Przygotowanie nadawy do procesu granulacji nawarstwiającej w młynie wibracyjnym

Paweł Tomach , Jan Sidor

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków

Streszczenie: Nawóz mineralny o wysokiej aktywności powinien mieć przed granulacją uziarnienie o zawartości klasy ziarnowej 0–10 μm powyżej 70%. Nadawę do granulacji były dwa rodzaje wapienia oraz kreda. Nadawę przygotowano przez mielenie w laboratoryjnym młynie wibracyjnym o działaniu okresowym i przy niskiej częstotliwości drgań – 14 Hz. Proces mielenia przeprowadzano na sucho, bez udziału aktywatora, uzyskując zmielone materiały o zawartości klasy ziarnowej 0–10 μm – dla wapieni w zakresie 84–95%, a dla kredy – 87%. Wyniki badań wskazują, że młyn wibracyjny można zastosować do przygotowania nadawy do granulacji bezciśnieniowej, w celu wytwarzania nawozów mineralnych o wysokiej aktywności.

Słowa kluczowe: granulacja nawozu, młyn wibracyjny, mielenie wibracyjne

THE USE OF A VIBRATORY MILL FOR FEED PREPARATION FOR THE LAYERED GRANULATION PROCESS

Abstract: Mineral fertilizer of high activity should contain (before granulation) grain class 0–10 microns in amount greater than 70%. Feed for granulation were two types of limestone and chalk. The feed was prepared by milling in a laboratory vibratory mill batchwise and with low vibration frequency 14 Hz. The milling process was performed dry, without the activator, to obtain grain class 0–10 microns: for the limestone in the range from 84 to 95%, and 87% for the chalk. The results indicate that vibratory mills can be used to prepare feed for non-pressurized granulation that is for preparation of granulated mineral fertilizers with high activity.

Keywords: fertilizer granulation, vibratory mill, vibratory milling

https://doi.org/10.7494/978-83-66727-48-9_12

1. Wprowadzenie

Granulacja bezciśnieniowa stosowana jest w procesach wytwarzania nawozów mineralnych, farmaceutyków, wielu innych granulowanych produktów, a także w przygotowaniu do zagospodarowania drobno uziarnionych odpadów przemysłowych. Problematyka granulacji stale się rozwija i stanowi przedmiot wielu prac badawczych (Biń 2012). Drobno uziarnione materiały przed poddaniem granulacji powinny być odpowiednio przygotowane. Często jednym z tych procesów jest proces rozdrabniania, zwłaszcza mielenia (Malinowski i in. 2015), w którym wytwarzane są najdrobniejsze klasy ziarnowe ułatwiające proces granulacji. W wielu przypadkach bez wcześniejszego rozdrobnienia materiału nie można go zgranulować. Proces ten zachodzi najczęściej w młynach grawitacyjnych, nazywanych ze względu na rodzaj mielników młynami kulowymi (Heim 1998, Warych 2014). Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne tych młynów i ich parametry technologiczne podane zostały przez Sidora (2013). Młyny te charakteryzuje duży jednostkowy pobór energii, dlatego w wielu technologiach wypierane są przez młyny o znacznie większych możliwościach technologicznych i mniejszym o ponad połowę poborze energii (Gock i in. 2006), czyli młyny wibracyjne (Andres i in. 2011, Sidor 2005, 2011, Sidor i in. 1997, 2002) i mieszadłowe (Heim 1998, Tamblyn 2009, Rule 2010, Sidor 2013). Znaczącą zaletą tych młynów są niższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, dlatego też w Katedrze Inżynierii Maszyn i Transportu AGH prowadzone są prace badawcze nad tego typu młynami (Tomach 2017a, 2017b, 2019, 2020). Od wielu lat zauważalny jest wzrost produkcji nawozów granulowanych (Heffer i in. 2014), a od kilku lat znaczący wzrost cen energii elektrycznej – oba te aspekty zdeterminowały podjęcie prac w tej dziedzinie.

W pracy, która ma charakter eksperymentalny i sondażowy, przedstawiono próbę zastosowania młyna wibracyjnego do przygotowania wapieni i kredy jako nadawy do granulacji bezciśnieniowej. Materiały te przewidziano do zastosowania jako nawóz mineralny w formie granulatu.

