

GRZEGORZ LIGUS*
KARINA IGNASIAK**

Wykorzystanie cyfrowej anemometrii obrazowej do analizy segregacji cząstek monodispersyjnych pod kątem zastosowań w gospodarce odpadami

W artykule przedstawiono wizualne badania procesu segregacji cząstek monodispersyjnych w separatorze powietrznym. Opisano koncepcję stanowiska pomiarowego z aplikacją toru optycznego do pomiarów za pomocą szybkiej kamery wideo. Do opisu zjawisk zastosowano algorytmy cyfrowej anemometrii obrazowej (DPIV). Zaprezentowano ocenę zmiany stopnia segregacji w zależności od parametrów przepływowych w urządzeniu.

1. Wprowadzenie

Jedną z podstawowych wytycznych w gospodarce odpadami komunalnymi jest minimalizacja ilości odpadów deponowanych na składowiskach. Do najskuteczniejszych metod umożliwiających osiągnięcie tego celu, poza realizowaniem polityki ograniczania wytwarzania odpadów, jest prowadzenie procesu segregacji i recyklingu odpadów. Ze względu na to, że segregacja „u źródła” nie rozwiązuje całkowicie problemu recyklingu odpadów komunalnych, powinna być ona uzupełniona o segregację automatyczną, odbywającą się w wyspecjalizowanych punktach. Proces segregacji odpadów przeprowadzany w sposób mechaniczny, umożliwia rozdział pierwotnego strumienia odpadów na frakcje dostosowane charakterystyką do wymagań stawianym odpadom w aspekcie ich późniejszego recyklingu (podział na frakcje w zależności od rozmiaru, rodzaju materiału, charakteru odpadu, itp.). Istotną zaletą mechanicznej segregacji odpadów komunalnych jest minimalizacja zagrożeń epidemiologicznych poprzez zmniejszenie liczby stanowisk pracy o skrajnie trudnych warunkach środowiskowych. Urządzenia mechaniczne do rozdzielania odpadów są znane i powszechnie stosowane w skali

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

** Dr inż., Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny.

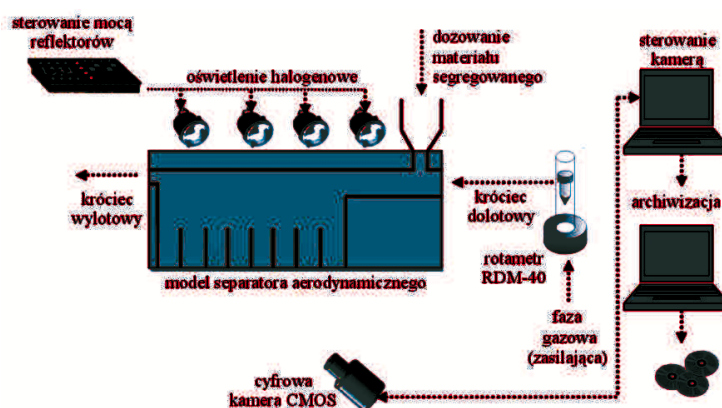
przemysłowej. Jednak ze względu na złożony charakter procesu segregacji odpadów, sprawność takich aparatów kształtuje się na poziomie znacznie niższym, aniżeli analogicznych urządzeń rozdzielających frakcje, np. materiałów sypkich.

Typowym urządzeniem spotykanym w gospodarce odpadami, w którym realizowany jest proces mechanicznego rozdzielania odpadów jest separator powietrzny, zwany także separatorem aerodynamicznym [2–6]. Wykorzystywany jest jako pojedynczy aparat lub jako element linii technologicznej do mechanicznej segregacji odpadów. Jego niewątpliwą zaletą jest możliwość definiowania parametru segregującego (wypadkowa siły ciężkości i pędu segregowanych cząstek stałych) w zakresie umożliwiającym pozyskiwanie większości frakcji składowych odpadów komunalnych. Często separatory tego typu znajdują się w ciągu technologicznym segregującym odpady wstępnie rozdrobnione. Jest to uzasadnione ze względu na znaczne powiązanie oddziaływań sił oporu aerodynamicznego z wielkością powierzchni czołowej segregowanej frakcji odpadów.

Omawiane procesy segregacji odpadów uznać można za szczególny przypadek zjawisk dwufazowych typu gaz–ciało stałe i zaproponować wykorzystanie, sprawdzonych w tym obszarze, optycznych technik pomiarowych oraz metod analizy obrazu.

