

Andrzej HEIM\*, Tadeusz GLUBA\*, Bogusław KOCHAŃSKI\*

## **GRANULACJA AGLOMERACYJNA DROBNOZIARNISTYCH ODPADÓW PRZEMYSŁU METALURGICZNEGO**

Badano proces granulacji pyłów odlewniczych i szlamu szlifierskiego. Stwierdzono możliwość przetworzenia ich w granulaty w granulatorze przesypowym. Określono warunki ich granulowania oraz wpływ zawartości cieczy wiążącej na rozkład wielkości średnic i wytrzymałość granulek na ściskanie.

### **WPROWADZENIE**

Jednym z istotnych problemów procesów produkcyjnych jest wprowadzanie do środowiska różnego typu odpadów stałych, które z reguły powodują jego zanieczyszczenie. Do najbardziej uciążliwych należą pyły powstające w wielu miejscach odlewni, zatrzymane w urządzeniach odpylających, oraz szlamy szlifierskie. Wynika to z ich drobnoziarnistości oraz składu chemicznego. W skład mas formierskich, rdzeniowych oraz szlamów wchodzi związki trwałe jedynie w zakresie temperatur do 500 °C. W procesie odlewniczym oraz podczas szlifowania podlegają one działaniu znacznie wyższych temperatur, w których następuje termodestrukcja z utworzeniem przeważnie niskomolekularnych, najczęściej wysokotoksycznych połączeń (Janio et al. 1985). Pyły odpadowe zlokalizowane na składowiskach czy wysypiskach stwarzają możliwość emisji szkodliwych substancji do atmosfery na drodze wtórnego pylenia, jak również wnikania do gleby i wód w wyniku wymywania wodami opadowymi (Rzeszut i Żmudzińska 1985).

Zmiana postaci pyłów w granulaty eliminuje pylenie, zmniejsza szybkość wymywania w wyniku redukcji powierzchni właściwej, przez co umożliwia ich transport i składowanie na wysypiskach, tym samym ogranicza zanieczyszczenie środowiska naturalnego (Astańowicz et al. 1986).

Zgranulowane odpady metalurgiczne mogą być wykorzystane w zależności od składu chemicznego jako surowiec wtórnego przetopu lub materiał zastępujący kruszywo w budowie dróg.

W każdym przypadku wymaga się aby granulaty miały odpowiednie uziarnienie oraz wytrzymałość mechaniczną. Poznanie czynników wpływających na proces i

---

\*Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej, ul. Wólczańska 175, 90-924 Łódź.

właściwości granulek jest zasadniczym problemem, którego rozwiązanie gwarantuje przydatność atrakcyjnej ekonomicznie granulacji przesypowej do utylizacji drobnoziarnistych odpadów.

Przegląd dotychczas opracowanych modeli aglomeracji układów (Batterham et al. 1990; Heim i Antkowiak 1988) wykazuje, że brak, jak dotąd, modelu na tyle uniwersalnego, aby pozwalało to wyeliminować całkowicie potrzebę prowadzenia badań w urządzeniach pilotowych. Szczególnie uwidacznia się to w przypadku konieczności granulowania substancji dotychczas niegranulowanych. Wtedy niezbędne stają się kompleksowe badania przebiegu procesu w celu ustalenia warunków jego prowadzenia oraz właściwości wytworzonego granulatu.

## DOŚWIADCZENIA

Badania wykonano dla trzech rodzajów pyłu odlewniczego oraz szlamu szlifierskiego w granulatorze bębnowym o działaniu okresowym, o średnicy 0,3 m i długości 0,24 m, przy stałej prędkości kątowej bębna  $0,45 \text{ s}^{-1}$ .

Właściwości fizyczne badanych materiałów zestawiono w tabeli.

