DOI: 10.2429/proc.2015.9(1)025 2015;9(1)

Agnieszka DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA[1], Małgorzata NABRDALIK[1], Natalia MAŚLAK[1] Natalia WĄSIEWICZ[1] i Zbigniew ZIEMBIK[1]

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE JOGURTÓW NATURALNYCH

THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF NATURAL YOGHURT

Abstrakt: Jogurt, podobnie jak inne produkty mleczne zawierające kultury bakterii, ma strukturę żelu, która rozwija się podczas fermentacji. Dzięki takiej strukturze żel wykazuje zależność lepkości od czasu i szybkości ścinania. Badaniom poddano handlowe jogurty naturalne o zawartości tłuszczu 2,0 i 2,5%. W badanych jogurtach oznaczono parametry reologiczne za pomocą wiskozymetru rotacyjnego BROOKFIELD DV2T, z wykorzystaniem wrzeciona CPA-422. Parametry reologiczne określono w różnych dniach terminu przydatności jogurtu do spożycia przy stałych prędkościach ścinania. Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów obliczono parametry modelu potęgowego, opisujące właściwości reologiczne badanych jogurtów. Stwierdzono, że model Ostwalda de Waele'a dobrze opisuje krzywe płynięcia jogurtów. Zauważono również wzrost lepkości jogurtu w kolejnych dniach od momentu otwarcia opakowania.

Słowa kluczowe: właściwości reologiczne, jogurt, model Ostwalda de Waele'a

Emulsje spożywcze są substancjami złożonymi pod względem składu i struktury. Charakteryzują się rozmaitymi właściwościami reologicznymi. Takie produkty, jak mleko czy napoje mleczne, są przykładami emulsji o niskiej lepkości, a masło czy też margaryna to emulsje będące ciałami stałymi [1]. Jogurt jest emulsją typu olej w wodzie (o/w). Fazą olejową są kropelki tłuszczu, a fazę wodną tworzą roztwory białek, cukrów i soli mineralnych. Produkty mleczne, w tym także jogurty, charakteryzują się strukturą żelu, rozwijającą się podczas procesu fermentacji [1].

Fermentowane napoje mleczne to produkty o znacznej wartości odżywczej i zdrowotnej [2, 3]. Obecność żywych kultur bakterii starterowych w jogurtach jest jednym z czynników wpływających na właściwości terapeutyczne, profilaktyczne i dietetyczne jogurtów. W skład najczęściej stosowanych obecnie w produkcji jogurtów szczepionek czystych kultur wchodzą *Streptococcus thermophilus* i *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus,* które muszą pozostać żywe, aktywne i liczne (min. 10^7 jtk/g) do ostatniego dnia przydatności do spożycia [4, 5]. W skład jogurtów mogą wchodzić również szczepy probiotyczne. Do drobnoustrojów o działaniu probiotycznym należą przede wszystkim bakterie z rodzaju *Lactobacillus* i *Bifidobacterium.* Udokumentowano, że dodawanie ich do produktów żywnościowych korzystnie wpływa na pracę organizmu [6].

Mleczne napoje fermentowane charakteryzują się lekko kwaśnym smakiem oraz przyjemnym zapachem. Aby poprawić walory smakowe tych produktów, producenci bardzo często wzbogacają je poprzez dosładzanie, dodawanie owoców, bakalii, aromatów oraz zwiększenie suchej masy mleka. Produkty fermentowane z udziałem probiotyków wzbogaca się również poprzez dodatek prebiotyków, do których zalicza się niektóre białka, tłuszcze oraz oligo- i polisacharydy. Stosowanie takiego zabiegu ma na celu wspomaganie rozwoju bifidobakterii oraz poprawę tekstury produktu [5, 6].