2. Stanowisko badawcze i technika pomiarowa

Na potrzeby realizacji badań zaprojektowano i skonstruowano stanowisko pomiarowe (ryc. 1), stanowiące model separatora aerodynamicznego cząstek stałych. Tor optyczny stanowiska to szybka kamera wideo CMOS oraz oświetlony czterema reflektorami halogenowymi model separatora. Zasilająca układ faza gazowa jest doprowadzana do króćca zasilającego za pośrednictwem sprężarki tłokowej, natomiast segregowany materiał podawany jest grawitacyjnie z zasobnika.



Ź r ó d ł o: Ryciny 1–6 opracowanie własne.

Ryc. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Metodyka badań umożliwiającą stworzenie opisu procesu segregacji aerodynamicznej odpadów stałych w oparciu o nieinwazyjne metody optyczne i realizację zaproponowanych kierunków badań może przebiegać według schematu przedstawionego na rycinie 2.



Ryc. 2. Przykładowa metodyka prowadzenia badań segregacji aerodynamicznej odpadów z wykorzystaniem optycznych metod pomiarowych

Obserwowany proces segregacji aerodynamicznej, utrwalony za pomocą szybkiej kamery wideo, stanowi podstawowy materiał badawczy. Zarejestrowane obrazy segregacji zapisywane są na dwa sposoby: w sposób statyczny – w postaci map bitowych obserwowanych zjawisk i w sposób dynamiczny – w postaci sekwencji wideo powstałej z połączenia pojedynczych map bitowych. Wstępne przetwarzanie obrazu do dwóch niezależnych formatów danych jest konieczne, ze względu na różny charakter algorytmów stosowanych we właściwej analizie obrazu.

3. Metody analizy obrazu

Istotnym dla opisu procesu segregacji jest pozyskanie informacji o przemieszczaniu się elementarnych porcji cząstek. Wykorzystano do tego celu narzędzie bazujące na algorytmach cyfrowej anemometrii obrazowej PIV (z ang. *Particle Image Velocimetry*). Technika ta umożliwia szczegółową analizę nie tylko wartości prędkości, ale również jej dwuwymiarowego zróżnicowania przestrzennego, czyli kierunku przemieszczania się monodispersyjnych cząstek rozdzielanej mieszaniny. Metoda opiera się na wyznaczeniu przesunięcia pomiędzy dwoma wzorami zbiorów pikseli, zarejestrowanych w postaci obrazu przepływu, które są reprezentowane jako dwuwymiarowy rozkład poziomu szarości [1, 7, 9]. Na podstawie korelacji dwóch następujących po sobie obrazów procesu segregacji, zapisanych w postaci map bitowych, a dokładniej sekcji obrazów o ustalo-

nym rozrzucie pikseli, algorytm matematyczny, stosując szybkie transformacje Fouriera (FFT), odnajduje wektory przesunięć sekcji obrazów o określonym rozkładzie poziomu szarości, tworząc na ich podstawie szukane wektorowe pole prędkości procesu segregacji cząstek monodispersyjnych.

