

MAREK SIKORA, GRETA ADAMCZYK, MAGDALENA KRYSZYJAN

TIKSOTROPIA MIARĄ NIESTABILNOŚCI CIEKŁYCH PRODUKTÓW ŻYWNOŚCIOWYCH

Streszczenie

Stwierdzono, że zjawisko tiksotropii jest zjawiskiem reologicznym, o dużym znaczeniu w przemyśle, również spożywczym. Ogólnie ujmując, jest to cecha niestabilności substancji, związana z powstawaniem i niszczeniem jej wewnętrznej struktury. Zależna jest od czasu i szybkości ścinania, a także od zjawisk mechanicznych zachodzących w materiale. Tiksotropia wykorzystywana jest na szeroką skalę, m.in. w cukiernictwie – do opisu zjawisk, zachodzących podczas konszowania mas czekoladowych. Żele skrobiowe (kleiki) charakteryzują się strukturą bardzo niestabilną w czasie. Do scharakteryzowania tej niestabilności (zmienności w czasie) stosuje się właśnie pomiary właściwości tiksotropowych.

Słowa kluczowe: tiksotropia, żele skrobiowe, oddziaływania międzycząsteczkowe, pętla histerezy

Wprowadzenie

Wszystkie procesy zachodzące w przyrodzie sprowadzają się do wzajemnej zamiany różnych substancji oraz do ciągłych transformacji jednej w drugą [3].

Nauką o płynięciu materiałów oraz ich plastycznej deformacji jest reologia. Jest to nauka o substancjach rzeczywistych, które wykazują złożone właściwości mechaniczne cieczy i ciał stałych, ściśle powiązane ze skalą czasu [14]. Właściwości tych substancji są opisane za pomocą związków między siłami zewnętrznymi, oddziałującymi na ciało a wewnętrznymi reakcjami materiału, czyli odkształceniami. Reologia jest nauką, która plasuje się między klasyczną mechaniką płynów newtonowskich, a teorią ciał doskonale sprężystych. Zajmuje się ona substancjami nienewtonowskimi, takimi jak: kremy, piany, różnego rodzaju pasty, emulsje, farby, kleje, lakiery, jak również beton, skały, metale i wiele innych. Jednym z istotniejszych zjawisk zachodzących w reologii jest tiksotropia.

Prof. dr hab. inż. M. Sikora, mgr inż. G. Adamczyk, mgr inż. M. Krystyjan, Katedra Technologii Węglowodanów, Wydz. Technologii Żywności, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ul. Balicka 122, 39-140 Kraków

Opis zjawiska tiksotropii

Zjawisko tiksotropii polega na tym, że w warunkach izotermicznego przepływu cieczy, która uprzednio znajdowała się dłużej w spoczynku, przy stałej szybkości ścinania, naprężenie styczne maleje odwracalnie z upływem czasu. Tiksotropią nazywa się każdy proces, w którym na skutek niszczenia wewnętrznej struktury układu następuje izotermiczne zmniejszanie się tarcia wewnętrznego cieczy z upływem czasu ścinania, jak również dający się zmierzyć w czasie powolny powrót do pierwotnej konsystencji podczas spoczynku [1, 2, 9].

