

## Wpływ szybkości nawilżania na rozmiar uzyskanego aglomeratu podczas granulacji talerzowej

Influence of the wetting rate on the size of the obtained agglomerate during disc granulation

Andrzej Obraniak<sup>1\*</sup>, Katarzyna Ławińska<sup>2</sup>, Remigiusz Modrzewski<sup>1</sup>, Roman Hejft<sup>3</sup>, Bogdan Derbiszewski<sup>4</sup>, Paweł Cwalina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, <sup>2</sup>Łukasiewicz-Łódzki Instytut Technologiczny, <sup>3</sup>Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika, Białostocka, <sup>4</sup>Wydział Politechniczny, Akademia Kaliska

---

### Abstrakt

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących aglomeracji bentonitu w granulatorach talerzowych o średnicy  $D=0,5-1,0$  m, przy nawilżaniu kroplowym złoża. Wykazano wpływ parametrów procesowych: szybkości nawilżania ( $dw/dt$ ), prędkości obrotowej talerza  $n$  i czasu granulacji  $t_n$  na średni wymiar granulatu  $d$  otrzymanego w czasie nawilżania. Złoże materiału sypkiego natryskiwano w trakcie dozowania, przy stałym natężeniu przepływu cieczy za pomocą zraszacza, który zapewniał kroplowe podawanie cieczy natryskowej. Proces granulacji prowadzono każdorazowo, aż do całkowitego zwilżenia materiału w aparacie. Stwierdzono, że parametry procesowe, a w szczególności parametry nawilżania mają istotny wpływ na kinetykę procesu (funkcję  $d = f(t)$ ). Wiąże się to z wpływem szybkości dostarczania cieczy na lokalne przewilżenie złoża, co w konsekwencji determinuje przewagę określonych mechanizmów tworzenia i wzrostu aglomeratów. Stwierdzono, że kinetyka granulacji talerzowej jest ściśle związana z intensywnością dostarczanej cieczy.

### Abstract

The paper presents the results of research on bentonite agglomeration in disc granulator with a diameter of  $D = 0.5-1.0$  m, with drop moistening of the bed. The influence of the process parameters was demonstrated: the wetting speed ( $dw / dt$ ), the rotational speed of the disc  $n$  and the granulation time  $t_n$  on the average size of the granulate  $d$  obtained during moistening. The bed of bulk material was sprayed during dispensing, at a constant liquid flow rate, by means of a sprinkler which provided droplet delivery of the spraying liquid. The granulation process was carried out each time until the material was completely wetted in the apparatus. It was found that the process parameters, and in particular the moistening parameters, have a significant impact on the kinetics of the process (function  $d = f(t)$ ). This is related to the influence of the liquid delivery rate on the local overwetting of the bed, which in turn determines the advantage of specific mechanisms of agglomerate formation and growth. It was found that the kinetics of disc granulation is closely related to the intensity of the liquid supplied.

*Słowa kluczowe:* granulacja talerzowa, nawilżanie granulatu.

*Keywords:* disc granulation, moisturizing the granules

---

\* autor korespondencyjny: Andrzej Obraniak: andrzej.obraniak@p.lodz.pl  
DOI: 10.57636/67.2022.1.2

## 1. Wstęp

Jedną z podstawowych własności uzyskanego w procesie aglomeracji talerzowej produktu jest jego skład granulometryczny. Parametrem, który najczęściej stosuje się do opisu granulowanego złoza jest jego średni wymiar  $d$ . W procesie tym na jego wielkość wpływ mają takie czynniki jak: czas granulacji, parametry geometryczne aparatu, parametry jego pracy oraz warunki nawilżania złoza. Jako jedni z pierwszych badania dotyczące kinetyki granulacji okresowej prowadzili Kapur i Fuerstenau. Autorzy ci wyznaczyli zależność szybkości wzrostu granulek od ilości obrotów bębna. Podzielili proces tworzenia i wzrostu aglomeratu na 3 etapy: nukleacji (obszar zarodkowania), obszar przejściowy i wzrostu granulek [1].

