

Karina IGNASIAK<sup>1</sup>, Irmira ZAGAJ<sup>2</sup>, Roman ULBRICH<sup>2</sup>

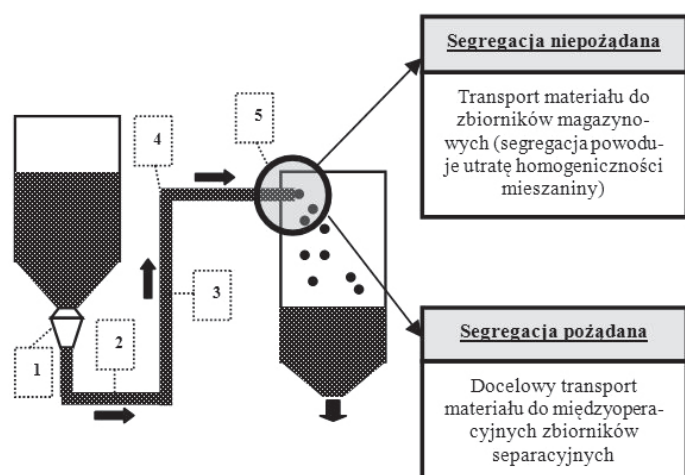
e-mail: kignasiak@ichpw.zabrze.pl

<sup>1</sup> Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze<sup>2</sup> Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Zjawisko segregacji materiału dwuskładnikowego w transporcie pneumatycznym

### Wstęp

Podczas przetwarzania, magazynowania oraz transportu pneumatycznego materiałów polidispersyjnych często zachodzi zjawisko niekontrolowanej segregacji. Jest ono głównie spowodowane występowaniem różnic w rozmiarach, gęstościach oraz kształtach ziaren transportowanej mieszaniny [Piatkiewicz, 1999]. W instalacjach transportu pneumatycznego zjawisko segregacji może zachodzić w przewodach poziomych, pionowych, w kolanach (oraz innych elementach służących do zmiany kierunku przepływu), jak również podczas wypływu materiału z poziomego rurociągu pneumatycznego [Rabinovich i Kalman, 2010; Levy i Mason, 1998]. W zależności od lokalizacji transportu w ciągu technologicznym, segregacja materiału podczas wypływu z kanału poziomego może się okazać się zjawiskiem pożądanym bądź negatywnym (Rys. 1).



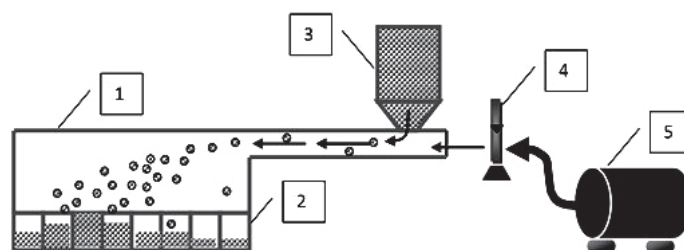
Rys. 1. Obszary powstawania segregacji w instalacji transportu pneumatycznego: 1 – dozowanie materiału, 2 – rurociągi poziome, 3 – rurociągi pionowe, 4 – kolana, łuki, rozdzielcze, 5 – wyrzut materiału z poziomego rurociągu

W przypadku, gdy materiał transportowany jest docelowo do separatorów pneumatycznych, segregacja cząstek już podczas ich wyrzutu z kanału zmniejsza komplikacje lub wyklucza konsekwencje występowania tego zjawiska. Natomiast, gdy materiał transportowany jest do zbiorników magazynowych, występowanie zjawiska segregacji może prowadzić do pogorszenia jakości transportowanej mieszaniny poprzez utratę jej homogeniczności [Węgrzyn, 2008]. Większość materiałów transportowanych stanowią zazwyczaj mieszaniny polifrakcyjne, czyli zróżnicowane pod względem rozmiarów jak również kształtu oraz gęstości cząstek. Zachowanie odpowiednich proporcji udziału składników mieszaniny jest niezwykle istotne w warunkach przemysłowych.