[1] Samodzielna Katedra Biotechnologii i Biologii Molekularnej, Uniwersytet Opolski, ul. kard. B. Kominka 6, 45-032 Opole, tel. 77 401 60 46, email: agna@uni.opole.pl
[*] Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'14, Jarnołtówek, 15-17.10.2014

Mleczne produkty żywnościowe są układami złożonymi, których właściwości reologiczne ulegają zmianom w czasie, najczęściej w niekorzystnym kierunku [7]. Proces fermentacji wywołany przez bakterie fermentacji mlekowe przyczynia się do zmniejszenia pH oraz koagulacji mleka wskutek zmiany laktozy na kwas mlekowy. Micele kazeiny przy pH = 5,0 zaczynają się częściowo destabilizować i łączyć ze sobą w agregaty i łańcuchy. Prowadzi to do ich wytrącenia w punkcie izoelektrycznym i utworzenia skrzepu. W ten sposób powstają trójwymiarowe macierze białkowe z unieruchomioną fazą ciekłą mleka [8]. Należy zwrócić uwagę, że schłodzenie końcowego produktu ogranicza aktywność metaboliczną bakterii, jednak nie hamuje całkowicie przemian enzymatycznych w mleku, np. proteolizy. Powolna proteoliza białek prowadzi do zmian w trójwymiarowej sieci skrzepu, decydując o właściwościach reologicznych produktu końcowego. Również działanie czynników mechanicznych oraz niekorzystne warunki środowiskowe, a w szczególności brak ciągłości łańcucha chłodniczego, może wpływać na obniżenie stabilności skrzepu. Procesy te decydują o właściwościach sensorycznych i swoistej strukturze jogurtu, która sprawia, że występują zależności pomiędzy lepkością a czasem i szybkością ścinania [8].

Na właściwości reologiczne jogurtów wpływ ma technologia produkcji i dodatki, ale także rodzaj kultur starterowych i ich aktywność. Do produkcji jogurtów używa się bakterii *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus* i *S. thermophilus*. Oba szczepy zdolne są do syntezy egzopolisacharydów (ang. EPS - *exopolysaccharides*) [9-11]. Przykładami EPS wytwarzanymi przez bakterie kwasu mlekowego są między innymi: dekstran, alternan, mutan, reuteran, ksantan, gellan, pullulan, alginia. Są one wydzielane na zewnątrz komórki w postaci śluzu lub związane z powierzchnią komórek [10, 12]. Dlatego też, jak pokazują badania, jogurty wyprodukowane na bazie szczepów zdolnych do syntezy EPS wykazują lepszą reologię, lepkość czy konsystencję niż te wyprodukowane przy udziale szczepów niezdolnych do syntezy tych polimerów [13]. Przyjmuje się, że w mieszaninie starterowej *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus* jest odpowiedzialny za zakwaszenie sprzyjające koagulacji kazeiny, z kolei *S. thermophilus* odpowiedzialny jest za uwolnienie aromatu. Hassan i in. [14] stwierdzili, iż jogurt zawierający kultury *S. thermophilus* produkujące EPS wykazywał wzrost współczynników spójności w porównaniu do jogurtu przygotowanego z kultur niebędących w stanie produkować EPS. Z kolei Sady i in. [15] wykazali, że poziom *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus* oraz *S. thermophilus* w jogurtach naturalnych wzrastał do trzeciego dnia ich przechowywania.

Ramchandran i Sha [16] wykazali, iż zastosowanie szczepów *S. thermophilus* wytwarzających EPS nie ma wpływu na pH, zawartość kwasu mlekowego oraz konsystencję jogurtów o niskiej zawartości tłuszczu. Natomiast obecność EPS ma wpływ na jędrność, spontaniczne oddzielenie serwatki oraz plastyczność produktu. Jak wynika z przeprowadzonych badań, na strukturę i konsystencję jogurtów wpływa między innymi zawartość tłuszczu.

Reasumując, poprawę stabilności fizycznej jogurtów naturalnych można uzyskać poprzez zastosowanie bakterii mających zdolność produkowania EPS.

Celem przeprowadzonych pomiarów było zbadanie zmian właściwości reologicznych jogurtów naturalnych w zależności od czasu pozostałego do terminu przydatności do spożycia.

