

Układy dyspersyjne w przemyśle mleczarskim – otrzymywanie i ocena

Fabian Dajnowiec*, Katarzyna Stasiewicz, Malwina Banaszczyk

Katedra Inżynierii Aparatury Procesowej i Biotechnologii Żywności
Wydział Nauki o Żywności
Uniwersytet Warmińsko–Mazurski w Olsztynie

*kontakt e–mail: fabian.dajnowiec@uwm.edu.pl

Co to jest układ dyspersyjny?

Najprostszą definicję układu dyspersyjnego można znaleźć w słowniku języka polskiego i według tego źródła jest to „układ fizycznie niejednorodny, składający się z fazy rozpraszającej i znajdującej się w niej w postaci drobnych cząstek fazy rozproszonej” [15]. W każdym układzie dyspersyjnym znajdują się dwie fazy: faza ciągła i faza rozproszona. Fazą ciągłą może być substancja będąca płynem, gazem i ciałem stałym. W każdej z wymienionych substancji będących fazą ciągłą mogą być rozproszone gazy, ciecz i ciała stałe, tworząc układ koloidalny. Wielkość cząstek rozproszonych w fazie ciągłej mieści się w granicach od 1 nm do 15 μm . W zależności od charakteru fazy ciągłej i fazy rozproszonej układy dyspersyjne mają różną nazwę. Dyspersja może być stała, ciekła lub gazowa. Układy dyspersyjne można powszechnie znaleźć w surowcach i produktach przemysłu spożywczego. Najbardziej znanym, naturalnym układem dyspersyjnym, będącym surowcem przetwarzanym w warunkach przemysłowych jest mleko, które stanowi złożoną emulsję typu olej w wodzie (o/w), składającą się z wody, tłuszczu, białka, węglowodanów, witamin i składników mineralnych. Jest to typowy ciekły układ polidyspersyjny. Taki układ stanowi też śmietanka, która jest emulsją typu o/w. Z kolei masło to najbardziej typowy przykład stałej dyspersji, będące emulsją typu woda w oleju (w/o), w którym to w „stałym” tłuszczu mlekowym mamy rozproszone krople wody. Przykładem specyficznego układu dyspersyjnego w przemyśle mleczarskim są lody, które są koloidem zawierającym kuleczki tłuszczowe, pęcherzyki powietrza i kryształy lodu zdyspergowane w zamrożonym roztworze białek, węglowodanów i soli [18]. Jeszcze innym przykładem układu dyspersyjnego występującego w przemyśle mleczarskim jest mgła, którą tworzą podczas rozpylenia na dysku rozpryskowym w gorącym powietrzu cząstki suszonego materiału.

Emulsje jako układy dyspersyjne

Emulsje to powszechne w przemyśle mleczarskim, jak i spożywczym, układy dyspersyjne. Ich wytwarzanie jest procesem endotermicznym, wymaga dostarczenia energii mechanicznej w postaci działania sił ścinających. Podczas działania tych sił następuje rozdrobnienie kuleczek tłuszczowych na coraz mniejsze krople w fazie ciągłej (wodnej), tj. w plazmie mleka. Przyczynia się to do zwiększenia powierzchni międzyfazowej na granicy nierozpuszczających się faz.

Emulsje, po zaprzestaniu działania sił je wytwarzających, w sposób naturalny dążą do obniżenia energii powierzchniowej na granicy faz i w związku z tym należą do układów termodynamicznie niestabilnych, w których zachodzą przemiany wywołujące ich wady. Wśród form niestabilności emulsji można wyróżnić [1, 6, 7, 10,13, 25]:

- flokulację – agregację kropeł fazy rozproszonej bez utraty ich indywidualności,
- koalescencję – łączenie się kropeł w większe jednostki,
- śmietankowanie – migrację kropeł fazy rozproszonej ku górze,
- sedymentację – opadanie cząstek na dno,
- dojrzewanie Ostwaldowskie – rozpuszczanie się mniejszych kropeł w fazie ciągłej, a następnie dyfundowanie i ponowne osadzanie się na większych, co prowadzi do ogólnego wzrostu średniej wielkości cząstek zdyspergowanych,
- odwrócenie faz.

