

WPLYW AKTYWNOŚCI WODY I KONSOLIDACJI NA WŁAŚCIWOŚCI PŁYNIĘCIA WYBRANYCH TYPÓW MĄKI PSZENNEJ*

Ewa Domian, Karolina Poszytek

Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Technologii Żywności, SGGW
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159c
e-mail: domian@alpha.sggw.waw.pl

Streszczenie. W pracy badano właściwości płynięcia wybranych typów mąki pszennej z uwzględnieniem wpływu wilgotności mąki i konsolidacji. Materiałem badawczym była mąka typ 500 poznańska o aktywności wody 0,33, 0,65 i 0,8 oraz mąka typ 2000 razowa o aktywności wody 0,65 i 0,8. Badania przeprowadzono metodą bezpośredniego ścinania w aparacie przystosowanym do procedury pomiarowej zgodnej z teorią Jenike w zakresie naprężeń konsolidujących 4,9-17,5 kPa. Dla badanych typów mąki wyznaczono parametry plastycznego płynięcia, takie jak kohezja, kąt tarcia wewnętrznego, wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, funkcja płynięcia. Sypkość badanych typów mąki charakteryzowano również na podstawie gęstości nasypowej luźnej i utręzionej.

Słowa kluczowe: funkcja płynięcia, test ścinania, mąka pszenna

WYKAZ OZNACZEŃ

- a_w – aktywność wody (–),
- d_{50} – średnia średnica cząstek (μm),
- ρ_L – gęstość nasypowa luźna ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
- ρ_T – gęstość nasypowa utręciona ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
- ρ – gęstość nasypowa materiału skonsolidowanego ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
- I_{Hr} – współczynnik Hausera – stosunek ρ_T/ρ_L (–),
- φ – kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego ($^\circ$),
- δ – efektywny kąt tarcia wewnętrznego ($^\circ$),
- C – kohezja (Pa),
- σ_E – naprężenie konsolidujące (Pa),
- σ_1 – największe naprężenie konsolidujące (Pa),

* Praca prezentowana i opublikowana w ramach aktywności Centrum Doskonałości AGROPHYSICS (Contract No.: QLAM-2001-00428) 5 Programu Ramowego UE.

σ_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (Pa),

ff_c – indeks płynięcia – stosunek σ_1/σ_c (-),

FF – funkcja płynięcia (-).

WSTĘP

W technologii materiałów sypkich w większości operacji jednostkowych określenie ruchu ośrodka sypkiego ma podstawowe znaczenie. Właściwości fizyczne złoża materiału sypkiego, szczególnie zdolność do płynięcia, sypkość i ściśliwość, zdeterminowane są właściwościami ogólnymi cząstek, właściwościami powierzchniowymi, adhezją i kohezją oraz strukturą złoża. Istotność każdego z wymienionych czynników i ich oddziaływanie jest uzależnione od procesu technologicznego i warunków, w jakich cząstki były tworzone, jak również od parametrów składowania materiału sypkiego, szczególnie z uwzględnieniem naporu złoża, czasu oraz wilgotności i temperatury [3,6,18,19].

Obrót materiałami sypkimi to całość procesów związanych zarówno z ich produkcją, magazynowaniem jak i transportem [9]. Podczas obrotu materiały te poddawane są działaniu wielu sił powodujących odkształcenia i niszczenie struktury. Problemy związane z obrotem proszkami wynikają z zakłóceń w ich przepływie. Do najczęściej występujących zakłóceń zalicza się zasklepienie otworu wylotowego zbiornika oraz przepływ niepełny [18].

Do określenia właściwości płynięcia proszków, niezbędną staje się symulacja warunków, jakie panują w zbiorniku. Metodą najbardziej przydatną są badania bezpośredniego ścinania. Wielkości uzyskane z testów ścinania, według teorii płynięcia proszków Jenike [2,8], pozwalają określić parametry plastycznego płynięcia materiałów sypkich z wystarczającą dokładnością do praktycznego zastosowania i przewidywania charakteru ich płynięcia. Parametry te określają warunki w jakich materiał sypki przestaje zachowywać się jak ciało stałe upodabniając się do cieczy [14,17]. Do parametrów plastycznego płynięcia należą: kąt tarcia wewnętrznego w materiale, efektywny kąt tarcia (miara tarcia wewnętrznego uwzględniającego kohezję), wytrzymałość na odkształcenia, kohezja, kąt tarcia o ściany zbiornika, gęstość nasypowa. Wyżej wymienione wielkości zależne są od poziomu naprężenia normalnego. Wyniki badań są zależne nie tylko od cech materiału, ale i przyjętej procedury i aparatury badawczej [5,10,12].