Materiały i metody

Zbadano jogurty naturalne o zawartościach tłuszczu 2,0 i 2,5%, wyprodukowane przez jednego producenta i dostępne w sieciach handlowych. Jogurty badane były w dniu zakupu oraz przez kolejne 2 dni, a także w ostatnim dniu ich przydatności do spożycia. W tabeli 1 przedstawiono skład badanych jogurtów naturalnych, natomiast w tabeli 2 ich wartości odżywcze.

Tabela 1

Skład badanych jogurtów naturalnych

Table 1

Composition of the natural yoghurt

Nazwa jogurtu	Mleko	Mleko w proszku	Białka mleka	Wapń	Kultury bakterii jogurtowych	Dodatkowe kultury bakterii
Jogurt naturalny 2%	∨	∨	∨	∨	*Streptococcus thermophilus, Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*	*Lactobacillus acidophilus, Bifidobacterium* sp.
Jogurt naturalny 2,5%	∨	∨	∨	-	*Streptococcus thermophilus, Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*	

Tabela 2

Wartość odżywcza badanych jogurtów naturalnych

Table 2

The nutritional value of the natural yoghurt investigated

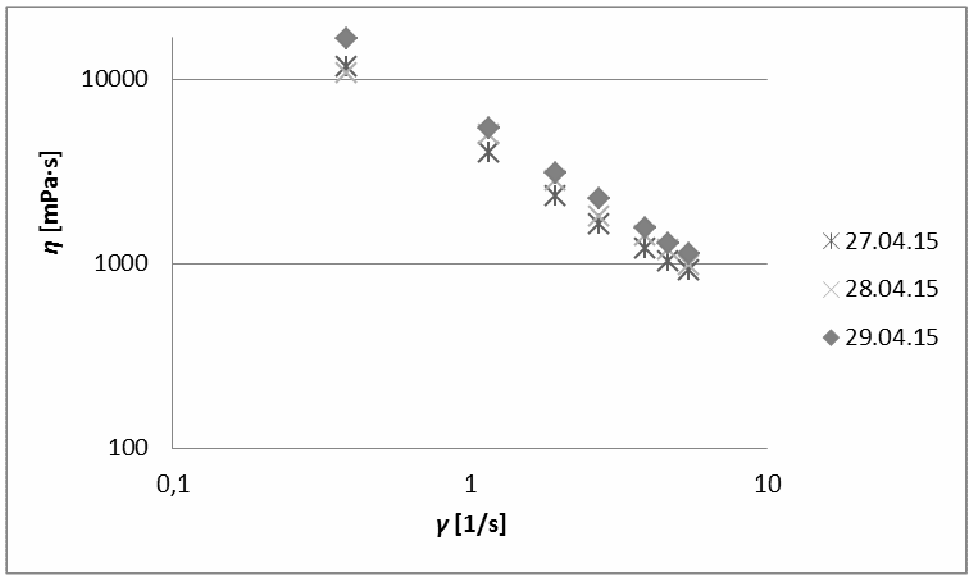
Nazwa jogurtu	Wartość odżywcza w 100 g					
	Energia [kcal]	Tłuszcz [g]	Węglowodany [g]	Białko [g]	Sól [g]	Wapń [mg]
Jogurt naturalny 2%	58	2	5,7	4,3	0,05	240
Jogurt naturalny 2,5%	61	2,5	5,2	4,3		

Parametry reologiczne określono za pomocą wiskozymetru rotacyjnego BROOKFIELD DV2T z wykorzystaniem wrzeciona CPA-422. Parametry te określono w różnych dniach terminu przydatności jogurtu do spożycia przy stałych prędkościach ścinania. Każdą z próbek jogurtu przechowywano w chłodziarce w temp. 4ºC. Przed każdym pomiarem sprawdzano pH jogurtów, których wartość oscylowała w granicach 4,10-4,46. Wszystkie pomiary prowadzono w temperaturze 10ºC.