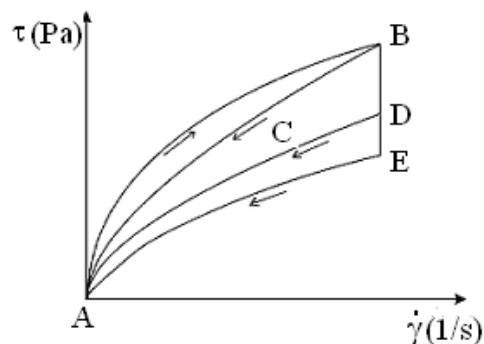
Podstawy tiksotropii wiążą się ze skomplikowaną budową molekularną substancji, bazującą na silnych elektrycznych oddziaływaniach międzycząsteczkowych. Częsteczkowe układy samoorganizujące się charakteryzują się tym, że powstają dzięki siłom wewnętrznym układu. Siłami, które są odpowiedzialne za powstawanie tych struktur są: siły van der Waalsa, siły wiązania wodorowego, siły hydrofobowe i siły elektrostatyczne [6, 13, 8]. Wszystkie te siły powstają przy wzajemnym zbliżaniu się atomów lub cząsteczek. Następuje wtedy zmiana ich konfiguracji elektronowej, czyli inne rozmieszczenie elektronów, należących do atomów danego pierwiastka na jego powłokach, podpowłokach i orbitalach, w wyniku której powstaje słabe oddziaływanie elektromagnetyczne. Wszystkie wymienione wyżej siły oddziaływania międzycząsteczkowego są związane z oddziaływaniem elektromagnetycznym. Do oddziaływań międzycząsteczkowych zalicza się między innymi (w kolejności od najsilniejszych do najslabszych): oddziaływania jon-jon, wiązania wodorowe, oddziaływania trwałe dipol - trwałe dipol oraz oddziaływania van der Waalsa. Oddziaływania jon-jon, zachodzą między dwiema różnoimiennie naładowanymi cząsteczkami, siła tych oddziaływań jest proporcjonalna do $1/r^2$ (gdzie r – odległość między cząsteczkami). Wiązania wodorowe biorą udział w interakcjach pomiędzy kowalentnie związanym atomem wodoru a elektroujemnymi atomami sąsiedniej cząsteczki. Jeśli występują w obrębie jednej cząsteczki, są często traktowane jak słabe wiązania chemiczne. Jeśli wiążą one dwie lub kilka cząsteczek, można je traktować jako oddziaływania międzycząsteczkowe. Oddziaływania trwałe dipol - trwałe dipol tworzą się między cząsteczkami mającymi trwałe momenty dipolowe. Cząsteczki takie zawierają w jednych miejscach nadmiar ładunku ujemnego, a w innych jego niedomiar. Ich oddziaływanie jest słabsze od jonowego, ponieważ występują tu cząstkowe, a nie całkowite ładunki elektryczne. Oddziaływania van der Waalsa, zwane też oddziaływaniami Londona lub oddziaływaniami dyspersyjnymi, są to oddziaływania między trwałym dipolem i wzbudzonym dipolem lub między dwoma wzbudzonymi dipolami. Taki wzbudzony dipol i trwałe dipol oddziałują na siebie podobnie jak dwa trwałe dipole, tyle że znacznie słabiej. W cząsteczkach bez trwałego momentu dipolowego występują natomiast stochastyczne fluktuacje ich chmur elektronowych, powodujące powstawanie chwilowych momentów dipolowych. Cząsteczka mająca chwilowy moment dipolowy może go wzbudzić w cząsteczce są-

siadującej, wskutek czego obie cząsteczki mogą się nawzajem chwilowo przyciągać lub odpychać. Wynikiem uśrednienia sił odpychających i przyciągających jest oddziaływanie przyciągające, proporcjonalne do $1/r^6$. Oddziaływania van der Waalsa wynikają m.in. z korelacji ruchów elektronów pomiędzy oddziałującymi atomami. Dlatego też w metodach obliczeniowych, które nie uwzględniają korelacji elektronowej, sił tych praktycznie nie ma. Należy również mieć na uwadze, że pomiędzy powłokami elektronowymi, przy małych odległościach pomiędzy atomami, pojawia się oddziaływanie odpychające, wynikające z obowiązywania zakazu Pauliego [6].

Struktura przestrzenna substancji powstaje w zależności od oddziaływań między cząsteczkami i od kształtu tych cząsteczek. O właściwościach reologicznych substancji decydują właściwości jej struktury wewnętrznej, pozostającej przez dłuższy czas w spoczynku. W substancjach, które poddaje się ścinaniu, słabe wiązania fizyczne ulegają rozerwaniu, co powoduje rozpad struktury wewnętrznej na oddzielne agregaty. Rozpad ten jest wielostopniowy i jest funkcją zarówno czasu, jak i szybkości ścinania. Przy wystarczająco wysokich szybkościach ścinania fokuły rozpadają się do pierwotnych, pojedynczych cząstek. Ruchy Browna powodują jednak zderzenia pomiędzy fokułami, co w rezultacie prowadzi do wzrostu liczby agregatów. Po pewnym czasie, przy danej szybkości ścinania, ustala się równowaga dynamiczna pomiędzy rozpadem i wzrostem agregatów, zaś przy wyższych szybkościach ścinania równowaga ustala się przy większej dyspersji (rozdrobieniu substancji rozproszonej) [7, 9].

