



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2023.5>

Zastosowanie kruszarki wibracyjnej do przygotowania nadawy do procesu granulacji

Marcin Mazur – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Jacek Feliks – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: Do przygotowania nadawy, wapienia do granulacji bezciśnieniowej, przez bardzo drobne kruszenie, zastosowano laboratoryjną wibracyjną kruszarkę szczękową z kinematycznym wymuszeniem ruchu drgającego szczęk. Kruszarka ta charakteryzuje się wysokim średnim stopniem rozdrobnienia 30÷50. W procesie kruszenia wibracyjnego wytworzono nadawę do granulacji o zawartości klasy ziarnowej 0÷200 µm, w zakresie 46,2÷69,6%. Następnie przeprowadzono badania granulowania w rynnowym granulatorze wibracyjnym. Uzyskano bardzo dobre rezultaty granulowania materiału uzyskanego z kruszarki wibracyjnej. Oznacza to, że kruszarka wibracyjna o niższym od każdego ze znanych młynów jednostkowym poborze energii, może znaleźć zastosowanie do produkcji granulatów nawozów mineralnych.

Słowa kluczowe: granulacja nawozu, kruszarka wibracyjna, kruszenie wibracyjne

The use of vibratory jaw crusher for feed preparing for granulation process

Abstract: Feed (limestone) for non-pressure granulation was prepared by very fine crushing in laboratory vibratory jaw crusher with kinematic actuation of crushers jaws. The crusher is characterized by high average degree of fragmentation (30÷50). Produced feed contain grain class 0÷200 microns in the range of 46.2%÷69.6%. Then, granulation tests were carried out in a vibrating chute granulator. Very good granulation results were observed for the material obtained from the vibrating crusher. This means that vibratory jaw crushers, which have lower energy consumption than any mills, can be used for production of granulated mineral fertilizers.

Keywords: fertilizer granulation, vibratory crusher, vibratory crushing, fine crushing

1. Wprowadzenie

W każdej z technologii wytwarzania granulowanych nawozów mineralnych występuje proces przygotowania materiału mineralnego przez poddanie go procesowi mielenia [1]. Proces ten zachodzi najczęściej w młynach z mielnikami swobodnymi, z których najbardziej popularne są młyny grawitacyjne, nazywane też kulowymi lub rurowo-kulowymi [2, 3]. Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne i parametry technologiczne tych młynów podano w pracy [4]. Młyny te cechuje znaczne zapotrzebowanie energii, stąd podejmowane są prace eksperymentalne nad zastosowaniem w procesach mielenia nowych maszyn rozdrabniających o znacznie większych możliwościach technologicznych, mniejszym zapotrzebowaniu na energię, a w szczególności niższych kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Ponadto można zaobserwować rosnące zapotrzebowanie na nawozy granulowane [5] oraz wzrost cen energii elektrycznej. Stąd w pracy zamieszczono wyniki wstępnych badań zastosowania wibracyjnej kruszarki szczękowej do przygotowania nawozu mineralnego - kamienia wapiennego do granulacji bezciśnieniowej. Kruszarkę tę cechują duże możliwości technologiczne, w porównaniu z powszechnie stosowanymi kruszarkami szczękowymi, w szczególności kilkakrotnie większy stopień średni rozdrobnienia [6]. Wykazały to wyniki wcześniejszych badań porównawczych (przeprowadzonych w Katedrze Inżynierii Maszyn i Transportu) w trzech kruszarkach szczękowych: wibracyjnej kruszarce KW 40/1 o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego szczęk, wibracyjnej kruszarce o bezwładności o wymuszeniu ruchu drgającego KWB-d oraz w klasycznej kruszarce szczękowej o prostym ruchu szczęki KS. Nadawa – materiał podawany do kruszenia do wszystkich kruszarek miała uziarnienie w zakresie 0÷40 mm. Najdrobniejszy produkt kruszenia o zawartości klasy ziarnowej 0÷1,0 mm w ilości ponad 60% otrzymano w kruszarce wibracyjnej



KW 40/1. Udział tej klasy w produkcie kruszenia z klasycznej kruszarki KS wynosił tylko około 10%. W badaniach procesu kruszenia w kruszarce KW 40/1 przyjęto szczelinę wylotową szczęk 1,5 mm. Szczelina wylotowa ma największy wpływ na uziarnienie produktu kruszenia i można ją zmniejszyć nawet do 0,5 mm, co jak wykazały badania [4, 6, 7] spowoduje korzystne zwiększenie udziału klasy 0÷1,0 mm oraz drobniejszych klas.