Tabela

| Lp. | Materiał | Gęstość nasypowa<br>$\rho_n$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Gęstość<br>$\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Porowatość<br>$\epsilon$<br>[ - ] | Średnica<br>$d_z$<br>[μm] |
|-----|----------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 1   | Pył 1    | 760                                                  | 2670                                      | 0,404                             | 46,97                     |
| 2   | Pył 2    | 850                                                  | 2140                                      | 0,603                             | 35,24                     |
| 3   | Pył 3    | 1590                                                 | 3320                                      | 0,771                             | 267,95                    |
| 4   | Szlam    | 1090                                                 | 4520                                      | 0,759                             | 61,34                     |

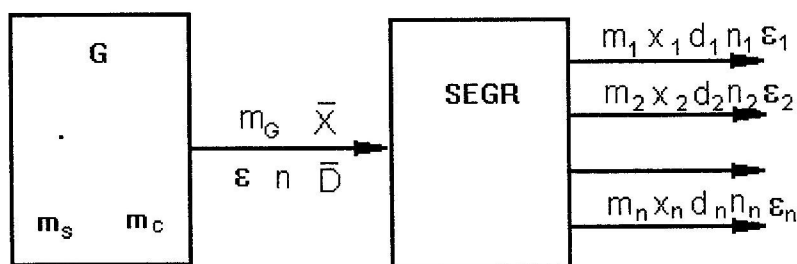
Materiał nawilżano przed bębniem, wprowadzając do granulatora wsad o założonej wilgotności. Dla każdego materiału określano zmiany zachodzące w czasie trwania procesu na podstawie analizy wyników badań całego wsadu. Celem badań było określenie stopnia nawilżenia wsadu niezbędnego dla pomyślnej granulacji, oraz analiza kinetyki procesu.

## WYNIKI

W granulatorze przesypowym ziarna ciała stałego oraz faza ciekła ulegają wzajemnym przegrupowaniom, a w ich wyniku powstaje nowy stan uporządkowania charakterystyczny dla granulatu. Granulat jest produktem polidispersyj-

nym. W poszczególnych jego frakcjach obserwuje się różny sposób ułożenia ziaren, jak i stopień wypełnienia przestrzeni międzyziarnowych. W zależności od warunków prowadzenia procesu produkt granulacji może mieć zróżnicowany kształt.

Realizacja procesu doświadczalnego przebiega według schematu przedstawionego na rys. 1.



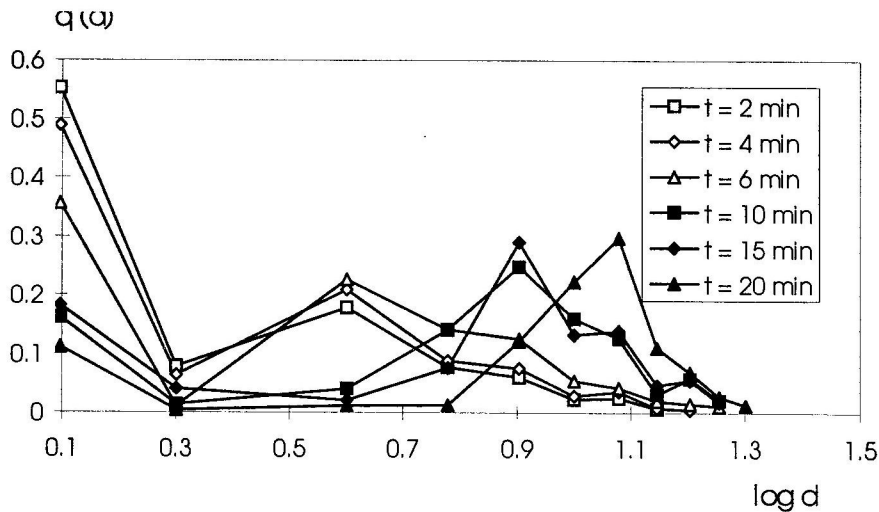
Rys. 1. Schemat procesu granulacji

Postęp procesu wyraża się ubytkiem ilości niezgranulowanego materiału. Ilość surowca przechodzącego w postać granulek zależy od poziomu nawilżenia oraz wielkości istniejących zarodków.

W przypadku granulacji okresowej masa ciała stałego i ilość zawartej w nim cieczy nie ulega zmianie. Proces może być zakłócony przez zjawisko oblepiania wnętrza bębna, które przyczynia się do zmniejszenia wartości stopnia zgranulowania i nie pozwala na bezpośrednie bilansowanie strumieni substratów i granulatu.

