

## WŁAŚCIWOŚCI KOHEZYJNE WYBRANYCH PROSZKÓW SPOŻYWCZYCH

Karolina Szulc, Andrzej Lenart

*Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji,  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

**Streszczenie.** Celem pracy było zbadanie zdolności do płynięcia w teście bezpośredniego ścinania wybranych proszków spożywczych dostępnych na rynku polskim: mleko w proszku, cukier puder, proszek truskawkowy, kaszka ryżowa i kaszka kukurydziana. Zakres pracy obejmował analizę parametrów plastycznego płynięcia oraz analizę składu granulometrycznego i gęstości nasypowej badanej żywności w proszku. Wyznaczona funkcja płynięcia określa badane produkty tj. mleko w proszku, cukier puder, kaszkę kukurydzianą i kaszkę ryżową KR2 jako proszki kohezyjne lub słabo kohezyjne, natomiast proszek truskawkowy i kaszkę ryżową KR1 jako proszki słabo kohezyjne lub niekohezyjne, w zależności od naprężenia konsolidującego.

**Słowa kluczowe:** żywność w proszku, test ścinania, kohezja, funkcja płynięcia

### Wykaz oznaczeń

- $u$  – zawartość wody [%],
- $d_{10}$  – średnica wyznaczająca dokładnie 10% objętości zbioru cząstek [ $\mu\text{m}$ ],
- $d_{50}$  – średnica wyznaczająca dokładnie 50% objętości zbioru cząstek [mediana][ $\mu\text{m}$ ],
- $d_{90}$  – średnica wyznaczająca dokładnie 90% objętości zbioru cząstek [ $\mu\text{m}$ ],
- $\rho_L$  – gęstość nasypowa luźna [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],
- $\rho_T$  – gęstość nasypowa utręszona [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],
- $\rho_k$  – gęstość nasypowa materiału skonsolidowanego [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],
- $\varphi$  – kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego [ $^\circ$ ],
- $\delta$  – efektywny kąt tarcia wewnętrznego [ $^\circ$ ],
- $C$  – kohezja [Pa],
- $\sigma_E$  – naprężenie konsolidujące [Pa],
- $\sigma_I$  – największe naprężenie konsolidujące [Pa],
- $\sigma_c$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [Pa],
- $ff_c$  – indeks płynięcia – stosunek  $\sigma_I / \sigma_c$  [-],
- $FF$  – funkcja płynięcia [-].

## Wstęp

Wraz ze wzrastającą ilością i różnorodnością proszków produkowanych w przemyśle spożywczym, istnieje potrzeba informacji o ich przetwarzaniu i obrocie. Charakterystyki te są szczególnie ważne w przypadku żywności w proszku ze względu na jej złożoność. Proszki, jak i materiały ziarniste mogą być produkowane z uwzględnieniem różnych właściwości fizycznych. Pomiar właściwości fizycznych jest ważny, gdyż właściwości te pomagają zdefiniować proszek oraz odnoszą się do jego dalszego obrotu i transportu, magazynowania i przetwarzania [Fitzpatrick i in. 2004b; Turchiuli i in. 2005].

Zdolność do płynięcia proszków i zachowanie się pod naciskiem masy złoza oraz temperatura i wilgotność są szczególnie ważne w operacjach, taki jak: magazynowanie w zbiornikach i silosach, transport, mieszanie i dozowanie. Zdolność płynięcia pojedynczych cząstek proszku jest bardzo ważną właściwością fizyczną. Niska zdolność materiału do płynięcia sprawia często problemy praktyczne, proszki takie sprawiają trudności w obrocie tworząc np. zatory w silosie. [Teunou i in. 1999; Domian i Poszytek 2004].

Szybkość płynięcia proszku ma także wpływ na kohezję i ściśliwość. Kohezja zależy od wielu parametrów fizycznych, tj. kształtu cząstek, higroskopijności, porowatości, aktywności elektrostatycznej [Chaudhuri i in. 2006; Feritas-Eduardo i in. 2007]. Istnieje odwrotna zależność między kohezją materiałów w formie proszku i zdolnością ich do płynięcia. Natomiast ściśliwość jest to zdolność cząstek proszku do zbrylania (zlepiania się) w niewielkie objętościowo twory i określana jest z różnicy między masą i objętością nasypową. Objętość nasypowa (lub gęstość cząstek) mierzona jest wyłącznie z powietrzem zawartym wewnątrz cząstek [Santomaso i in. 2003]. Proszki, tzw. wolno płynące charakteryzują się słabą ściśliwością [Turchiuli i in. 2005; Żbikowski i Żbikowska 2007].