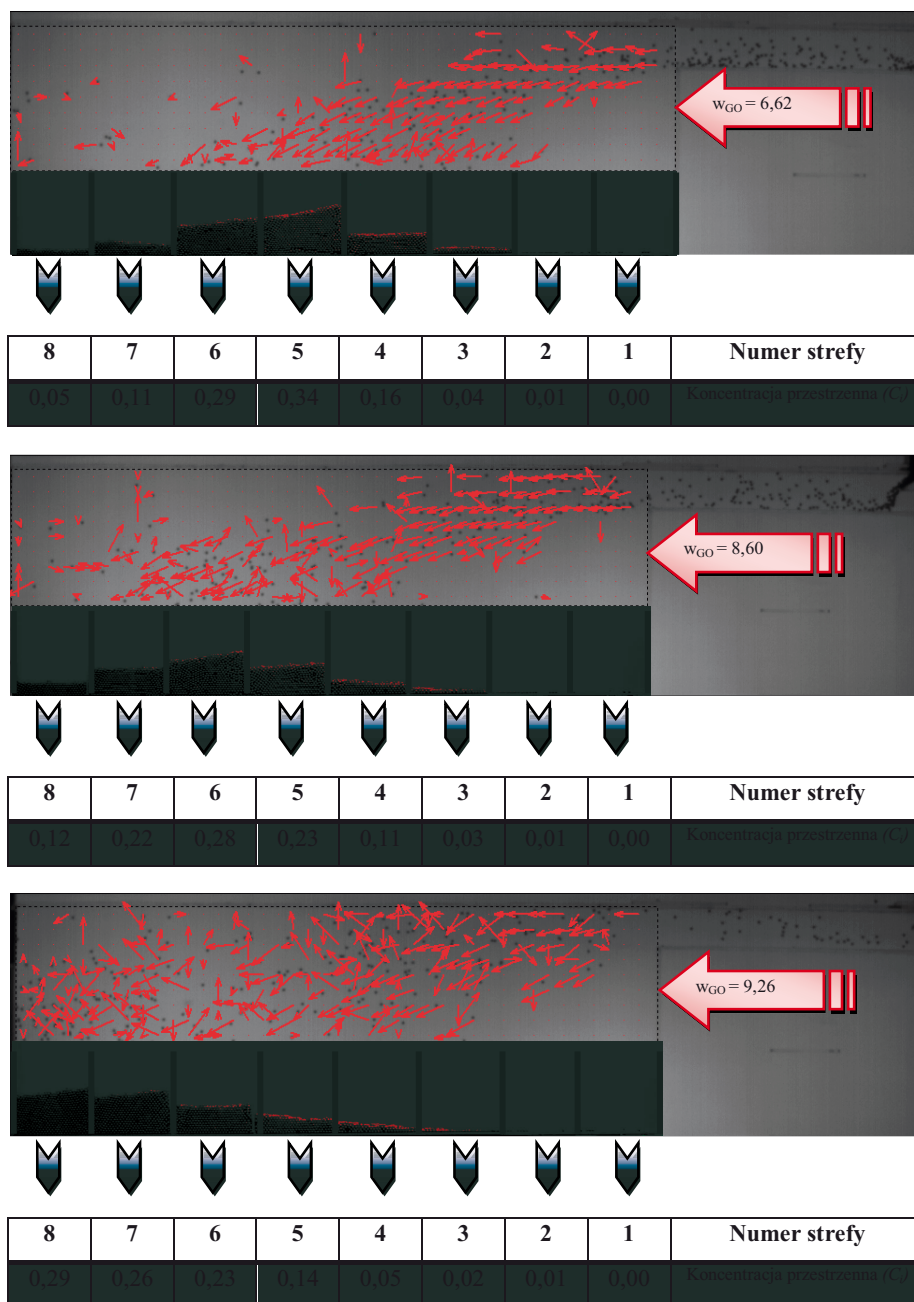
4. Wyniki analiz

W celu wyznaczenia trajektorii ruchu cząstek, do obliczeń wymagana jest znajomości czasu dzielącego chwile rejestracji obu obrazów oraz dowolnego charakterystycznego wymiaru na ich obszarze, by uchwycić skalę zjawiska. W przeprowadzonych badaniach segregacji cząstek monodispersyjnych, interwał czasowy rejestracji wynika bezpośrednio z częstotliwości pracy kamery, a za wymiar konieczny do ustalenia skali przyjęto znaną szerokość sekcji odbioru poszczególnych frakcji. Cała realizacja operacji wyznaczenia wektorowych pól prędkości została wykonana z wykorzystaniem programu DPIV [8]. W przeprowadzonych obliczeniach segregowane cząstki ciała stałego traktowano jako znaczniki, poruszające się w zasilażącej urządzenie fazie gazowej. Na rycinach 3–6 zaprezentowano trajektorie ruchu cząstek materiałów monodispersyjnych o różnej gęstości w zależności od prędkości gazu.