Trwałość powstających podczas bębnowania granulek uzależniona jest od oddziaływań międzyziarnowych w uformowanych aglomeratach (zwłaszcza w ich warstwach powierzchniowych). Gdy oddziaływania te nie są zbyt mocne, granulki ulegają łatwo deformacji, ścieraniu, kruszeniu a nawet rozpadowi. Suma koalescencji i dekoalescencji daje w efekcie produkt procesu – granulatu. Jest on różnorodny pod względem wielkości uziarnienia. Zawiera w swoim składzie cząstki różnej wielkości, od ziaren niezgranulowanego surowca po granulki o kilkudziesięciomilimetrowej średnicy. Przykładowe zmiany składów ziarnowych granulatów szlamu szlifierskiego otrzymanych dla różnych czasów granulacji przedstawiono na rys. 2.

Na osi odciętych odłożono wartości  $\log d$  (średnicy przeciętnej granulek danej frakcji, mm), a na osi rzędnych wielkości udziałów masowych poszczególnych frakcji. Na podstawie wyników analizy frakcyjnej produktu obliczono wartości średniej średnicy granulek otrzymanych w poszczególnych doświadczeniach. Na rys. 3 zestawiono wartości przeciętnych średnic granulatu –  $D(t)$  wyznaczonych w oparciu o wyniki doświadczalne granulacji szlamu po 2, 4, 6, 10, 15 i 20 minutach trwania procesu, prowadzonego dla trzech stopni nawilżenia wsadu –  $X$ : 0,29, 0,30 i 0,31 kg wody/kg ciała stałego.



Rys. 2. Zależność udziałów poszczególnych frakcji od wielkości średnic w różnych fazach procesu dla szlamu szlifierskiego

Wyniki te posłużyły do analizy kinetyki procesu granulacji. Przeciętna wartość wielkości średnicy granulatu, przyjmowana najczęściej jako miernik postępu procesu, uzależniona jest od udziałów w procesie granulacji takich zjawisk jak: kruszenie i rozpad ( $g$ ), ścieranie i zarodkowanie ( $i$ ) oraz koalescencja ( $r$ ). Udziały te wiążą zależność:

$$g + i + r = 1 \quad (1)$$

$$g \cdot \bar{D} + i \cdot \bar{D} + r \cdot \bar{D} = \bar{D} \quad (2)$$

Po wyrażeniu przeciętnej średnicy granulek  $\bar{D}$  jako wielokrotności przeciętnego ziarna surowca  $d_z$  oraz rozpatrzeniu łącznie prawdopodobieństwa kruszenia, rozpadu, ścierania, i zarodkowania, równanie (2) przyjmie postać (3)

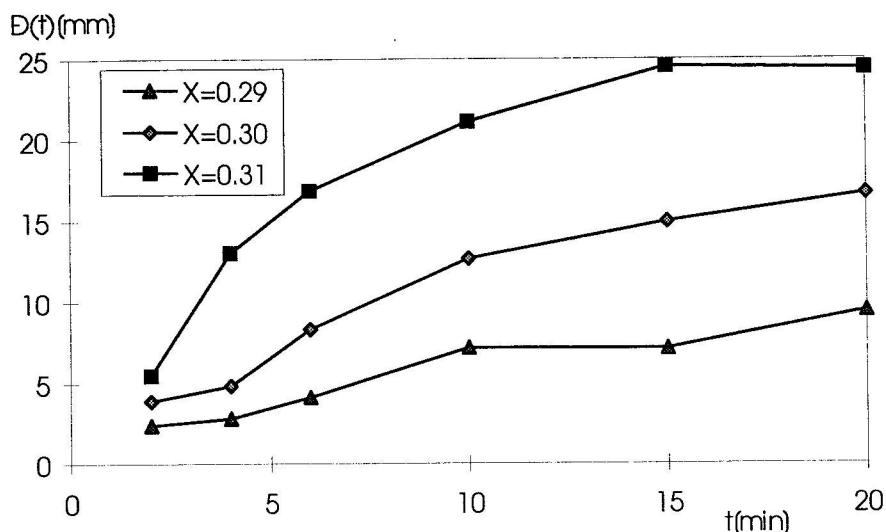
$$h \cdot \bar{D} + r \cdot \bar{D} = p \cdot d_z \quad (3)$$

gdzie:  $h = g + i$ ,

$p$  – stała.

