

Rafał RAKOCZY, Marian KORDAS, Przemysław GRĄDZIK, Maciej KONOPACKI

e-mail: rrakoczy@zut.edu.pl

Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

## Wpływ wirującego pola magnetycznego na wytwarzanie układu magnetodispersyjnego

### Wstęp

Klasyczna fluidyzacja jest procesem podnoszenia drobnej fazy stałej oraz rozproszenia i utrzymania jej w fazie ciągłej. Powstały dynamicznie zmieniający się układ dyspersyjny korzystnie wpływa na procesy wymiany masy i ciepła oraz zapewnia uzyskanie homogeniczności pól temperatury lub stężenia.

Magnetycznie wspomaganą fluidyzację MAF (*Magnetically Assisted Fluidization*) jest przykładem kombinowanej techniki, zapewniającej otrzymanie stabilnego stanu układu fluidalnego o wysokim stopniu dyspersyjnej homogeniczności. Do kontroli warstwy fluidalnej stosuje się również pole elektryczne, ultradźwięki oraz wibracje [Yang i in., 2005; Zeng i in., 2008].

W przypadku, gdy pole magnetyczne silnie oddziałuje na cząstki ciała stałego, powodując ich ruch bez udziału przepływającego płynu, to taki proces nazywany jest magnetycznie napędzaną fluidyzacją MDF (*Magnetically Driven Fluidization*), zgodnie z klasyfikacją podaną w pracy [Hristov, 2002]. Intensywność ruchu cząstek zależy od właściwości magnetycznych układu fluidalnego oraz udziału objętościowego cząstek. W układach z zawartością warstwy ciała stałego powyżej 15% obj. zachodzą silne oddziaływania międzycząsteczkowe, co powoduje wprowadzenia dodatkowego podziału tego typu fluidyzacji na tryb FIRST (pole magnetyczne działa na warstwę ciała stałego przed zastosowaniem przepływu płynu) oraz LAST (pole działa na warstwę ciała stałego uniesioną wraz z przepływającym płynem) [Hristov, 2002].

Proces MAF (zawartość warstwy ciała stałego poniżej 15% obj.) może być z powodzeniem realizowany za pomocą stacjonarnego pola magnetycznego. Zastosowanie wirującego pola magnetycznego (WPM) do realizacji procesu *magnetyzacji* jest relatywnie nowym podejściem, niedostatecznie zbadanym oraz wyjaśnionym. Elementy warstwy ciała stałego, najczęściej wykazujące właściwości ferro- lub ferromagnetyczne, aktywowane WPM, mogą działać jak małe dynamiczne mieszadła, poprawiając znacznie warunki hydrodynamiczne panujące w złożu fluidalnym [Hristov, 2006]. Wytworzony w ten sposób dynamiczny układ dyspersyjny można z powodzeniem zastosować do intensyfikacji procesów wymiany masy i ciepła oraz procesu mielenia materiału ziarnistego [Rakoczy, 2010].

Głównym celem prezentowanej pracy jest przeanalizowanie procesu podnoszenia i zawieszania cząstek magnetytu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) za pomocą WPM w ośrodkach ciekłych różniących się przewodnością elektryczną (woda wodociągowa; 5, 10, 26% wag. roztwór NaCl).

### Aparatura doświadczalna

Szczegółowy opis aparatury badawczej, którą zastosowano do uzyskania rezultatów zaprezentowanych w niniejszej pracy podano w publikacji [Rakoczy i Masiuk, 2011].