W transporcie pneumatycznym często stosuje się klasyfikatory pneumatyczne w celu rozdzielenia transportowanej mieszaniny na frakcje o odpowiednich właściwościach [Shapiro i Galperin, 2004]. Analiza mechanizmów oraz parametrów podczas wyrzutu mieszaniny z kanału poziomego pozwala na intensyfikację bądź ograniczenie skali zjawiska segregacji [Ignasiak, 2010]. W przypadku, gdy materiał jest transportowany do klasyfikatorów pneumatycznych, odpowiedni dobór parametrów ruchowych, takich jak np. prędkość nośnika może intensyfikować zjawisko segregacji już podczas wyrzutu materiału z kanału, co może zwiększyć wydajność separatora [Ignasiak i Ulbrich, 2011].

### Stanowisko pomiarowe

W celu oceny stopnia niekontrolowanej segregacji materiału dwuskładnikowego podczas wypływu z poziomego rurociągu pneumatycznego zaprojektowano oraz zbudowano stanowisko badawcze (Rys. 2).



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 – kanał pomiarowy, 2 – strefy separacyjne, 3 – zbiornik dozujący cząstki ciała stałego, 4 – rotametr, 5 – sprężarka

Głównym elementem stanowiska badawczego jest poziomy kanał przepływowy – 1, o wymiarach 2050×655×30 mm (długość/szerokość/wysokość). Kanał wykonano z tworzywa sztucznego będącego odmianą syntetycznej żywicy akrylowej, potocznie zwanej plexiglasem. Taki dobór materiału zapewnił możliwość odpowiedniej obserwacji zachodzącego procesu oraz wystarczającą wytrzymałość konstrukcyjną i stabilność. W górnej części kanału znajdował się zbiornik (dozujący materiał) zaopatrzony w zasuwę, poprzez którą dozowano odpowiednią ilość cząstek mieszaniny – 3. Z kolei w dolnej części kanału znajdował się zbiornik złożony z ośmiu równych stref separacyjnych – 2. Powietrze doprowadzono ze sprężarki – 5 i za pomocą rotametu RDM-40 regulowano oraz kontrolowano strumień gazu – 4. Dobór takiego typu rotametu pozwolił na badania w szerokim zakresie zmian strumieni fazy gazowej przy niskim błędzie pomiaru.

### Materiały badawcze

Do analizy procesu segregacji wykorzystano cząstki o kształcie kulistym wykonane z tworzywa sztucznego o właściwościach przedstawionych w tab. 1 i 2. Odpowiednie komponenty mieszanin dobrano w taki sposób, aby utworzyć dwuskładnikowe układy o takich samych wymiarach średnic (stałym stosunku  $d_1/d_2=const.$ ), lecz różnych gęstościach. Kluczowy składnik (traser) w każdym układzie posiadał gęstość mniejszą od gęstości składnika rozpraszającego. Stosunek objętościowy odpowiednich składników wynosił 2:1, przy czym materiał najlżejszy K1 był stałym komponentem wszystkich układów dwuskładnikowych i zawsze występował w większej ilości. Odpowiednim materiałom oraz ich układom dwuskładnikowym przypisano określone oznaczenia zaprezentowane w poniższych tabelach. Średnice cząstek wyznaczano dla 20 losowo wybranych kulek i stwierdzono, że we wszystkich przypadkach średnica wynosiła 6,01 mm z dokładnością 0,04 mm. W pracy dla uproszczenia operowano wymiarem 6,00 mm.

