

JAN LIMANOWSKI  
ALEKSANDER KUBIAK

Wydział Nauki o Żywności, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

# Ocena efektu mieszania materiałów ziarnistych metodą komputerowej analizy obrazu

## Wprowadzenie

Ocena poziomu jednorodności mieszanin materiałów ziarnistych, np. piasku i rozdrobnionej stłuczki szklanej przy produkcji szkła, mączki surowcowej do produkcji cementu, mieszanin farmaceutycznych, granulowanych mieszanek paszowych, nawozów mineralnych, tworzyw sztucznych i mieszanin spożywczych (np. mąki, musli, mieszanki cukiernicze, owocowe, warzywne, inne), jest podstawowym zagadnieniem związanym z ich produkcją. W odróżnieniu od wielu mieszanin ciekłych i gazowych wykazujących pełną jednorodność, w przypadku materiałów ziarnistych nie dzieje się tak nigdy, a o rozkładzie składników w masie można wnioskować wyłącznie na podstawie analizy pobranych próbek [1]. Na wynik oceny jednorodności mieszaniny ziarnistej mają więc wpływ reprezentatywność próbki, jej wielkość, liczba próbek, sposób statystycznej obróbki danych. Celem pracy jest przyjęcie i weryfikacja obiektywnych i nieinwazyjnych metod oceny efektu mieszania materiałów ziarnistych, na przykładzie komputerowej analizy obrazu mieszaniny i parametrów jego tekstury.

## Metodyka badań

Badania modelowe procesu mieszania wykonano metodą przesywową w przezroczystej rurze z polimetakrylanu metylu o wysokości 2 m i średnicy 50 mm. Jako komponenty wykorzystano kule z tworzyw sztucznych o średnicy 6 mm i gęstości nasypowej 524,2 kg/m<sup>3</sup> (w kolorze złotym) oraz o średnicy 8 mm i gęstości nasypowej 490,2 kg/m<sup>3</sup> (w kolorze czerwonym). Górną połowę rury podzielono wzdłużnie przegrodą na dwie równe części pełniące funkcję kaset zasypowych komponentów. Dolną połowę mieszalnika, pełniącą funkcję odbieralnika, zajmowało mieszadło statyczne. Do badań użyto trzy typy mieszadeł własnej konstrukcji [3], różniących się kątem odgięcia listków (30, 45 i 60°). Przed wykonaniem próby mieszania wolną przestrzeń między mieszadłem a ścianką odbieralnika wypełniano ziarnami rzepaku, a kasety zasypowe – kulami złotymi i czerwonymi. Przesyp zawartości mieszalnika uruchamiano unosząc aparat do góry i otwierając szczelinę między krawędzią rury a dnem stożkowym. Miejsce usuwanego rzepaku zajmowała mieszanina kul z kaset zasypowych, sformowana w trakcie przesypu przez mieszadło. Proces przerywano w chwili całkowitego wysypania rzepaku z mieszalnika opuszczając aparat na dno stożkowe. Zatrzymane w odbieralniku kule fotografowano. Efekt procesu określano na podstawie analizy obrazów mieszaniny. Niezależnie analizowano obrazy zmieszania po przesypaniu składników przez 1/3, 2/3 i 3/3 długości mieszadła (I, II i III droga mieszania). Obraz binarny mieszaniny wyznaczano przez nałożenie

na każdą z analizowanych fotografii siatki metrycznej umieszczonej na przezroczystej folii. Dzięki siatce można było identyfikować położenie dowolnej kuli w zbiorze i kolory wszystkich kul z nią sąsiadujących. Polom siatki zajęтым przez kule czerwone przyporządkowano wartość „1”, a polom zajęтым przez kule złote przyporządkowano wartość „0”. Dalej umożliwiło to utworzenie macierzy koekurencji [2] wskazującej na częstość sąsiedowania kul złotych i czerwonych. W przypadku obrazów dwukolorowych macierz składała się z dwóch wierszy i dwóch kolumn [4]. Na jej podstawie wyznaczano parametry charakteryzujące teksturę obrazu [5]: średnią, wariancję, jednolitość, entropię, korelację, homogeniczność, bezwładność, odcień skupień i wyniosłość skupień (Tablica 1). Obliczone wartości parametrów porównywano z wartościami modelowymi obliczonymi dla przypadków pełnej segregacji i idealnego zmieszania (Tablica 2 i 3).

Tablica 1

Parametry charakteryzujące teksturę obrazu

Parametr tekstury	Postać matematyczna
Średnia	$\mu = i \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} p(i, j)$
Jednolitość	$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \{p(i, j)\}^2$
Korelacja	$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{(i - \mu)(j - \mu)}{\sigma^2} p(i, j)$
Bezwładność	$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (i - j)^2 p(i, j)$
Wyniosłość skupień	$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (i + j - 2\mu)^4 p(i, j)$
Wariancja	$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (1 - \mu)^2 p(i, j)$
Entropia	$-\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} p(i, j) \log(p(i, j))$
Homogeniczność	$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{1}{1 + (i - j)^2} p(i, j)$
Odcień skupień	$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (i + j - 2\mu)^3 p(i, j)$

$p(i, j)$  – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia o współrzędnych  $(i, j)$  w macierzy koekurencji

## Omówienie wyników badań

Na podstawie wartości parametru tekstury „średnia” (Tabl. 2 i 3) można wstępnie oszacować względną ilość obiektów różnoimiennych w próbce. Niemal równe wartości w przypadku mieszanin modelowych świadczą o bardzo zbliżonej liczbie obiektów jednoimiennych w próbkach typu „pełna segregacja” (Model 1) i „pełne zmieszanie” (Model 2). Wartość średniej

większa od odpowiednio 1,513 i 1,500 świadczy zawsze o większej liczbie kulek złotych w obserwowanym obszarze próbki. Na podstawie znajomości wartości parametru *średnia* nie można więc ocenić efektu mieszania, chociaż zmienia się ona wraz z rodzajem mieszadła i długością drogi mieszania.