## Cel i metodyka badań

Celem pracy było określenie kohezji na podstawie zdolności do płynięcia w teście bezpośredniego ścinania pięciu różnych proszków spożywczych (mleko w proszku, cukier puder, proszek truskawkowy, kaszka ryżowa i kaszka kukurydziana).

Zakres pracy obejmował również zbadanie wybranych właściwości fizycznych żywności w proszku obejmujących skład granulometryczny i gęstość nasypową cząstek.

Materiał badawczy stanowiły następujące proszki spożywcze: mleko pełne w proszku (MP), cukier puder (CP), proszek truskawkowy (PT), kaszka ryżowa o wielkości cząstek -  $0,2 < d < 0,63$  mm (KR1) i  $0,8 < d < 1,25$  mm (KR2), kaszka kukurydziana ( $0,2 < d < 0,63$  mm) (KK).

Badania właściwości płynięcia przeprowadzono metodą bezpośredniego ścinania w aparacie przystosowanym do procedury pomiarowej zgodnej z teorią Jenike (komora pomiarowa o średnicy 95 mm i wysokości 50 mm) [Domian i Poszytek 2004].

Dla badanych proszków spożywczych wyznaczono następujące parametry plastycznego płynięcia [Horabik i Grochowicz 2002; Domian i Poszytek 2004; Fitzpatrick i in. 2004a]: kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego, efektywny kąt tarcia wewnętrznego, kohezję, największe naprężenie konsolidujące, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, indeks płynięcia. Badane kaszki scharakteryzowano funkcją płynięcia  $FF$  oraz gęstością nasypową materiału skonsolidowanego  $\rho_k$ .

Skład granulometryczny badanych proszków spożywczych wyznaczano z wykorzystaniem analizatora wielkości cząstek ciał stałych w powietrzu AWK – V 97 / Kamika Warszawa.

Gęstość nasypową luźną  $\rho_L$  i utrzęśioną  $\rho_T$  oznaczano z wykorzystaniem objętościomierza wstrząsowego STAV 2003 / Engelsmann AG, Germany.

## Omówienie wyników badań

Skład granulometryczny cząstek odgrywa decydującą rolę w ocenie proszków, gdyż powiązany jest on z cechami użytkowymi żywności w proszku, a także wpływa na zachowanie podczas dalszego jej obrotu. Wielkość cząstek jest jedną z najistotniejszych właściwości definiujących zdolność materiału w proszku do płynięcia (sympkość). Gdy średnica cząstek przekracza 200  $\mu\text{m}$ , proszki mogą charakteryzować się dobrą sympkością, natomiast proszki drobne zalicza się do proszków kohezyjnych, które mogą stwarzać problemy przy dozowaniu. W tabeli 1 zestawiono wartości średnicy cząstek wyznaczających dokładnie 10, 50 i 90% objętości zbioru cząstek ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  i  $d_{90}$ ). Przedstawione wyniki wskazują na znaczące różnice w wielkości cząstek pomiędzy poszczególnymi proszkami spożywczymi. Największy rozrzut wielkości cząstek posiadała kaszka ryżowa KR2 ( $0,8 < d < 1,25$  mm), różnice pomiędzy cząstkami osiągały nawet 683  $\mu\text{m}$ . Kaszka ryżowa KR1 i kaszka kukurydziana KK charakteryzowały się zbliżonym rozrzutem wielkości cząstek (389 i 383  $\mu\text{m}$ ). Najmniejszy rozrzut wielkości cząstek wykazywał proszek truskawkowy tj. 245  $\mu\text{m}$ . Największą średnią średnicą (medianą)  $d_{50}$  cechowała się kaszka ryżowa KR2 867  $\mu\text{m}$ , zaś najmniejszą medianę posiadał cukier puder CP 208  $\mu\text{m}$  i mleko w proszku MP 220  $\mu\text{m}$ .