Jako charakterystyka sypkości szerokie uznanie zyskała funkcja płynięcia FF wprowadzona przez Jenike [8], będąca zależnością wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c od największego naprężenia konsolidującego σ_1 . Funkcja płynięcia FF charakteryzuje zdolność materiału do zakłóceń swobodnego wypływu ze zbiorników pod wpływem sił grawitacji i wykorzystywana jest przy projektowaniu zbiorników. Ponadto, wyniki testów bezpośredniego ścinania

umożliwiają porównanie jakościowe różnych materiałów sypkich, na podstawie parametru zaproponowanego przez Jenike i Carson [7,11]. Parametrem tym jest indeks płynięcia ff_c , obliczany jako stosunek σ_1/σ_c . Materiały sypkie mogą być klasyfikowane zgodnie z ich zdolnością do płynięcia na podstawie wartości indeksu płynięcia ff_c w następujący sposób: bardzo kohezyjne, brak płynięcia ($ff_c < 2$); kohezyjne, trudno płynące ($2 < ff_c < 4$); słabo kohezyjne, łatwo płynące ($4 < ff_c < 10$); niekohezyjne, sypkie, swobodnie płynące ($10 < ff_c$).

CEL I ZAKRES

Celem pracy jest zbadanie właściwości płynięcia wybranych typów mąki pszennej z uwzględnieniem wpływu aktywności wody i konsolidacji mąki.

Zakres pracy obejmuje analizę parametrów plastycznego płynięcia wyznaczonych metodą bezpośredniego ścinania w zakresie naprężeń konsolidujących 4,9-17,5 kPa z uwzględnieniem wpływu aktywności wody na parametry płynięcia, na przykładzie mąki poznańskiej o aktywności wody 0,33, 0,65 i 0,8 oraz mąki razowej o aktywności wody 0,65 i 0,80.

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

MATERIAŁY I METODY

Materiałem badawczym były dwa typy mąki pszennej: mąka poznańska typ 500 i mąka razowa typ 2000 o różnej wilgotności. Mąka poznańska była badana przy następującej aktywności wody/zawartości wody: 0,33/11,0% (mąka bezpośrednio z opakowania, handlowa), 0,65/13,9% i 0,8/16,1% (mąka nawilżona). Natomiast mąkę razową badano przy aktywności wody / zawartości wody odpowiednio: 0,65/13,5% (mąka bezpośrednio z opakowania, handlowa) i 0,8/16,1% (mąka nawilżona). Nawilżanie próbek mąki pszennej do uzyskania założonej aktywności wody przeprowadzono w komorze pneumatycznego nawilżania typ KK01 firmy APEK, Warszawa.

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). Jeden pomiar pozwalał na wyznaczenie tylko jednego punktu leżącego na krzywej uplastycznienia. Do określania kolejnych czterech punktów leżących na tej samej krzywej uplastycznienia powtarzano trójfazową procedurę pomiaru przy tej samej wartości naprężenia normalnego konsolidującego σ_E i kolejno trzech mniejszych wartościach naprężenia normalnego σ podczas właściwego ścinania [13].

Uwzględniając powtórzenia, dla poszczególnych typów mąki o różnej aktywności wody (poznajska $a_w = 0,33$, $a_w = 0,65$, $a_w = 0,8$, razowa $a_w = 0,65$ i $a_w = 0,8$) przeprowadzono łącznie 320 testów bezpośredniego ścinania. Ostatecznie dla badanych próbek mąki o danej aktywności wody otrzymano po cztery linie uplastycznienia, odpowiednio do naprężenia konsolidującego σ_E 4,89; 9,09; 13,30 i 17,50 kPa.

Dla każdej otrzymanej linii uplastycznienia graficznie wyznaczano parametry plastycznego płynięcia [14] badanych skonsolidowanych mąk pszennych, takie jak φ – kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego, δ – efektywny kąt tarcia wewnętrznego, C – kohezję σ_1 – naprężenie główne konsolidujące, σ_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, ff_c – indeks płynięcia. Badane mąki scharakteryzowano funkcją płynięcia FF oraz gęstością nasypową ρ .