Badania nad zjawiskiem tiksotropii znacząco poszerzyła metoda wyznaczania pętli histerezy [5]. Podczas ścinania cieczy tiksotropowej, np. w viskozymetrze rotacyjnym, następuje niszczenie struktury cieczy. Końcem niszczenia struktury jest moment wytworzenia przy danej prędkości ścinania szczytkowej struktury cieczy. Porównanie krzywej płynięcia, wykreślonej przy wzrastającej szybkości ścinania, z krzywą przy malejącej szybkości ścinania, umożliwia określenie zakresu niszczenia struktury tiksotropowej. Jeżeli przed rozpoczęciem wyznaczania krzywej (kiedy wartość szybkości ścinania jest jeszcze mała) substancję podda się przez pewien czas ścinaniu przy określonej maksymalnej szybkości (γ), to naprężenie styczne (τ), odpowiadające tej szybkości zmniejszy się proporcjonalnie do rozpadu struktury tiksotropowej (punkty B→C). Ścinanie z szybkością γ_{\max} , prowadzone przez nieskończenie długi czas, doprowadza zmniejszające się naprężenie styczne do wartości równowagowej (punkt D), wartość ta jest charakterystyczna dla danej szybkości ścinania (rys. 1).

Krzywa opadająca E→A jest krzywą równowagową, wykreśloną przy granicznym zniszczeniu struktury, kiedy γ przyjmuje wartość maksymalną.



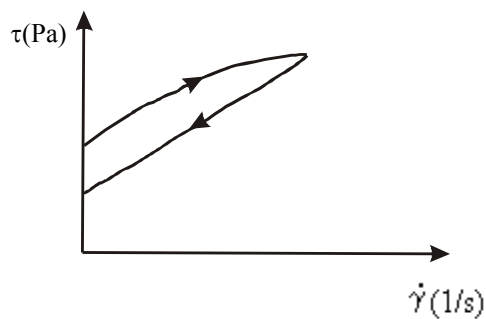
Rys. 1. Pętle histerezy powstałe przez połączenie krzywych szybkości ścinania.

Fig. 1. Hysteresis loops formed by connecting shear rate curves.

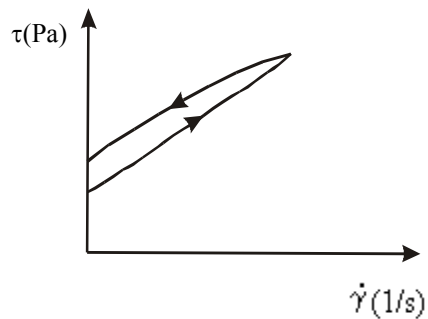
Źródło / Source: [9]