W obszarze zarodkowania szybkość wzrostu granul przypadająca na jeden obrót bębna jest największa, jednak swoje maksimum osiąga w obszarze przejściowym, po którym gwałtownie spada. Podsumowując badania [1] autorzy podjęli próbę określenia zależności między parametrami procesu czyli liczbą obrotów bębna a wielkością cząstek. Sastry i Fuerstenau podzielili [2] mechanizmy wzrostu granulek wyszczególniając:

- koalescencję – w wyniku zderzenia plastycznego powstają dwie lub więcej cząstek,
- kruszenie – powstawanie nowego aglomeratu na skutek rozpadu słabszych granulek i ponownym łączeniu się ich z innymi cząstkami,
- ścieranie – ścieranie się materiału z granulek i przenoszenie go na inne, co powoduje ich wzrost,
- nawarstwianie – do istniejącego granulatu przyłącza się nawilżony materiał, na zasadzie śnieżnej kuli.

Ci sami autorzy opracowali teorię aglomeracji w „ograniczonej przestrzeni”. Przebiega ona podczas granulacji w bębnach obrotowych, tak samo na etapie

wzrostu jak i zarodkowania [3]. Rozkład wielkości ziaren zdefiniowany jest jako stosunek liczby granul w danym okresie czasu do początkowej liczby granul.

Natomiast Kapur i Fuerstenau opracowali model [4], w którym założyli że materiał dzieli się na warstwy, a granule podczas procesu przemieszczają się w warstwach jak również między nimi. Podsumowując wyniki, Kapur i Fuerstenau udowodnili, że można dobrze opisać wzrost aglomeratów w dwóch pierwszych etapach (zarodkowania i przejściowym). W trzecim etapie (wzrostu granul) pojawia się błąd modelu, który spowodowany jest założeniem stałej liczby zderzających się granul. Uważali, że dominującym mechanizmem w granulacji jest koalescencja. Ouchiyama i Tanaka [5] poddali pod rozważenie koalescencyjny model kinetyki procesu. Stwierdzili, że szybkość aglomeracji zależna jest od średnicy cząstek w granulowanym zbiorze. Również zaproponowali równanie w postaci bezwymiarowej uwzględniając w nim liczbę możliwych kontaktów pomiędzy aglomeratami, ich plastyczność, naprężenia, porowatość oraz saturację aglomeratu. [6]. Modele dotyczące opisu mechanizmów i kinetyki granulacji zaproponowali również [7-10], natomiast w pracach [11-13] poddano analizie wpływ parametrów nawilżania na efekt granulacji. Heim i wsp. [14] podczas badań granulacji bębnowej przybliżyli zmiany średniego wymiaru granulowanego złoża funkcją liniową, a współczynniki kierunkowe uzyskanych prostych uzależnili równaniem potęgowym od parametrów aparaturowo-procesowych. Zmiany średniego wymiaru granulatu  $d$  przybliżono równaniem liniowym postaci:

$$d = C \cdot t + d_p \quad (1)$$

gdzie:

-  $d_p$  to średni wymiar surowca, a współczynnik kierunkowy  $C$  opisano równaniem:

$$C = \frac{\partial d}{\partial t} = 10^{-2} \cdot n_w^{0.144} \cdot D^{-2.06} \cdot \varphi^{-0.9} \quad (2)$$

## 2. Model

Zakładając  $D$  bliskie wartości 2 i  $\varphi = 1$ , a także stałą wysokość burty talerza  $L$  oraz jako zmienną, przyjmując bezwzględną wartość prędkości obrotowej talerza, równanie (2) można uprościć do postaci zaproponowanej w [15] dla procesu granulacji bębnowej:

$$C = S_1 \cdot n_w^a \cdot \frac{1}{D^2 \cdot \varphi} = S_2 \cdot n^a \cdot \frac{1}{D^2 \cdot \varphi \cdot \rho \cdot L} = S_2 \cdot n^a \cdot \frac{1}{m_s} \quad (3)$$

Jeżeli wartości początkowe czasu nawilżania  $t$  i wilgotności złoża  $w=0$  to:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{m_w}{t \cdot m_s} = \frac{Q \cdot t}{t \cdot m_s} = \frac{Q}{m_s} \Rightarrow \frac{1}{m_s} = \frac{dw}{dt} \cdot \frac{1}{Q} \quad (4)$$

Podstawiając do wzoru (3) i zakładając stałość natężenia przepływu dostarczanej cieczy  $Q$  mamy:

$$C = S_3 \cdot n^a \cdot \frac{dw}{dt} \quad (5)$$

Czyli po podstawieniu do zależności (1) otrzymujemy:

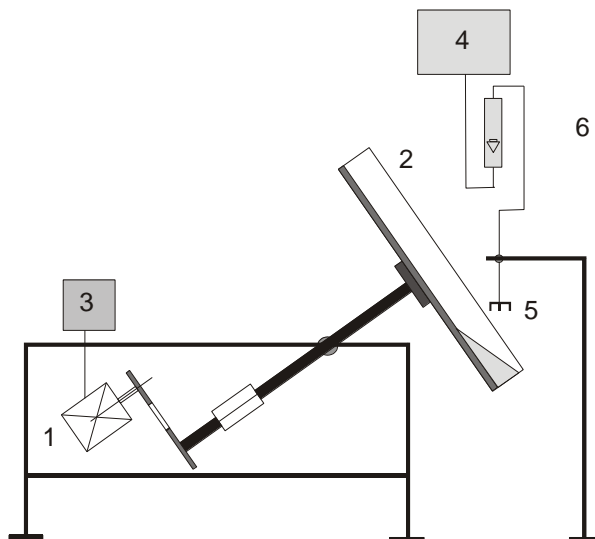
$$d = S_3 \cdot n^a \cdot \frac{dw}{dt} \cdot t + d_p \quad (6)$$

## 3. Cel pracy

Celem pracy jest potwierdzenie modelowych zależności między szybkością nawilżania złoża, a wielkością otrzymanego podczas granulacji talerzowej granulatu. Podjęto również próbę określenia wpływu szybkości nawilżania ( $dw/dt$ ) i prędkości obrotowej talerza na wielkość granulatu otrzymanego na etapie nawilżania granulowanego złoża. Model weryfikowano dla wybranego materiału ziarnistego jakim był bentonit odlewniczy.

#### 4. Aparatura

Do badań związanych z określaniem wartości wielkości zmieniających się w trakcie prowadzenia procesu granulacji wykorzystano stanowisko pomiarowe do badania procesu granulacji talerzowej. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na Rys. 2. Motoreduktor (1) poprzez przekładnię pasową napędzał talerz granulatora (2). Stosując falownik (3) otrzymywano płynną zmianę prędkości obrotowej talerza, którą kontrolowano wykorzystując obrotomierz. Ciecz zwilżającą (woda) ze zbiornika (4) dostarczano kroplowo na przesypującą się w talerzu warstwę złoża ziarnistego (w dolnej części talerza) za pomocą zraszacza hydraulicznego (5), aż do przewilżenia złoża. Stałe natężenie dopływu cieczy ustalano każdorazowo za pomocą rotametru (6). Aby zapewnić stałe ciśnienie podawanej cieczy przez cały czas trwania próby utrzymywano stały poziom cieczy w zbiorniku (4). Zastosowanie ruchomej płyty nośnej (wchodzącej w skład podstawy 7), do której przymocowano łożyska wału granulatora, dało możliwość zmian kąta  $\alpha$  talerza.



Rys. 2. Schemat aparatury do badań granulacji talerzowej.