Skład granulometryczny badanych typów mąki wyznaczano z wykorzystaniem analizatora wielkości cząstek ciał stałych w powietrzu AWK – V 97/ Kamika Warszawa. Gęstość nasypową luźną ρ_L i utrzęsioną ρ_T (DIN 66145) oznaczono z wykorzystaniem objętościomierza wstrząsowego STAV 2003/ Engelsmann AG, Germany.

WYNIKI

Badane typy mąki pszennej – poznajska i razowa o standardowej aktywności wody (odpowiednio 0,33 i 0,65) w stanie nieskonsolidowanym są materiałami sypkimi. Mąka razowa cechowała się większymi wymiarami cząstek i lepszą sypkością w porównaniu z mąką poznajską. Zakres wielkości cząstek i średnia średnica d_{50} badanych typów mąki wynosiły odpowiednio: 37-591 μm dla mąki razowej przy wartości d_{50} 266 μm , oraz 35-178 μm przy wartości d_{50} 103 μm dla mąki poznajskiej (tab. 1).

Nawilżanie mąki poznajskiej do aktywności wody 0,65 i 0,8 oraz mąki razowej do 0,8 powoduje obniżenie gęstości nasypowej luźnej i utrzęsionej. Przy aktywności wody 0,65 występowały niewielkie różnice w gęstości nasypowej luźnej ρ_L i utrzęsionej ρ_T pomiędzy mąką poznajską (ρ_L 587 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_T 719 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), a mąką razową (ρ_L 590 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_T 708 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Różnica stopniowo zwiększała się wraz ze wzrostem wilgotności i w aktywności 0,8 gęstość nasypowa luźna ρ_L i utrzęsiona ρ_T wynosiła odpowiednio dla mąki razowej 582 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i 695 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a dla mąki poznajskiej 593 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i 725 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (tab. 1).

Gęstość nasypowa umożliwia ocenę stopnia wypełnienia materiałami sypkimi zbiorników, silosów, opakowań. Z gęstością nasypową luźną i utrzęsioną związany jest współczynnik Hausnera I_{Hr} (stosunek gęstości nasypowej utrzęsionej ρ_T do gęstości nasypowej luźnej ρ_L) będący wskaźnikiem sypkości proszków. Jeśli współczynnik I_{Hr} jest większy niż 1,4 to jest prawdopodobne, że proszek ma

wszystkie własności spójnego proszku. Materiały charakteryzujące się współczynnikiem I_{Hr} mniejszym od 1,25 określane są jako proszki o dobrej sypkości. Kiedy wielkość cząstek nie przekracza 100 μm następuje znaczny wzrost współczynnika Hausnera. Im większa wartość tego współczynnika tym spójniejszy proszek z powodu wzrastających sił międzycząsteczkowych [1,4,15]. Badane mąki to materiały charakteryzujące się dobrą sypkością, przy czym wartość I_{Hr} różnicuje je pod względem sypkości. Mąka razowa cechuje się (I_{Hr} 1,20-1,19) lepszą sypkością, w porównaniu z mąką poznańską (I_{Hr} 1,24-1,22) (tab. 1). Zarówno dla mąki poznańskiej jak i mąki razowej wraz ze wzrostem aktywności wody malał współczynnik Hausnera I_{Hr} .

Gęstość materiału skonsolidowanego ρ mierzona podczas testu bezpośredniego ścinania odniesiona do gęstości nasypowej utrzęsionej ρ_T może być również wyróżnikiem właściwości płynięcia materiału sypkiego [1,16]. Dla proszków swobodnie płynących gęstość nasypowa utrzęsiona ρ_T jest zbliżona wartością do gęstości materiału skonsolidowanego ρ ; dla proszków trudno płynących ρ_T jest dużo niższa od ρ . Interpretując wartości gęstości mąki skonsolidowanej ρ można sądzić, że mąka razowa okaże się materiałem o lepszej sypkości w porównaniu z mąką poznańską. Niezależnie od aktywności wody dla mąki razowej gęstość utrzęsiona ρ_T była niewiele niższa (o 2,7%) od średniej gęstości po konsolidacji ρ , natomiast dla mąki poznańskiej gęstość utrzęsiona ρ_T była znacznie niższa o 9,5% od średniej gęstości ρ (tab. i 2).