Na podstawie uzyskanych wyników zdecydowano się przeprowadzić badania kruszenia wibracyjnego i granulowania kamienia wapiennego do wykorzystania go jako nawóz granulowany. Do badań kruszenia wybrano wibracyjną kruszarkę szczękową o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego, charakteryzującą się najlepszymi parametrami technologicznymi. Do badań granulacji beciśnieniowej przyjęto laboratoryjny granulator wibracyjny [8, 9, 10]. Możliwość zastosowania tego granulatora potwierdziły korzystne wyniki badań granulacji beciśnieniowej kilku surowców mineralnych (w tym wapieni) zmielonych, w młynie wibracyjnym [11].

2. Cel i metoda badań

Celem badań było określenie możliwości przygotowania nadawy do procesu granulacji beciśnieniowej w laboratoryjnej wibracyjnej kruszarce szczękowej. Materiałem użytym do badań był kamień wapienny z kopalni „Czatkowice” w Krzeszowicach, zwany dalej wapieniem w stanie suchym o uziarnieniu 0÷40 mm – oznaczany dalej symbolem NK.

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. Etap pierwszy obejmował badania procesu kruszenia wibracyjnego, etap drugi granulację beciśnieniową przeprowadzaną w granulatorze wibracyjnym rynnowym. Aby stwierdzić wpływ uziarnienia na możliwość granulacji wapienia zdecydowano o przeprowadzeniu badań procesu granulacji przy dwóch wariantach uziarnienia nadawy, to jest „drobnej” o uziarnieniu poniżej 0,5 mm – oznaczanej dalej symbolem ND oraz „grubej” o uziarnieniu poniżej 2,0 mm – oznaczanej dalej symbolem NG. Oba warianty nadawy wydzielano z próbki pierwotnej produktu kruszenia wibracyjnego – przez odsianie na sitach: 2 mm i 0,5 mm.

W procesie kruszenia wibracyjnego przyjmowano masę próbki 1 kg, częstotliwość drgań szczęk kruszarki wynosiła 20 Hz, szczelina wylotowa 0,5 mm.

W procesie granulacji przyjmowano masę próbki 0,5 kg, częstotliwość drgań rynny wynosiła 16 Hz. Jako lepszycze stosowano wapno hydratyzowane 2% oraz wodę wodociągową w ilości średnio 10% do nadawy NG oraz 12% do nadawy ND.

3. Stanowiska badawcze kruszarki i granulatora

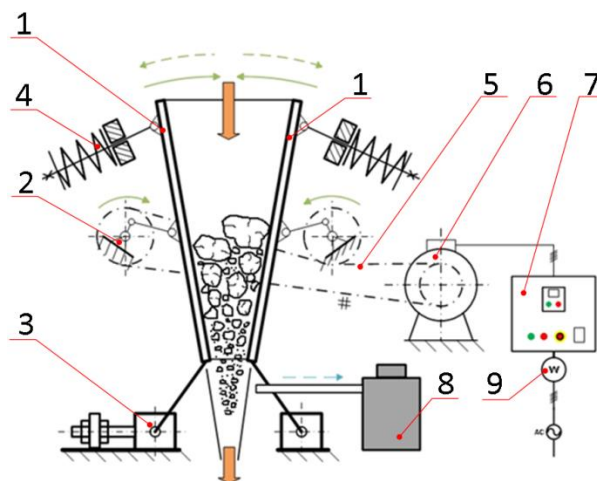
Stanowisko badawcze wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1 przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widok stanowiska laboratoryjnego wibracyjnej kruszarki szczękowej o oznaczeniu KW 40/1