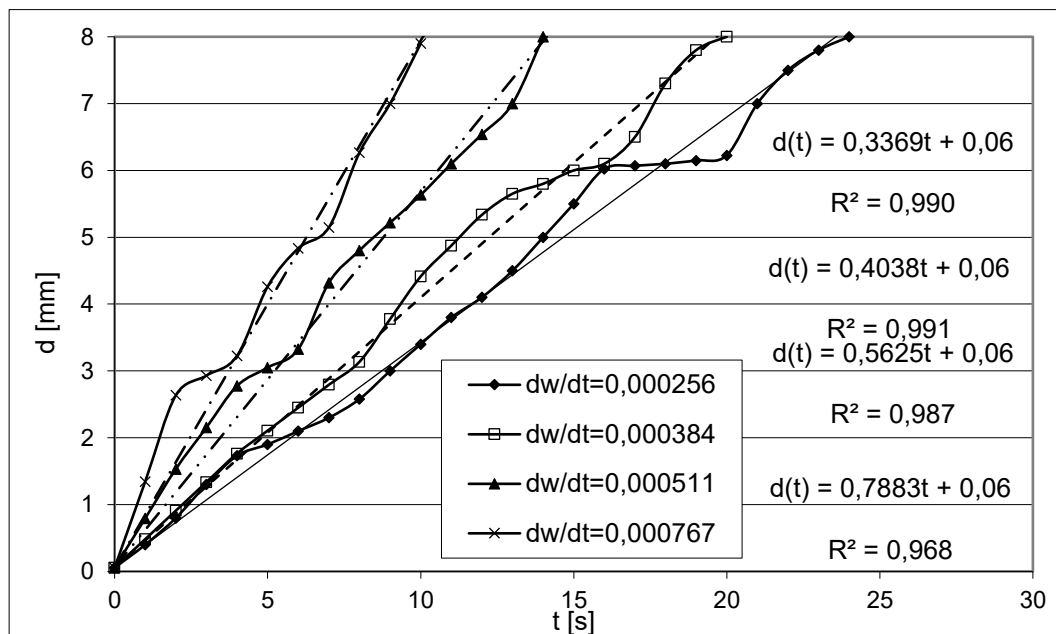
W trakcie badań przeprowadzono analizę granulometryczną każdej reprezentatywnie pobranej próbki, stosując do tego celu zestaw sit o rozmiarach oczek kolejno: 0,5, 1, 2, 4, 6,3, 8, 10, 12,5 mm. Uzyskane frakcje kolejno ważono wagą laboratoryjną, po czym próbkę zawracano. Otrzymane na tej podstawie udziały masowe kolejnych frakcji posłużyły do obliczenia średniej średnicy. Proces granulacji prowadzono w sposób okresowy, każdorazowo przy ustalonych parametrach procesowo-aparaturowych: stopniu wypełnienia talerza, prędkości obrotowej granulatora oraz średnicy aparatu. Badania przeprowadzono w granulatorach talerzowych o okresowym cyklu pracy różniących się średnicą talerza. Stosowano granulatory o średnicy bębna  $D=0,5, 0,7$  i  $1,0$  m i wysokości burty  $L=0,15$  m. Parametrami zmiennymi w czasie badań były:

- masa wypełnienia talerza surowcem  $m_s$ , w zakresie zmienności 500-5000g,
- prędkość obrotowa talerza  $n$ , w zakresie zmienności 10 –30 obr/min.

Przeprowadzono próby dla 15 różnych mas (wynikających z przyjętych stopni wypełnienia aparatu materiałem surowca i średnicą talerza), przy 21 różnych prędkościach obrotowych talerza. Jako materiału badawczego użyto bentonitu odlewniczego o ziarnach w zakresie 0-0,16 mm. Przyjęto, że średni rozmiar surowca przed granulacją wynosi 0,06 mm. W czasie badań złożo drobnoziarniste nawilżano przy stałym natężeniu cieczy  $Q=1$  g/s, aż do chwili przewilżenia materiału, co powodowało oblepienie się złoża na ścianie wewnętrznej granulatora, uniemożliwiając dalszy proces granulacji. Jako ciecz zwilżającą użyto wodę destylowaną, którą podawano na przesypujące się w aparacie złożo za pomocą zraszacza wymuszającego kropłowy wypływ cieczy oraz zapewniającego równomierne nawilżenie na całej długości bębna. W stałych odstępach czasu wynoszących 1 minutę pobierano próbki do analizy sitowej. Po dokonaniu analizy sitowej obliczano średni wymiar uzyskanych granulek  $d_{\text{śr}}$ .