Tab. 1. Właściwości materiałów badawczych oraz ich oznaczenia

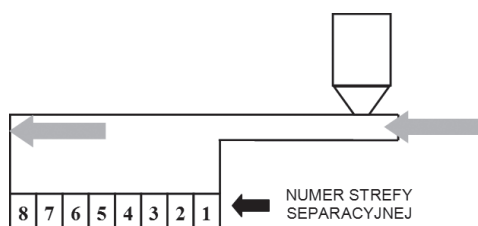
Oznaczenie materiału	Średnica ziaren $d$ [mm]	Gęstość nasypowa $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
K1	6	750
K2	6	1100
K3	6	1250
K4	6	1400

Tab. 2. Właściwości układów dwuskładnikowych oraz ich oznaczenia

Oznaczenie materiału	Stosunek średnicy ziaren $d_1/d_2$ [mm]	Gęstość nasypowa $\rho_1/\rho_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]
K1-K2	1	0,68
K1-K3	1	0,60
K1-K4	1	0,53

### Koncepcja oraz metodyka badań

Materiał przeznaczony do badań, przed zasypaniem do zbiornika dozującego cząstki ciała stałego, został odpowiednio przygotowany. W celu ujednoczenia mieszaniny składającej się z dwóch komponentów materiał ręcznie mieszano, a następnie po zwolnieniu zasowy, trafiał do strumienia gazu tłoczonego sprężarką. Cząstki po wypływie z kanału poziomego wskutek działania siły ciężkości oraz wzajemnych zderzeń, opadały do poszczególnych przegród, w których były ręcznie rozdzielane na poszczególne frakcje i ważone. Podział kanału na poszczególne strefy separacyjne przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Podział kanału badawczego na strefy separacyjne

Dla potrzeb pracy zdecydowano się wprowadzić dwa rodzaje koncentracji:

- **koncentrację frakcyjną** ( $F_{j,i}$ ), wyrażoną jako stosunek udziału objętościowego komponentu  $j$  mieszaniny w  $i$ -tej strefie do sumy udziału objętościowego tego komponentu we wszystkich strefach:

$$F_{j,i} = \frac{V_{j,i}}{\sum_{i=1}^8 V_{j,i}} \quad (1)$$

gdzie:

$j = (K1 \text{ lub } K2 \text{ lub } K3 \text{ lub } K4)$

$i = 1, 2, 3, \dots, 8$

- **koncentrację przestrzenną** ( $C_i$ ), wyrażoną jako stosunek udziału objętościowego obydwu komponentów mieszaniny w  $i$ -tej strefie do objętości całej mieszaniny:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^2 V_{j,i}}{\sum_{i=1}^8 V_{j,i}} \quad (2)$$

gdzie:

$j = (K1, K2) \text{ lub } (K1, K3) \text{ lub } (K1, K4)$

$i = 1, 2, 3, \dots, 8$

W celu określenia charakteru zmienności rozkładu koncentracji cząstek posłużono się współczynnikiem nierównomierności rozkładu koncentracji ( $\phi$ ), który jest miarą stopnia segregacji [Borsuk, 2004]:

$$\phi = \frac{C_{i,\max}}{\bar{C}_i} \quad (3)$$

gdzie:

$\phi$  – współczynnik nierównomierności rozkładu koncentracji

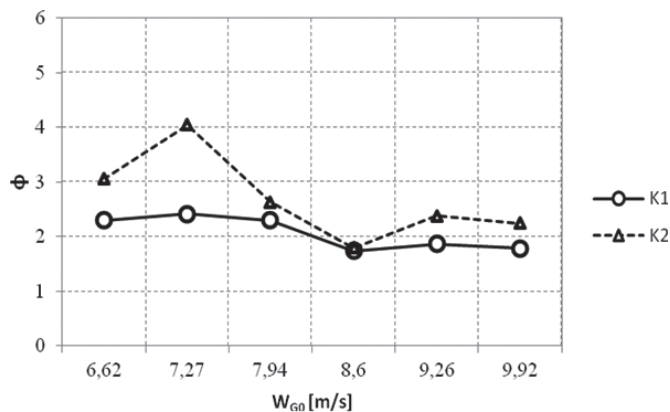
$C_{i,\max}$  – maksymalna wartość koncentracji we wszystkich strefach