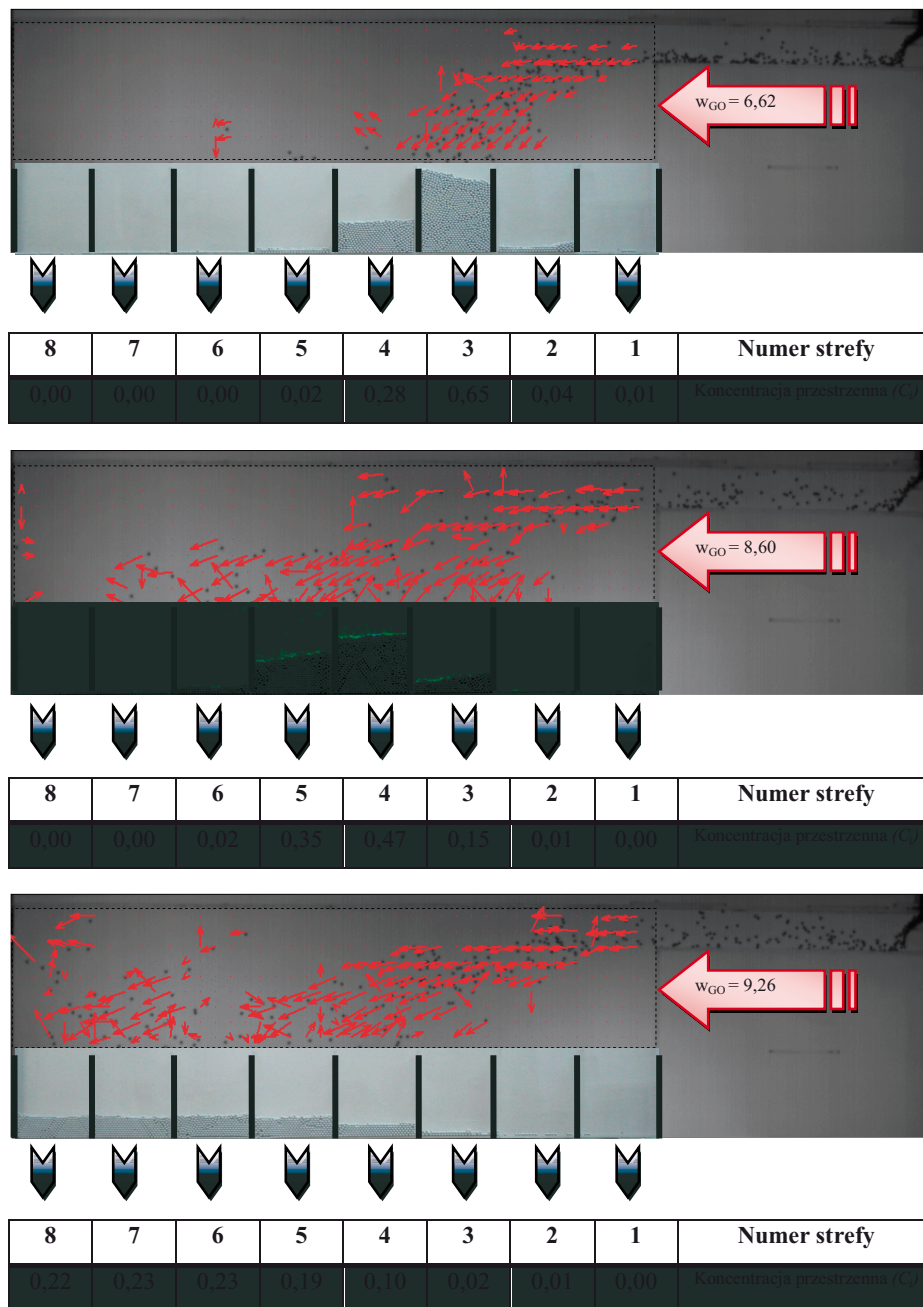
Aby dokonać porównania zachowania się różnych cząstek, zakres zmian prędkości powietrza przyjęto dla wszystkich cząstek taki sam, co oznacza, że dla cząstek lżejszych może dojść i dochodziło do zbyt odległego wyrzutu, natomiast dla cząstek cięższych nie następuje pełne wykorzystanie stref rozdziału za kanałem. Na rycinach 3–6 porównano kierunki oraz zwroty wektorów cząstek monodispersyjnych o różnych gęstościach podczas wypływu z kanału poziomego. Z otrzymanych charakterystyk pól prędkości wyodrębniono dwie strefy:

- strefę dużej zgodności sąsiadujących ze sobą wektorów, charakterystyczną dla obszaru rozbiegowego strugi mieszaniny gaz–ciało stałe;
- strefę o znacznej ilości obszarów o nierównomiernym rozkładzie kierunków i zwrotów wektorów, które są wynikiem odbijania się cząstek ciała stałego pomiędzy sobą oraz o ścianki przegród, co w rezultacie prowadzi do dalszego niezorganizowanego ruchu cząstek.

