

## WPŁYW AGLOMERACJI NA WŁAŚCIWOŚCI PŁYNIĘCIA SPROSKOWANYCH ODŻYWEK DLA DZIECI

Karolina Poszytek, Andrzej Lenart

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

**Streszczenie:** W pracy badano właściwości płynięcia dwóch rodzajów kaszek mleczno-ryzowych z dodatkiem kakao bądź proszku jabłkowego przed i po aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym. Pomiar właściwości płynięcia kaszek wykonano za pomocą testu bezpośredniego ścinania według procedury pomiarowej zgodnej z teorią Jenike, przy czterech poziomach naprężenia konsolidującego z zakresu 11,2–19,6 kPa. Dla badanych kaszek w proszku wyznaczono parametry plastycznego płynięcia, takie jak: kohezja, kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na jednoosiowe ścinanie, największe naprężenie konsolidujące oraz funkcję płynięcia.

**Słowa kluczowe:** aglomeracja, funkcja płynięcia, test ścinania, proszki spożywcze

### Wprowadzenie

W ostatnich okresie obserwuje się coraz większe zapotrzebowanie na żywność wygodną, łatwo dostępną, umożliwiającą proste przygotowanie posiłków w dowolnym czasie i różnych sytuacjach. Od dawna poszukuje się takich sposobów przetwarzania i utrwalania surowców żywnościowych, aby otrzymać produkt bezpieczny, o podwyższonej jakości. Przykładem takich produktów są koncentraty spożywcze, występujące w formie proszku, stanowiącego mieszaninę suchych surowców roślinnych, zwierzęcych i innych dodatków smakowo-zapachowych.

Aglomeracja jest procesem łączenia drobnych cząstek w większe skupiska – aglomeraty, z zachowaniem pierwotnych właściwości fizykochemicznych materiału. Celem aglomeracji materiałów sypkich jest nadanie określonych (pożądanych) właściwości otrzymanym produktom. Dotyczą one głównie dobrej sypkości, łatwej rozpuszczalności w cieczach, ograniczenia zdolności do pylenia i zbrylania oraz w wypadku układów wieloskładnikowych nie występowania segregacji komponentów, co zapewnia jednorodność materiału.

Cechy produktów spożywczych w formie sypkiej otrzymywanych różnymi metodami, które bardzo często decydują o jakości gotowego produktu, związane są z właściwościami fizycznymi proszków [Schubert 1993]. Znajomość tych właściwości pozwala na określenie cech produktów sypkich ważnych zarówno dla konsumenta, jak i producenta.

Jako charakterystyka sypkości szerokie uznanie zyskała funkcja płynięcia FF wprowadzona przez Jenike [Jenike 1964], pozwalającą określić parametry plastycznego płynięcia materiałów sypkich z wystarczającą dokładnością i przewidzieć charakter płynięcia badanego materiału w proszku. Parametry te określają warunki, w jakich materiał sypki prze-

staje się zachowywać jak ciało stałe i upodabnia się w swym przepływie do cieczy [Horabik, Grochowicz 2000]. Funkcja płynięcia charakteryzuje zdolność materiału do zakłóceń swobodnego wypływu ze zbiorników pod wpływem sił grawitacji i wykorzystywana jest przy projektowaniu zbiorników.

## Cel i zakres pracy

Celem pracy była analiza wpływu aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym na właściwości płynięcia wybranych odżywek dla dzieci.

Zakres pracy obejmował analizę parametrów plastycznego płynięcia, wyznaczonych metodą bezpośredniego ścinania w zakresie naprężeń konsolidujących 11,21–19,62 kPa, odżywek przed i po aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym na przykładzie wybranych kaszek mleczno-zbożowych dla dzieci.

Zakres pracy obejmował również charakterystykę materiału badawczego na podstawie analizy składu granulometrycznego, gęstości nasypowej luźnej i utręsionej.