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanych typów mąki pszennej
Table 1. Physical properties of tested two types of wheat flour

Mąka pszenna Wheat flour	d_{50} (μm)	x (% w/w)	a_w (-)	ρ_L ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ρ_T ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	I_{Hr} (-)
Poznańska	103	11,0	0,33	600	744	1,24
Poznanska		13,5	0,65	587	719	1,22
		16,4	0,80	593	725	1,22
Razowa	266	13,6	0,65	590	708	1,20
Whole meal		16,0	0,80	582	695	1,19

d_{50} – średnia średnica cząstek, x – zawartość wody, a_w – aktywność wody, ρ_L – gęstość nasypowa luźna, ρ_T – gęstość nasypowa utrzęsiona, I_{Hr} – współczynnik Hausera.

d_{50} – mean particle size, x – moisture content, a_w – water activity, ρ_L – loose bulk density, ρ_T – tapped bulk density, I_{Hr} – Hausner ratio.

Gęstość materiału skonsolidowanego ρ mierzona podczas testu bezpośredniego ścinania odniesiona do gęstości nasypowej utrzęsionej ρ_T może być również wyróżnikiem właściwości płynięcia materiału sypkiego [1,16]. Dla proszków swobodnie płynących gęstość nasypowa utrzęsiona ρ_T jest zbliżona wartością do

gęstości materiału skonsolidowanego ρ ; dla proszków trudno płynących ρ_T jest dużo niższa od ρ . Interpretując wartości gęstości mąki skonsolidowanej ρ można sądzić, że mąka razowa okaże się materiałem o lepszej sypkości w porównaniu z mąką poznańską. Niezależnie od aktywności wody dla mąki razowej gęstość utręszona ρ_T była niewiele niższa (o 2,7%) od średniej gęstości po konsolidacji ρ , natomiast dla mąki poznańskiej gęstość utręszona ρ_T była znacznie niższa o 9,5% od średniej gęstości ρ (tab. 1 i 2).

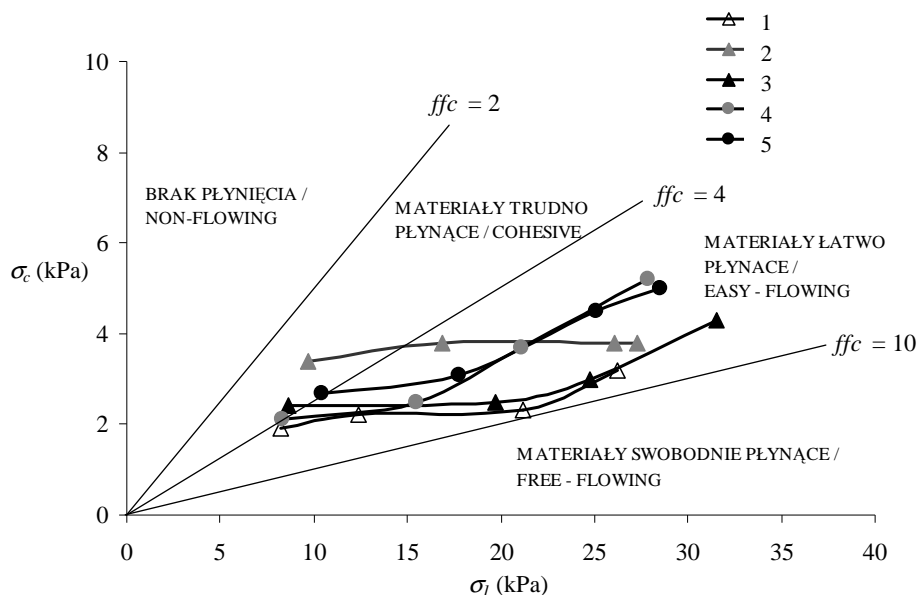
Tabela 2. Wpływ aktywności wody i naprężenia konsolidującego na parametry plastycznego płynięcia mąki pszennej poznańskiej i razowej

Table 2. Effect of water activity and consolidation stress on the flow parameters of poznańska and whole meal wheat flours