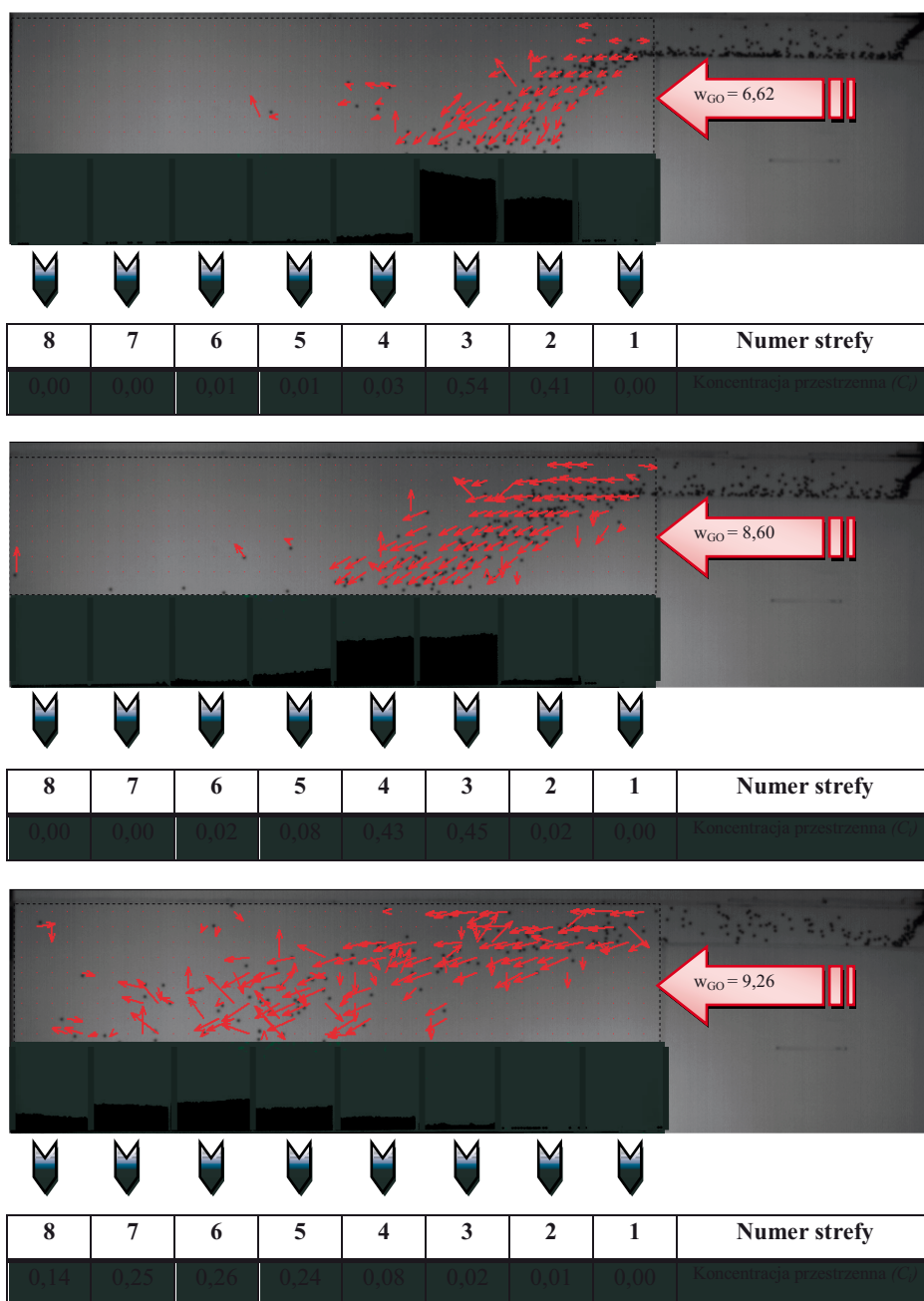
Położenie i wielkość poszczególnych stref zgodności bądź niezgodności kierunków oraz zwrotów wektorów w dużym stopniu jest zależna od gęstości materiału oraz prędkości przepływającego gazu. Dla materiału o najmniejszej gęstości K1 (ryc. 3) można zaobserwować, że widmo trajektorii ruchu cząstek zwiększa swój obszar wraz ze wzrostem prędkości nośnika, a cząstki opadają do stref odbioru materiału coraz bardziej oddalonych od kanału wylotowego. Dla materiału K1 maksymalna prędkość gazu, przy której cząstki nie ulegają odbiciu o końcową ściankę kanału to 8,60 m/s. Powyżej tej prędkości następuje zaburzenie pola, które już nie odzwierciedla naturalnych zjawisk zachodzących podczas wypływu materiału z separatora.



