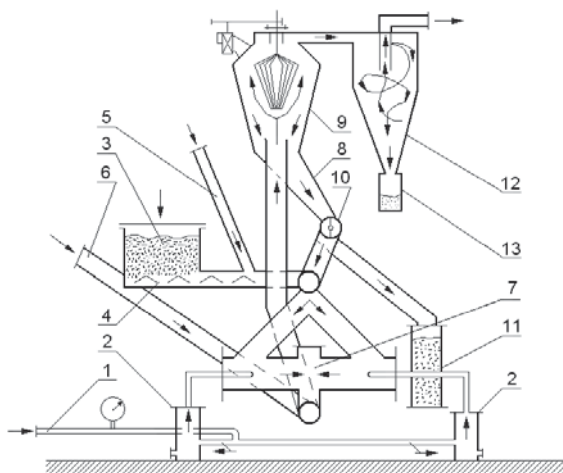
W młynie przeciwstrumieniowym typu „O-SEPA” (rys. 6) nadawa doprowadzana jest grawitacyjnie do jednej z dwóch strumieni (4). W wirowej komorze klasyfikacji (6), w wyniku działania sił odśrodkowych, następuje separacja produktu. Drobniejszy produkt odprowadzany jest otworem wypływowym (7), natomiast grubszy produkt wirujący po wewnętrznych ściankach komory trafia do drugiej strumienicy, gdzie zostaje porwany przez powietrze (1) i poddany ponownemu rozdrabnianiu w komorze mielenia (5).

W młynie przeciwstrumieniowym typu „STEGAWSKIEGO” (rys. 7) powietrze (1) doprowadzane jest do dysz podobnie jak w młynie typu „BLOW-KNOW” z tą różnicą, że zamontowane są dodatkowo zbiorniki wyrównujące ciśnienie (2). Młyn wyposażony jest także w podajnik ślimakowy (4), transportujący nadawę ze zbiornika (3) do komory mielenia młyna (7). Przewodem (5) doprowadzane jest dodatkowe powietrze do podajnika nadawy, przewodem (6) do komory mielenia. Opuszczający komorę rozdrobniony materiał

kierowany jest do klasyfikatora wirnikowego (9), gdzie po oddzieleniu grubszy materiał (8) kierowany jest poprzez podajnik nadziarna (10) do zbiornika (11) lub do komory mielenia w celu ponownego rozdrobnienia. W cyklonie (12) następuje separacja drobnego produktu, który magazynowany jest w zbiorniku (13).



**Rys. 6.** Konstrukcja młyna przeciustrumieniowego typu „O-SEPA” z wirową komorą klasyfikacji: 1 – doprowadzenie powietrza, 2 – dysze, 3 – doprowadzenie nadawy, 4 – strumienice rozpędowe, 5 – komora mielenia, 6 – wirowa komora klasyfikacji, 7 – odprowadzenie produktu