Na podstawie opisu właściwości ciał tiksotropowych, za pomocą rozmiarów i kształtu pętli histerezy, wprowadzono dodatkowo współczynniki chronotiksotropii oraz mobilotiksotropii, charakteryzujące ciecze tiksotropowe. Współczynnik chronotiksotropii oznacza szybkość rozpadu struktury wewnętrznej w czasie, przy stałej szybkości ścinania, natomiast współczynnik mobilotiksotropii jest miarą rozpadu tiksotropowego, wywołanego rosnącą szybkością ścinania [15]. Istnieje również teoria, że pętla histerezy ma związek z fizyczną energią potrzebną do przezwyciężenia oporu lepkości, aby początkowa struktura układu została zniszczona bądź odbudowana [4, 11]. Zjawiskami „przeciwymi” do tiksotropii są tiksotropia ujemna i antytiksotropia. Terminy te oznaczają, że struktura odbudowuje się przy ścinaniu, a niszczy się przy spoczynku (zawiesina uwolniona od ścinania) [1, 2]. Ciecze antytiksotropowe wykazują odwracalny wzrost naprężenia stycznego, po dostatecznie długim okresie spoczynku, przy stałej szybkości ścinania i w warunkach izotermicznych. Antytiksotropia nazywana była często w literaturze reopeksją. Reopeksja jest to właściwość cieczy nienewtonowskich, powodująca zastyganie substancji w wyniku ścinania poprzez zwiększenie lepkości. Zastyganie takie następuje szybciej niż w warunkach, w których nie ma ścinania. Jest to zjawisko formowania struktury substancji pod wpływem łagodnych i regularnych ruchów. Tego typu właściwości wykazują np. zawiesiny gipsu. Wprowadzono również termin „tiksoplastyczność”, łączący zjawisko tiksotropii z lepkosprężystością [12]. Ciecze plastycznie tiksotropowe zachowują się zupełnie inaczej, gdyż nie tracą swej „plastyczności” i charakteryzują się niewielką granicą płynięcia.

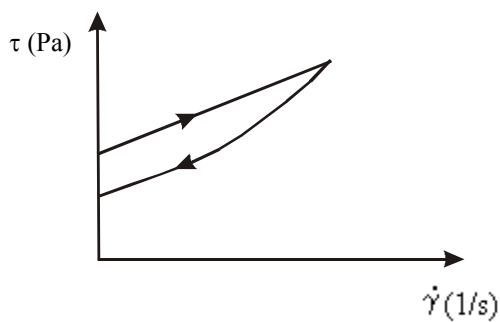
Poniżej przedstawiono podział płynów tiksotropowych (rys. 2), uwzględniający zarówno tiksotropię, antytiksotropię, reopeksję i antyreopeksję [8].



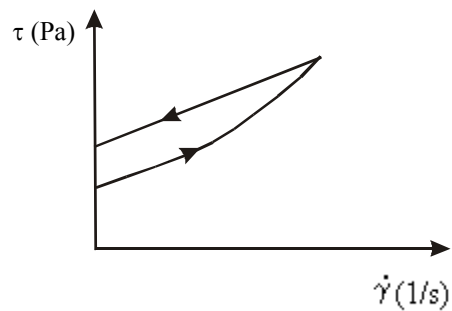
Rys. 2a. Zachowanie tiksotropowe.
Fig. 2a. Thixotropic behaviour.



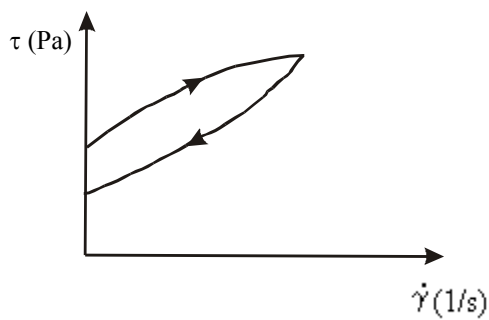
Rys. 2b. Zachowanie antytiksotropowe.
Fig. 2b. Antithixotropic behaviour.



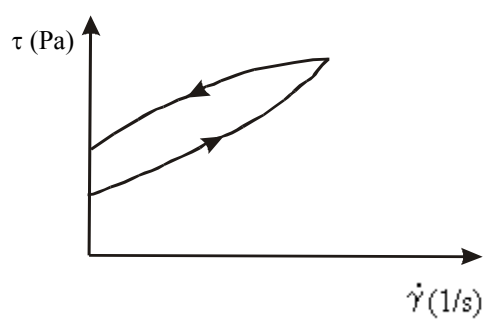
Rys. 2c. Zachowanie reopeksyjne.
Fig. 2c. Rheopectic behaviour.