Uwzględniając wykładniczą zmianę udziału koalescencji ( $r$ ) z czasem granulacji oraz stałość udziału  $h$  otrzymano zależność wiążącą przeciętną średnicę granulatu z czasem:

$$\frac{\bar{D}}{d_z} = \frac{1}{Q + \frac{1}{p} \exp(-k \cdot t)} \quad (4)$$



Rys. 3. Zmiana przeciętnej średnicy granulek w czasie dla różnych stopni nawilżenia wsadu szlamu szlifierskiego

Zależność (4) zawiera dwa człony wyrażające: koalescencję  $r = \exp(-k \cdot t)$  i

dekoalescencję  $Q = \frac{h}{p}$ .

W wyniku obliczeń uzyskano szczegółową postać równania kinetycznego granulacji szlamu szlifierskiego:

$$\frac{\bar{D}}{d_z} = \frac{1}{0,0022 + 7,4 \cdot 10^{-17} \cdot X^{-30} \cdot \exp(-0,125 \cdot t)} \quad (5)$$

Tempo wzrostu przeciętnej średnicy związane jest z czasem granulacji oraz zależy od stopnia nawilżenia. Dla czasów granulacji dłuższych od 15 min wzrost przeciętnej średnicy jest nieznaczny. Rozkłady wielkości średnic granulek wskazują na szybki zanik najdrobniejszych frakcji i przyrost ze wzrostem czasu udziału frakcji o coraz większych wymiarach. Podobny efekt obserwujemy w przypadku podwyższenia zawartości cieczy, co odzwierciedla otrzymana zależność (5).

Badania warunków granulowania pyłów z odlewni prowadzono stosując różne stopnie nawilżenia wodą:

- dla pyłu 2,  $X = 0,075; 0,0875; 0,0925; 0,9625; 0,1$  i  $0,1055$  kg wody/kg pyłu
- dla pyłu 1,  $X = 0,1; 0,15; 0,18; 0,20; 0,225; 0,23; 0,24$  i  $0,25$  kg wody/kg pyłu.

Próby granulacji pyłu 3 nie dały zadowalających rezultatów; utworzone granulki miały niewielką wytrzymałość i często podczas segregacji ulegały rozpadowi. Pył 3 zmieszany natomiast w równych proporcjach z pyłem 1 oraz pyłem 2 pozwolił uzyskać granulat o bardzo dobrych cechach jakościowych.

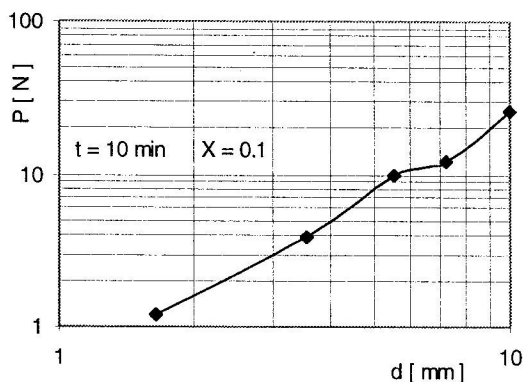
Otrzymane wyniki badań w przypadku granulacji pyłu 2 wykazały, że w warunkach nawilżenia wsadu poniżej 0,09 obserwuje się niski stopień zgranulowania (zawartość granulatu nie przekracza 20%). Przy nawilżeniu powyżej 0,1 kg wody/kg pyłu udział granulatu we wsadzie stanowił ponad 60%.

Badania wytrzymałości na ściskanie granulek otrzymanych w poszczególnych próbach wykazały, że najwyższą wytrzymałość granulek pyłu 2 uzyskano przy wilgotności wsadu 0,1 kg wody/kg pyłu. Przykładową zależność obciążenia niszczonego od średnicy przedstawiono na rys. 4.