Stanowisko laboratoryjne składa się z wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1, układu ciągłego zasilania nadawą w postaci dozownika elektromagnetycznego, układu zasilania i regulacji częstotliwości drgań szczęk kruszarki (przebiegiem częstotliwości - zwany dalej falownikiem), układu pomiaru mocy czynnej współpracującego z komputerem rejestrującym oraz układu odpylania i oczyszczania powietrza. Podczas określania składu ziarnowego nadawy i produktu kruszenia korzystano z w pełni wyposażonego stanowiska do analizy sitowej materiałów uziarnionych. Dodatkowo w skład stanowiska wchodzi komplet szczelinomierzy oraz innych narzędzi służących do regulacji nastaw parametrów pracy kruszarki.

Głównym elementem stanowiska laboratoryjnego jest wibracyjna kruszarka szczękowa KW 40/1 przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat budowy laboratoryjnej, wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1

1 - szczęki, 2 - wibrator kinematyczny, 3 - mechanizm regulacji szczeliny wylotowej, 4 - układ sprężysty, 5 - przekładnia łańcuchowa, 6 - silnik elektryczny, 7 - układ zasilania i sterowania częstotliwością drgań szczęk kruszarki, 8 - układ odpylania i oczyszczania powietrza, 9 - watomierz rejestrujący pobór mocy czynnej

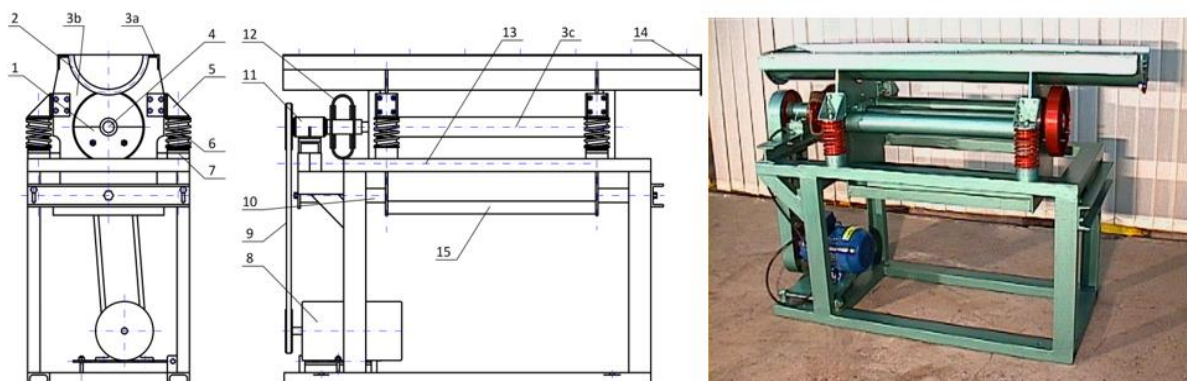
Zespół roboczy kruszarki KW 40/1 przedstawionej na rysunku 2 stanowią dwie ruchome szczęki (1) zamocowane wahliwie u dołu. Układy sprężyste (4) dociskają obie szczęki do rolek napędowych wibratorów kinematycznych (2). Jedna ze szczęk ma mechanizm regulacji szczeliny wylotowej (3).

Oba wały wibratora sprzężone są przekładnią łańcuchową (5), napędzaną z silnika elektrycznego (6). Dzięki przekładni łańcuchowej (5), ruch szczęk zachodzi w sposób przeciwsobny, to znaczy jednocześnie szczęki zbliżają się do siebie lub od siebie oddalają. Kruszarka ma możliwość regulacji skoku obu szczęk. Układ zasilania i sterowania częstotliwością drgań (7) umożliwi regulację prędkości obrotowej wałów wibratorów, a tym samym częstotliwości drgań szczęk oraz sprzężony jest z watomierzem rejestrującym pobór mocy czynnej (9), który posiada możliwość archiwizacji wyników pomiarów. Odpylanie strefy wylotu z kruszarki oraz oczyszczanie powietrza zapewnia odkurzacz przemysłowy, dodatkowo współpracujący z filtrem odśrodkowym (8).