Wyniki badań

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe krzywe płynięcia 2,0% jogurtu w kolejnych dniach od momentu jego otwarcia. Obserwowana w podwójnej skali logarytmicznej

liniowość zależności sugeruje potęgowy związek pomiędzy lepkością η i prędkością ścinania γ. Zależność tę można opisać równaniem $\log(\eta) = a \log(\gamma)+b$.



Rys. 1. Przykładowe krzywe płynięcia 2,0% jogurtu

Fig. 1. The flow curves examples of 2.0% yoghurt

Analizując wykres, można zauważyć znaczne zmniejszenie lepkości wraz ze wzrostem prędkości ścinania, zwłaszcza przy małych wartościach tej prędkości. Zauważono również wzrost lepkości w kolejnych dniach od momentu otwarcia jogurtu, największą lepkość odnotowano dwa dni od jego otwarcia. Może to być skutkiem wzrostu liczebności bakterii wytwarzających EPS, które istotnie wpływają na lepkość jogurtu.

W tabeli 3 przedstawiono parametry równań liniowych opisujących zależności przedstawione na rysunku 1. *SE a* i *SE b* są błędami standardowymi współczynnika kierunkowego i wyrazu wolnego, a R^2 jest współczynnikiem determinacji zależności liniowej.

Tabela 3

Parametry równań liniowych opisujących zależności przedstawione na rysunku 1

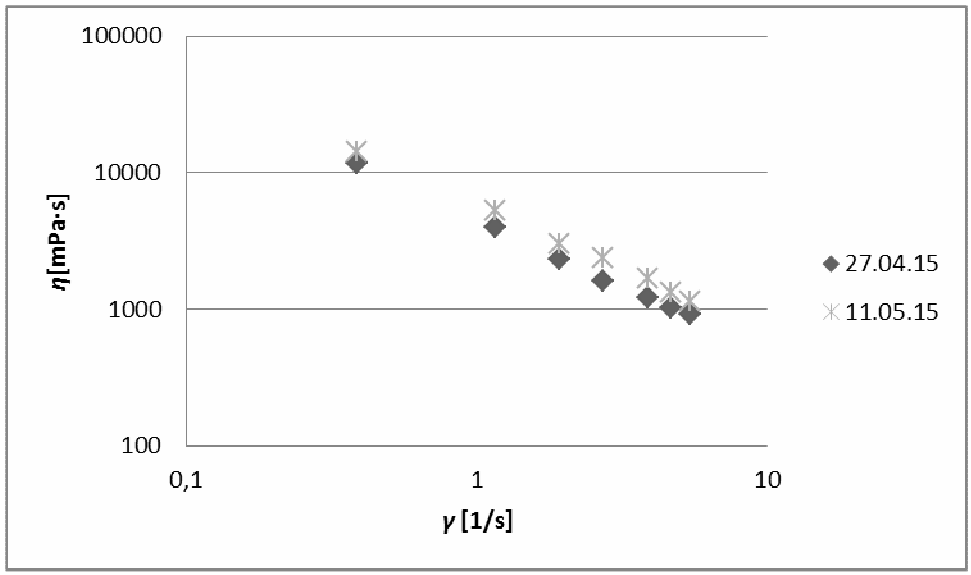
Table 3

Parameters of linear equations plotted in Figure 1

Dzień pomiaru	***a***	***SE a***	***b***	***SE b***	R^2
27.04.2015 r.	–0,974	0,016	3,6533	0,0082	0,999
28.04.2015 r.	–0,929	0,043	3,689	0,021	0,990
29.04.2015 r.	–1,0220	0,0072	3,7909	0,0036	1,000

Dane przedstawione w tabeli 3 wskazują, że największą wartość współczynnika kierunkowego odnotowano dwa dniu po otwarciu jogurtu. Również wartość wyrazu wolnego osiągnęła największą wartość po tym czasie.

Na rysunku 2 porównano krzywe płynięcia 2,0% jogurtu naturalnego 15 dni przed upływem terminu przydatności do spożycia i w dniu upływu tego terminu.