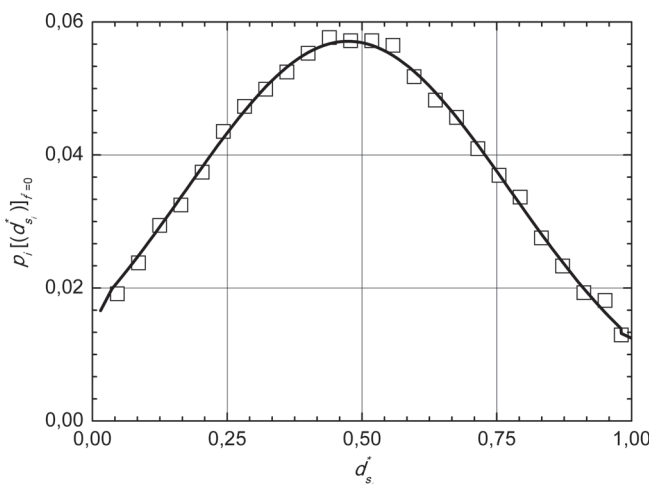
### Rezultaty i dyskusja wyników

Badania doświadczalne wpływu wirującego pola magnetycznego na podnoszenie oraz wytwarzanie specyficznego układu „magneto-dyspersyjnego” rozpoczęto od przygotowania cząstek magnetytu o ściśle określonej frakcji mieszczącej się w przedziale średnic sitowych od 0,04 mm do 4 mm. W tym celu wykonano klasyfikację mechaniczną dostępnego materiału przez podzielenie go na *i*-te klasy wymiarów (sita dobrane zgodnie z PN-ISO 565:2000; procedurę przesiewania wykonano

zgodnie z wytycznymi znajdującymi się w PN-71/C-04501). Następnie określoną masę (~7 gram) cząstek magnetytu o średnicy sitowej ( $d_s$ ), wprowadzano do szklanego pojemnika, umieszczonego wewnątrz generatora wirującego pola magnetycznego.

Pokazane na rys. 1 punkty przedstawiające wyznaczone wartości częstości  $p[(d_s^*)]$  w stanie początkowym procesu wytwarzania układu *magneto-dyspersyjnego* typu cząstki magnetyczne – ciecz przewodząca (dla znormalizowanej wartości częstotliwości wirującego pola magnetycznego  $f^* = 0$ ), opisano następującą zależnością analityczną ( $R_{kor} = 0,9975$ ;  $\sigma = 0,0011$ ):

$$p[(d_s^*)]_{f=0} = 0,0571 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(d_s^*) - 0,4739}{0,3014}\right)^2\right] \quad (1)$$



Rys. 1. Graficzna prezentacja wyznaczonych wartości częstości w stanie początkowym procesu wytwarzania układu „magneto-dyspersyjnego” typu cząstki magnetytu – ciecz przewodząca prąd elektryczny (linią ciągłą zaznaczono przebieg równ. (1))

Cząstki magnetytu o rozkładzie zaprezentowanym na rys. 1 umieszczono w szklanym pojemniku, współosiowo usytuowanym w generatorze wirującego pola magnetycznego oraz wypełnionym cieczą przewodzącą prąd elektryczny  $\sigma_e = 0,5 - 21,56 \text{ [S}\cdot\text{m}^{-1}]$ . Uruchomienie wirującego pola magnetycznego wywołuje podnoszenie cząstek z dna pojemnika oraz zawieszenie ich w ciekłym ośrodku ciągłym. Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że cząstki magnetytu w obecności wirującego pola magnetycznego poruszają się po obwodzie oraz wykazują ruch obrotowy wokół własnej osi. Taki stan układu dyspersyjnego można nazwać dynamicznym. Z chwilą wygaszenia oddziaływania wirującego pola magnetycznego, dynamiczny stan *magneto-dyspersyjny* zanika i cząstki fazy stałej opadają na dno pojemnika.

Stan wytwarzanych układów *magneto-dyspersyjnych* wirującym polem magnetycznym określono na podstawie analizy próbek pobranych za pomocą specjalnej sondy próbkującej. Sonda ta została wykonana z materiału niewykazującego właściwości magnetycznych oraz umożliwiła analizowanie całej objętości roboczej  $V_r = 0,00033 \text{ m}^3$ , w której znajdowały się cząstki magnetytu. Pobrane próbki fotografowano w odpowiednim powiększeniu oraz analizowano stosując oprogramowanie do wizualnej analizy kształtów i obrazów. Wykorzystując możliwości zastosowanego programu do analizy zdjęć cyfrowych zdecydowano, że ilościowa ocena kształtu cząstek magnetytu zostanie przeprowadzona z uwzględnieniem nieregularności ziaren analizowanego materiału.