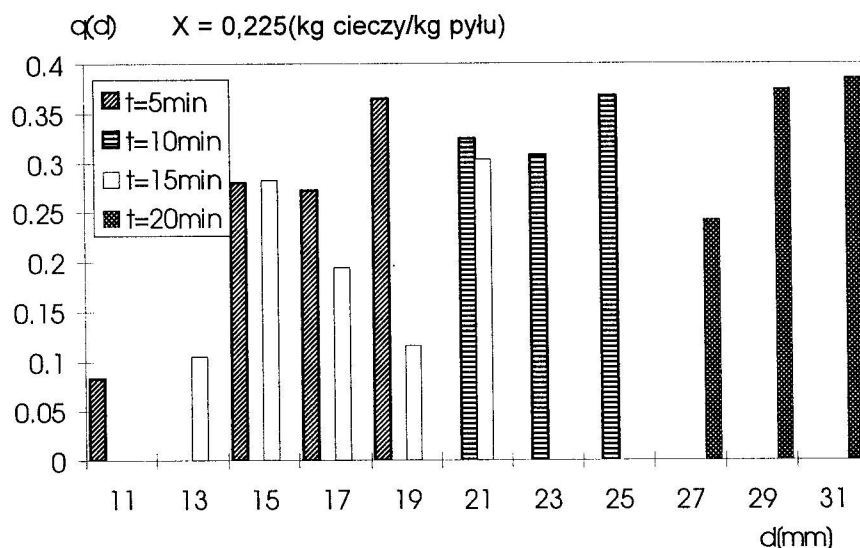
Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie granulek szlamu wykazały jej zależność od warunków suszenia. Najwyższą wytrzymałość miały granulki suszone w temperaturze 220 °C. Średnia wytrzymałość takich granulek wynosiła ok. 430 kPa.

Badania warunków granulacji prowadzono do uzyskania granicznych wartości nawilżenia, których przekroczenie czyniło granulację niemożliwą z racji przekształcenia złoża nawilżonego proszku w pastę. W warunkach podwyższonej zawartości cieczy obserwowano w produkcie zanik frakcji drobnych granulatu. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe rozkłady wielkości średnic granulek pyłu 1 otrzymanych przy zawartości cieczy wiążącej 0,225 kg wody/kg pyłu.

Na osi odciętych odłożono wartości wielkości średnic poszczególnych frakcji granulatu, a na osi rzędnych ich udziały masowe. Charakterystycznym zjawiskiem jest zanik w produkcie frakcji poniżej 10 mm już w pierwszej fazie granulacji (dla czasu przebywania 5 min), zawężanie się przedziału wielkości średnic produktu np. od 28 do 32 mm dla czasu granulacji 20 min, jak również wyrównywanie się udziałów poszczególnych frakcji.



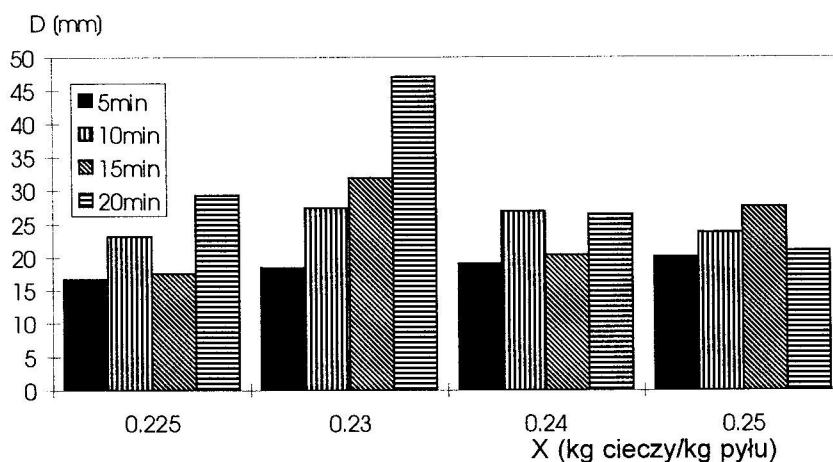
Rys. 4. Zależność obciążenia niszczonego od średnicy granulek pyłu 2



Rys. 5. Rozkłady wielkości średnic granulek w poszczególnych fazach procesu granulacji pyłu – 1 przy nawilżeniu 0,225 kg wody/kg pyłu

W miarę podwyższania zawartości cieczy w granulowanym materiale (ponad pewną wartość) postęp procesu granulacji wyrażony przez wzrost wielkości przeciętnej średnicy ulega zahamowaniu a nawet obserwuje się jej zmniejszenie. Dowodem takiego zachowania są przykładowe wyniki granulacji pyłu 1 przedstawione na rys. 6.