Tabela 1. Właściwości fizyczne wybranych proszków spożywczych  
Table 1. Physical properties of selected food powders

Proszki	Mleko pełne w proszku MP	Cukier puder CP	Proszek truskawkowy PT	Kaszka ryżowa KR1	Kaszka ryżowa KR2	Kaszka kukurydziana KK
$u$ [%]	3,1	0,42	6,3	5,2	5,2	4,0
$d_{10}$ [ $\mu\text{m}$ ]	112	84	117	277	560	203
$d_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	220	208	254	472	867	380
$d_{90}$ [ $\mu\text{m}$ ]	409	420	362	666	1243	586
$\rho_L$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	464	538	557	227	189	185
$\rho_T$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	596	730	710	258	210	214

Źródło: obliczenia własne autora

Gęstość nasypową wykorzystuje się do charakterystyki materiałów w proszku. Gęstość nasypowa proszków, czy innych sypkich materiałów wykazuje istotną zależność związaną z upakowaniem złoża cząstek, czyli ściśliwością [Żbikowski i Żbikowska 2007]. Gęstość nasypowa luźna  $\rho_L$  określa objętość proszku luźno przesypanego razem z objętością przestrzeni między cząstkami. W wyniku ubijania złoża materiału, mniejsze cząstki przechodzą w puste przestrzenie pomiędzy większymi i w efekcie objętość proszku zmniejsza się.

Obliczona gęstość materiału utrzęsionego (upakowanego) jest tak zwaną gęstością nasypową utrzęsioną  $\rho_T$ . Gęstość nasypowa luźna i utrzęsiona są charakterystyczne dla danego materiału w proszku i zależą od składu granulometrycznego, a tym samym na ich wielkość ma wpływ porowatość złoza. Badane kaszki – ryżowa i kukurydziana charakteryzowały się znacznie mniejszą wartością gęstości nasypowej w porównaniu do pozostałych proszków (cukier puder, mleko w proszku, proszek truskawkowy). Gęstość nasypowa badanych kaszek była 2-3 krotne niższa w stosunku do pozostałych materiałów w proszku (tab. 1.). Największą gęstością luźną i utrzęsioną cechował się proszek truskawkowy i cukier puder, a najniższą gęstość nasypową uzyskała kaszka kukurydziana i kaszka ryżowa KR2.

Tabela 2. Parametry plastycznego płynięcia wybranych proszków spożywczych  
Table 2. Plastic flow parameters for selected food powders

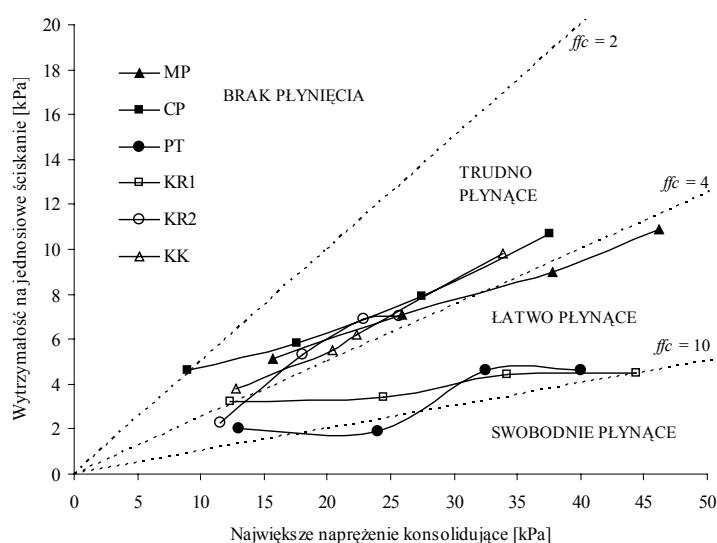
Proszki	$\sigma_E$ [kPa]	$\rho_k$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$\varphi$ [°]	$\delta$ [°]	$C$ [kPa]	$ff_c$ [-]
Mleko w proszku MP	17,24	597	36	41	2,79	4,2
	13,03	592	38	43	2,42	4,2
	8,83	587	38	45	1,84	3,6
	4,62	579	42	48	1,15	3,1
Cukier puder CP	17,24	806	29	36	3,79	3,5
	13,03	773	27	35	2,36	3,5
	8,83	750	15	35	1,92	3,0
	4,62	737	18	34	1,71	2,0
Proszek truskawkowy PT	17,24	674	36	42	1,05	8,7
	13,03	666	40	39	1,22	7,1
	8,83	665	37	40	0,39	12,6
	4,62	665	31	36	0,50	6,5
Kaszka ryżowa KR1	17,24	223	36	40	1,28	9,9
	13,03	223	35	40	1,26	7,8
	8,83	222	37	41	0,76	7,2
	4,62	207	34	44	0,79	3,8
Kaszka ryżowa KR2	17,24	223	13	22	2,64	3,7
	13,03	221	17	27	2,48	3,3
	8,83	216	36	35	1,54	3,4
	4,62	215	35	39	0,51	5,0
Kaszka kukurydziana KK	17,24	212	23	32	3,22	3,5
	13,03	205	21	25	2,44	3,6
	8,83	199	30	38	1,69	3,7
	4,62	199	30	41	1,26	3,4