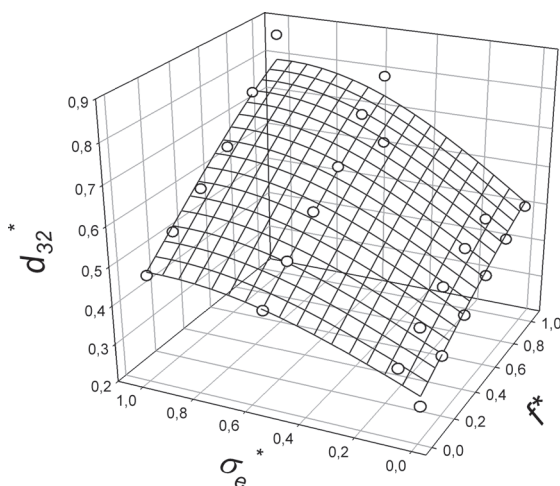
Dla analizowanych cząstek magnetytu, w oparciu o przeprowadzone badania mikroskopowe, wyznaczono tzw. *średnicę projekcyjną* cząstki ( $d_p$ )  $i$ -tej frakcji, będącej średnicą kuli mającej taką samą powierzchnię rzutu na płaszczyznę jak ziarno oglądane w kierunku prostopadłym do płaszczyzny stabilnego ułożenia się ziarna.

Uzyskane *średnice projekcyjne* dla parametrów charakteryzujących zastosowane wirujące pole magnetyczne oraz płynów przewodzących prąd elektryczny, zinterpretowano w postaci bezwymiarowej *średnicy projekcyjnej*, którą zdefiniowano jako stosunek *średnicy projekcyjnej* ( $d_p$ ) do maksymalnej średnicy sitowej ( $[d_s]_{\max}$ ) ( $d_p^* = ([d_s]_{\max})^{-1} \Rightarrow d_p^* = d_p (4 \text{ mm})^{-1}$ ).

Następnie dla każdej znormalizowanej *średnicy projekcyjnej* wyznaczono liczebność cząstek magnetytu ( $N_i[(d_p^*)]$ ), którą odniesiono do całkowitej liczby cząstek magnetytu ( $N_0[(d_s^*)]$ ) wyznaczając w ten sposób częstość ( $p_i[(d_p^*)]$ ).

Analizę wytwarzanych dynamicznych układów *magneto-dyspersyjnych* zdecydowano oprzeć na obliczonej średniej średnicy ziaren wyznaczonej w oparciu o *średnice projekcyjne*. Wytwarzane dynamiczne układy *magneto-dyspersyjne* (cząstki magnetytu – ciecz przewodząca prąd elektryczny) opisano matematycznie wykorzystując wyznaczone histogramy częstości, za pomocą średniej średnicy objętościowo-powierzchniowej (średnica *Sautera*) zdefiniowanej zależnością:

$$[d_{32}]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}} = \frac{\sum_{i=1}^m (d_p)^3 \{N_i[(d_p^*), f^*, \sigma_e^*]\}}{\sum_{i=1}^m (d_p)^2 \{N_i[(d_p^*), f^*, \sigma_e^*]\}} \quad (2)$$



Rys. 2. Wyznaczone zmiany średniej średnicy *Sautera* dla przykładowych dynamicznych układów *magneto-dyspersyjnych* cząstki magnetytu – ciecz przewodząca prąd elektryczny

Zmiany średniej średnicy *Sautera*, wyznaczonej z zależności (2) dla przykładowych dynamicznych układów *magneto-dyspersyjnych* cząstki magnetytu – ciecz przewodząca prąd elektryczny przedstawiono w formie zależności  $[d_{32}]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}} = f(f^*, \sigma_e^*)$  na rys. 2. Wartości znormalizowanej średniej średnicy *Sautera*  $[d_{32}]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}}$  wyznaczono z następującej zależności:

$$[d_{32}^*]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}} = \frac{[d_{32}]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}}}{[d_{32}]_0} \quad (3)$$

gdzie wartość  $[d_{32}]_0 = 2,92 \text{ mm}$  wyznaczono dla histogramu przedstawiającego rozkład średnic sitowych cząstek magnetytu w stanie początkowym procesu wytwarzania układu *magneto-dyspersyjnego* (Rys. 1).