Możliwość wykorzystania młyna wibracyjnego do bardzo drobnego mielenia surowców mineralnych, czyli przygotowania nadawy do granulacji w granulatorze wibracyjnym, potwierdziły korzystne wyniki badań granulacji sześciu surowców mineralnych (w tym wapieni) zmieszanych w młynie wibracyjnym (Sidor i in. 2014).

2. Cel i metoda badań

Celem badań było określenie możliwości otrzymania w młynie wibracyjnym, o działaniu okresowym i niskiej częstotliwości drgań, produktu mielenia stanowiącego

nadawę do procesu granulacji bezciśnieniowej. Badania obejmowały również wyznaczenie parametrów mielenia wibracyjnego w celu otrzymania produktu mielenia o zawartości klasy 0–10 μm minimum 70% – przy standardowych parametrach młyna oraz w możliwie najkrótszym czasie mielenia.

Do badań przyjęto trzy materiały, to jest: wapień oznaczony symbolem A, kredę oznaczoną symbolem B oraz wapień oznaczony symbolem C. Materiały były w stanie suchym. Ich skład ziarnowy i gęstość nasypową w stanie luźnym podano w tabeli 1.

Tabela 1
Uziarnienie oraz gęstość nasypowa materiałów A, B i C

Wymiary oczek [mm]	Klasa ziarnowa [mm]	Materiał					
		Wapień A		Kreda B		Wapień C	
		suma frakcji [%]	przesiew [%]	suma frakcji [%]	przesiew [%]	suma frakcji [%]	przesiew [%]
10	>10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
8	8–10	0,00	100,00	2,50	97,50	0,00	100,00
4	4–6	0,00	100,00	43,70	56,30	0,30	99,70
2	2–4	1,19	98,81	85,20	14,80	9,10	90,90
1	1–2	23,62	76,38	95,90	4,10	50,20	49,80
0,5	0,50–1,00	48,33	51,67	98,40	1,60	72,40	27,60
0,25	0,25–0,50	66,08	33,92	98,90	1,10	82,40	17,60
–	<0,25	99,70	0,30	99,40	0,60	99,60	0,40
Gęstość nasypowa [kg/dm ³]		1,44 $\pm$ 0,03		1,05 $\pm$ 0,03		1,68 $\pm$ 0,04	

Stanowisko badawcze laboratoryjnego młyna wibracyjnego o działaniu okresowym (schemat budowy i widok) przedstawiono na rysunku 1 (Sidor 2005). Do badań przyjęto komorę o średnicy 210 mm z wykładziną stalową o pojemności 2,2 dm³ (znajdującą się w uchwycie komory – rys. 1a), a jako elementy robocze – kulki stalowe. Taką średnicę komór mają najmniejsze przemysłowe młyny wibracyjne. Młyn ten może być również wyposażony w komory o średnicy 123 mm i 310 mm oraz komory z wykładziną z tworzywa polimerowego i korundową. Częstotliwość drgań komory wynosiła 14 Hz, a stopień napełnienia komory 70%.

Rys. 1. Stanowisko badawcze laboratoryjnego młyna wibracyjnego: a) schemat; b) widok;
 1 – komora, 2 – uchwyt komory, 3 – moduł napędu, 4 – silnik wibratora, 5 – układ sterowania i zasilania, 6 – podstawa, 7 – dodatkowe komory o innych średnicach, 8 – napęd ruchu obrotowego komory (nieużywany w badaniach)

3. Metodyka, przebieg i wyniki badań

Sondażowe badania procesu mielenia wibracyjnego wapieni i kredy przeprowadzono na zgodnie z przyjętą metodą. W badaniach nie stosowano aktywatorów, czyli środków ułatwiających mielenie. Każdą z prób mielenia powtarzano dwukrotnie, a końcowy wynik stanowi średnia arytmetyczną z dwóch prób oraz dwóch oznaczeń uziarnienia. Uziarnienie zmieszanych próbek oznaczano metodą dyfraktometryczną – granulometrem laserowym LAU-15. Próbkę dyspergowano alkoholem izopropylowym.