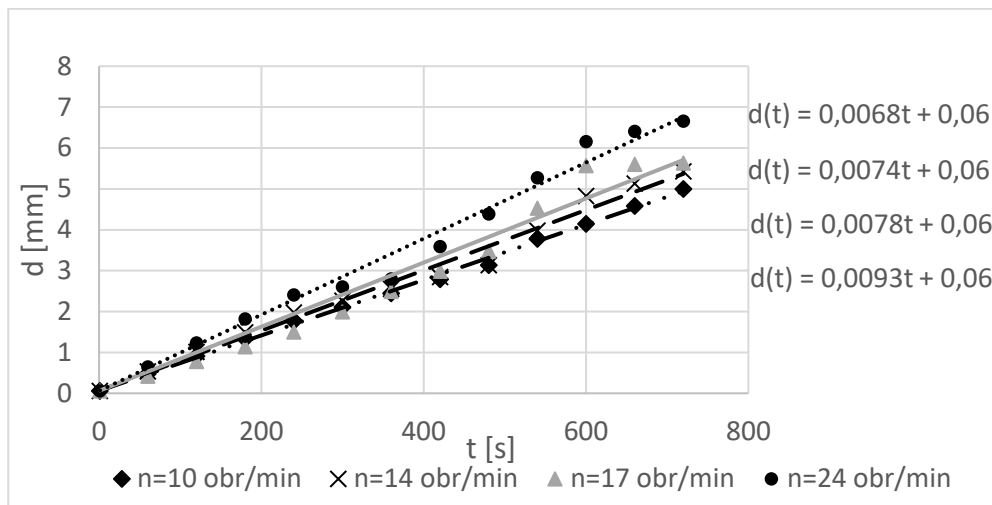
## 5. Wyniki

Uzyskane wyniki badań potwierdziły zaobserwowaną wcześniej dla granulacji bębnowej tendencję, że charakter zmian średniego wymiaru granulowanego złoża wraz z czasem nawilżania można przybliżyć funkcją liniową (wysokie współczynniki korelacji dla każdej przeprowadzonej próby granulacji bentonitu). Analiza przykładowych danych przedstawiona na rysunku 2 pozwala zauważyć, że proces prowadzony z większą szybkością nawilżania umożliwił szybsze zgranulowanie przetwarzanego materiału, co wiąże się zapewne z szybszym zarodkowaniem aglomeratów na skutek lokalnego przewilżenia złoża pod wpływem dostarczanej cieczy. Decydujący wpływ ma więc masa dostarczonej cieczy zwilżającej w stosunku do masy przetwarzanego złoża, zwłaszcza, że krople o rozmiarach ok. 5 mm zwilżają surowiec lokalnie.



**Rys. 2.** Przykładowe porównanie zmian średniego wymiaru granulatu  $d$  wraz ze zmianami czasu nawilżania dla różnych szybkości nawilżania złoża (średnica talerza  $D=500\text{mm}$ , stopień wypełnienia talerza  $\varphi=7\%$ ).

Analizując wyniki badań stwierdzono również wpływ prędkości obrotowej talerza na zmiany średniego wymiaru uzyskanego granulatu. Większa prędkość aparatu skutkuje tym, że granulacja postępuje szybciej, co wiązać należy z liczbą cykli, które zrealizuje przesypujące się w talerzu złożo. Potwierdzają to zależności graficzne przedstawione na Rys.3.



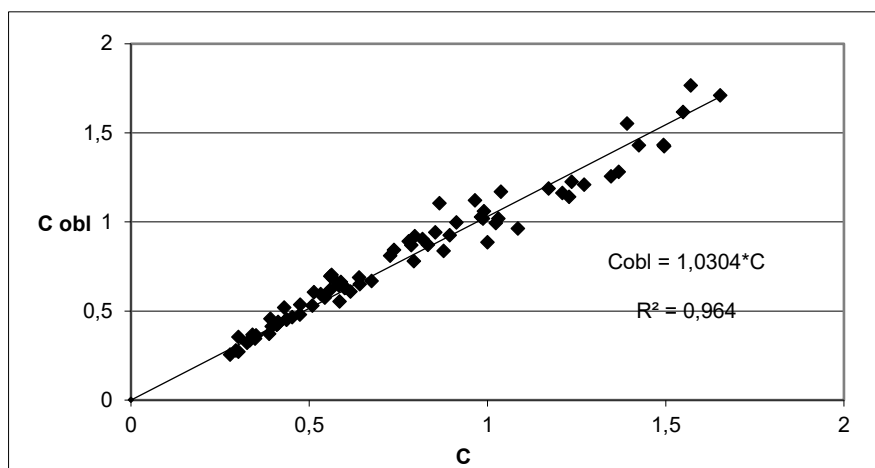
**Rys. 3.** Przykładowe porównanie zmian średniego wymiaru granulatu  $d$  wraz ze zmianami czasu nawilżania dla różnych prędkości obrotowych talerza (średnica talerza  $D=500\text{mm}$ , stopień wypełnienia talerza  $k=5\%$ )

Uzyskane wyniki badań pozwoliły na uzależnienie szybkości granulacji, którą opisuje współczynnik kierunkowy  $C$  od szybkości nawilżania oraz prędkości obrotowej bębna. Zaproponowano równanie potęgowe postaci:

$$C = 10^3 \times \left(\frac{dw}{dt}\right)^{0,96} \times n^{0,18} \quad (7)$$

Na Rys. 4 porównano szybkości przyrostu średniego wymiaru uzyskiwanego na danym etapie procesu aglomerowanego złoża (współczynniki kierunkowe prostych) z wartościami tych współczynników uzyskanych z zaproponowanego równania potęgowego.





