

Lidia ZANDER, Elżbieta HAPONIUK, Zygmunt ZANDER, Grzegorz PROBOLA

e-mail: lidia@uwm.edu.pl

Katedra Inżynierii i Aparatury Procesowej, Wydział Nauki o Żywności, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

Wpływ obróbki mechanicznej na stabilność reologiczną skrzepu jogurtowego

Wstęp

Jogurt należy do najbardziej popularnych mlecznych napojów fermentowanych. Obok wysokiej wartości odżywczej i walorów smakowych o jego akceptacji przez konsumentów decyduje tekstura, oceniana sensorycznie, ale dająca się też charakteryzować ilościowo za pomocą parametrów reologicznych.

Z fizycznego punktu widzenia jogurt należy do kategorii słabych żeli spożywczych [1]. Podczas jego wytwarzania w mleku zachodzi szereg przemian strukturalnych prowadzących do zmian właściwości reologicznych. Do śledzenia tych przemian stosuje się różne techniki pomiarowe – od prostych testów penetrometrycznych poczynając, poprzez wyznaczanie klasycznych krzywych płynięcia aż po bardziej zaawansowane metody badania właściwości lepkosprężystych [1]. Reologii jogurtu poświęcono już wiele prac badawczych, np. [2]. Autorzy zgodnie stwierdzają jego podatność na rozrzedzenie ścinaniem i stosują różne modele reologiczne do odwzorowania krzywych płynięcia [3, 4].

Ważną cechą jogurtu jest też brak stabilności reologicznej, która przejawia się jako zachowania tiksotropowe i lepkosprężystość [5]. Jednakże do celów praktycznych, np. przy projektowaniu urządzeń i instalacji, najbardziej popularnym modelem, wykorzystywanym do przedstawienia jego właściwości pozostaje równanie potęgowe [5] – przede wszystkim ze względu na swą prostotę.

Znajomość złożonych właściwości reologicznych jogurtu oraz charakteru ich zmian w różnych etapach i warunkach procesu przetwórczego pozwala inżynierom na świadome kształtowanie konsystencji produktu w zależności od oczekiwań konsumentów. W przemysłowej technologii wytwarzania jogurtu stosuje się szereg operacji jednostkowych, w których produkt poddawany jest działaniu sił ścinających – bezpośrednio po koagulacji następuje łagodne na ogół mieszanie, po czym następuje przetłaczanie przez wymienniki ciepła, mieszanie z dodatkami i pakowanie. Konsekwencją tych operacji są zmiany w strukturze cieczy, wyrażające się zmianami charakterystyk reologicznych.

Celem niniejszej pracy było dokonanie oceny zmian przebiegu krzywych płynięcia i stabilności reologicznej jogurtu pod wpływem procesu homogenizacji ciśnieniowej i intensywnego ścinania w młynku kolooidalnym.

Materiał i metodyka badań

Materiał do badań stanowił skrzep jogurtowy otrzymywany w warunkach laboratoryjnych. Po fermentacji żel jogurtowy mieszano mieszadłem wstęgowym przez 5 minut przy częstości obrotów $N = 1,35 \text{ s}^{-1}$. Otrzymaną zawiesinę białkową poddawano homogenizacji ciśnieniowej przy 70, 100 i 140 MPa za pomocą homogenizatora laboratoryjnego NIRO SOAVI model NS 1001L – Panda. Odrębną partię rozmieszanego żelu poddawano ścinaniu w młynku kolooidalnym przy szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ około 17000 s^{-1} , stosując jedno-, dwu- i trzykrotny przepływ jogurtu przez urządzenie. Po obróbce mechanicznej mierzono krzywe płynięcia skrzepu jogurtowego za pomocą reometru rotacyjnego Rheotest 2 z układem cylindrów koncentrycznych S/S1. Stosowano kolejno rosnące i malejące szybkości ścinania w zakresie 1,5 do $364,5 \text{ s}^{-1}$, przy czym przy $\dot{\gamma} = 364,5 \text{ s}^{-1}$ każdą próbkę ścinano przez 120 s. Do dalszych analiz wykorzystywano wartości naprężeń stycznych ustalających się po 60 s ścinania przy danej wartości $\dot{\gamma}$. Następnie próbki skrzepu jogurtowego poddawano relaksacji w temperaturze $10,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$ przez 24 godziny i ponownie mierzono ich charakterystyki reologiczne.