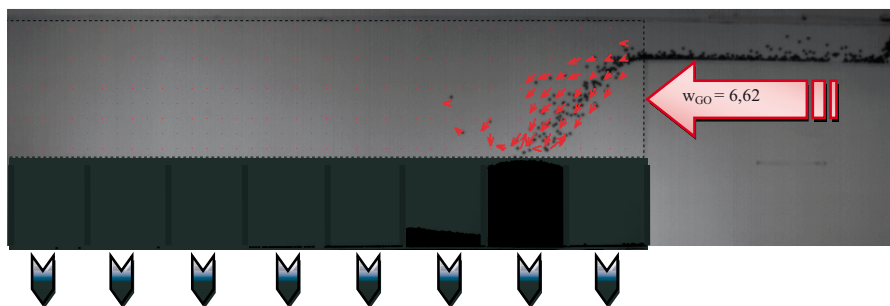
Ryc. 3. Trajektorie ruchu cząstek materiału K1 w zależności od prędkości gazu ($m_{c-p2} = 0,14$ kg/s)



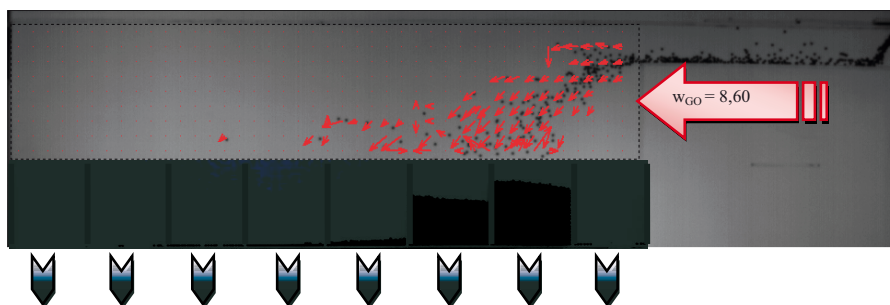
Ryc. 4. Trajektorie ruchu cząstek materiału K2 w zależności od prędkości gazu ($m_{c-p2} = 0,14$ kg/s)



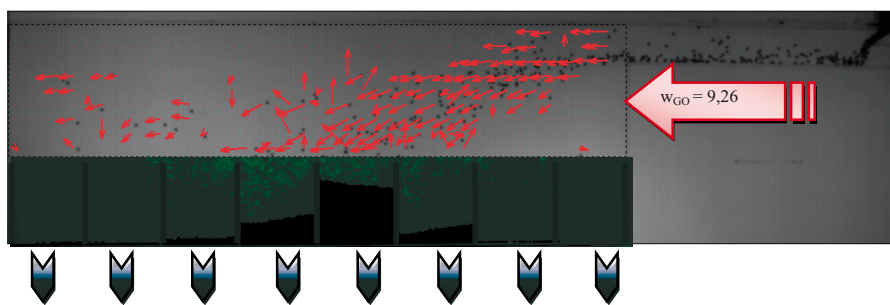
Ryc. 5. Trajektorie ruchu cząstek materiału K3 w zależności od prędkości gazu ($m_{c-p2} = 0,14$ kg/s)



8	7	6	5	4	3	2	1	Numer strefy
0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,19	0,78	0,01	Koncentracja przestrzenna (C)



8	7	6	5	4	3	2	1	Numer strefy
0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,43	0,52	0,00	Koncentracja przestrzenna (C)



8	7	6	5	4	3	2	1	Numer strefy
0,00	0,00	0,02	0,27	0,53	0,17	0,01	0,00	Koncentracja przestrzenna (C)

Ryc. 6. Trajektorie ruchu cząstek materiału K4 w zależności od prędkości gazu ($m_{c,p2} = 0,14 \text{ kg/s}$)

Dla materiału o nieco większej gęstości K2 (ryc. 4), dla najmniejszej prędkości przepływającego gazu 6,62 m/s zaobserwowano dużą zgodność kierunków oraz zwrotów wektorów. Cząstki głównie kumulowały się w sporej ilości w strefie 3 oraz 4. Zwiększenie prędkości przepływającego gazu powodowało znacznie większe zaburzenie widma trajektorii cząstek, zaobserwowano jednak, że materiał bardziej równomiernie rozłożył się w kolejnych strefach separacyjnych. Dla prędkości gazu 9,26 m/s, cząstki K2 równomiernie rozłożyły się w końcowych strefach odbioru materiału. Podobne zależności zaobserwowano dla materiału K3 (ryc. 5), gdzie również okazało się, że prędkość gazu równa 9,26 m/s powodowała dość równomierne rozmieszczenie cząstek.