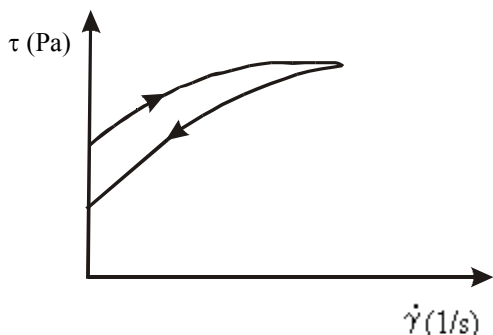
Rys. 2d. Zachowanie antyreopeksyjne.
Fig. 2d. Antirheopectic behaviour.



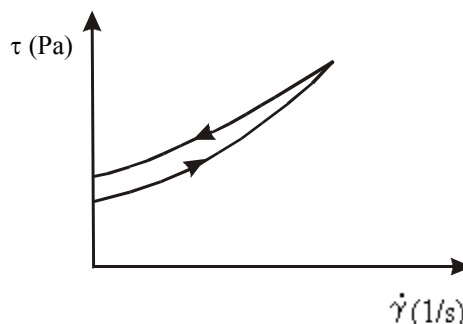
Rys. 2e. Zachowanie tikso-reopeksyjne.
Fig. 2e. Thixo-rheopectic behaviour.



Rys. 2f. Zachowanie antyreopeksyjno-
antytiksotropowe.
Fig. 2f. Antirheopectic-antithixotropic behaviour.



Rys. 2g. Zachowanie tikso-antytikotropowe.
Fig. 2g. Thixo-antithixotropic behaviour.



Rys. 2h. Zachowanie antyreo-reopeksyjne.
Fig. 2h. Antirheo-rheopectic behaviour.

Rys. 2. Podział płynów tiksotropowych.
Fig. 2. Classification of thixotropic fluids.
Źródło / Source: [9]

Zdarza się, że podczas badań zawiesiny charakteryzuje się ją jako tiksotropową, a tymczasem jej zachowanie reologiczne zależy tylko od osadzania się cząstek stałych. Wytrącanie się i sedymentacja cząstek w funkcji czasu są m.in. zależne od wielkości cząstek i od lepkości substancji. Jeżeli szybkość sedymentacji jest większa od szybkości rozpraszania (dyspersji), wówczas następuje rozwarstwianie, w wyniku którego uzyskuje się podobne efekty pomiarowe (pętla histerezy), często mylnie opisywane jako tiksotropia. Innym zjawiskiem błędnie odczytywanym jako tiksotropia jest syneriza, która polega na wydzielaniu małych ilości cieczy z cząstek zawieszonych w żelu i jest związana z procesami koagulacji. Przy mechanicznym wzbudzaniu takich żeli może zdarzyć się przypadek, że ciecz „wyciśnięta” z cząstki utworzy dookoła niej warstwę. Spowoduje to rozdzielenie układu dyspersyjnego na dwie części: stężony żel i bardzo rozcieńczony roztwór zolu. Syneriza może zachodzić samorzutnie lub pod wpływem elektrolitów i substancji zmniejszających rozpuszczalność związków wielkocząsteczkowych. Syneriza jest objawem starzenia się żelu [7].

Struktura w cieczach tiksotropowych wykazuje pewną sztywność, która oznacza rzeczywistą wartość granicy płynięcia. Wartość ta pokrywa się z wartością uzyskaną przez przecięcie stycznej do krzywej płynięcia z osią naprężeń, w przypadku, gdy niszczenie poszczególnych etapów utworzonej struktury tiksotropowej odbywa się w sposób ciągły. Szybkość rozpadu struktury zależy od liczby wiązań, które ulegają zniszczeniu. Szybkość odbudowy struktury rośnie w miarę, jak mnoży się liczba tworzonych wiązań. W pewnym momencie zostaje osiągnięty stan równowagi dynamicznej, w której szybkość odbudowy struktury jest równa szybkości rozpadu wiązań. Sztywność struktury tiksotropowej określa maksymalne naprężenie styczne, konieczne do

zniszczenia wewnętrznej struktury zawiesiny, pozostającej w spoczynku. Jest to rzeczywista granica płynięcia płynów plastyczno-tiksotropowych. Różnica pomiędzy wartościami sztywności struktury tiksotropowej a granicą płynięcia τ_y określa jej sprężystość [4, 10].