Zmiany naprężeń stycznych w funkcji szybkości ścinania przybliżano równaniem potęgowym

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

gdzie:

- τ – naprężenie styczne [Pa],
- K – współczynnik konsystencji [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$],
- n – wskaźnik płynięcia.

Otrzymane w wyniku bezpośrednich pomiarów wartości współczynnika K korygowano metodą podaną w pracy [6], zakładając, że oszacowane wartości wskaźnika płynięcia n są stałą materiałową badanych próbek i nie zależą od rzeczywistego profilu prędkości w szczelinie układu pomiarowego.

Za miarę stabilności reologicznej badanych próbek jogurtu przyjęto wielkość pola powierzchni pętli histerezy Δ między krzywymi płynięcia otrzymywanymi kolejno przy rosnących i malejących szybkościach ścinania. Obliczenia parametrów krzywych płynięcia oraz oceny istotności wpływu analizowanych wykonano za pomocą programu STATISTICA v. 8.0 (StatSoft Inc. 2008), przyjmując do weryfikacji hipotez statystycznych poziom $p \leq 0,05$.

Wyniki i ich analiza

Parametry krzywych płynięcia jogurtu poddawanego operacjom mechanicznym zestawiono w tabeli 1. W każdym przypadku otrzymywano wyraźnie niższe wartości współczynników konsystencji K przy malejących szybkościach ścinania w reometrze niż przy rosnących. Jednocześnie wskaźnik płynięcia n zwiększał się, co oznacza, że pomimo radykalnego zniszczenia struktury w procesach homogenizacji podczas pomiarów reologicznych następowała dalsza destrukcja próbki, co obserwowali także inni autorzy [7].

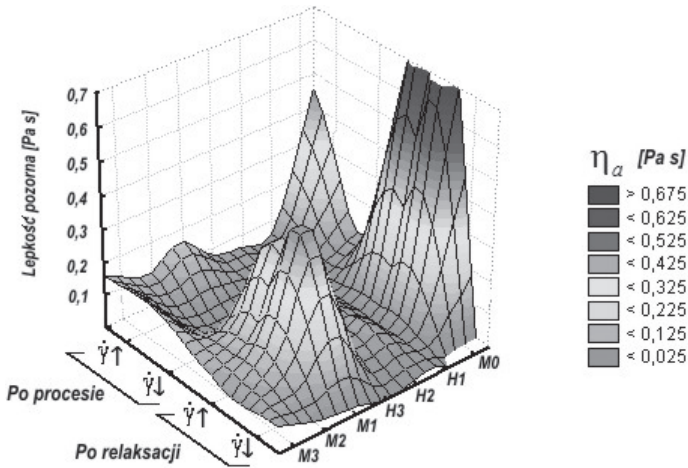
Tab. 1. Krzywe płynięcia jogurtu poddawane obróbce mechanicznej – parametry równania potęgowego

Próbka	Proces	Kierunek zmian $\dot{\gamma}$	Po procesie 43 °C		Po 24 h relaksacji 10 °C	
			K [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$]	n	K [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$]	n
M0	mieszanie	↑	2,772	0,419	7,842	0,368
		↓	1,619	0,469	2,370	0,447
H1	homogenizacja 70 MPa	↑	1,377	0,257	1,740	0,231
		↓	0,651	0,376	0,201	0,591
H2	homogenizacja 70 MPa	↑	1,259	0,289	2,463	0,240
		↓	0,608	0,423	0,472	0,517
H3	homogenizacja 70 MPa	↑	2,037	0,211	2,473	0,260
		↓	0,634	0,397	0,420	0,536
M1	młynek koloidalny 1×	↑	1,674	0,366	6,366	0,366
		↓	1,177	0,425	3,410	0,422
M2	młynek koloidalny 2×	↑	1,668	0,306	5,398	0,262
		↓	1,085	0,355	2,086	0,405
M3	młynek koloidalny 3×	↑	3,476	0,280	2,379	0,331
		↓	2,106	0,370	0,961	0,471