Widmo trajektorii ruchu cząstek materiału o najwyższej gęstości K4 (ryc. 6) dla prędkości gazu 6,62 charakteryzuje bardzo mała rozpiętość, a cząstki szybko wytrącają się ze strugi gazu i opadają do pierwszych stref separacyjnych, co jest także widoczne jeszcze w kanale poziomym przed wypływem materiału z rurociągu. Można zauważyć, że cząstki są raczej toczone, niż unoszone strugą przepływającego gazu. Maksymalna wartość przepływającego gazu dla materiału K4 nie skutkuje równomiernym rozkładem cząstek, jak to było w przypadku materiałów lżejszych, lecz jedynie wpływa na lokalizację strefy, w której występują cząstki najliczniej.

5. Podsumowanie

Na podstawie powyższych analiz wektorowych pól prędkości materiałów o różnej gęstości i przy zmiennej prędkości przepływającego gazu wraz z uzupełniającymi je rycinami (3–6), przedstawiającymi koncentrację cząstek w danych strefach separacyjnych, należy stwierdzić, że dobierając odpowiednią prędkość gazu, można wpłynąć na równomierność rozkładu cząstek monodispersyjnych już podczas wylotu z kanału poziomego separatora. Cyfrowa anemometria obrazowa jest dobrym narzędziem obrazującym zjawiska oraz mechanizmy zachodzące podczas procesu segregacji cząstek wstępnie przetworzonych. Ponieważ analizowane materiały stanowiły cząstki monodispersyjne, można również skonstatować, że opadanie poszczególnych cząstek do sąsiadujących ze sobą stref separacyjnych jest procesem losowym, gdyż rozpiętość stref, w których gromadził się materiał był znaczny. Rozkład cząstek w poszczególnych sekcjach oraz ich rozrzut można więc uznać za miarę segregacji przestrzennej. Dla pełnego potwierdzenia przydatności technik wizualizacyjnych konieczne jest przeprowadzenie badań na frakcjach ciała stałego, odzwierciedlających w sposób ilościowy i jakościowy frakcje przetworzonych odpadów komunalnych.

Literatura

- [1] Zając D., Ulbrich R., *Nieinwazyjne metody badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz*, Politechnika Opolska, Opole 2005.
- [2] Wodzicki P., *Elementy składowe linii technologicznych do segregacji odpadów bytowych*, [w:] VIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska, materiały konferencyjne”, Koszalin-Ustronie Morskie 2006.
- [3] Wodzicki P., *Segregacja śmieci*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej” 2003, nr 21.
- [4] Shapiro M., Galperin V., *Air classification of solid particles: a review*, „Chemical Engineering and Processing” 2005, No. 44.
- [5] Swartzbaugh J.T., Duvall D.S., Diaz L.F., Savage G.M., *Recycling Equipment and Technology for Municipal Solid Waste*, William Andrew Publishing, Notes 1993.
- [6] Tchobanoglous G., Kreith F., *Handbook of Solid Waste Management*, McGraw-Hill, New York 2003.
- [7] Grant I., *Selected papers on particle image velocimetry*, SPIE Optical Engineering Press, Washington 1994.
- [8] Bińkowski G., *Zastosowanie cyfrowej anemometrii obrazowej do wyznaczania pól prędkości*, Płock 1999, praca magisterska, Politechnika Warszawska.
- [9] Tadeusiewicz R., Korohoda P., *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.

GRZEGORZ LIGUS
KARINA IGNASIAK

ASSESSMENT OF MONODISPERSING MATERIAL SEGREGATION WITH THE USED OF DIGITAL PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (DPIV) TECHNIQUE IN WASTE MANAGEMENT CONTEST

In the paper authors propose visualization research of monodispersing material separation in pneumatic separator. Conception of experimental stand with application of optical track based on fast video camera was described. Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) for assessment of physical phenomena during pneumatic segregation was used. In the paper also correlation between two-dimensional concentration factor and flow parameters in device was described.