Mąka pszenna Wheat flour	a_w (-)	σ_E (kPa)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	φ ($^\circ$)	δ ($^\circ$)	C (kPa)	σ_c (kPa)	σ_1 (kPa)	ff_c (-)
	0,33	4,89	792	27	33	0,60	1,9	8,2	4,3
		9,09	805	26	29	0,74	2,2	12,4	5,6
		13,30	820	28	30	0,74	2,3	21,2	9,2
		17,50	825	28	33	0,97	3,2	26,2	8,2
Poznańska Poznanska	0,65	4,89	766	35	44	0,87	3,4	9,7	2,9
		9,09	785	34	42	0,91	3,8	16,9	4,4
		13,30	817	33	37	1,01	3,8	26,1	6,9
		17,50	823	31	36	1,03	3,8	27,3	7,2
	0,8	4,89	762	31	38	0,92	2,4	8,6	3,6
		9,09	786	30	33	1,02	2,5	19,7	7,9
		13,30	795	32	34	1,19	3,0	24,8	8,3
		17,50	805	26	32	1,79	4,3	31,5	7,3
Razowa Whole meal	0,65	4,89	729	31	36	0,71	2,1	8,3	4,0
		9,09	732	31	36	0,94	2,5	15,5	6,2
		13,30	741	30	36	1,31	3,7	21,1	5,7
		17,50	745	30	35	1,86	5,2	27,9	5,4
Razowa Whole meal	0,8	4,89	696	33	38	0,79	2,7	10,4	3,9
		9,09	701	37	38	1,01	3,1	17,8	5,7
		13,30	706	31	36	1,52	4,5	25,1	5,6
		17,50	710	31	36	1,63	5,0	28,5	5,7

a_w – aktywność wody, σ_E – naprężenie konsolidujące, ρ – gęstość nasypowa materiału skonsolidowanego, φ – kinetyczny kąt tarcia wewnętrznego, δ – efektywny kąt tarcia wewnętrznego, C – kohezja, σ_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, σ_1 – największe naprężenie konsolidujące, ff_c – indeks płynięcia.

a_w – water activity, σ_E – normal consolidating stress, ρ – bulk density, φ – kinetic angle of internal friction, δ – effective angle of internal friction, C – cohesion, σ_c – unconfined yield strength, σ_1 – major consolidating stress, ff_c – flow index.



Rys. 1. Wpływ aktywności wody na funkcję płynięcia FF badanych typów mąki pszennej: 1 – poznańska $a_w = 0,33$; 2 – poznańska $a_w = 0,65$; 3 – poznańska $a_w = 0,8$; 4 – razowa $a_w = 0,65$; 5 – razowa $a_w = 0,8$

Fig. 1. Effect of water activity on instantaneous flow functions FF of tested wheat flours: 1 – poznańska $a_w = 0,33$, 2 – poznańska $a_w = 0,65$, 3 – poznańska $a_w = 0,8$, 4 – whole meal $a_w = 0,65$, 5 – whole meal $a_w = 0,8$

Pomimo statystycznie istotnego wpływu aktywności wody na przebieg funkcji płynięcia FF mąki poznańskiej oraz statystycznie istotnej różnicy w przebiegu funkcji płynięcia FF mąki poznańskiej i mąki razowej o danej aktywności wody, kryterium Jenike nie różnicuje badanych typów mąki pszennej pod względem ich właściwości płynięcia. Funkcje płynięcia FF mąki poznańskiej o aktywności wody 0,33, 0,65 i 0,8 oraz mąki razowej o a_w 0,65 i 0,8 znajdują się w jednym przedziale kryterium płynięcia (indeks płynięcia $4 < ffc < 10$) i określają badane mąki jako słabo kohezyjne, łatwo płynące (rys. 1). Według kryterium Jenike, występuje brak wpływu zawartości wody (od 11 do 16% dla mąki poznańskiej oraz od 13 do 16% dla mąki razowej) na zmianę zdolności płynięcia badanej mąki pszennej konsolidowanych naprężeniem σ_E do 17,5 kPa.

Wartości parametrów plastycznego płynięcia zależą od typu mąki, stopnia jej nawilżenia oraz przyjętego poziomu naprężeń konsolidujących (tab. 2). Wykazano statystycznie istotny wpływ aktywności wody oraz różnice w kohezyjności i wytrzymałości konsolidowanych typów mąki pszennej.