$\bar{C}_i$  – średnia wartość koncentracji we wszystkich strefach

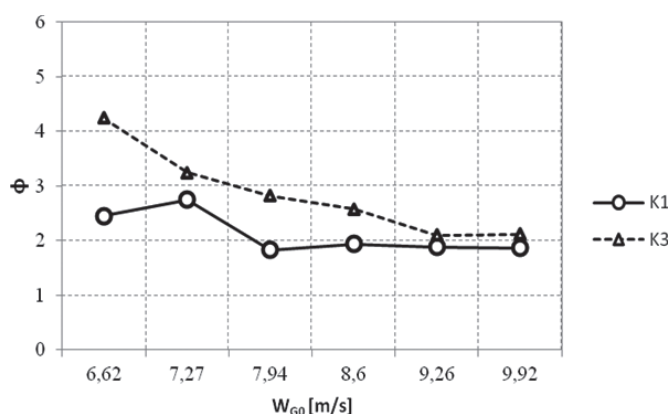
Współczynnik nierównomierności rozkładu koncentracji wymaga wyznaczenia dwóch wielkości: maksymalnej oraz średniej wartości koncentracji cząstek we wszystkich strefach. Wyliczona wartość jest pomocna w określeniu, jaki jest stopień nierównomierności rozkładu koncentracji cząstek w poszczególnych strefach.

### Wyniki badań

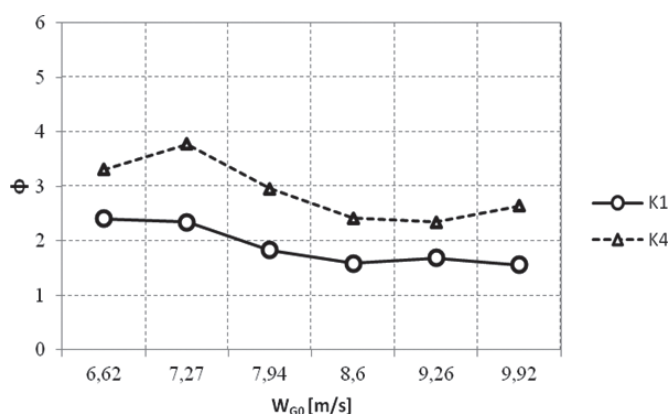
Na rys. 4–6 zaprezentowano wpływ prędkości gazu na współczynnik nierównomierności dla rozkładu koncentracji frakcyjnej. Wysoka wartość współczynnika nierównomierności rozkładu koncentracji przy danej prędkości wskazuje na skłonność gromadzenia się znacznej ilości materiału w nielicznych strefach separacyjnych.



Rys. 4. Stopień nierównomierności rozkładu koncentracji frakcyjnej w zależności od prędkości gazu dla poszczególnych komponentów materiału K1-K2



Rys. 5. Stopień nierównomierności rozkładu koncentracji frakcyjnej w zależności od prędkości gazu dla poszczególnych komponentów materiału K1-K3



Rys. 6. Stopień nierównomierności rozkładu koncentracji frakcyjnej w zależności od prędkości gazu dla poszczególnych komponentów materiału K1-K4

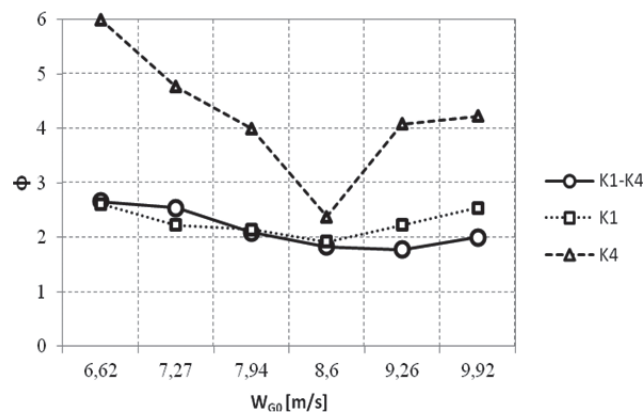
Na podstawie rys. 4–6 można zaobserwować, iż najniższe wartości współczynnika nierównomierności rozkładu koncentracji stwierdzono dla materiału o najmniejszej gęstości K1. Drugi komponent, z którym występował materiał K1 zawsze wykazywał wyższą wartość współczynnika  $\phi$ , co może świadczyć o tym, że materiał najlżejszy rozmieszcza się w strefach separacji równomierniej.