W przypadku, kiedy zawiesina rozpada się na mniejsze flokuły o blaszkowatym pokroju cząstek, mogą wystąpić trzy różne połączenia cząstek: powierzchnia do powierzchni, krawędź do powierzchni i krawędź do krawędzi. Każde z tych połączeń charakteryzuje się różnym wzajemnym oddziaływaniem energii, szybkością rozpraszania i zbliżania się cząstek. Połączenie powierzchnia do powierzchni prowadzi do powstania grubszych i dłuższych blaszek. Agregacja zmniejsza wytrzymałość zawiesiny, ponieważ ogranicza liczbę elementów będących w stanie budować strukturę substancji. Odwrotnością agregacji jest dyspersja – rozproszenie. Połączenie krawędź do powierzchni i krawędź do krawędzi powoduje powstanie struktury trójwymiarowej, o dużych rozmiarach. Czas niszczenia i odtwarzania struktury tiksotropowej może zmieniać się w szerokim zakresie, dlatego też jego pomiar nie jest łatwy [10].

Właściwości reologiczne substancji ulegają zmianie wraz z upływem czasu. Zjawisko to określane jest jako „starzenie się”. Lepkość zawiesin często z upływem czasu maleje aż do tzw. czasu „stabilizacji”. Stąd też okres „starzenia się” zawiesin liczony jest od ustabilizowania się wszystkich właściwości reologicznych zawiesin. Zmiany reologiczne zawiesin w okresie „starzenia się” są nieodwracalne, dlatego wymagają szczególnego podejścia, zarówno pod względem użytkowym, jak i poznawczym. W procesie „starzenia” zmianom ulega lepkość oraz sztywność struktury tiksotropowej. Zmiany te w zależności od czasu przechowywania mogą być spowodowane m.in. rozpadem agregatów ziaren na mniejsze jednostki, co objawia się podwyższeniem lepkości i wzmocnieniem zjawiska koagulacji, sedymentacją grubszych ziaren, jak również występowaniem połączeń organicznych, które mogą ulec rozpadowi, łączeniu lub zmianie konformacji łańcuchów, co zwykle objawia się podwyższeniem lepkości oraz zmianami temperatury [9].

Przemysłowe znaczenie zjawiska tiksotropii

Z punktu widzenia reologii tiksotropia jest cechą niestabilności substancji. Związana jest ona z powstawaniem i niszczeniem wewnętrznej struktury ośrodka. Zjawisko tiksotropii uzależnione jest od czasu i szybkości ścinania, a także od zjawisk mechanicznych, którym podlega materiał. Tiksotropia ma duże znaczenie zarówno w przemyśle spożywczym, jak w branżach nieżywnościowych.

W cukiernictwie zjawisko tiksotropii służy do opisu zjawisk zachodzących podczas konszowania mas czekoladowych. Sommer [18], badając czekoladę gorzką, przedstawił sposób pomiaru, pozwalający na rozdzielenie wpływu dwóch rodzajów lepkości – powstałych na skutek przepływu i na skutek tarcia cząstek fazy stałej.

Umożliwiło to określenie zmian struktury płynnej czekolady oraz przepływu tłuszczu kakaowego, pomiędzy cząstkami fazy stałej masy czekoladowej. Zieliński i wsp. [21], badając wpływ procesów technologicznych na właściwości suspensji o dużym stężeniu cząstek fazy stałej, stwierdzili, że przy pewnych zakresach szybkości ścinania można uzyskać znaczącą redukcję lepkości, przy utrzymaniu tej samej końcowej zawartości tłuszczu kakaowego. Obserwację tę tłumaczyli poprzez zmiany strukturalne, zachodzące w badanych zawiesinach (masach), sprowadzające się do lepszego układu (upakowania) cząstek w zawieszynie.

