

Łukasz Tomczak\*, Włodzimierz Mosorow\*

## **Ocena stopnia jednorodności mieszanki materiałów sypkich z wykorzystaniem technik przetwarzania obrazów**

### **1. Wprowadzenie**

Mieszanie ciał stałych jest procesem szeroko wykorzystywanym w wielu gałęziach przemysłu takich, jak np. przemysł chemiczny, farmaceutyczny lub spożywczy. Jakość mieszania, czyli stopień homogeniczności mieszanki surowców sypkich ma istotne znaczenie dla jakości otrzymanego produktu. W celu zminimalizowania ilości energii elektrycznej i czasu potrzebnego do otrzymania mieszanki homogenicznej, niezbędna jest metoda, która pozwoliłaby na ocenę stopnia jednorodności mieszanki materiałów w czasie rzeczywistym, bezpośrednio podczas przebiegu procesu przemysłowego. Niestety wiele tradycyjnych metod pomiarowych takich, jak metody wykorzystujące pomiar rezystancji mieszanki [1] oraz dyfrakcję rentgenowską [2] do określenia stopnia jej homogeniczności, może być stosowanych jedynie w laboratoriach i nie nadaje się do kontrolowania procesu w systemie on-line. Prezentowane podejście wykorzystuje techniki przetwarzania obrazów [3] oraz analizę głównych składowych [4]. Nie wpływa w żaden sposób na przedmiot badań oraz charakteryzuje się dużą szybkością, dzięki czemu może zostać wykorzystane do analizy stopnia homogeniczności mieszanki w czasie rzeczywistym. W przeciwieństwie do metody [5] charakteryzuje się pełną automatyzacją i dzięki zastosowaniu analizy głównych składowych nie zawiera etapu progowania obrazu [3], który uzależnia wynik pomiaru od przyjętej wartości progów.

### **2. Opis metody pomiaru homogeniczności mieszanki materiałów sypkich**

Proponowana metoda składa się z dwóch podstawowych etapów:

1. pobrania klatki z kamery CCD umieszczonej nad przenośnikiem taśmowym i automatycznego wyznaczenia jej prostokątnego fragmentu, który pokazuje badaną mieszaninę materiałów sypkich;

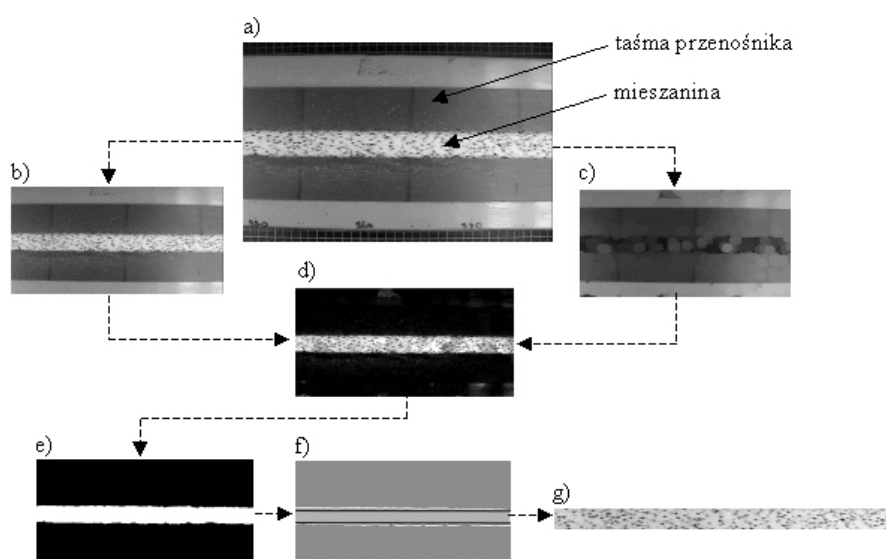
---

\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka, Łódź

2. dokonania oceny homogeniczności mieszanki, przedstawionej na uzyskanym uprzednio fragmencie klatki, z wykorzystaniem analizy głównych składowych.

### 2.1. Automatyczne wyznaczenie fragmentu klatki przedstawiającego analizowaną mieszaninę

Poszczególne klatki (rys. 1a) otrzymane za pomocą kamery CCD, pokazują taśmę przenośnika wraz z badaną mieszaniną. Do dalszej analizy homogeniczności wykorzystywany jest jedynie prostokątny fragment przedstawiający mieszaninę (rys. 1g).