## Metodyka

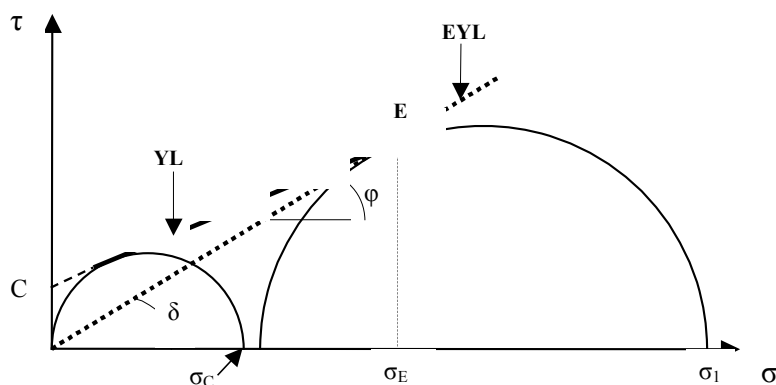
Materiał badawczy stanowiły dwa rodzaje odżywek: kaszka mleczno-ryżowa z kakao i kaszka mleczno-ryżowa z jabłkami. W skład kaszki mleczno-ryżowej z kakao wchodziło: mleko w proszku (39%), kaszka ryżowa (34%), cukier (26%), kakao (1%). Kaszka mleczno-ryżowa z jabłkami składała się z: mleka w proszku (40%), kaszki ryżowej (34%), cukru (25,7%) i proszku jabłkowego (1,3%).

Aglomerację w pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym przeprowadzono w aglomeratorze STREA 1/Niro-Aeromatic AG. Agglomerację w mechanicznie generowanym złożu fluidalnym przeprowadzono w mieszalniku do granulacji materiałów sypkich firmy Lödige Plughshare Mixer typ L5. Po aglomeracji utworzone aglomeraty dosuszano w temperaturze 50°C przez 15 minut w złożu fluidalnym.

Określenie parametrów plastycznego płynięcia oparte jest na wykonanych testach ścinania próbek. Badanie to wykonuje się za pomocą aparatu bezpośredniego ścinania zwane go celką Jenike [Jenike 1964]. Efektem doświadczenia jest otrzymanie eksperymentalnej linii uplastycznienia  $Y_L$ , uzyskanej w teście bezpośredniego ścinania przy naprężeniu konsolidującym  $\sigma_E$  (rys. 1).

Dla badanych odżywek wyznaczono następujące parametry plastycznego płynięcia [Tenou i in. 1999; Fitzpatrick i in. 2004]:  $\varphi$  – kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego,  $\delta$  – efektywny kąt tarcia wewnętrznego,  $C$  – kohezję,  $\sigma_1$  – naprężenie główne konsolidujące,  $\sigma_E$  – naprężenie konsolidujące,  $\sigma_c$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie,  $ff_c$  – indeks płynięcia. Badane kaszki scharakteryzowano funkcją płynięcia FF oraz gęstością nasypową materiału skonsolidowanego  $\rho$ .

Skład granulometryczny badanych mąk wyznaczano z wykorzystaniem analizatora wielkości cząstek ciał stałych w powietrzu AWK – V 97 / Kamika Warszawa. Gęstość nasypową luźną  $\rho_L$  i utręsioną  $\rho_T$  [DIN 66145 1976] oznaczono z wykorzystaniem objętościomierza wstrząsowego STAV 2003 / Engelsmann AG, Germany.



Rys. 1. Eksperymentalna linia uplastycznienia YL i efektywna linia uplastycznienia EYL dla materiału sypkiego

Fig. 1. Experimental plasticity line YL and effective plasticity line EYL for loose material

## Wyniki badań i ich analiza

Badane kaszki mleczno-ryżowe z dodatkami charakteryzowały się niską zawartością i aktywnością wody (tab. 1). Aglomeracja w mechanicznie generowanym złożu fluidalnym powodowała nieznaczne podwyższenie tych wartości, natomiast aglomeracja w pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym spowodowała, że utworzone aglomeraty charakteryzowały się niższą zawartością i aktywnością wody w stosunku do kaszek wyjściowych, to jest przed aglomeracją.

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanych kaszek

Table 1. Physical properties of tested porridge products

Rodzaj kaszki	$u$ [g H <sub>2</sub> O · 100 g s.s.]	$a_w$ [-]	$d_{50}$ [μm]	$\rho_L$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$\rho_T$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	$I_H$ [-]
Jabłkowa	3,87	0,08	571	373	437	1,17
Jabłkowa aglomeracja mechaniczna	4,88	0,19	703	284	334	1,17
Jabłkowa aglomeracja pneumatyczna	2,95	0,04	748	267	305	1,14
Kakaowa	4,07	0,22	759	479	561	1,17
Kakaowa aglomeracja mechaniczna	5,71	0,23	1177	368	407	1,10
Kakaowa aglomeracja pneumatyczna	2,61	0,03	935	261	304	1,16