Próbki pozostawione w bezruchu na 24 h w niskiej temperaturze w większości przypadków charakteryzowały się wyższymi wartościami współczynnika konsystencji niż bezpośrednio po procesie mechanicznym. Różnica ta jest nie tylko wynikiem obniżenia temperatury, lecz

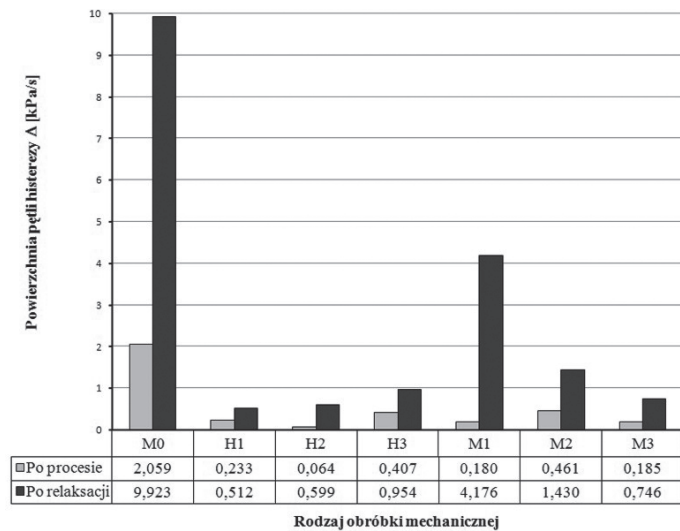
także może wskazywać na odbudowę struktury żelowej [8]. Należy przy tym zwrócić uwagę na stosunkowo wysokie wartości współczynników konsystencji próbek poddawanych jedno- i dwukrotnemu ścinaniu w młynku koloidalnym. Może to być skutek zmian zachodzących w strukturze białek pod wpływem ścinania [8].

Na rys. 1 zilustrowano zmiany lepkości pozornej (η_a) jogurtu przy szybkości ścinania 100 s^{-1} , reprezentatywnej dla warunków konsumpcji [9]. Stwierdzono, że po 24 h relaksacji szczególnie silnie wzrasta lepkość jogurtu mieszanego (M0), co oznacza, że w tym czasie następuje odbudowa jego struktury żelowej. Struktura ta jednak łatwo ulega rozpadowi pod wpływem ścinania, dlatego lepkości uzyskiwane przy malejących szybkościach ścinania są zdecydowanie niższe.



Rys. 1. Zmiany lepkości pozornej jogurtu przy $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ po obróbce mechanicznej i relaksacji – oznaczenia próbek, jak w tab. 1

Zmiany strukturalne zachodzące w badanych próbkach wyrażały się zróżnicowaną stabilnością reologiczną. Na rys. 2 porównano wielkości pola powierzchni pętli histerezy powstającej między krzywymi płynięcia uzyskiwanymi przy rosnących ($\dot{\gamma} \uparrow$) i malejących ($\dot{\gamma} \downarrow$) szybkościach ścinania. Jogurt łagodnie mieszany (M0) w największym stopniu odbudowywał swoją pierwotną strukturę, ale była ona szczególnie słaba.



Rys. 2. Powierzchnie pętli histerezy Δ w próbkach jogurtu mieszanego (M0), poddanego homogenizacji (H1-H3) i ścinaniu w młynku koloidalnym (M1-M3)

Z kolei jogurty poddawane homogenizacji ciśnieniowej (H1-H3) w wyniku tego procesu ulegały całkowitemu niemal upłynnieniu, przy jednoczesnym zachowaniu silnej podatności na rozrzedzenie ścinaniem. Ich struktura w nieznacznym stopniu odbudowywała się podczas

relaksacji w niskiej temperaturze, ale wzrost lepkości po tym czasie był niewysoki (Tab. 1 i Rys. 1.) Jednocześnie próbki te odznaczały się dość dużą stabilnością reologiczną – w omawianych przypadkach powierzchnie pętli histerezy były najmniejsze. Wynika stąd, że homogenizację ciśnieniową należy stosować podczas produkcji jogurtu pitnego, który powinien charakteryzować się stosunkowo niewysoką lepkością i nie ulegającą zmianom podczas przechowywania w chłodziarce.