**Rys. 1.** Przykładowa klatka przedstawiająca taśmę przenośnika z mieszaniną dwóch materiałów sypkich (Za zgodą The Powders and Processes Research Centre, Francja)  
Opis w tekście

W celu uzyskania tego fragmentu, na początku użytkownik zawęża obszar przeznaczony do dalszej analizy (rys. 1b). Taśma przenośnika wraz z mieszaniną jest nierównomiernie oświetlona, co jest dodatkowo potęgowane przez materiał stosunkowo łatwo odbijający światło, z którego została ona wykonana. W celu prawidłowego przeprowadzenia segmentacji, fragment klatki (rys. 1b) jest najpierw poddany morfologicznemu procesowi otwierania obrazów w skali szarości [6], w wyniku czego otrzymujemy obraz przedstawiony na rysunku 1c, zostaje on odjęty od fragmentu klatki przedstawionego na rysunku 1b. Uzyskany w ten sposób obraz (rys. 1d) jest poddany segmentacji z wyznaczeniem progu metodą Otsu [6], a następnie morfologicznej operacji zamykania i usuwania obiektów o małym polu powierzchni (rys. 1e). W końcowym etapie zostaje wyznaczony kontur mieszanki (rys. 1f) i jej prostokątny fragment przeznaczony do analizy homogeniczności (rys. 1g).

## 2.2. Ocena homogeniczności z wykorzystaniem analizy głównych składowych

Do analizy homogeniczności wykorzystywany jest jedynie prostokątny fragment obrazu, który przedstawia badaną mieszaninę. Załóżmy, że liczba jego wierszy wynosi  $N$ .

Zmiany koncentracji poszczególnych składników mieszanej wzdłuż wierszy obrazu mają charakter losowy i mogą być traktowane jako stochastyczne procesy stacjonarne

$$X_i(m), i = 0, \dots, N-1, m = 0, \dots, M-1,$$

gdzie:

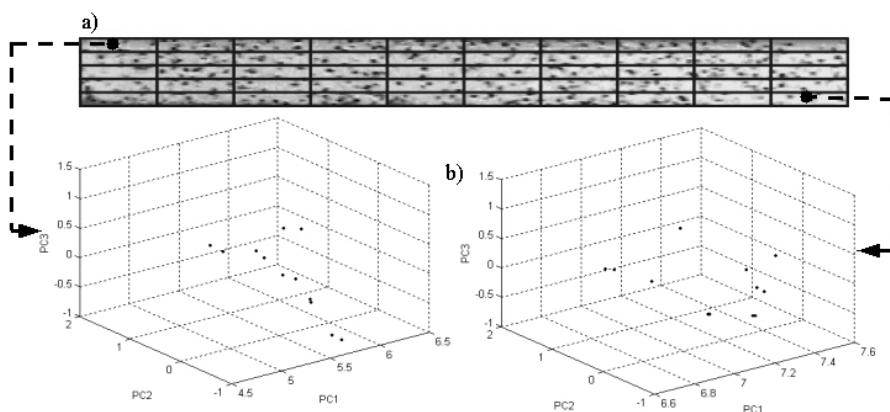
- $M$  – liczba pikseli w danym wierszu obrazu,
- $m$  – numer piksela,
- $i$  – numer wiersza.

W związku z tym, matematyczny model obrazu może zostać zdefiniowany jako macierz  $X = [X_i(m)]$ ,  $i = 0, \dots, N-1$ , gdzie  $X_i(m)$  jest procesem elementarnym.

W celu sformułowania kryterium homogeniczności, zaproponowano wykorzystanie analizy głównych składowych PCA (*Principle Component Analysis*) procesów elementarnych [4]. Jest ona jedną z bardziej rozpowszechnionych metod analizy danych wielowymiarowych. Służy przede wszystkim do redukcji wymiarowości danych, ich wizualizacji w przestrzeni oraz odsumiania.

PCA definiuje główne składowe, będące wektorami własnymi macierzy kowariancji procesów elementarnych. Każdemu wektorowi własnemu odpowiada jego wartość własna, która jest miarą liczby wariancji danych przez niego opisywanych. Wektor własny o największej wartości własnej stanowi pierwszą główną składową  $PC_1$  (*First Principle Component*). Wektor własny o kolejnej pod względem wielkości wartości własnej stanowi drugą główną składową  $PC_2$  (*Second Principle Component*) i tak dalej. Procesy elementarne są rzutowane na  $R$ -wymiarową przestrzeń zdefiniowaną przez  $PC_r$ ,  $r = 1, \dots, R$ , dzięki temu uzyskujemy  $R$ -wymiarową reprezentację procesów elementarnych, zawierającą maksymalną wariancję danych. W zależności od rodzaju problemu można przyjąć, że istotne są te pierwsze główne składowe, które zawierają 90÷95% zmienności danych, pozostałe składowe się pomijają. Dzięki temu możliwa jest redukcja wymiarowości danych.