Równość wartości parametru *wariancja* dla mieszanin modelowych (Tabl. 3) i spadek jego wartości wraz ze wzrostem średniej oznacza, że w przeciwieństwie do innych parametrów tekstury jest on bardziej związany z ilością ziaren mieszaniny niż kompozycją ich rozkładu w populacji.

Parametrami zależnymi od średniej bądź wariancji są korelacja, odcień skupień i wyniosłość skupień. W przypadku dwóch ostatnich parametrów ich wartości obliczone dla mieszanin rzeczywistych przekroczyły granice zmienności nakreślone przez rozkłady modelowe, a rozstępowi wartości parametru *korelacja* dla rozkładów modelowych (0,820) towarzyszył rozstęp wartości obliczonych 0,111 w przypadku użycia najkrótszego i najdłuższego mieszadła 30° (Tabl. 2), przy czym zmiany zachodziły w kierunku wzrostu dyspersji układu.

Tablica 2

Zestawienie wartości parametrów tekstury obrazu mieszaniny materiałów ziarnistych uzyskanych za pomocą mieszadła statycznego 30 i 45°

Parametry	Droga mieszania					
	I	II	III	I	II	III
	Mieszadło statyczne 30°			Mieszadło statyczne 45°		
średnia	1,699	1,590	1,487	1,519	1,359	1,596
wariancja	0,211	0,242	0,250	0,250	0,230	0,241
jednolitość	0,333	0,266	0,252	0,259	0,292	0,270
entropia	0,310	0,330	0,321	0,321	0,286	0,326
korelacja	-0,035	-0,060	0,076	0,178	0,025	0,041
homogeniczność	0,782	0,744	0,769	0,795	0,776	0,769
bezwładność	0,436	0,513	0,462	0,410	0,449	0,462
odcien skupień	-0,150	-0,070	0,020	-0,030	0,140	-0,100
wyniosłość skupień	0,390	0,450	0,540	0,590	0,480	0,510



Wydaje się, że mimo prawidłowych zmian efektu mieszania w funkcji drogi, mała zmienność parametru na tle jego teoretycznej zmienności całkowitej dyskwalifikują go jako źródło informacji o jakości mieszaniny.

Zachowanie pozostałych czterech parametrów można ocenić jako bardzo podobne. Najmniejszy zakres zmienności uzyskano w przypadku parametru *entropia*. Parametr ten o wartościach zbliżonych do zmieszania idealnego uzyskano na końcu mieszadła 30°, a mieszadło 60°, intensywnie mieszające na pierwszym odcinku, dalej powodowało segregację składników.

Efekt działania mieszadeł można dokładniej obserwować w szerszym zakresie zmienności pozostałych parametrów.

Tablica 3

Zestawienie wartości parametrów tekstury obrazu mieszaniny materiałów ziarnistych uzyskanych za pomocą mieszadła statycznego 60° i wartości modelowych

Parametry	Mieszadło statyczne 60°			Wartości modelowe	
	Droga mieszania			Model 1	Model 2
	I	II	III		
średnia	1,468	1,670	1,673	1,513	1,500
wariancja	0,249	0,221	0,220	0,250	0,250
jednolitość	0,256	0,322	0,320	0,389	0,251
entropia	0,318	0,306	0,309	0,245	0,323
korelacja	0,125	0,145	0,097	0,743	-0,077
homogeniczność	0,782	0,812	0,801	0,936	0,731
bezwładność	0,436	0,378	0,397	0,128	0,538
odcien skupień	0,040	-0,220	-0,200	-0,040	0,000
wyniosłość skupień	0,560	0,550	0,510	0,870	0,460

Działania mieszadła 45° nie można ocenić jednoznacznie. Wydłużanie drogi mieszania skutkowało naprzemiennie bądź wzrostem, bądź spadkiem wartości czterech parametrów tekstury.

### Wnioski

1. Komputerowa analiza obrazu i wartości wybranych parametrów tekstury: jednolitość, entropia, homogeniczność i bezwładność mogą być pomocne w doborze długości drogi mieszania umożliwiającej uzyskanie określonego efektu.
2. Na podstawie wartości parametrów: średnia i wariancja można wnioskować o względnej liczebności różnoimennych składników mieszaniny. Nie informują one o jakości mieszaniny.
3. Ze względu na związek ze średnią lub wariancją, do oceny efektu mieszania układów analizowanych jako binarne nie powinno się używać takich parametrów jak korelacja, odcień skupień i wyniosłość skupień.
4. Wartości parametrów tekstury obrazu wykazały brak wyraźnej zależności z długością drogi mieszania, a podobny końcowy efekt mieszania uzyskano za pomocą najkrótszego odcinka każdego z badanych mieszadeł.

### LITERATURA

1. J. Boss, Mieszanie materiałów ziarnistych, PWN, Warszawa, 1987.
2. A. Kubiak, J. Limanowski: Inż. Maszyn, vol. XXII, 115, (2004).
3. J. Limanowski, patent nr 335709, Warszawa, WUP, 2006.
4. J. Limanowski, A. Kubiak: Inż. Ap. Chem. 44, nr 1-2, 65 (2005).
5. S. Majumdar, D.S. Jayas: Trans. ASAE, 43, 1681, (2000).