Proces ścinania w młynku koloidalnym z założenia powinien prowadzić do podobnych skutków, co homogenizacja ciśnieniowa. Wyniki pomiarów krzywych płynięcia próbek ścinanych w młynku (M1-M3) wskazują jednak na nieco większą lepkość i mniejszą stabilność reologiczną. Różnice te zarówno w stosunku do danych odnoszących się do próbek homogenizowanych (M1-M3) wobec H1-H3), jak i w grupie próbek ścinanych w młynku (M1-M3) są statystycznie istotne na poziomie $p \leq 0,05$ i dotyczą wszystkich analizowanych cech reologicznych.

Po 24 h relaksacji lepkość jogurtu jednokrotnie ścinanego (M1) była najbardziej zbliżona do jogurtu mieszanego (M0) – rys. 1, ale jego stabilność reologiczna była większa (Rys. 2). Z kolei próbki dwu- i trzykrotnie ścinane (M2 i M3) były porównywalne z próbkami poddawany homogenizacji ciśnieniowej. Stwierdzano obniżenie lepkości i mniejsze wartości powierzchni pętli histerezy Δ , czyli wzrost stabilności reologicznej. Oznacza to jednak, że pierwotna struktura zawiesiny białkowej jogurtu w wyniku tych procesów ulega tak silnemu naruszeniu, że podczas pomiarów krzywych płynięcia dalsza degradacja cząstek już nie zachodzi.

Otrzymane wyniki mogą wskazywać na występowanie zjawiska rozciągania molekuł białkowych podczas przepływu jogurtu przez głowicę młynka [7, 8, 10]. Zjawisko to było prawdopodobnie podstawą skonstruowania reaktora typu rotor-stator, oferowanego jako urządzenie pozwalające na poprawę jakości jogurtu poprzez nadanie mu gładkiej, gęstej konsystencji i ograniczenie skłonności do synerazy serwatki wg [10].

Wnioski

Przeprowadzone doświadczenia i uzyskane wyniki wskazują, że podanie jogurtu na tyle intensywnemu ścinaniu, że wywołuje ono zmiany w strukturze miceli kazeinowych, może pozwolić na kształtowanie jego konsystencji. Rozpoznanie tego zjawiska wymaga jednak powiązania badań reologicznych zachowań jogurtu z badaniami struktur białkowych tworzących się w wyniku operacji mechanicznych.

Oznaczenia

- K – współczynnik konsystencji, $[\text{Pa}\cdot\text{s}^n]$
- n – wskaźnik płynięcia, $[-]$
- η_a – lepkość pozorna przy $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$
- Δ – powierzchnia między krzywymi płynięcia dla rosnących i malejących szybkości ścinania, $[\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}]$
- $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, $[\text{s}^{-1}]$
- $\uparrow\downarrow$ – kierunek zmian szybkości ścinania
- τ – napężenie styczne, $[\text{Pa}]$

LITERATURA

- [1] M. H. Tunick: J. Dairy Sci., **83**, 1892 (2000)
- [2] T. Benezech, J. F. Maingonnat: J. Food Eng. **21**, nr 4, 447 (1994).
- [3] A. Skriver, H. Roemer, K. B. Qvist: J. Text. Studies, **24**, nr 2, 185 (1993).
- [4] L. De Lorenzi, S. Priol, G. Torriano: Int. Dairy Journal, **5**, nr 7, 661 (1995).
- [5] G. Mullineux, M.J.H. Simmons: J. Food Eng., **79**, 850 (2007).
- [6] F. Rieger, L. Zander: Inż. Ap. Chem., **46**, nr 2, 6 (2007).
- [7] B. Özer: Turk. J. Agric. For., **28**, 19 (2004).
- [8] J. I. Sulowska, M. Cieplak: Biophys. J., **94**, 1, 6 (2008).
- [9] J. F. Steffe: Rheological Methods in Food Process Engineering. Freeman Press, East Lansing 1996.
- [10] A. Y. Tamime, R. K. Robinson: Yoghurt: Science and Technology, Woodhead Publ. 1999.