*Źródło: obliczenia własne autora*

Właściwości materiału do płynięcia uzyskane w testach bezpośredniego ścinania zostały przedstawione w tabeli 2. Gęstość materiału skonsolidowanego wyznaczona na podstawie testu bezpośredniego ścinania, odniesiona do gęstości nasypowej utrzęsionej może być wyróżnikiem właściwości płynięcia materiału sypkiego. Interpretując wartości gęstości materiału skonsolidowanego  $\rho_k$  można stwierdzić, że badane produkty wykazują podobną tendencję, w stosunku do wartości gęstości nasypowej utrzęsionej  $\rho_T$ . Największą gęstość

materiału w proszku wykazywał cukier puder i proszek truskawkowy, najniższą zaś kaszka kukurydziana i kaszka ryżowa KR2, podobnie jak w przypadku gęstości nasypowej.

Kinetyczny  $\phi$ , jak i efektywny  $\delta$  kąt tarcia wewnętrznego jest charakterystyczny dla danego materiału sypkiego i zależy od wielkości naprężenia konsolidującego. Uzyskane wyniki efektywnego kąta tarcia wewnętrznego  $\delta$  charakteryzują się wyższymi wartościami w stosunku do wartości uzyskanych dla kinetycznego kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  niezależnie od rodzaju badanego proszku (tab. 2). Mleko w proszku, proszek truskawkowy i kaszka ryżowa KR1 posiadały najwyższe wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  i  $\delta$ , najmniejsze zaś wartości wykazywał cukier puder.



Źródło: obliczenia własne autora

Rys. 1. Funkcja płynięcia wybranych proszków spożywczych

Fig. 1. Plastic flow parameters for selected food powders

Dla badanej żywności w proszku wartości kohezji  $C$  rosną wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego. Najwyższą spójność cząsteczkową (kohezję) wykazywał cukier puder, najmniejszą zaś proszek truskawkowy.

Funkcje płynięcia badanych proszków spożywczych  $FF$  przedstawiono na rysunku 1. Obszar wykresu 1 podzielono na części odpowiadające granicznym wartościom indeksu płynięcia  $ff_c$ , zgodnie z kryterium podanym przez Jenike i Carson [1985]. Średni indeks płynięcia dla badanej żywności w proszku wynosił odpowiednio: 3,8 dla mleka w proszku; 3,0 dla cukru pudru; 8,7 dla proszku truskawkowego; 7,2 i 3,9 dla kaszki ryżowej KR1 i KR2 oraz 3,5 dla kaszki kukurydzianej. Funkcja płynięcia  $FF$  klasyfikuje badane materiały sypkie następująco:

- proszek truskawkowy – proszek słabo kohezyjny lub niekohezyjny, łatwo lub swobodnie płynący w zależności od naprężenia konsolidującego,

- kaszka ryżowa KR1 – proszek słabo kohezyjny, łatwo płynący,
- mleko w proszku i kaszka ryżowa KR2 – proszki kohezyjne lub słabo kohezyjne, trudno lub łatwo płynące w zależności od naprężenia konsolidującego,
- cukier puder i kaszka kukurydziana – proszki kohezyjne, trudno płynące.