Analizę przykładowych klatek, otrzymanych za pomocą kamery CCD, przeprowadzono w środowisku Matlab. Uzyskany w sposób automatyczny fragment obrazu, który pokazuje wyłącznie mieszaninę materiałów sypkich, jest dzielony na  $L$  obszarów o tym samym rozmiarze (rys. 2a). Proporcje boków pojedynczego obszaru zostają zdefiniowane przez użytkownika. Następnie procesy elementarne analizowanych obszarów zostają przedstawione w trójwymiarowej przestrzeni. W tym celu wykorzystano trzy główne składowe  $PC_r$ ,  $r = 1, 2, 3$  ponieważ razem przedstawiają one procent zmienności danych większy niż 98%. Na rysunku 2b pokazano przykład reprezentacji procesów elementarnych dwóch obszarów w trójwymiarowej przestrzeni głównych składowych.



**Rys. 2.** Fragment klatki z mieszaniną dwóch materiałów sypkich, podzielony na obszary o tych samych rozmiarach ( $L=50$ ) (a); reprezentacja procesów elementarnych dwóch obszarów w trójwymiarowej przestrzeni głównych składowych (b)

Mieszanina może być zdefiniowana jako homogeniczna, jeżeli każda jej próbka posiada taki sam skład i właściwości [7]. W proponowanym podejściu jako próbki analizowanej mieszaniny wykorzystano obszary, na które został podzielony jej obraz. W celu zdefiniowania kryterium homogeniczności mieszaniny przedstawionej we fragmencie pojedynczej klatki, wszystkie obszary, na które został on podzielony, są ze sobą porównywane przy użyciu współczynnika podobieństwa  $s_d$  zdefiniowanego za pomocą równania

$$s_d = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \sqrt{(PC_1^{di} - PC_1^{ji})^2 + (PC_2^{di} - PC_2^{ji})^2 + (PC_3^{di} - PC_3^{ji})^2} \quad (1)$$

gdzie:

- $d$  – numer obszaru,  $d = 1, \dots, L, d \neq j$ ,
- $K$  – liczba wierszy w obszarze,
- $L$  – liczba obszarów, na które został podzielony obraz mieszaniny,
- $PC_k^{ji}$  –  $k$ -ta główna składowa obliczona dla  $i$ -tego wiersza w  $j$ -tym obszarze.

Empirycznie udowodniono, że wartość  $s_d$  jest mniejsza dla obszarów do siebie podobnych, rośnie natomiast, gdy różnica między nimi jest większa. Dla mieszaniny idealnie homogenicznej prostokątne obszary, na które został podzielony jej obraz, są takie same, a wartość  $s_d$  obliczona dla każdego z nich jest równa 0.

Następnie za pomocą równania (2) obliczana jest suma  $S_n$  wartości  $s_d$ , wyznaczonych dla wszystkich obszarów fragmentu klatki o numerze  $n$ .

$$S_n = \sum_{d=1}^L s_d[n] \quad (2)$$

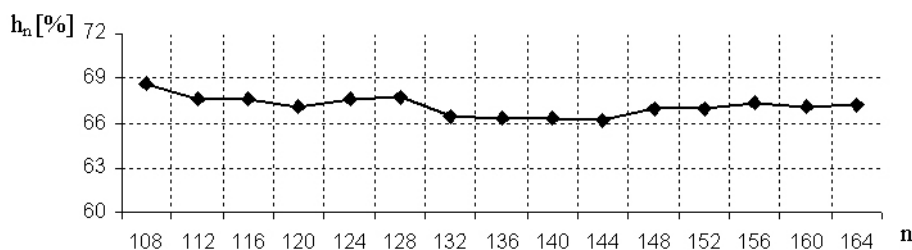
Ostatecznie dla fragmentu klatki o numerze  $n$ , pokazującego analizowaną mieszaninę, zdefiniowano współczynnik homogeniczności  $h_n$  za pomocą równania

$$h_n = \left(1 - \frac{S_n}{S_0}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie  $S_0$  jest sumą wartości  $s_d$  obliczonych dla mieszaniny idealnie heterogenicznej, która została wykorzystana jako wzorzec heterogeniczności.