Tiksotropia żeli (kleików) skrobiowych jest zjawiskiem niekorzystnym, świadczącym o niestabilności ich struktury. Aby temu przeciwdziałać, stosuje się różnego rodzaju modyfikacje skrobi – fizyczne, chemiczne, biochemiczne oraz ich kombinacje, a także próbuje się ustabilizować żele skrobiowe poprzez dodatki do nich nieskrobiowych hydrokoloidów polisacharydowych. Sikora i wsp. [15] podkreślają możliwość redukcji tzw. pola powierzchni pętli histerezy poprzez dodatek gumy ksantanowej do skrobi ziemniaczanej, kukurydzianej i owsianej i w ten sposób otrzymania stabilnych właściwości reologicznych w czasie przechowywania sosów truskawkowych. W innej pracy Sikory i wsp. [16] wykazano zróżnicowany wpływ dodatku gumy ksantanowej na stabilizację reologicznych właściwości i zmniejszenie powierzchni pól histerezy tiksotropii mieszanin tej gumy ze skrobiami: ziemniaczaną, kukurydzianą, tapiokową i owsianą. W kolejnej pracy Sikory i wsp. [17] określono zróżnicowany wpływ dodatku gumy guarowej na wielkość powierzchni pól histerezy tiksotropii mieszanin tej gumy z różnymi skrobiami. Generalnie, zjawisko tiksotropii kleików skrobiowych, jako niekorzystne, bowiem powoduje brak stabilizacji właściwości reologicznych żywności z udziałem tych kleików, a zatem powinno być lepiej zbadane i zdefiniowane, aby w sposób efektywny niwelować jego wpływ albo wręcz je eliminować.

Dolz i wsp. [5] badali właściwości tiksotropowe hydrożeli, o różnym stężeniu i zaproponowali empiryczną procedurę, pozwalającą na wyliczenie i porównanie względnych powierzchni pól tiksotropii badanych hydrożeli. Choi i Yoo [4] usiłowali scharakteryzować zmienne w czasie właściwości zawiesin żywnościowych. Bazując na parametrach, otrzymanych na podstawie trzech modeli reologicznych (Weltmana, Hahna i Figoniego & Shoemakera) stwierdzili, że zmienne w czasie ciekłe właściwości zawiesin żywnościowych uzależnione są od prędkości ścinania, temperatury i w dużym stopniu od rodzaju zawiesiny żywnościowej (ketchup, musztarda, przecier dla dzieci).

Właściwości tiksotropowe mogą być mierzone w różny sposób. Są one uzależnione zarówno od metodyki pomiaru, sposobu przygotowania i rodzaju substancji, jak również od czasu trwania eksperymentu. Jednakże nadal nie udało się opracować uniwersalnej metody pomiaru jednoznacznie opisującej to zjawisko.

Podsumowanie

Zjawisko tiksotropii ma zastosowanie zarówno w przemyśle spożywczym, jak i w branżach niespożywczych. W odniesieniu do tak ważnego surowca żywnościowego, jakim jest skrobia, wydaje się mieć duże znaczenie. Badania tiksotropii mogą przyczynić się do opracowania rozwiązań pozwalających np. na alternatywną aplikację mieszanin skrobi natywnych z naturalnymi czy nieskrobiowymi hydrokoloidami polisacharydowymi w produkcji żywności, którą dotychczas wytwarza się na bazie skrobi modyfikowanych. Skrobie modyfikowane, zwłaszcza modyfikowane chemicznie, nie zawsze znajdują uznanie wśród konsumentów, którzy preferują produkty żywnościowe otrzymywane z surowców naturalnych.

Praca finansowana ze środków MNiSzW, w ramach grantu NN 312 207436.