Rys. 2. Przykładowe krzywe płynięcia 2,0% jogurtu naturalnego w różnych okresach terminu przydatności do spożycia

Fig. 2. Examples of 2.0% yogurt flow curves in different periods of shelf life

W tabeli 4 podano parametry równań liniowych opisujących zależności przedstawione na rysunku 2.

Tabela 4

Parametry równań liniowych opisujących zależności przedstawione na rysunku 2

Table 4

Parameters of linear equations plotted in Figure 2

Dzień pomiaru	***a***	***SE a***	***b***	***SE b***	R^2
27.04.2015 r.	–0,974	0,016	3,6533	0,0082	0,999
11.05.2015 r.	–0,954	0,017	3,7684	0,0087	0,998

Współczynnik kierunkowy krzywych płynięcia 2,0% jogurtu naturalnego w różnych okresach terminu przydatności do spożycia nie zmienia się istotnie. Natomiast odnotowano zwiększenie wartości wyrazu wolnego równania liniowego, co wskazuje na zmianę parametrów fizykochemicznych badanych jogurtów.

Do opisu otrzymanych wyników pomiarów reologicznych wykorzystano model Ostwalda de Waele'a. Jest to dwuparametrowy model reologiczny, opisujący krzywe płynięcia badanych produktów [1]:

$$\tau = k \cdot \gamma^n \quad (1)$$

gdzie: τ - naprężenie styczne [Pa], k - współczynnik konsystencji [Pa·s^n], γ - szybkość ścinania [1/s], n - wskaźnik płynięcia [-].

W tabeli 5 przedstawiono parametry reologiczne jogurtów, obliczone za pomocą modelu potęgowego.

Tabela 5

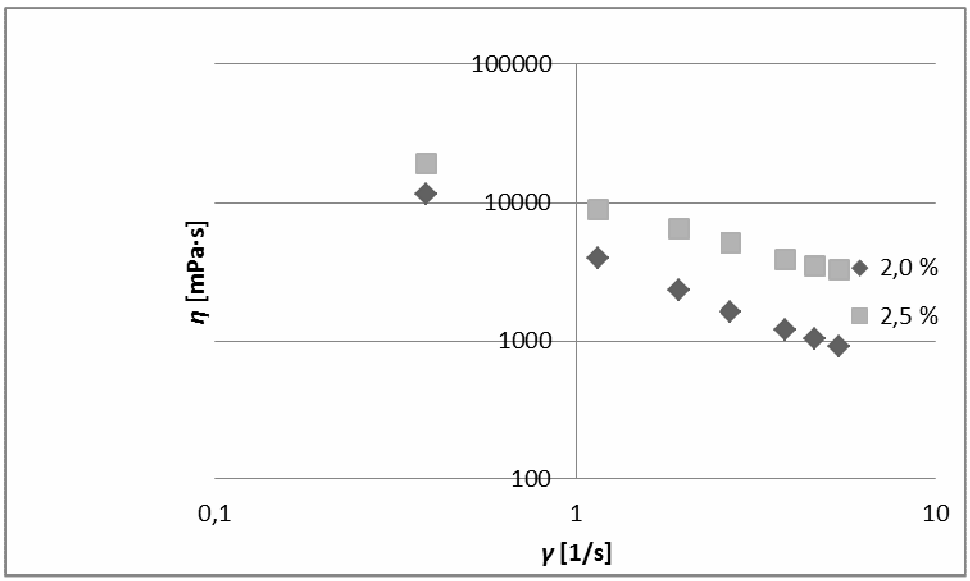
Parametry reologiczne jogurtów i ich błędy standardowe *SE*

Table 5

Rheological parameters yoghurts and their standard errors *SE*

Jogurt	Model potęgowy			
	ln(*k*/[Pa·s^n])	*SE*/(ln(*k*/[Pa·s^n]))	*n* [-]	*SEn* [-]
2,0%	1,59	0,20	0,27	0,17
2,5%	2,300	0,009	0,310	0,008

Porównując wyniki zamieszczone w tabeli 5, można zauważyć, że przy zbliżonych wartościach wskaźnika płynięcia badane jogurty charakteryzują się różnymi wartościami współczynnika konsystencji, co jest związane z ich strukturą. Badane jogurty miały różną strukturę i konsystencję, co prawdopodobnie wynika z różnych zawartości tłuszczu. Na rysunku 3 porównano krzywe płynięcia dla jogurtów 2,0 i 2,5% w momencie ich otwarcia.