Przedstawiona na rys. 2 powierzchnia prezentuje aproksymację wyznaczonych przykładowych wartości średniej średnicy *Sautera*  $[d_{32}^*]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}}$  (punkty). Zależność opisująca tę powierzchnię ma następującą postać ( $R_{kor} = 0,9691$ ;  $\sigma = 0,0399$ )

$$[d_{32}^*]_{f^*=\text{var}; \sigma_e^*=\text{var}} = 0,87 \exp \left\{ -0,5 \left[ \left( \frac{f^* - 1,58}{1,42} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_e^* - 0,96}{1,04} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

gdzie  $\sigma_e^* = (\sigma_e) ([\sigma_e]_{\max})^{-1} \Rightarrow \sigma_e^* = (\sigma_e) (21,56 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$  oznacza znormalizowaną wartość przewodności elektrycznej.

## Wnioski

Uzyskane wyniki wskazują, że wirujące pole magnetyczne (WPM) może być efektywnie wykorzystane do wytwarzania układów *magneto-dyspersyjnych* oraz do magnetycznego wspomaganie procesu technicznego wytwarzania układu fluidalnego.

Przeprowadzone obserwacje zachowania się cząstek ciała stałego (magnetytu) wykazały, że wirujące pole magnetyczne nie tylko wytwarza taki układ, lecz pozwala również kontrolować jego stan dynamiczny.

Opracowana zależność analityczna (3) definiuje wpływ WPM na zdolność podnoszenia cząstek fazy stałej. Zdolność ta zależy od właściwości magnetycznych cząstek fazy stałej, parametrów fizykochemicznych oraz właściwości elektro-magnetycznych ciekłych ośrodków ciągłych.

Z analizy uzyskanych rezultatów wynika, że przewodność elektryczna fazy ciągłej wywiera znaczący wpływ na średnią średnicę *Sautera*.

## LITERATURA

- Yang J., Sliva A., Banerjee A., Dave R.N., Pfeffer R., 2005. Dry particle coating for improving the flowability of cohesive powders. *Powder Tech.* 158, nr 1-3, 21-33. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.04.032
- Zeng P., Zhou T., Yang J., 2008. Behavior of mixtures of nano-particles in magnetically assisted fluidized bed. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensification* 47, nr 1, 101-108. DOI: 10.1016/j.cep.2007.08.009
- Hristov J.Y., 2002. Magnetic field assisted fluidization – A uniform approach: Part 1. Fundamental and relevant hydrodynamics of gas-fluidized beds (batch solids mode). *Reviews Chem. Eng.* 18, nr 4-5, 295-509. DOI: 10.1515/REVCE.2002.18.4-5.295
- Hristov J.Y., 2006. Magnetic field assisted fluidization-a unified approach. Part 5. A hydrodynamic treatise on liquid – solid fluidized beads. *Reviews Chem. Eng.* 22, 195-375. DOI: 10.1515/REVCE.2006.22.4-5.195
- Rakoczy R., 2010. The application of the informational theory to the analysis of the grinding process under action of transverse rotating magnetic field. *Powder Tech.* 201, nr 2, 161-170. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.03.021
- Rakoczy R., Masuk S., 2011. Studies of a mixing process induced by a transverse rotating magnetic field. *Chem. Eng. Sci.* 66, nr 11, 2298-2308. DOI: 10.1016/j.ces.2011.02.021

**Badania finansowane z grantu MNiSW w ramach projektu Inventus Plus nr 0448/IP2/2011/71**