Literatura

- [1] Barnes A.H.: Thixotropy – a review, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 1997, **70**,1-33.
- [2] Bautista F., de Santos J.M., Puig J.E., Manero O.: Understanding thixotropic and antithixotropic behavior of viscoelastic micellar solutions and liquid crystalline dispersions. I The model. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 1999, **80**, 93-113.
- [3] Brummer R.: *Rheology essentials of cosmetics and food emulsions*. Ed. Springer, Berlin 2005, pp. 1-16.
- [4] Choi Y.H., Yoo B.: Characterization of time-dependent flow properties of food suspensions. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 2004, **39**, 801-805.
- [5] Dolz M, Gonzalez F, Delegido J, Hernandez, MJ, Pellicer J.: A time dependent expression for thixotropic areas. Application to Aerosil 200 hydrogels. *J Pharm Sci*, 2000, **89**, 790-797.
- [6] Green H., Weltman R.N.: Equations of thixotropic breakdown for rotational viscometer. *Ing. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 1946, **18**, 167-172.
- [7] Israealchvili J.: *Intermolecular and surface forces*, Academic Press, London, 1992, pp. 3-108.
- [8] Mendez-Vivar, J., Bosch P., Lara V.H.: Synthesis and spectroscopic study of mixed metal clusters using methacrylate and acrylate ligands., *J. Non-Crystalline Solids*, 2005, 351, 1949-1957.
- [9] Migas A.: *Reologia ceramicznych zawiesin tiksotropowych*. Rozprawa doktorska. AGH, Wydz. Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Kraków 2008, ss. 7-33.
- [10] Mujumadar A., Beris A., Metzner A.B.: Transient phenomena in thixotropic system. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2002, **102**, 157-178.
- [11] Olphen H.: An introduction to clay colloid chemistry. *J. Colloid Interf. Sci.*, 1964, **19**, 313.
- [12] Perret D, Locat J, Martignoni P.: Thixotropic behavior during shear of a fine-grained mud from Eastern Canada. *Eng. Geol.*, 1996, **43**, 31-44.
- [13] Quemada D.: Rheological modeling of complex fluids. IV. Thixotropic and “thixoelastic” behavior. Start-up and stress relaxation, creep test and hysteresis cycles. *Eur. Phys. J.-Appl. Phys.*, 1999, **5**, 1191-1207.
- [14] Sikora M.: *Rola sacharydów w kształtowaniu reologicznych właściwości wodnych zawiesin tlenku glinu*. Wyd. Nauk. PTTŻ, Kraków 2001, pp. 17-29.
- [15] Sikora M., Kowalski S., Tomasik P., Sady M.: Rheological and sensory properties of dessert sauces thickened by starch-xanthan gum combinations. *J. Food Eng.*, 2007, **79**, 1144-1151.

- [16] Sikora M., Kowalski S., Tomasik P.: Binary hydrocolloids from starches and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 2008, **22**, 943-952.
- [17] Sikora M., Krystyjan M., Tomasik P., Krawontka J.: Mixed pastel of starches with guar gum. *Polimery* (praca w druku).
- [18] Sommer K.: Messmethode zur Bestimmung der Strukturaenderungen beim Conchieren von Schokolademassen. *Die Ernahrungsindustrie*, 1973, 123-126.
- [19] Steffe J.: *Rheological methods in food process engineering*, Freeman Press, USA, 1996, pp. 1-93.
- [20] Wilkinson W.L.: *Ciecze nienewtonowskie*, WNT, Warszawa 1963, pp. 52-56.
- [21] Zieliński M., Niediek E.A., Sommer K.: Einfluss des Knetens und Rührens auf das Fließverhalten von hochkonzentrierten Suspensionen. *Gordian*, 1974, **74**, 135-138, 141, 287-289.

THIXOTROPY AS A MEASURE OF LIQUID FOOD PRODUCTS

S u m m a r y

Thixotropy has been found to be a rheological phenomenon of great importance in industry including the food industry. Generally, it is a measure of substance instability owing to the formation and destruction of its internal structure. It depends on the time and rate of shear, as well as on the mechanical phenomena occurring within the material. Among other things, thixotropy is applied, on a large scale, in the confectionery industry for the purpose of describing phenomena occurring during the conching of chocolate masses. Starch gels (gruels) are characterized by a structure highly instable in time. Thixotropic characteristics are measured and applied to characterize this instability (changeability in time).

Key words: thixotropy, starch gels, inter-particle interactions, hysteresis loop ☒