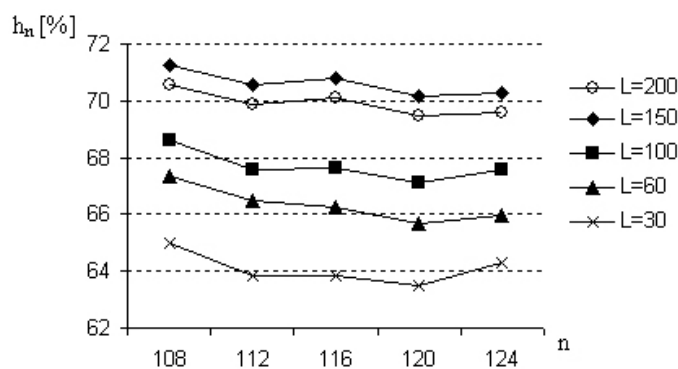
### 3. Wyniki pomiarów

Proponowane podejście zostało wykorzystane do pomiaru stopnia homogeniczności mieszaniny materiałów sypkich. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 3. Wartość współczynnika homogeniczności, obliczonego dla sekwencji 15 klatek ( $L = 100$ ), zawiera się w przedziale pomiędzy 66% a 69%, osiąga minimum dla klatki 144 i maksimum dla klatki 108.



**Rys. 3.** Współczynniki homogeniczności  $h_n$  obliczone dla przykładowej sekwencji 15 klatek ( $L = 100$ )

W celu obliczenia współczynnika homogeniczności w początkowym etapie należy wybrać liczbę obszarów  $L$ , na jaką ma zostać podzielony obraz przedstawiający analizowaną mieszaninę. Pojedynczy obszar powinien reprezentować jakość mieszaniny i dlatego jego rozmiar musi zostać dopasowany do rozmiaru cząsteczek poszczególnych komponentów mieszaniny. Przeprowadzone pomiary pokazują, że współczynnik homogeniczności zależy od przyjętej liczby  $L$ . Na rysunku 4 przedstawiono wykresy współczynników homogeniczności obliczonych dla przykładowej sekwencji klatek, dla pięciu wartości  $L$ . Współczynnik homogeniczności rośnie wraz ze wzrostem  $L$  i osiąga maksimum dla  $L = 150$ . Pomimo to jednak, jak można zauważyć na rysunku 4, zmiany współczynnika homogeniczności są niezależne od liczby obszarów i są obserwowane dla każdej z wartości  $L$ . Współczynnik homogeniczności przyjmuje wartość największą dla klatki 108 i najmniejszą dla klatki 120 dla poszczególnych wartości  $L$ .



Rys. 4. Współczynniki homogeniczności  $h_n$  obliczone dla różnej liczby obszarów  $L$ , na które został podzielony fragment klatki przedstawiający analizowaną mieszaninę

#### 4. Wnioski

W niniejszym artykule zaproponowano metodę oceny stopnia homogeniczności mieszaniny materiałów sypkich, opartą na analizie jej obrazu otrzymanego z kamery CCD, która została umieszczona nad przenośnikiem taśmowym. Przedstawione podejście wykorzystuje techniki przetwarzania obrazów i analizę głównych składowych, dzięki czemu posiada szereg zalet w porównaniu z tradycyjnymi metodami pomiaru homogeniczności. Analiza obrazu mieszaniny materiałów sypkich nie zakłóca w jakikolwiek sposób procesu transportu mieszaniny. Poza tym przedstawiona metoda odznacza się dużą szybkością, co umożliwia wykorzystanie jej do kontroli stopnia homogeniczności mieszaniny materiałów sypkich, bezpośrednio na będącym w ruchu przenośniku taśmowym.

#### Literatura

- [1] Kalyon D.M., Elvan B.: *Electrical properties of composites as affected by the degree of mixedness*. Polymer Engineering and Science, nr 42, 2002, 1609–1617
- [2] Yazici R., Kalyon D. M.: *Analysis of degree of mixing in filled polymers by wide-angle X-ray diffraction*. SPE ANTEC Technical Papers, nr 43, 1997, 2076–2080
- [3] Pavlidis T.: *Grafika i przetwarzanie obrazów*. Warszawa, WNT 1987
- [4] Morrison D. F.: *Wielowymiarowa analiza statystyczna*. Warszawa, PWN 1990
- [5] Tomczak Ł., Mosorow W.: *Analiza jednorodności mieszaniny materiałów sypkich przy użyciu kamery CCD*. Pótrocznik AGH Automatyka, nr 3, 2004, 34–39
- [6] Malina W., Amblameyko S., Pawlak W.: *Podstawy cyfrowego przetwarzania obrazów*. Warszawa, Exit 2002
- [7] Terence A.: *Particle size measurement*. London, Chapman and Hall 1990