Podstawowe parametry szczękowej kruszarki wibracyjnej KW 40/1

Wymiary wlotu: 100 x 160 mm, zakres regulacji szczeliny: 0,5÷10 mm, częstotliwość drgań szczęk: 8÷25 Hz, moc silnika 2,2 kW, maksymalny wymiar ziaren nadawy: 40 mm, wymiary 840 x 420 x 980 mm, masa: 145 kg, zakres wydajności: 50÷500 kg/h.

Stanowisko badawcze granulatora wibracyjnego przedstawiono na rysunku 3.



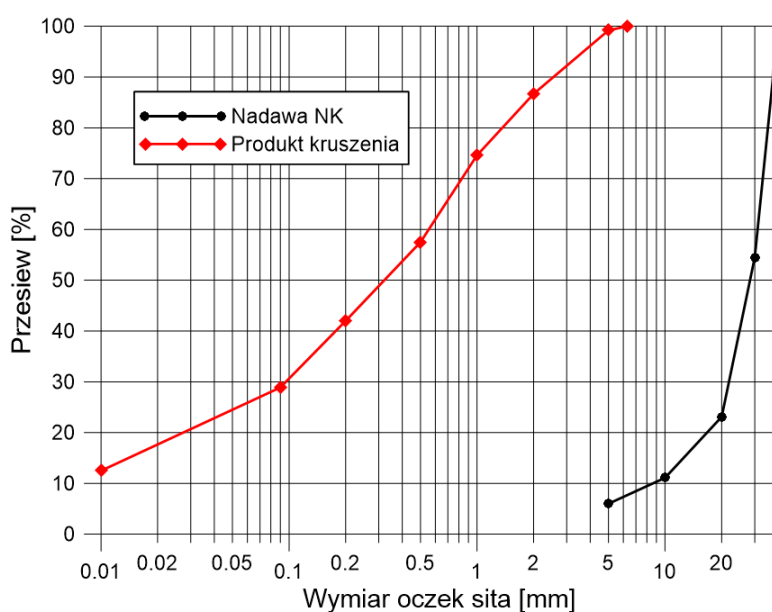
Rys. 3. Schemat i widok stanowiska laboratoryjnego wibracyjnego granulatora rynnowego

Głównym elementem granulatora jest rynna (2) o długości 1500 mm i promieniu 125 mm zakończona kołnierzami (14), służącymi do mocowania dodatkowych rynien lub ograniczników wysokości wysypu. Rynna jest przymocowana do kątowników (3a) stanowiących razem z płytami czołowymi (3b) i rurami usztywniającymi (3c) podstawę pod rynnę. Dodatkowo w dolnej części płyt przyspawane są ceowniki (15) z nawierconymi otworami służącymi do przymocowania dodatkowej masy w celu ewentualnego korygowania trajektorii drgań, tak aby uzyskać drgania kołowe. Masa drgająca oparta jest na sprężynach (6) poprzez uchwyty (5), które są skonstruowane w sposób umożliwiający ich obrót wokół własnej osi. Sprężyny ułożone są w gniazdach, pod którymi znajdują się podkładki (7) służące do zmiany kąta nachylenia rynny, całość opiera się na ramie (13) wykonanej z ceowników. Silnik napędowy (8) o obrotach znamionowych 1440 obr/min zasilany jest przez przemiennik częstotliwości (falownik) i umożliwia pracę z prędkością obrotową od 400 obr/min do 1800 obr/min. Moment obrotowy z silnika przekazywany jest poprzez przekładnię pasową (9) na wałek pośredni (11), a następnie przez sprzęgło oponowe (12), na wał wibratora (4), na którego końcach są zamontowane wymienne masy niewyważone (1). W wyniku zastosowania takiego napędu uzyskuje się wzbudzenie rynny do drgań kołowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi rynny. Laboratoryjny rynnowy granulator wibracyjny jest urządzeniem nadrezonansowym, w którym drgania wywołane są przez jednomasowy wibrator bezwładnościowy. Konstrukcja wibratora bezwładnościowego pozwala na zmianę mas niewyważonych, co wpływa na amplitudę drgań. W granulatorze zastosowano tłumiki (10) obniżające amplitudę drgań rezonansowych. Granulator posiada również możliwość zainstalowania w rynnie ślimaka transportowego w celu