Rys. 3. Porównanie krzywych płynięcia dla jogurtów 2,0 i 2,5% w momencie ich otwarcia

Fig. 3. Comparison of 2.0 and 2.5% yoghurt flow curves for at the time of opening

W tabeli 6 przedstawiono parametry równań liniowych opisujących zależności pokazane na rysunku 3.

Tabela 6

Parametry równań liniowych opisujących zależności przedstawione na rysunku 3

Table 6

Parameters of linear equations plotted in Figure 3

Jogurt	*a*	*SE a*	*b*	*SE b*	R^2
2,0%	–0,9738	0,016	3,6534	0,0082	0,999
2,5%	–0,6827	0,0080	4,0002	0,0040	0,999

Wnioski

1. Z pomiarów przeprowadzonych na produktach świeżo otwartych wynika, że wraz ze wzrostem prędkości ścinania maleje lepkość jogurtu. Jest on płynem nienewtonowskim, rozrzedzanym ścinaniem.
2. Badane jogurty miały różną strukturę i konsystencję, co było prawdopodobnie związane z różnymi zawartościami tłuszczu.
3. Pomiędzy lepkością jogurtów η i prędkością ścinania γ istnieje zależność, którą w zlinearyzowanej formie przedstawia równanie $\log(\eta) = a \log(\gamma) + b$.
4. Zauważono wzrost lepkości jogurtów w kolejnych dniach od momentu otwarcia opakowań.
5. Największe wartości współczynnika kierunkowego i wyrazu wolnego odnotowano dwa dniu po otwarciu jogurtu. Można przypuszczać, że jest to związane ze wzrostem liczebności bakterii *L. delbrueckii* ssp. *bulgaricus* oraz *S. thermophilus* i wzrostem zawartości wytwarzanych przez nie egzopolisacharydów (EPS).
6. Współczynnik kierunkowy krzywych płynięcia 2,0% jogurtu naturalnego w różnych okresach do końca terminu przydatności do spożycia nie zmienia się istotnie. Natomiast odnotowano zwiększenie wartości wyrazu wolnego równania liniowego, co wskazuje na zmianę parametrów fizykochemicznych jogurtów.
7. Model Ostwalda de Waele'a dobrze opisuje krzywe płynięcia badanych jogurtów.

Litertura

[1] Plaskota D. Właściwości reologiczne jogurtów w zależności od czasu ich dojrzewania. Żywność Nauka Technol Jakość. 2004;4(41)S:88-99. http://www.pttz.org/zyw/wyd/czas/2004,%204%2841%29%20Supl/08_Plaskota.pdf.

[2] Przysławski J, Główka A, Bolesławska I, Kaźmierczak A, Dzięcioł M. Preferencje i czynniki wyboru w zakresie spożycia mleka i produktów mlecznych wśród studentek poznańskich uczelni wyższych. Bromat Chemia Toksykol. 2012;3:1024-1029. http://www.ptfarm.pl/pub/File/Bromatologia/2012/3/1024-1029.pdf.

[3] Mojka K. Probiotyki, prebiotyki i synbiotyki - charakterystyka i funkcje. Probl Hig Epidemiol. 2014;95(3):541-549. http://www.phie.pl/pdf/phe-2014/phe-2014-3-541.pdf.

[4] Kycia K, Krysiński C. Jakość mikrobiologiczna i higieniczna rynkowych jogurtów z mleka koziego w kontekście ich właściwości terapeutycznych. Probl Hig Epidemiol. 2014;95(1):186-191. http://phie.pl/pdf/phe-2014/phe-2014-1-186.pdf.