Zarówno kinetyczny (φ) jak i efektywny (δ) kąt tarcia wewnętrzznego jest charakterystyczny dla danego typu mąki i jest zależny od wielkości naprężenia konsolidującego i aktywności wody. Zależnie od wartości naprężenia konsolidującego σ_E i aktywności wody materiału kąt φ wahał się od 26 do 35° dla mąki poznańskiej oraz od 30 do 37° dla mąki razowej. Kąt δ uwzględnia wzrost kohezji w materiale sypkim podczas konsolidacji. Wartości kąta δ są wyższe od wartości kąta φ i wynoszą od 31 do 40° dla mąki poznańskiej oraz od 36 do 37° dla mąki razowej (tab. 2).

Kohezyjność badanych typów mąki pszennej zależy od stopnia konsolidacji i aktywności wody (tab. 2). Mąka razowa charakteryzowała się średnio o 26% wyższą kohezją C (wartość średnia $C = 1,21$ kPa) w stosunku do mąki poznańskiej (wartość średnia $C = 0,96$ kPa) przy aktywności wody 0,65. Przy wzroście wilgotności mąk do aktywności wody 0,8 mąka poznańska i mąka razowa wykazują taki sam poziom kohezji C . W aktywności wody 0,8 średnia wartość kohezji wynosi: 1,23 kPa dla mąki poznańskiej i 1,24 kPa dla mąki razowej. Kohezja C rośnie wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego σ_E niezależnie od rodzaju mąki i jej aktywności wody. Bardziej znaczący wzrost kohezyjności występował dla mąki razowej wraz ze wzrostem σ_E niż dla mąki poznańskiej.

Wytrzymałość mąk konsolidowanych, określona parametrem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c , rośnie wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego σ_E niezależnie od aktywności wody (tab. 2). Wzrost σ_E z 4,89 do 17,50 kPa powoduje wzrost wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c mąki razowej odpowiednio: o 148% z 2,1 do 5,2 kPa ($a_w = 0,65$) i o 85% z 2,7 do 5,0 kPa ($a_w = 0,8$). Wzrost σ_E z 4,89 do 17,50 kPa powoduje wzrost wytrzymałości σ_c mąki poznańskiej odpowiednio: o 68% z 1,9 do 3,2 kPa ($a_w = 0,33$); o 11% z 3,4 do 3,8 kPa ($a_w = 0,65$) i o 79% z 2,4 do 4,3 kPa ($a_w = 0,8$). Wytrzymałość mąki poznańskiej rośnie wraz ze wzrostem aktywności wody. Mąki poznańska i razowa nie wykazują statystycznie istotnych różnic w wytrzymałości przy jednakowym poziomie aktywności wody; wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie σ_c mąki poznańskiej i mąki razowej przy aktywności wody odpowiednio 0,65 i 0,8 są jednakowe.

WNIOSKI

1. Materiały sypkie charakteryzujące się współczynnikiem Hausnera I_{Hr} mniejszym od 1,25 określane są jako proszki o dobrej sypkości. Badane mąki pszenne to materiały charakteryzujące się dobrą sypkością, przy czym wartość I_{Hr} różnicuje je pod względem sypkości. Mąka razowa cechuje się lepszą sypkością, w porównaniu do mąki poznańskiej. Dla badanych mąk wraz ze wzrostem aktywności wody do 0,8 maleje współczynnik I_{Hr} .

2. Według kryterium Jenike badana mąka pszenna poznańska i razowa, konsolidowane naprężeniem do 17,5 kPa wykazują podobne właściwości płynięcia.

Nawilżanie do aktywności wody 0,8 nie powoduje zmian pod względem zdolności do płynięcia tych materiałów. Funkcje płynięcia FF mąki poznańskiej o aktywności wody 0,33, 0,65 i 0,8 oraz mąki razowej o aktywności wody 0,65 i 0,8 określają badane mąki jako słabo kohezyjne, łatwo płynące.

3. Parametry plastycznego płynięcia badanych typów mąki pszennej, uzyskane z testów bezpośredniego ścinania i charakteryzujące właściwości płynięcia, zależą od aktywności wody i przyjętego poziomu naprężeń konsolidujących. Gęstość nasypowa w stanie skonsolidowanym, kohezyjność i wytrzymałość obu typów mąki – poznańskiej i mąki razowej, skonsolidowanej naprężeniem do 17,5 kPa, rośnie wraz ze wzrostem naprężenia konsolidującego i aktywności wody.