$d_{50}$  – średnia średnica cząstek,  $u$  – zawartość wody,  $a_w$  – aktywność wody,  $\rho_L$  – gęstość nasypowa luźna,  $\rho_T$  – gęstość nasypowa utręszona,  $I_H$  – współczynnik Hausera

Rozmiar cząstek jest jedną z najistotniejszych właściwości ogólnych definiujących zdolność proszku do płynięcia. Oznaczenie składu granulometrycznego pozwoliło na wstępną ocenę właściwości płynięcia badanych kaszek. Badane kaszki charakteryzowały się dużymi rozmiarami cząstek powyżej 500  $\mu\text{m}$ , co świadczy o tym, że mogą to być proszki swobodnie płynące. Niezależnie od zastosowanej metody aglomeracji nastąpił wzrost rozmiaru cząstek. Utworzone aglomeraty charakteryzowały się o 23-55% większą średnią średnicą cząstek  $d_{50}$  w stosunku do kaszek przed aglomeracją (tab. 1). Pomiedzy badanymi odżywkami występowały wyraźne różnice w składzie granulometrycznym. Kaszka mleczno-ryżowa z kakao charakteryzowała się większym rozmiarem cząstek i lepszą sypkością w porównaniu z kaszką mleczno-ryżową z jabłkami.

Aglomeracja powoduje wyraźne obniżenie gęstości nasypowej luźnej i utrzęsionej badanych kaszek. Aglomeraty utworzone w pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym posiadały niższą gęstość nasypową w stosunku do aglomeratów utworzonych w mechanicznie generowanym złożu fluidalnym (tab. 1). Z gęstością nasypową  $\rho_L$  i  $\rho_T$  związany jest współczynnik Hausera (stosunek gęstości nasypowej utrzęsionej do gęstości nasypowej luźnej) będący wskaźnikiem sypkości proszków. Materiały charakteryzujące się współczynnikiem  $I_H$  niższym niż 1,25 charakteryzują się dobrą sypkością (tab. 1). Badane kaszki, jak i utworzone z nich aglomeraty miały współczynnik Hausera znacznie poniżej tej wartości. Utworzone z kaszki mleczno-ryżowej z kakao aglomeraty mechaniczne cechowały się najlepszą sypkością.