Dla każdego z materiałów wyznaczano kinetykę procesu mielenia, czyli wpływ czasu mielenia na wybrane parametry uziarnienia, w szczególności na zawartość klasy ziarnowej 0–10 μm oraz wymiar ziarna d_{90} . Proces mielenia każdego materiału kontynuowano nawet po otrzymaniu wymaganej zawartości tej klasy, to jest 70%, aby ocenić możliwości technologiczne młyna. Wyniki badań zamieszczono na rysunkach 2 i 3.

W tabeli 2 zestawiono wyniki badań uziarnienia próbek spełniających wymóg technologiczny uziarnienia wraz z podaniem czasu ich mielenia. Na rysunkach 4–6 zamieszczono kompletne składy ziarnowe tych próbek. Rysunki te stanowią wynik generowany przez oprogramowanie granulometru LAU, gdzie kolorem fioletowym przedstawiona jest krzywa sumacyjna, a kolorem niebieskim histogram (procentowy udział klas ziarnowych).

Rys. 2. Wpływ czasu mielenia wapieni i kredy na zawartości klasy ziarnowej 0–10 μm

Rys. 3. Wpływ czasu mielenia wapieni i kredy na wymiar ziarna d_{90} [μm]

Tabela 2
Wybrane parametry uziarnienia próbek poszczególnych materiałów (A, B, C)
spełniających podstawowy wymóg technologiczny uziarnienia

Próbka	Czas mielenia [min]	Klasa 0–10 μm [%]	Klasa 0–20 μm [%]	Wymiar ziarna d ₉₀ [μm]	Wymiar ziarna d ₉₇ [μm]
MWAa-1	5	95,34	97,07	6,30	19,08
MWBa-1	2,5	87,30	87,92	48,21	121,31
MWCa-4	15	84,35	94,71	13,13	28,08

Rys. 4. Uziarnienie próbki materiału A – czas mielenia $t = 5$ min

Rys. 5. Uziarnienie próbki materiału B – czas mielenia $t = 2,5$ min

Rys. 6. Uziarnienie próbki materiału C – czas mielenia $t = 15$ min

Próbki wszystkich materiałów zostały poddane granulacji bezciśnieniowej w granulatorze wibracyjnym (Sidor i in. 2014).

4. Podsumowanie wyników badań i wnioski

Użyte do badań materiały stanowiące nadawę do procesu mielenia różniły się znacznie uziarnieniem oraz pochodzeniem geologicznym. Materiał B miał uziarnienie 0–10 mm, materiał A – uziarnienie 0–4 mm, a materiał C – uziarnienie 0–6 mm.

We wszystkich przypadkach mielenia otrzymano wymagane uziarnienie próbek, czyli zawartość klasy 0–10 μm powyżej 70%. Najkorzystniejszy rezultat, 95,3% zawartości klasy 0–10 μm, uzyskano przy najdrobniejszym materiale (A) w czasie 5 min. Korzystny rezultat, 87,3% klasy 0–10 μm, otrzymano także przy znacznie „grubszym” materiale B, przy czym była to bardziej podatna na mielenie kreda. Materiał C wymagał znacznie dłuższego czasu mielenia, bo aż 15 minut. Wówczas uzyskano 84,3% klasy 0–10 μm, a wymaganą zawartość tej klasy (czyli 70%) uzyskano już w czasie około 6 minut.

Proces mielenia wszystkich materiałów zachodził w zamkniętej komorze, bez aeracji (przewietrzania komory). Były to niekorzystne warunki, które nie występują w młynach przemysłowych o działaniu ciągłym. Brak aeracji spowodował znaczne spowolnienie procesu mielenia wskutek szkodliwych zjawisk aglomeracji i „coatingu”. Jednak pomimo tych niekorzystnych warunków proces mielenia wibracyjnego był bardzo intensywny. Doświadczenia z eksploatacji wibracyjnych młynów przemysłowych

pracujących w sposób ciągły (Sidor 2002), a także młynów kulowych wskazują, że przy zastosowaniu aeracji komory szybkość mielenia znacznie się zwiększa, a w wielu przypadkach młynów nie można eksploatować bez wymuszonego przepływu powietrza lub innego gazu przez komorę.