Wraz ze wzrostem prędkości gazu współczynnik nierównomierności rozkładu koncentracji stałego komponentu K1 występującego w połączeniu z innymi materiałami zmierza do wyrównania z współczynnikiem drugiego komponentu. Dalsze zwiększanie prędkości gazu nie powoduje większych zmian wartości współczynnika nierównomierności rozkładu koncentracji i utrzymuje się na stałym poziomie. Najbardziej dynamiczna zmiana wartości współczynnika  $\phi$  w zależności od prędkości gazu dla pozostałych materiałów występuje dla cząstek K3 w połączeniu z K1. Wzrost prędkości gazu w przypadku materiału K2 w połączeniu z K1 początkowo powoduje wzrost wartości współczynnika  $\phi$ , a następnie w zakresie prędkości gazu 7,27–8,60 m/s jego wartość maleje. Po przekroczeniu prędkości gazu 8,60 m/s współczynnik nierównomierności rozkładu koncentracji frakcyjnej ponownie wzrasta. Podobne zależności zaobserwowano również dla materiału K4 w połączeniu z K1. Warto jednak zwrócić uwagę, że dla tego materiału dynamika zmian współczynnika nierównomierności rozkładu koncentracji jest znacznie mniejsza.

Współczynnik nierównomierności koncentracji w zależności od prędkości gazu wyznaczono również dla koncentracji przestrzennej mieszanin na tle materiałów monodispersyjnych (Rys. 7–9). Maksymalna wartość współczynnika  $\phi$  dla układu K1-K3 oraz K1-K4 występuje przy małej prędkości przepływającego gazu. W przypadku jednak materiału K1-K2 wartość maksymalna współczynnika  $\phi$  osiągana jest dla prędkości gazu równej 7,27 m/s.

Zaobserwowano również, że dla wszystkich układów mieszanin wartość współczynnika nierównomierności rozkładu koncentracji przestrzennej nie ulega większej zmianie powyżej prędkości gazu równej 7,94 m/s. Również dalsze zwiększanie prędkości gazu nie wpływa znacząco na wartość  $\phi$ .

Na rys. 7–9 przedstawiono również współczynnik nierównomierności koncentracji materiałów monodispersyjnych, będących komponentami odpowiednich mieszanin. Najniższe wartości współczynnika  $\phi$  za-



Rys. 9. Stopień nierównomierności rozkładu koncentracji przestrzennej materiału K1-K4 na tle materiałów monodispersyjnych

obserwowano dla materiału K1. Stwierdzono również, że jego wartość wzrasta wraz ze wzrostem gęstości komponentu z którym występuje. Analizując zmiany wartości współczynnika nierównomierności rozkładu koncentracji dla poszczególnych prędkości gazu można stwierdzić, że wartość  $\phi$  dla układów polidispersyjnych (K1-K2, K1-K3, K1-K4) zwykle jest wypadkową współczynnika nierównomierności koncentracji jego komponentów, ale zdecydowanie największy wpływ na wartość  $\phi$  ma stały komponent mieszanin K1.