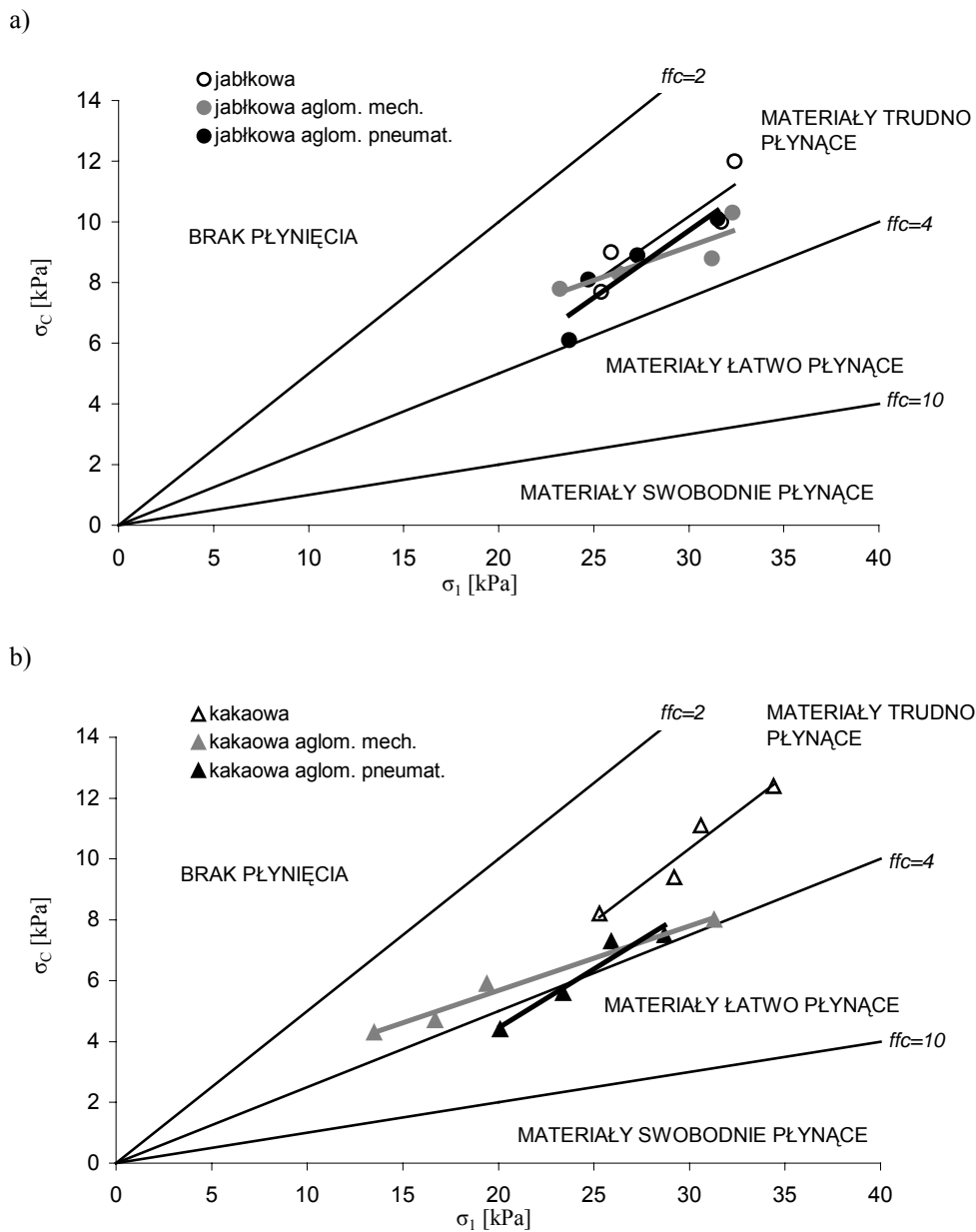
Na podstawie testu bezpośredniego ścinania wyznacza się gęstość materiału skonsolidowanego, która odniesiona do gęstości nasypowej - utrzęsionej może być również wyróżnikiem właściwości płynięcia materiału sypkiego. Zbliżona wartość gęstości  $\rho_T$  i  $\rho_k$  świadczy o swobodnym płynięciu materiału w proszku (tab. 1 i 2); dla proszków trudno płynących  $\rho_T$  jest dużo niższa od  $\rho_k$ . Interpretując wartości gęstości kaszki skonsolidowanej można stwierdzić, że kaszka mleczno-ryżowa z jabłkami i kaszka mleczno-ryżowa z kakao będą prawdopodobnie charakteryzowały się zdolnością do swobodnego płynięcia, podobnie jak utworzone z nich aglomeraty niezależnie od zastosowanej metody aglomeracji w złożu fluidalnym.

Zarówno kinetyczny  $\varphi$  jak i efektywny  $\delta$  kąt tarcia wewnętrznego jest charakterystyczny dla danego rodzaju kaszki i zależy od wielkości naprężenia konsolidującego. Wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego  $\delta$  są wyższe od wartości kinetycznego kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$ , zależne od poziomu naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$  (tab. 2). Kąt  $\delta$  uwzględnia wzrost kohezji w materiale sypkim podczas konsolidacji  $\sigma_E$ . Kaszka mleczno-ryżowa z jabłkami i kaszka mleczno-ryżowa z kakao charakteryzowały się podobną wartością kinetycznego i efektywnego kąta tarcia wewnętrznego. W przypadku kaszki mleczno-ryżowej z kakao wartość  $\varphi$  i  $\delta$  wzrastała wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$  z 11,21 do 19,62 kPa. Wartość kinetycznego kąta tarcia wewnętrznego malała, a efektywnego kąta tarcia wewnętrznego wzrastała wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$  z 11,21 do 19,62 kPa dla kaszki mleczno-ryżowej z jabłkami. Aglomeracja w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym powodowała spadek  $\varphi$  i  $\delta$  utworzonych aglomeratów w stosunku do kaszek mleczno-ryżowych przed aglomeracją. Wzrost naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$  z 11,21 do 19,62 kPa powodował spadek wartości kinetycznego  $\varphi$  i  $\delta$  efektywnego kąta tarcia wewnętrznego badanych aglomeratów niezależnie od zastosowanej metody aglomeracji.

Nieaglomerowana kaszka mleczno-ryżowa z kakao charakteryzowała się wyższą kohezją  $C$  w stosunku do kaszki mleczno-ryżowej z jabłkami (tab. 2). Dla badanych kaszek mleczno-ryżowych z kakao, bądź proszkiem jabłkowym wartości  $C$  rosną wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego. Aglomeracja powoduje wzrost kohezji  $C$  utworzonych aglomeratów z kaszki mleczno-ryżowej z proszkiem jabłkowym w stosunku do materiału przed aglomeracją niezależnie od zastosowanej metody. Odwrotną zależność wykazuje kaszka mleczno-ryżowa z kakao, w wyniku aglomeracji następuje spadek kohezji w stosunku do materiału przed aglomeracją.