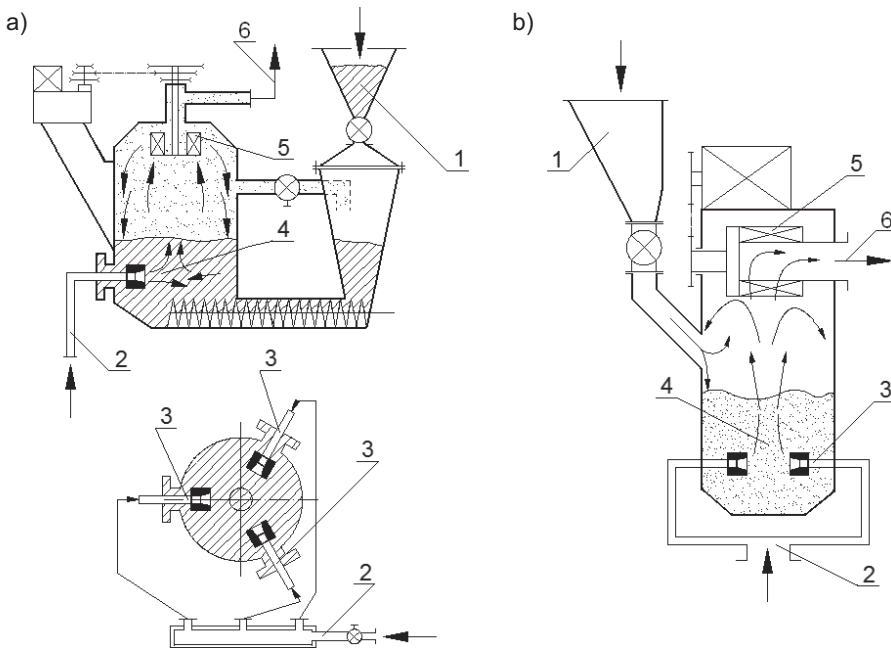


**Rys. 7.** Konstrukcja młyna przeciustrumieniowego typu „STEGAWSKIEGO” z wirkową komorą klasyfikacji: 1 – doprowadzenie powietrza, 2 – zbiornik wyrównawczy ciśnienia, 3 – zbiornik nadawy, 4 – podajnik ślimakowy, 5, 6 – dopływ dodatkowego powietrza, 7 – komora mielenia, 8 – odprowadzenie grubego produktu, 9 – klasyfikator wirnikowy, 10 – podajnik nadziarna, 11 – zbiornik nadziarna, 12 – cyklon, 13 – zbiornik produktu drobnego

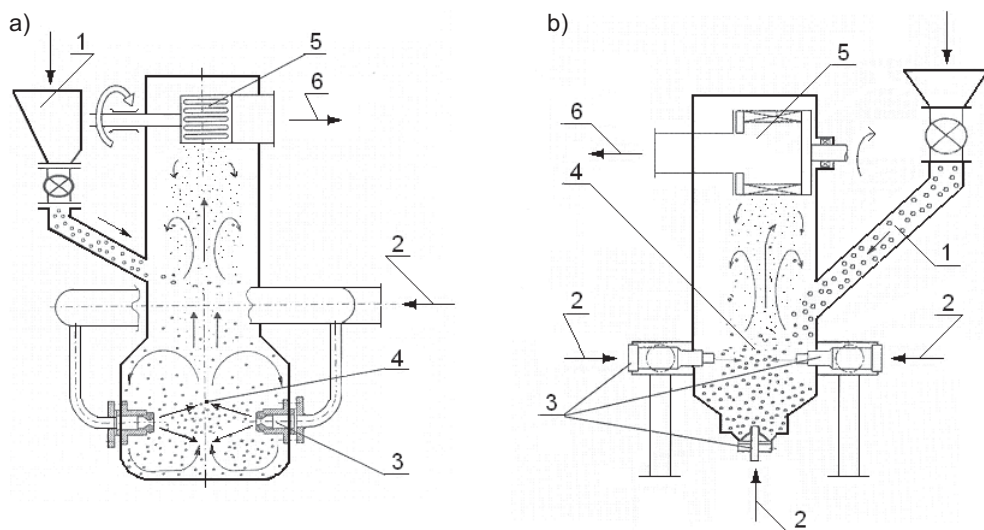
## 2.4. Młyny strumieniowo-fluidyzacyjne

W młynach strumieniowo-fluidyzacyjnych rozdrabnianie nadawy odbywa się w wysokoenergetycznej warstwie fluidalnej, w wyniku koncentrycznego wdmuchiwanie do warstwy materiału strumieni powietrznych. Wśród młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych wyróżnia się kilka typów, przykładowo przedstawionych na rysunku 1. Różnica między poszczególnymi typami młynów wynika głównie z zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego układów podawania nadawy i powietrza, układu klasyfikacji i wybranego producenta młyna. Przykłady konstrukcji tego typu młynów, według propozycji firmy Hosokawa Micron Powder Systems [12] przedstawiono na rysunku 8, zaś firm Netsch Group [15] i Kurimoto [14] na rysunku 9.

W młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym (rys. 8a) nadawa (1) wprowadzana jest z zasobnika poprzez podajnik ślimakowy do dolnej części komory mielenia (4). Na obwodzie komory zamontowane są dysze powietrzne (3), do których doprowadzone jest poprzez kolektor zbiorczy sprężone powietrze (2), których strumienie spotykają się w jednym punkcie, gdzie następuje rozdrabnianie doprowadzonej nadawy. Porwane wraz z powietrzem ziarna materiału przepływają do klasyfikatora wirnikowego (5), w którym następuje separacja produktu: grubszy zostaje zawrócony z powrotem do zasobnika nadawy, natomiast drobniejszy produkt (6) trafia do cyklonu i filtra, gdzie ulega zatrzymaniu.