[5] Kudełka W. Charakterystyka mlecznych napojów fermentowanych w Unii Europejskiej oraz w Polsce. Zesz Nauk Akademii Ekonomicznej w Krakowie. 2005;678:149-160.

[6] Kudełka W, Marzec M. Preferencje studentów dotyczące spożycia mlecznych napojów fermentowanych. Żywność Nauka Technol Jakość. 2004;3(40):63-76.

[7] Adamczyk G, Sikora M, Krystyjan M. Metody pomiaru właściwości tiksotropowych produktów żywnościowych. Żywność Nauka Technol Jakość. 2012;3(82):19-34. http://www.pttz.org/zyw/wyd/czas/2012,%203%2882%29/02_Adamczyk.pdf.
[8] Plaskota D. Wyznaczenie obszaru optymalnych szybkości ścinania jogurtów o różnym czasie dojrzewania. Żywność Nauka Technol Jakość. 2004;4(41):95-106. http://www.pttz.org/zyw/wyd/czas/2004,%204%2841%29/08_Plaskota.pdf.
[9] Welman AD, Maddox IS. Exopolysaccharides from lactic acid bacteria: perspectives and challenges. Trends Biotechnol. 2003;21(6):269-274. DOI: 10.1016/S0167-7799(03)00107-0.
[10] Feldmane J, Semjonovs P, Iprovica I. Potential of exopolysaccharides in yoghurt production. Internat J Biol Food Veter Agricult Eng. 2013;7(8):424-427.
[11] Patel S, Majumder A, Goyal A. Potentials of exopolysaccharides from lactic acid bacteria. Indian J Microbiol. 2003;52(1):3-12. DOI: 10.1007/s12088-011-0148-8.
[12] Górska S, Grycko P, Rybka J, Gamian A. Egzopolisacharydy bakterii kwasu mlekowego - biosynteza i struktura. Postępy Hig Med Dośw. 2007;61:805-818.
[13] Doleyres Y, Schaub L, Lacroix C. Comparison of the functionality of exopolysaccharides produced in situ or added as bioingredients on yogurt properties. J Dairy Sci. 2005;88(12):4146-415. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(05)73100-3.
[14] Hassan AN, Ipsen R, Janzen T, Qvis KB. Microstructure and rheology of yogurt made with cultures differing only in their ability to produce exopolysaccharides. J Dairy Sci. 2003;86(5):1632-1638. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(03)73748-5.
[15] Sady M, Domagała J, Grega T, Kalicka D. Wpływ czasu przechowywania na mikroflorę jogurtów z dodatkiem nasion amarantusa i ziaren owsa. Żywność Nauka Technol Jakość. 2007;6(55):242-250. http://www.pttz.org/zyw/wyd/czas/2007,%206%2855%29/23_Sady.pdf.
[16] Ramchandran L, Sha NP. Effect of exopolysaccharides on the proteolytic and angiotensin-I converting enzyme-inhibitory activities and textural and rheological properties of low-fat yogurt during refrigerated storage. J Dairy Sci. 2009;92(3):895-906. DOI: 10.3168/jds.2008-1796.

THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF NATURAL YOGHURT

Independent Department of Biotechnology and Molecular Biology, Opole University

Abstract: Yogurt, like other dairy products containing bacterial cultures, has a gel structure which develops during fermentation. With this structure, the gel shows the time dependence of the viscosity and shear rate. Two commercial natural yoghurt with a fat content of 2.0 and 2.5% were tested. In the studied yoghurts rheological parameters were determined, using BROOKFIELD DV2T rotational viscometer with CPA-422 spindle. Rheological parameters were determined in different days of yoghurt shelf-life, at constant shear rates. Parameters of power-law model, describing rheological properties of the investigated yoghurt, were calculated. It was found that Ostwald de Waele model describes well the flow curves of yoghurts. An increase in viscosity of yoghurt in consecutive days from the package opening was also observed.

Keywords: rheology, yoghurt, model of Ostwald de Waele