W celu ograniczenia tych procesów można podejmować działania, które będą miały wpływ na strukturę gotowego układu dyspersyjnego. Należą tu: regulacja zawartości fazy rozproszonej w układzie, obniżenie różnicy gęstości pomiędzy fazą ciągłą i rozproszoną, zwiększenie lepkości fazy ciągłej czy zmniejszenie rozmiaru cząstek fazy rozproszonej [1, 21, 26]. Do utrzymania rozmiaru cząstek tej fazy, a tym samym stabilności układu, niezbędne jest zmniejszenie napięcia międzyfazowego, stosując na przykład substancje powierzchniowo czynne, dobierając skład, temperaturę czy pH układu dyspersyjnego. W przemyśle spożywczym bardzo często używane są emulgatory, które mają za zadanie formować i stabilizować emulsję. Efektem działania emulgatorów jest: zmniejszenie napięcia międzyfazowego pomiędzy fazą wodno-olejową lub wodno-powietrzną, utworzenie warstwy międzyfazowej zapewniającej oddziaływanie elektrostatyczne między kroplami, zmniejszenie wymaganej ilości energii do degradacji gruboziarnistych cząstek, co ułatwia tworzenie mniejszych kropli [29].

W laboratoriach badawczych prowadzone są prace, mające na celu stosowanie alternatywnego sposobu stabilizowania układów dyspersyjnych. W doświadczeniach tych sprawdza się możliwość stabilizacji układu rozdrobnionymi ciałami stałymi, które ze względu na swoje właściwości będą nieodwracalnie adsorbowały się na granicy faz olej-woda, tworząc gęsty film zapobiegający agregacji kropli. Są to tzw. emulsje Pickeringa. Emulsje Pickeringa można otrzymać stosując dodatek zawiesiny cząstek stałych do układu przeznaczonego do dyspergowania. W dalszym kroku wykorzystuje się znane techniki emulgowania, takie jak mieszanie, przepływ przez układ rotor-stator, homogenizację ciśnieniową jedno lub dwustopniową czy stosując ultradźwięki. Do zalet takiego sposobu stabilizowania emulsji można zaliczyć mniejszą, niezbędną do stabilizacji ilość emulgatora. Pozytywne jest również to, że emulsje Pickeringa nie są podatne na działanie środowiska zewnętrznego, tj. zmianę pH czy siły jonowej [4]. Z uwagi na to, że materiały ziarniste stosowane jako stabilizatory do tego typu emulsji są w większości substancjami naturalnymi, mają dobrą biokompatybilność i mogą być wykorzystane jako nośniki do dostarczania związków bioaktywnych. Yang i in. [34] w swoim opracowaniu wymieniają następujące naturalne cząstki, które mogą być zastosowane jako stabilizatory w emulsjach Pickeringa: chitozan, cyklodekstryny, skrobia, białka sojowe, zeina czy odpowiednio przygotowane białka serwatkowe. Stabilizatorem może być również metyloceluloza. Schvartz i Shoseyov [28] dowodzą, że do stabilizacji emulsji Pickeringa można zastosować defibrylowaną celulozę mikrokrystaliczną. Może ona spełniać rolę skutecznego stabilizatora, odpornego na trudne warunki produkcyjne, stosowanego z różnymi rodzajami olejów spożywczych. Autorzy tej publikacji otrzymali stabilne emulsje oleju rzepakowego i kokosowego (50% fazy olejowej), używając 1,5% defirbylowanej celulozy mikrokrystalicznej, która była odporna na sterylizację w autoklawie w temperaturze 121°C przy ciśnieniu 210 kPa.

Metody wytwarzania emulsji

Znanych jest wiele metod tworzenia emulsji. Najpopularniejszą jest energiczne mieszanie, które najpierw powoduje deformację powierzchni i powstanie dużych kropli fazy dyspergowanej. W miarę upływu czasu procesu,



z utworzonych dużych kropli tworzą się mniejsze. Do wytwarzania emulsji można zastosować różnego rodzaju mieszalniki wyposażone w specjalnie dobrane mieszadła, młyny koloidalne, homogenizatory ciśnieniowe lub ultradźwiękowe [21].