**Rys. 8.** Konstrukcja młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego typu „ALPINE AFG”: a) z podajnikiem ślimakowym i pionowo ustawionym wirnikiem klasyfikatora; b) z podajnikiem śluzowym i poziomo ustawionym wirnikiem klasyfikatora: 1 – doprowadzenie nadawy, 2 – doprowadzenie powietrza, 3 – dysze powietrzne, 4 – komora mielenia, 5 – klasyfikator wirnikowy, 6 – odprowadzenie produktu



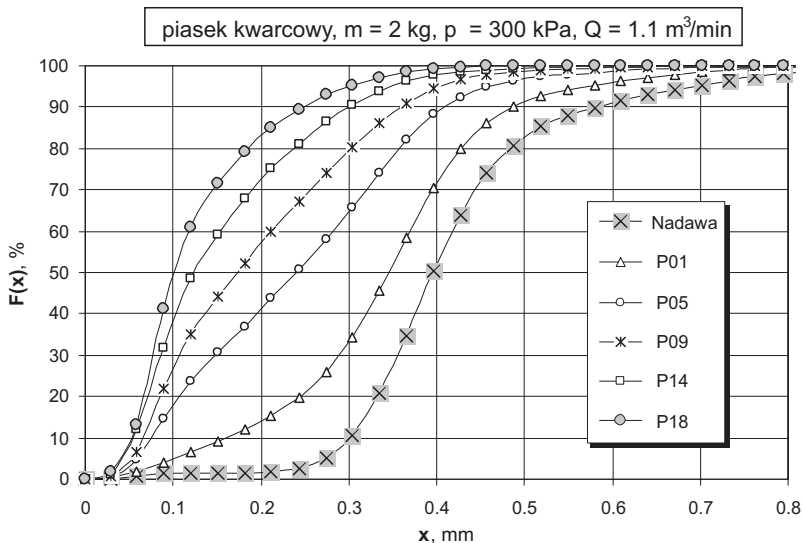
**Rys. 9.** Konstrukcja młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego z podajnikiem śluzowym i poziomo ustawionym wirnikiem klasyfikatora powietrznego: a) typu „CONDUX CGS”; b) typu „CROSS JET MILL CJM”; 1 – doprowadzenie nadawy, 2 – doprowadzenie powietrza, 3 – dysze, 4 – komora mielenia, 5 – klasyfikator wirnikowy, 6 – odprowadzenie produktu

Konstrukcje młynów przedstawione na rysunkach 8b, 9a i 9b różnią się od poprzedniej sposobem doprowadzania nadawy, powietrza i ustawieniem wirnika klasyfikatora. We wszystkich tych rozwiązaniach nadawa doprowadzana jest do komory mielenia (4) za pomocą podajnika śluzowego (1). Po otwarciu śluzy materiał grawitacyjnie zostaje wprowadzony w miejsce, w którym spotykają się strumienie sprężonego powietrza (2) wylatującego z dysz (3) znajdujących się na obwodzie komory mielenia (4). W konstrukcji młyna „CJM” (rys. 9b) zastosowano dodatkową dyszę powietrzną w dolnej części komory mielenia. Wirnik klasyfikatora (5), w którym następuje separacja produktu, umieszczony jest poziomo w górnej części komory w obszarze fontannowego unosu produktów mielenia. Grubszy produkt zostaje zawrócony z powrotem do komory, natomiast produkt drobniejszy (6) trafia do układu separacji zewnętrznej, gdzie ulega całkowitemu zatrzymaniu.

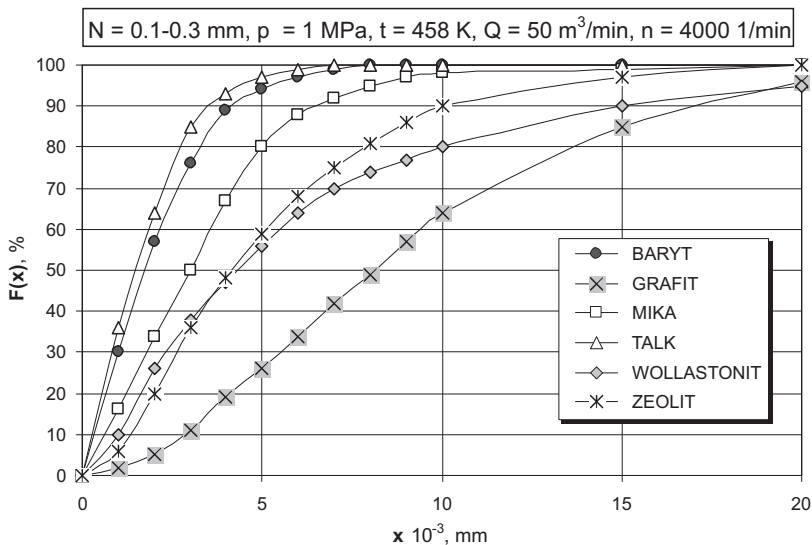
### 3. Wyniki rozdrabniania wybranych materiałów ziarnistych