zwiększenia wydajności całkowitej. Do przeprowadzenia badań opisanych w tym rozdziale ślimak transportowy nie był wykorzystywany. Stanowisko pozwala na regulację amplitudy drgań od 2,2 mm do 5,6 mm. Podstawowe parametry granulatora wibracyjnego: długość rynny: 1 500 mm, promień rynny: 125 mm, kąt nachylenia: 0°, częstotliwość drgań rynny: 15÷30 obr/min, moc silnika wibratora: 1,5 kW, amplituda drgań: 2,2; 3,0; 3,8; 4,8; 5,6 mm, średnica i skok ślimaka: 250 mm, prędkość obrotowa ślimaka: 80÷140 obr/min. Wymiary: długość 1 900 mm, szerokość 880 mm, wysokość 1 250 mm, masa: 115 kg, zakres wydajności: 100÷250 kg/godz.

4. Realizacja i wyniki badań kruszenia wibracyjnego

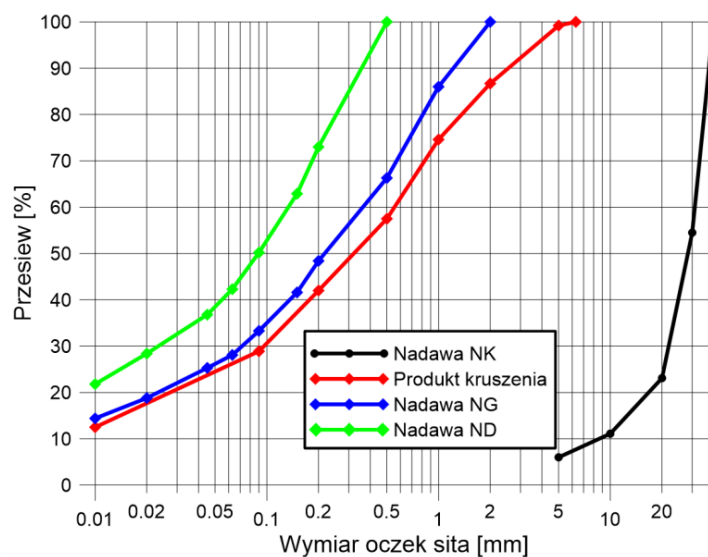
Nadawę NK do procesu kruszenia w kruszarce wibracyjnej podawano ręcznie, starając się, aby strefa kruszenia była wypełniona do około połowy jej wysokości, bowiem wcześniejsze badania wykazały [4, 6], że przy takim wypełnieniu strefy kruszenia kruszarka uzyskiwała największą wydajność. Każdą próbę powtarzano dwukrotnie, a końcowe wyniki są średnią arytmetyczną z tych prób. Analizę granulometryczną nadawy i produktu kruszenia wykonywano na sucho zgodnie z PN C-04501:1971. Wydajność kruszarki wyznaczano przez pomiar czasu kruszenia od rozpoczęcia procesu do jego zakończenia. Na rysunku 4 przedstawiono w formie graficznej uziarnienie nadawy NK oraz produktu kruszenia – próbki pierwotnej.



Rys. 4. Uziarnienie wapienia: nadawy NK i produktu kruszenia z kruszarki

Uziarnienie produktu kruszenia (próbki pierwotnej) z kruszarki mieściło się w 100% w klasie 0-6,3 mm, przy czym udział klasy 0÷200 µm, wynosił 40,2%.

Składy ziarnowe materiałów wytypowanych do granulacji (nadawa NG oraz ND) przedstawiono na rysunku 5.