**Rys.4.** Porównanie wartości współczynników kierunkowych prostych  $C$  z wartościami  $C_{obl}$  uzyskanymi z zależności (7).

## 6. Wnioski

Przeprowadzono analizę wpływu szybkości nawilżania na właściwości uzyskanego na danym etapie czasowym granulowanego złoża. Wykazano, że sterując czasem nawilżania, prędkością obrotów bębna oraz intensywnością nawilżania można w zdecydowany sposób wpływać na właściwości uzyskanego produktu (granulowanego bentonitu). Wyniki uogólniono równaniem potęgowym.

## 7. Symbole

$\varphi$  - stopień wypełnienia bębna materiałem

$S_{1,2,3}$  - stałe

$d$  – średnia średnica aglomeratu

$d_p$  – średnica surowca (początkowa)

$n_w$  – względna częstość obrotowa (odniesiona do częstości krytycznej)

$n$  – częstość obrotowa

## Literatura

- [1] Kapur P.C., Fuerstenau D.W.: *Size distributions kinetic relationships in the nuclei region of wet pelletization*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 1966, 5.
- [2] Sastry i Fuerstenau Sastry K.V.S., Fuerstenau D.W.: *Laboratory studies on the bath balling kinetics of taconite concentrates*, IX Int. Miner. Proc. Congr. Praga 1970.
- [3] Sastry K.V.S., Fuerstenau D.W.: *Mechanisms of Agglomerate Growth in Green Pelletization*, Powd. Techn., 7, 1973, str. 97-105.
- [4] Kapur P.C., Fuerstenau D.W.: *A coalescence model for granulation*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Der., 8, 1, 1969, str. 56-62.
- [5] N. Ouchiyama, T. Tanaka: *Stochastic model for compaction of pellets in granulation*, Ind. Eng. Chem. Fundament., 19, 1980, str. 555-560.
- [6] Ouychijama N., Tanaka T.: *Mathematical model in the kinetics of granulation*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Der., 13, 1974, str. 383-389.
- [7] Capes C.E.: *Mechanism of pellet growth in wet pelletization*, Eng. Chem. Process Des. Der., 6, 1967, str. 390 – 392.
- [8] Antkowiak W., Heim A.: *Mathematical Model for Granulation Kinetics*, Chem. Eng. Sc., 43, 1988, str. 1447-1456.
- [9] Obraniak A., Orczykowska M., Olejnik T.: *The effects of viscoelastic properties of the wetting liquid on the kinetics of the disc granulation process*. Powd. Techn. 342, 2019, str. 328–334.
- [10] Obraniak, A., Ławińska K.: *Spectrophotometric analysis of disintegration mechanisms (abrasion and crushing) of agglomerates during the disc granulation of dolomite*, Gran. Matt. 20:7, 2018, str. 1-10.
- [11] Heim A., Gluba T., Obraniak A., Błaszczuk M., Gawot-Młynarczyk E.: *Wpływ napięcia powierzchniowego cieczy zwilżającej na jakość produktu granulacji bębnowej*, Przem. Chem., 87(2), 2008, str. 146-149.
- [12] Heim A., Gluba T., Obraniak A., Błaszczuk M., Gawot-Młynarczyk E.: *Wpływ wielkości kropli cieczy zwilżającej na właściwości produktu granulacji bębnowej*, Przemysł Chemiczny, 87(2), 2008, str. 150-153.
- [13] Heim A., Obraniak A., Gluba T.: *Wpływ szybkości nawilżania złoża na gęstość nasypową uzyskanego granulatu*, Przem. Chem., 87(2), 2008, str. 154-157.
- [14] Heim A., Gluba T., Obraniak A.: *The effect of process and equipment parameters on the drum granulation kinetics*, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 34, 2000, str. 67-76.
- [15] Obraniak A., Gluba T.: *Wpływ szybkości nawilżania na wielkość uzyskania granulatu*, Inż. Apar. Chem., 45 (37), 2006, str. 121-122.