Na osi odciętych naniesiono wartości stopnia nawilżenia pyłu, na osi rzędnych zaś wielkości przeciętnej średnicy granulatu. Poszczególne kolumny ozna-



Rys. 6. Wpływ ilości cieczy wiążącej i czasu na wielkość przeciętnej średnicy granulek pyłu 1

czone w ten sam sposób przedstawiają granulat uzyskany dla takich samych czasów granulacji. Wzrost wielkości przeciętnej średnicy w całym zakresie zmian poziomu nawilżenia występuje jedynie dla czasu granulacji 5 min. Dla czasu 10 min wielkość maksymalną uzyskano przy nawilżeniu wsadu na poziomie 0,23 kg wody/kg pyłu. W warunkach wyższego nawilżenia rejestruje się spadek wielkości przeciętnej średnicy granulatu. Podobną, ale wyraźniejszą tendencję, obserwuje się dla czasu 15 i 20 min granulacji.

## PODSUMOWANIE

Stwierdzono możliwość uzyskania granulatów testowanych substancji odpadowych w procesie aglomeracyjnej granulacji przesypowej realizowanej w granulatorze bębnowym. Prawidłowy przebieg procesu wymaga utrzymania wielkości nawilżenia wsadu w dość wąskich granicach. Zakres zmian wynosi: 2% dla szlamu i 2,5% dla pyłów odpadowych. W przypadku granulowania szlamu poniżej stopnia nawilżenia 0,29 obserwuje się znaczny spadek wielkości przeciętnej średnicy oraz ilości granulatu (stopnia zgranulowania). Przekroczenie nawilżenia ponad 0,31 czyni granulację wręcz niemożliwą z powodu występujących jednocześnie procesów rozpadu i kruszenia oraz zbrylania wsadu już po 6 min bębnowania. Analogiczne zjawiska obserwowano podczas granulowania pyłów, gdy uzyskiwano stan równowagi układu kilku granulek, a przy nawilżeniu 0,23 po 20 minutach bębnowania nawet jednej granuli zawierającej cały materiał wsadu. Jest to potwierdzenie obserwacji Newitta i Conway-Jonesa (1958), jak również koalescencyjnego modelu wzrostu Kapura i Fuerstenau'a (1964). Zaproponowany model wyrażony zależnością (4), uwzględniający koalescencję oraz dekoalescencję, został sprawdzony dla szlamu szlifierskiego i będzie w dalszych badaniach poddawany praktycznej weryfikacji.

## LITERATURA

- ASŁANOWICZ M., GLUBA T., KOCHAŃSKI B., STROBIN W. (1986), *Agglomeracja pyłów odpadowych powstających w odlewni*, Przegląd Odlewnictwa 36, s.79.
- BATTERHAM R.J., CROSS M., THURLBY J.A. (1990), *A Review of Modeling In Agglomeration systems*, ICHIME – 5th International Symposium on Agglomeration, Brighton, 569–576.
- HEIM A., ANTKOWIAK W. (1988), *A Mathematical Model for Granulation Kinetics*, Chem. Eng. Science, 43, 1447–1456.
- JANIO K., CZAKIS-SULIKOWSKA D., PUSTELNIK N. (1985), *Ekologiczne aspekty termostruktury mas formierskich*, Ogólnokrajowa Konferencja Odlewnicza, Ustroń-Zawodzie, 2–3.09.1985 r., Mat. Konferencji s. 5–16.
- KAPUR P.C., FUERSTENAU D.W. (1964), *A Coalescence Model for Granulation*, Trans. AIME., 229, 348.



- NEWITT D.M., CONWAY-JONES J.M. (1958), *A Contribution to the Theory and Practice of Granulation*, Trans. Inst. Chem. Eng. 36, 422.
- RZESZUT J., ŻMUDZIŃSKA M. (1985), *Badania stopnia szkodliwości odpadów z technologii odlewniczych oraz określenie ich wpływu na środowisko naturalne*, Ogólnokrajowa Konferencja Odlewnicza, Ustroń-Zawodzie 2–3.09.1985 r., Mat. Konferencji, s. 17–27.

**Heim A., Gluba T., Kochański B.**, (1995), Agglomerative granulation of fine-grained wastes in metallurgical industry, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 29, 135–143 (Polish text)

Granulation of foundry dust and grinding sludges was tested. Transformation of these substances into granulated materials in a batch granulator was found feasible. Conditions of granulation and the effect of binding water content on size distribution and granule compressive strength were determined.