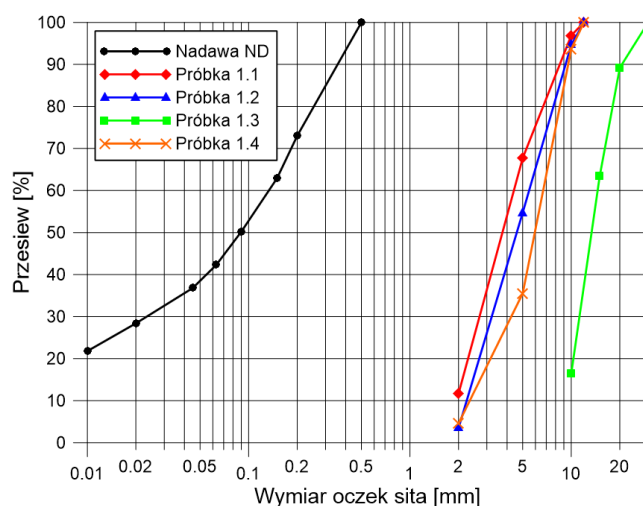


Rys. 5. Składy ziarnowe materiałów poddanych granulowaniu wibracyjnemu (nadawy NG oraz ND)

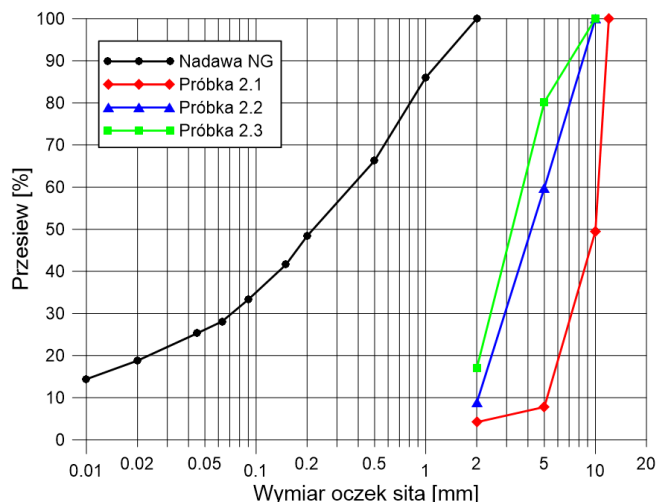
Nadawy do granulacji: NG (odsiana na sicie 2,0 mm) zawierała 46,2% klasy 0÷200 μm , natomiast nadawa ND (odsiana na sicie 0,5 mm) zawierała 69,6% klasy 0÷200 μm , ponad 50% klasy ziarnowej 0÷100 μm , oraz około 28% klasy 0÷20 μm . Ziarna o wymiarach poniżej 200 μm są bardzo pożądane w procesie granulacji i należy dążyć do jak największego ich udziału w nadawie granulatora.

5. Wyniki badań granulacji bezciśnieniowej

Zgodnie z przyjętą metodą i programem, badania granulacji bezciśnieniowej przeprowadzono przy nadawie ND (o uziarnieniu poniżej 0,5 mm) – seria 1, oraz nadawie NG (o uziarnieniu poniżej 2,0 mm) – seria 2, następnie określono składy ziarnowe produktów granulacji. Wyniki (składy ziarnowe) przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Jako lepszczca użyto wapna hydratyzowanego w ilości 2% oraz wody w ilości 12% w serii 1, oraz 10% w serii 2.