Tabela 2. Parametry plastycznego płynięcia dla kaszek przed i po aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym  
 Table 2. Plastic flow parameters for porridge products before and after agglomeration in mechanically and pneumatically generated fluid bed

Rodzaj kaszki	Naprężenie konsolidujące $\sigma_E$ [kPa]	Gęstość materiału skonsolidowanego $\rho_k$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Kinetyczny kąt tarcia wewn $\varphi$ [°]	Efektywny kąt tarcia wewn $\delta$ [°]	Kohezja $C$ [kPa]	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $\sigma_c$ [kPa]	Największe naprężenie konsolidujące $\sigma_I$ [kPa]	Indeks płynięcia $ff_c$ [-]
Jabłkowa	11,21	423	30	27	2,45	7,7	25,4	3,3
	15,15	428	18	28	3,17	9,0	25,9	2,9
	16,82	429	20	31	3,64	10,0	31,7	3,2
	19,62	433	15	37	4,56	12,0	32,4	2,7
Jabłkowa aglomeracja mechaniczna	11,21	352	19	30	3,32	7,8	23,2	3,1
	15,15	355	13	25	3,90	8,3	26,3	3,5
	16,82	357	12	26	3,95	8,8	31,2	3,2
	19,62	360	12	24	4,98	10,3	32,3	3,0
Jabłkowa aglomeracja pneumatyczna	11,21	298	29	32	2,39	6,1	23,7	3,9
	15,15	303	11	23	3,90	8,1	24,7	3,0
	16,82	308	11	23	4,23	8,9	27,3	3,1
	19,62	313	10	22	4,98	10,1	31,5	3,1
Kakaowa	11,21	564	17	28	2,30	8,2	25,3	3,1
	15,15	569	20	30	3,89	9,4	29,2	3,1
	16,82	570	21	31	3,99	11,1	30,6	2,8
	19,62	571	27	37	4,72	12,4	34,4	2,8
Kakaowa aglomeracja mechaniczna	11,21	418	22	28	1,67	4,3	13,5	3,1
	15,15	420	16	22	2,13	4,7	16,7	3,6
	16,82	422	19	25	2,50	5,9	19,4	3,3
	19,62	423	12	22	3,86	8,0	21,3	3,9
Kakaowa aglomeracja pneumatyczna	11,21	324	23	29	1,69	4,4	20,1	4,6
	15,15	334	17	24	2,50	5,6	23,4	4,2
	16,82	335	15	24	3,39	7,3	25,9	3,5
	19,62	339	13	22	3,50	7,5	28,7	3,8



Rys. 2. Funkcja płynięcia FF badanych kaszek przed i po aglomeracji: a) kaszka mleczno-ryżowa z jabłkami, b) kaszka mleczno-ryżowa z kakao

Fig. 2. Flow function FF of tested porridge products before and after agglomeration: a) milk and rice porridge with apples, b) milk and rice porridge with cocoa

Aglomerowane kaszki mleczno-ryżowe z kakao bądź proszkiem owocowym, w porównaniu do kaszek przed aglomeracją wykazują niższą wytrzymałość na deformacje (wytrzymałość na jednoosiowe ścinanie)  $\sigma_c$ , niezależnie od poziomu naprężenia konsolidującego  $\sigma_E$ . Aglomerowana kaszka mleczno-ryżowa z kakao jest bardziej wrażliwa na deformacje w stosunku do kaszki mleczno-ryżowej z proszkiem jabłkowym, co może wynikać z odmiennej struktury materiału (tab. 2).

Funkcje płynięcia badanych kaszek mleczno-ryżowych przed i po aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym przedstawiono na rysunku 1. Obszar wykresu podzielono na części odpowiadające granicznym wartościom indeksu płynięcia  $ff_c$ , zgodnie z kryterium podanym przez Jenike i Carson [Jenike, Carson 1985]. Średni indeks płynięcia dla badanych kaszek wynosił: 3,0 dla kaszki jabłkowej; 3,2 dla kaszki jabłkowej aglomerowanej mechanicznie; 3,3 dla kaszki jabłkowej aglomerowanej pneumatycznie (rys. 2a); 2,9 dla kaszki kakaowej; 3,5 dla kaszki kakaowej aglomerowanej mechanicznie; 4,0 dla kaszki kakaowej aglomerowanej pneumatycznie (rys. 2b). Funkcje płynięcia FF kaszki mleczno-ryżowej z proszkiem jabłkowym przed i po aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym leżą w obszarze  $2 < ff_c < 4$ , natomiast funkcje płynięcia kaszki mleczno-ryżowej z kakao po aglomeracji w mechanicznie i pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym leżą prawie całkowicie w pobliżu  $ff_c \approx 4$ . Klasyfikuje to badane materiały sypkie następująco:

- kaszka mleczno-ryżowa z proszkiem jabłkowym i kaszka mleczno-ryżowa z kakao – proszki kohezyjne, trudno płynące;
- kaszka mleczno-ryżowa z proszkiem jabłkowym i kaszka mleczno-ryżowa z kakao aglomerowane w mechanicznie generowanym złożu fluidalnym – proszki kohezyjne, trudno płynące;
- kaszka mleczno-ryżowa z proszkiem jabłkowym i kaszka mleczno-ryżowa z kakao aglomerowane w pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym – proszki kohezyjne lub słabo kohezyjne, trudno lub łatwo płynące w zależności od naprężenia konsolidującego.

## Wnioski

1. Aglomeracja wpłynęła na polepszenie właściwości fizycznych kaszek mleczno-ryżowych w proszku, a stopień wpływu uzależniony był od zastosowanej metody aglomeracji (mechanicznie lub pneumatycznie generowane złożo fluidalne) i składu surowcowego materiału. Badane odżywki charakteryzowały się dobrą sypkością, obniżoną gęstością nasypową, brakiem segregacji i zdolności do pylenia, większym rozmiarem cząstek.
2. Analiza parametrów plastycznego płynięcia uzyskanych z testów jednoosiowego ścinania umożliwiła jednoznaczną charakterystykę właściwości płynięcia badanych kaszek mleczno-ryżowych. Wartości parametrów plastycznego płynięcia zależą od sposobu aglomeracji kaszki (mechanicznie lub pneumatycznie generowane złożo fluidalne) i jej granulacji oraz przyjętego poziomu naprężeń konsolidujących. Funkcja płynięcia określa kaszki mleczno-ryżowe przed i po aglomeracji w pneumatycznie generowanym złożu fluidalnym jako proszki kohezyjne, trudno płynące. Natomiast aglomerowane w mechanicznie generowanym złożu fluidalnym jako proszki kohezyjne lub słabo kohezyjne, trudno lub łatwo płynące w zależności od naprężenia konsolidującego.

## Bibliografia

- Fitzpatrick J.J., Barringer S.A., Iqbal T.** 2004. 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 T., Delaney C., Twomey T., Keogh M.K.** 2004. 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.
- Horabik J., Grochowicz M.** 2000. Wyznaczanie parametrów plastycznego płynięcia sypkich surowców spożywczych. *Acta Agrophysica*, 37. s. 29-38.
- Jenike A.W.** 1964. Storage and flow of solids. Bulletin 123. Engineering Experiment Station, University of Utah.
- Jenike A.W., Carson J.** 1985. Measurement principles of the flowability of powders. *Advance Ceramic*, 21. s. 759-766.
- Schubert H.** 1993. Instantization of powdered foods. *International Chemical Engineering*, 33(1). s. 28-45.
- Tenou E., Fitzpatrick J.J., Synnott E.C.** 1999. Characterization of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 39, s. 31-37.
- DIN 66145 1976. Darstellung von Korn – (Teilchen-) Größenverteilungen; RRSB – Netz, Ausgabe 1976-04

## THE INFLUENCE OF AGGLOMERATION ON FLOW PROPERTIES OF PULVERIZED BABY FOOD

**Summary.** The work includes tests of flow properties of two types of milk-and-rice porridge with addition of cocoa or apple powder before and after agglomeration in mechanically and pneumatically generated fluid bed. Measurements of porridge flow properties were conducted by means of direct coagulation test following the test procedure according to the Jenike theory, for four levels of consolidating stress within a range of 11,2 ÷ 19,6 kPa. For tested powdered porridge products, the following plastic flow parameters were set out: cohesion, internal friction angle, uniaxial shear strength, the highest consolidating stress and flow function.

**Key words:** agglomeration, flow function, coagulation test, food powders

### Adres do korespondencji:

Karolina Poszytek; e-mail: karola.posz@wp.pl  
Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
ul. Nowoursynowska 159C  
02-776 Warszawa