## Wnioski

1. Badana żywność w proszku cechowała się różną wielkością cząstek (granulacją). Rozrzut wielkości cząstek wynosił 250-390  $\mu\text{m}$ , a nawet 683  $\mu\text{m}$  w przypadku kaszki ryżowej. Średnia średnica cząstek (mediana) mleka w proszku i cukru pudru wynosiła ok. 200  $\mu\text{m}$ . Wielkość ta charakteryzuje badane proszki jako proszki drobnoziarniste, co może świadczyć o tym, że produkty te mogą sprawiać trudności podczas procesów związanych z ich wytwarzaniem i obrotem. Pozostałe badane proszki spożywcze tj. proszek truskawkowy, kaszka kukurydziana i kaszka ryżowa KR1 charakteryzują się znacznie wyższą średnią średnicą cząstek proszku.
2. Gęstość nasypowa badanych materiałów sypkich ściśle wiąże się ze składem granulometrycznym. Proszki posiadające w swym składzie duże cząstki charakteryzowały się mniejszą gęstością nasypową, niż proszki drobnoziarniste, których gęstość nasypowa była ponad 2-krotnie większa.
3. Parametry plastycznego płynięcia uzyskane z testów jednoosiowego ścinania umożliwiły jednoznaczną charakterystykę właściwości płynięcia badanej żywności w proszku. Wartości parametrów plastycznego płynięcia zależały od składu surowcowego badanych proszków i stopnia ich rozdrobnienia, a także od przyjętego do badań poziomu naprężeń konsolidujących.
4. Na podstawie funkcji płynięcia sklasyfikowane badane proszki spożywcze: cukier puder i kaszka kukurydziana - proszki kohezyjne, trudno płynące; mleko w proszku i kaszka ryżowa KR2 – proszki kohezyjne lub słabo kohezyjne, trudno lub łatwo płynące w zależności od naprężenia konsolidującego; kaszka ryżowa KR1 – proszek słabo kohezyjny, łatwo płynący i proszek truskawkowy – proszek słabo kohezyjny lub niekohezyjny, łatwo lub swobodnie płynący w zależności od naprężenia konsolidującego.

## Bibliografia

- Chaudhuri B., Mehrotra A., Muzzio F.J., Tomassone M.S.** 2006. Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender, *Powder Technology*. Nr 165. s. 105–114.
- Domian E., Poszytek K.** 2004. Wpływ aktywności wody i konsolidacji na właściwości płynięcia wybranych typów mąki pszennej, *Acta Agrophysica*. Nr 4(2). s. 259-268.
- Fitzpatrick J.J., Barringer S.A., Iqbal T.** 2004a. Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values, *Journal of Food Engineering*, 61. s. 399-405.
- Fitzpatrick J.J., Iqbal C., Delaney C, Twomey T., Keogh M.K.** 2004b. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents, *Journal of Food Engineering*, 64. s. 435-444.
- Freitas-Eduardo M., Silva-Lannes S.C.** 2007. Use of texture analysis to determine compaction force of powders, *Journal of Food Engineering*, 80. s. 568-572.

- Horabik J., Grochowicz M.** 2002. Strength characteristics and dilatation of food powders, *International Agrophysics*. Nr 16. s. 183-189.
- Santomaso A., Lazzaro P., Canu P.** 2003. Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing, *Chemical Engineering Science*, 58. s. 2857-2874.
- Teunou E., Fitzpatrick J.J., Synnott E.C.** 1999. Characterisation of food powder flowability, *Journal of Food Engineering*, 39. s. 31-37.
- Turchiuli Ch., Eloualia Z., El Mansouri N., Dumoulin E.** 2005. Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties, *Powder Technology*, 157. s. 168-175.
- Żbikowski Z., Żbikowska A.** 2007. Właściwości fizyczne i funkcjonalne proszków mlecznych, *Przegląd Mleczarski*. Nr 2. s. 10-12.

*Badania finansowane w ramach projektu badawczego MNiSW w latach 2007-2009*

## **COHESION PROPERTIES OF SELECTED FOOD POWDERS**

**Abstract.** The purpose of the work was to examine flow capacity in the direct shearing test for selected food powders available in Polish market: powdered milk, powdered sugar, strawberry powder, rice groats and corn groats. The scope of work included analysis of plastic flow parameters and analysis of size distribution and bulk density of examined powdered food. Determined flow function characterises the examined products, that is powdered milk, powdered sugar, corn groats and KR2 rice groats as cohesive or weakly-cohesive powders, while strawberry powder and KR1 rice groats are described as weakly-cohesive or non-cohesive powders, depending on consolidating stress.

**Key words:** powdered food, shearing test, cohesion, flow function

**Autor do korespondencji:**

Karolina Szulc; e-mail: karolina\_szulc@sggw.pl, andrzej\_lenart@sggw.pl  
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
ul. Nowoursynowska 159C  
02-766 Warszawa