Rys. 6. Uziarnienie nadawy ND i produktów granulacji w serii 1



Rys. 7. Uziarnienie nadawy NG i produktów granulacji w serii 2

Materiał fotograficzny produktów obu serii przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Produkt granulacji serii 1



Rys. 9. Produkt granulacji serii 2

Po granulowaniu określono wilgotność poszczególnych próbek w danych seriach granulowania. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Wilgotność poszczególnych próbek wykorzystanych do granulowania

Tabela 1

Numer próbki	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3
Wilgotność masowa, [%]	13,0	14,0	15,0	14,4	13,0	12,0	12,0

6. Podsumowanie

Podczas bardzo drobnego kruszenia kamienia wapiennego, przeprowadzonego w wibracyjnej kruszarce szczękowej, otrzymano bardzo wysokie stopnie rozdrobnienia: $i_{90}=14,7$ oraz $i_{50}=88,4$. Z produktu kruszenia (próbek pierwotnych) wydzielono dwie klasy ziarnowe $0\div 2,0$ mm oraz $0\div 0,5$ mm, które były nadawami do procesu granulacji w granulatorze wibracyjnym. Oba rodzaje nadawy granulowały się dobrze. Korzystniejsze rezultaty, ze względu na udział granulatu w pożądanym zakresie



2÷5 mm, uzyskano przy nadawie „grubszej” NG. Dalsza ocena przydatności granulacji powinna być przeprowadzona przez odpowiednie instytucje badawcze.

Otrzymane wyniki badań z procesu kruszenia wibracyjnego oraz granulacji beziśnieniowej, wskazują na dobrą przydatność obu maszyn przeróbczych do wytwarzania granulowanych nawozów mineralnych.

Ze względu na niższe (niż znane młyny) zapotrzebowanie energii, zastosowanie wibracyjnej kruszarki szczękowej do przygotowania nadawy do procesu granulacji, może znacznie obniżyć koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, a w szczególności koszty poboru energii (szczególnie w porównaniu z młynami kulowymi). Wyniki badań wykazują potencjalną możliwość zastosowania wibracyjnej kruszarki szczękowej do bardziej ekonomicznego przygotowania nadawy do granulacji.

Literatura

1. Malinowski P., Kołosowski M., Biskupski A.: Zapewnienie jakości produkcji granulowanych nawozów mineralnych, *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, tom II, Oficyna Wydawnicza PTZP, s. 308-319, Opole 2015
2. Duda W.: *Cement Data Book*, 3rd Edition, Bauverlag GmbH, Berlin, 1985
3. Kurdowski W.: *Poradnik technologa przemysłu cementowego*, Wyd. Arkady, 1981
4. Mazur M.: *Badania efektywności procesu kruszenia w wibracyjnych kruszarkach szczękowych*, Praca doktorska, Kraków, 2016
5. Heffer P., Prud'homme M.: *Short-Term Fertilizer Outlook 2014 – 2015*, IFA Strategic Forum, Marrakech, November 2014
6. Sidor J., Mazur M.: *Badania eksperymentalne procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w kruszarkach szczękowych*, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, ISSN 0368-0827, R. 52 nr 3, s. 235–237, 2013
7. Sidor J., Mazur M., Feliks J.: *Badania rozdrabniania wibracyjnego surowców mineralnych i materiałów ceramicznych. Examination of mineral and ceramic materials vibratory crushing. Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie: III międzynarodowa konferencja: Wisła, 15–17 czerwca 2016*
8. Feliks J.: *Badania i modelowanie wibracyjnych grudkowników rynnowych. Research and modeling of vibratory chute clump-producing device*. Wydawnictwa AGH 186 (Rozprawy Monografie), Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; ISSN 0867-6631; 326), 2017
9. Feliks J.: *Granulowanie drobnoziarnistych odpadów z kopalń kruszyw skalnych dla potrzeb remineralizacji podłoża glebowego - Granulation of small-size wastes from stone quarries for subsoil remineralization*. *Przemysł Chemiczny*; ISSN 0033-2496. t. 96 nr 9, s. 1860–1863. 2017
10. Feliks J.: *Performance tests of waste coal sludge granulation*. *Polish Journal of Environmental Studies*. vol. 21 no. 5A, s. 69–72, 2012
11. Sidor J.: *Nowe młyny i układy mielenia w technologii rozdrabniania rud i surowców mineralnych. Innowacyjne i przyjazne dla środowiska techniki i technologie przeróbki surowców mineralnych: KOMEKO, Gliwice, ITG KOMAG*, s. 267–279, 2013