## Wnioski

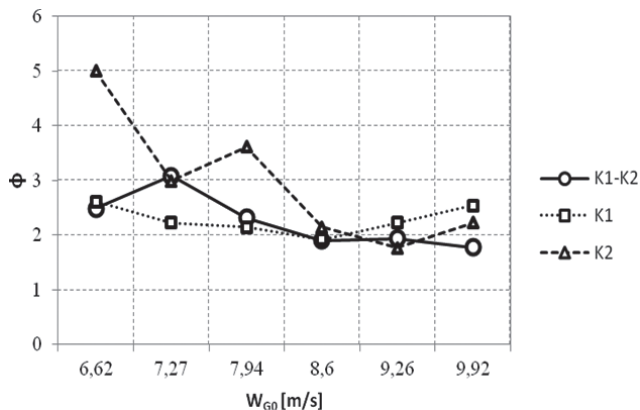
Zjawisko segregacji jest procesem losowym i trudnym do opisanie oraz kontrolowania. Można jednak dla materiału o określonych właściwościach oraz konstrukcji kanału określić prędkość gazu, poprzez którą można w zależności od potrzeb intensyfikować bądź ograniczać skalę występowania zjawiska segregacji. Jest to bardzo istotne z punktu widzenia eksploatacji separatorów oraz instalacji pneumatycznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że materiał o najmniejszej gęstości wykazuje największą skłonność do równomiernego rozkładania się w strefach separacyjnych.

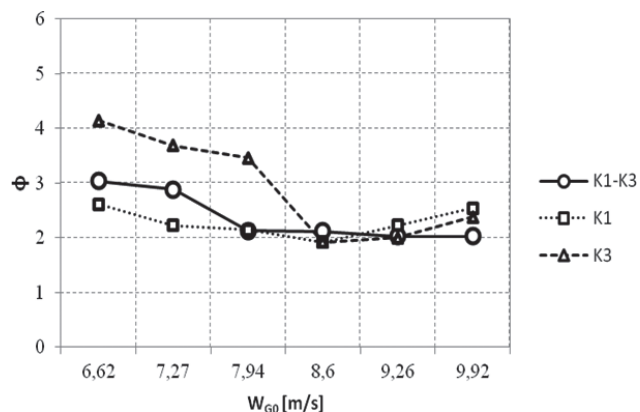
Wzrost prędkości gazu intensyfikuje równomierność rozkładu materiału w strefach separacyjnych, a zatem ogranicza rozmiar procesu segregacji. Na tej podstawie można zatem stwierdzić, że dobór prędkości przepływającego gazu podczas wypływu materiału z kanału poziomego może być czynnikiem w istotny sposób wpływającym na nierównomierność rozkładu cząstek w strefie odbioru produktu.

## LITERATURA

- Borsuk G., 2004. *Segregacja cząstek ciała stałego w układach transportu pneumatycznego*. Praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole
- Ignasiak K., 2010. *Segregacja układu dwuskładnikowego podczas wypływu z poziomego rurociągu pneumatycznego*. Politechnika Opolska, Opole
- Ignasiak K., Ulbrich R., 2011. *Aerodynamic assessment of granular materials segregations by use digital imaging anemometry*. The 6<sup>th</sup> International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, Ryn, Poland 28.06-02.07.2011
- Levy A., Mason D., 1998. The effect of a bend on the particle cross-section concentration and segregation in pneumatic conveying systems, *Powder Technology*, **98**, 95–103, DOI: 10.1016/S0032-5910(97)03385-8
- Piątkiewicz Z., 1999. *Transport pneumatyczny – monografia*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Rabinovich E., Kalman H., 2010. Phenomenological study of saltating motion of individual particles in horizontal particle-gas systems, *Chemical Engineering Science*, **65**, 739–752, DOI: 10.1016/j.ces.2009.09.027.
- Shapiro M., Galperin V., 2005. Air Classification of Solid Particles: a Review. Israel: *Chemical Engineering and Processing*, **44**, 279-285, DOI: 10.1016/j.ccep.2004.02.022
- Węgrzyn M., 2008. Ograniczenie segregacji mieszanek paszowych dla ptaków podczas wielopunktowego zasypu zbiornika, *Inżynieria Rolnicza*, **6** (104), 219-226



Rys. 7. Stopień nierównomierności rozkładu koncentracji przestrzennej materiału K1-K2 na tle materiałów monodispersyjnych



Rys. 8. Stopień nierównomierności rozkładu koncentracji przestrzennej materiału K1-K3 na tle materiałów monodispersyjnych