Na rysunku 10 przedstawiono dystrybuanty składu ziarnowego  $F(x)$  nadawy i produktu kolejnych prób rozdrabniania piasku kwarcowego w młynie strumieniowo-tarczowym z nieruchomą tarczą odbojową. Krzywe P01, P05, P09, P14, P18 reprezentują wyniki składu ziarnowego poszczególnych jednokrotnych prób rozdrabniania [2, 3]. Na rysunku 11 przedstawiono dystrybuanty składu ziarnowego końcowego produktu mielenia wybranych materiałów ziarnistych, tj.: barytu, grafitu, miki, talku, wollastonitu i zeolitu o nadawie  $N = 0,1-0,3$  mm, otrzymane podczas rozdrabniania w młynie strumieniowo-wirowym PMT Spiral Jet Mill SJ 50 [16].



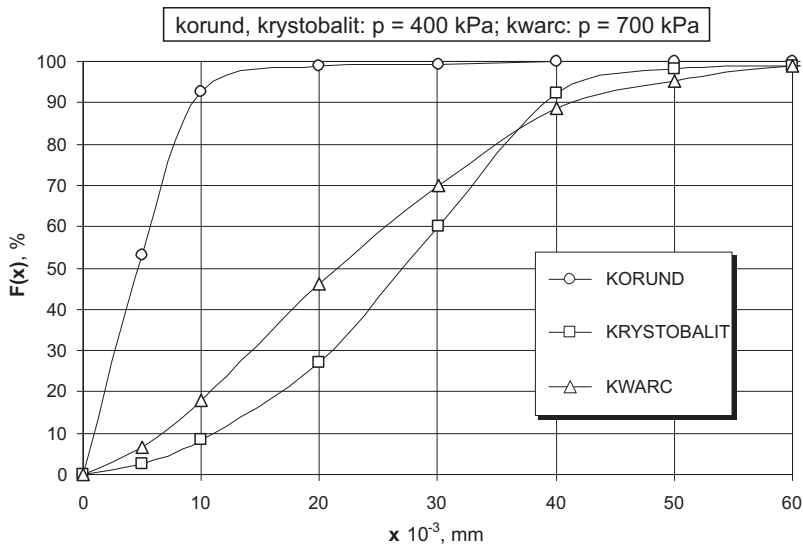


**Rys. 10.** Skład ziarnowy produktu kolejnych prób rozdrabniania nadawy piasku kwarcowego w młynie strumieniowo-tarczowym

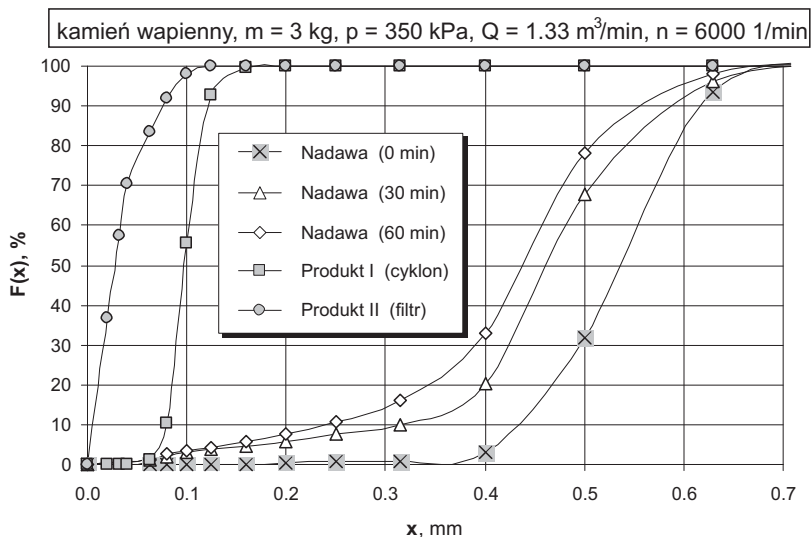


**Rys. 11.** Skład ziarnowy produktu rozdrabniania wybranych materiałów w młynie spiralnym

Na rysunku 12 przedstawiono dystrybuanty składu ziarnowego końcowego produktu mielenia wybranych materiałów ziarnistych, tj.: korundu o nadawie  $N = 0,4-1,6 \text{ mm}$  [7], krystalalitu o nadawie  $N = 0,31,6 \text{ mm}$  i kwarcu o nadawie  $N = 0,1-0,5 \text{ mm}$  [6], otrzymane podczas rozdrabniania w młynie przeciwstrumieniowym.