Wyniki badań, pomimo ich sondażowego charakteru, potwierdzają możliwość bardzo drobnego mielenia wszystkich materiałów w młynie wibracyjnym, a zmielone w tych młynach materiały cechuje dobra podatność na granulację.

Literatura

- Andres K., Haude F., 2010, *Application of the Palla™ vibrating mill in ultra fine grinding circuits*, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 110, s. 125–131.
- Biń K., 2012, *Najnowsze tendencje w zakresie badań nad procesami granulacji* [materiały konferencyjne – niepublikowane].
- Gock E., Corell J., 2006, *Schwingmühlen*, BHM Berg- und Hüttenmännische, Monatshefte, vol. 151, issue 6, s. 237–242. <https://doi.org/10.1007/BF03165360>.
- Heffer P., Prud'homme M., 2014, *Short-Term Fertilizer Outlook 2014–2015*, IFA Strategic Forum, Marrakech, https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2014_ifa_marrakech_outlook_summary.pdf [dostęp: 12.10.2021].
- Heim A., 1998, *Procesy mechaniczne w inżynierii procesowej i urządzenia do ich realizacji*, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź.
- Malinowski P., Kołosowski M., Biskupski A., 2015, *Zapewnienie jakości produkcji granulowanych nawozów mineralnych* [materiały konferencyjne – niepublikowane].
- Rule C.M., 2010, *Stirred Milling – New Comminution Technology in the PGM Industry*, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 111, s. 101–107.
- Sidor J., 2005, *Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Sidor J., 2011, *Rozwój technologii wytwarzania proszków z zastosowaniem młynów wibracyjnych*, Powder & Bulk, Materiały Symp. i Masowe, wyd. specjalne SyMas 2011, s. 19–23.
- Sidor J., 2013, *Nowe młyny i układy mielenia w technologii rozdrabniania rud i surowców mineralnych*, [w:] Klich A., Kozieł A. (red.), *Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych: bezpieczeństwo – jakość – efektywność: monografia*, ITG KOMAG, Gliwice, s. 267–279.
- Sidor J., Drzymała Z., 2002, *Synteza konstrukcji przemysłowego młyna wibracyjnego o niskiej częstotliwości drgań do mielenia tlenku chromu na sucho*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej – Budowa i Eksploatacja Maszyn, nr 9, s. 405–414.

- Sidor J., Wójcik M., Kordek J., 1997, *Fine grinding of hard ceramic waste in the rotary-vibration mill*, [w:] *Waste materials in construction: putting theory into practice: proceedings of the International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCON'97, Houthem St. Gerlach, the Netherlands, 4–6 June 1997*, Elsevier Science, s. 591–598.
- Sidor J., Wyszomirski P., Feliks J., Tomach P., Mazur M., 2014, *Sondażowe badania procesu bardzo drobnego mielenia i granulowania dolomitu i wapienia oraz rozpoznanie złóż dolomitów i wapieni* [prace zlecone AGH – niepublikowane].
- Tamblyn R.J., 2009, *Analysis of Energy Requirements in Stirred Media Mills*, School of Chemical Engineering, The University of Birmingham [rozprawa doktorska].
- Tomach P., 2017a, *Model procesowy młyna wibracyjnego uwzględniający wpływ elementu intensyfikującego proces mielenia*, *Przemysł Chemiczny*, t. 96, nr 12, s. 2467–2470.
- Tomach P., 2017b, *Badania intensyfikacji procesu mielenia w młynie wibracyjnym*, *Przemysł Chemiczny*, t. 96, nr 9, s. 1893–1897.
- Tomach P., 2019, *An attempt to increase technological capabilities of laboratory vibratory mills by changing the construction of chamber*, [w:] Kotwica K. (red.), *New trends in production engineering: monograph. Pt. 1, Engineering and technology*, Sciendo, Warszawa, s. 195–205.
- Tomach P., 2020, *Wybrane wyniki badań bardzo drobnego mielenia w laboratoryjnych młynach wibracyjnych*, [w:] Krauze K. (red.), *Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie 2020: monografia: praca zbiorowa*, Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 127–135.
- Warych J., 2004, *Aparatura chemiczna i procesowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.