PIŚMIENNICTWO

1. **Abdullah E.C., Geldart D.:** The use of bulk density measurements as flowability indicators. *Powder Technology*, 102, 151-165, 1999.
2. **Fitzpatrick J.J., Barringer S.A., Iqbal T.:** Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values. *Journal of Food Engineering*, 61, 399-405, 2004.
3. **Fitzpatrick J.J., Iqbal T., Delaney C., Twomey T., Keogh M.K.:** Effect of powder properties and storage conditions on flowability of milk powders with different fat contents. *Journal of Food Engineering*, 64, 435-404, 2004.
4. **Hausner H.H.:** Friction conditions in a mass of metal powder. *International Journal of Powder Metallurgy*, 3, 7-13, 1967.
5. **Horabik J., Grochowicz M.:** Strength characteristics and dilatation of food powders. *International Agrophysics*, 16, 183-189, 2002.
6. **Horabik, J.:** Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesie składowania. Monografia, *Acta Agrophysica*, 54, 2001.
7. **Jenike A. W., Carson J.:** Measurement principles of the flowability of powders. *Advance Ceramic* 21, 759-766, 1985.
8. **Jenike A.W.:** Storage and flow of solids. Bulletin No. 123 Engineering and Experiment Station 53 (26), University of Utah, USA, 1964.
9. **Knowlton T. M., Carson J. W., Klinzing G. E., Yang W. C.:** The importance of storage, transfer and collection. *Chemical Engineering Progress*, 90, 44-54, 1994.
10. **Peleg M.:** Flowability of food powders and methods for its evaluation – a review. *Journal of Food Process Engineering*, 1, 303-328, 1978.
11. **Schubert H.:** Food Particle Technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. *Journal of Food Engineering*, 6 (1), 1-32, 1987.
12. **Schulze D.:** Measuring powder flowability: a comparison of test methods Part I and II. *Powder and Bulk Engineering*, 10, 45-61, 17-28, 1996.
13. **Schwedes J.:** Consolidation and flow of cohesive bulk solids. *Chemical Engineering Science*, 57, 287-294, 2002.
14. **Schwedes J.:** Measurement of flow properties of bulk solids. *Powder Technology*, 88, 285-290, 1996.
15. **Seville J.P.K., Willett C.D., Knight P.C.:** Interparticle forces in fluidization. *Powder Technology*, 113, 261-268, 2000.

16. **Tchoreloff P., Leclerc B., Guerin E., Tanguy D., Deleuil M., Couarraze G.:** Reological characterization of pharmaceutical powders using tap testing, shear cell and mercury porosimeter. *International Journal of Pharmaceutics*, 189, 91-103, 1999
17. **Teunou E., Fitzpatrick J.J., Synnott E. C.:** Characterisation of food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 39, 31-37, 1999.
18. **Teunou E., Fitzpatrick J.J.:** Effect of relative humidity and temperature on food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 42, 109-116, 1999.
19. **Teunou E., Fitzpatrick J.J.:** Effect of storage time and consolidation on food powder flowability. *Journal of Food Engineering*, 43, 97-101, 2000.

FLOWABILITY OF THE WHEAT FLOUR AFFECTED BY WATER ACTIVITY AND CONSOLIDATION

Ewa Domian, Karolina Poszytek

Department of Food Engineering and Process Management, Warsaw Agricultural University
02-787 Warszawa , ul. Nowoursynowska 159c
e-mail: domian@alpha.sggw.waw.pl

Abstract. The effect of water activity and consolidation on the flowability for two types of wheat flour: type 500 (poznanska) and type 2000 (whole meal) was evaluated. The flours differed each other with particle size distribution and chemical composition. Powder flowability was measured using uniaxial shear tester according to Jenike procedure at four levels of normal consolidating stress at the range 4.9-17.5 kPa. Flours were placed in a humidity chamber to obtain following samples: wheat flour poznanska at 0.33, 0.65 and 0.8 water activity, wheat flour whole meal at 0.65 and 0.8 water activity. Instantaneous shear tests were performed at temperature 20°C on each flour, from which the instantaneous flow-function were obtained. A number of physical properties, including particle size distribution and bulk density were used in interpreting and comparing the flowability measurements for each flour.

Key words: flow function, shear test, wheat flour