**Rys. 12.** Skład ziarnowy produktu rozdrabniania wybranych materiałów w młynie przeciwstrumieniowym



**Rys. 13.** Skład ziarnowy produktu pozostałego w komorze mielenia, wytrąconego w cyklonie i zatrzymanego w filtrze otrzymanego po rozdrabnianiu nadawy kamienia wapiennego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym

Na rysunku 13 przedstawiono dystrybuanty składu ziarnowego produktu mielenia otrzymane w wyniku rozdrabniania nadawy kamienia wapiennego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym [9].

## 4. Podsumowanie

Przedstawione w pracy informacje pozwalają sformułować następujące wnioski:

- w ostatnich latach na świecie powstało wiele zaawansowanych i komercyjnych rozwiązań konstrukcyjnych młynów powietrzno-strumieniowych;
- możliwa jest skuteczna realizacja procesu rozdrabniania wybranych materiałów ziarnistych w różnych młynach powietrzno-strumieniowych, zapewniająca otrzymanie produktu o wymaganym uziarnieniu na danym etapie procesu przeróbki;
- właściwy dobór typoszeregu urządzenia mielącego winien uwzględniać m.in. rodzaj i uziarnienie nadawy materiału wejściowego oraz wymagania dotyczące: składu ziarnowego i czystości produktu, żądanej wydajności młyna i energochłonności procesu.

### LITERATURA

- [1] *Eskin D.I., Dorokhov I.N. i in.*: Modeling and optimization of jet milling. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 35, 2, 2001, s. 188–195
- [2] *Górecka-Zbrońska A.*: Modelowanie procesu jednokrotnego rozdrabniania w młynie strumieniowym. Politechnika Częstochowska 2003 (praca doktorska)
- [3] *Górecka-Zbrońska A., Zbroński D.*: Rozdrabnianie ziaren piasku kwarcowego na laboratoryjnym stanowisku młyna strumieniowo-tarczowego. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34, z. 4/1, 2010, s. 61–70
- [4] *Korzeń Z., Rink R.*: Powietrzno-strumieniowe technologie mikronizacji ciał twardych – tendencje rozwojowe i propozycje nowych wdrożeń. *Mechanika*, 18, z. 11, 1999, s. 49–65
- [5] *Mebtoul M., Large J.F., Guigon P.*: High velocity impact of particles on a target – an experimental study. *Int. J. Min. Proces.*, 44–45, 1996, s. 77–91
- [6] *Otwinowski H., Pastucha L.*: Strumieniowe rozdrabnianie materiałów sypkich. *Cement Wapno Gips*, 5, 1983, s. 153–155
- [7] *Rink R.*: Zastosowanie spalin jako nośnika energii w przeciwbieżnym młynie strumieniowym. *Cement Wapno Gips*, 10, 1975, s. 299–302
- [8] *Tasirin S.M., Geldart D.*: Experimental investigation on fluidized bed jet grinding. *Powder Technology*, 105, 1999, s. 337–341
- [9] *Zbroński D.*: Badanie i modelowanie procesu strumieniowo-fluidalnego rozdrabniania materiałów ziarnistych. Politechnika Częstochowska 2005 (praca doktorska)
- [10] [www.chemmachine-3j.com](http://www.chemmachine-3j.com)
- [11] [www.fluidenergype.com](http://www.fluidenergype.com)
- [12] [www.hmiconpowder.com](http://www.hmiconpowder.com)
- [13] [www.jetpul.com](http://www.jetpul.com)
- [14] [www.kurimoto.co.jp](http://www.kurimoto.co.jp)
- [15] [www.netzsch-grinding.com](http://www.netzsch-grinding.com)
- [16] [www.powder-maker.com](http://www.powder-maker.com)
- [17] [www.sturtevantinc.com](http://www.sturtevantinc.com)