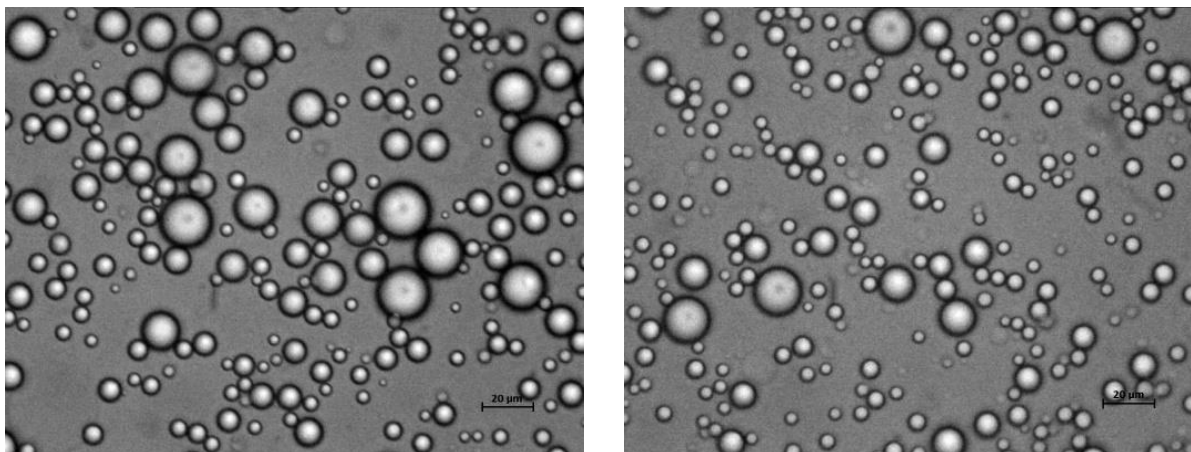
Młyny koloidalne są urządzeniami emulgującymi stosowanymi najczęściej do produktów o wysokiej zawartości tłuszczu. Są preferowaną technologią w przypadku emulsji o wysokiej lepkości. Podczas pracy młyna koloidalnego przez szczelinę pomiędzy nieruchomym statorem i wirującym rotorem przetłaczana jest emulsja wstępna. W wąskim kanale występują siły ścinające, które przyczyniają się do wytwarzania drobnych kropli fazy rozproszonej. O wielkości tych sił decyduje wielkość szczeliny, kształt i obroty wirnika, który może mieć różną konstrukcję. Wadą takiego rozwiązania może być mała wydajność urządzeń, ze względu na rozmiar szczeliny [20,31]. W przemyśle mleczarskim młyny koloidalne można stosować do homogenizacji i emulgacji mieszanek lodowych, co zapewnia uzyskanie gładkich i kremowych produktów. Można je również użyć w produkcji serków do smarowania [14].

Inną techniką wykorzystywaną do wytwarzania emulsji jest homogenizacja ciśnieniowa. W powszechnie używanych urządzeniach do tego procesu znajdują się jedna lub dwie głowice homogenizujące. Podczas ich pracy wstępne emulsje przetłaczane są przez szczelinę pod znacznym ciśnieniem. W szczelinie tej, podczas przepływu wstępnego układu dyspersyjnego, nakłada się efekt kawitacji i turbulencji, co powoduje powstawanie drobnych kropli. Przetłaczanie emulsji przez dwie szczeliny ujednolica rozkład wielkości kropli fazy rozproszonej i je stabilizuje. O wielkości kropli decyduje również rozmiar szczeliny. Jej zmniejszanie i jednocześnie zwiększanie ciśnienia przyczynia się do tworzenia drobnych kropli fazy rozproszonej. Homogenizatory ciśnieniowe są bardzo rozpowszechnione w przemyśle mleczarskim. Homogenizacja wysokociśnieniowa mleka zmniejsza średnią średnicę kuleczek tłuszczowych z 3-4 μm do 0,75-0,85 μm . Taka dyspersja skutkuje lepszą stabilnością emulsji, a produkty uzyskiwane z takiego mleka mają lepszą wydajność i właściwości tekstury. Dotyczy to np. jogurtu czy sera typu queso fresco [9, 12, 17, 27]. Homogenizacji mleka nie zaleca się stosować przy produkcji serów twardych i półtwardych, gdyż operacja ta zmienia teksturę i właściwości reologiczne sera. Stają się one bardziej miękkie, o zmniejszonej rozciągliwości i topliwości [33].

Emulsje można również wytwarzać stosując homogenizatory ultradźwiękowe. Podczas ich pracy wstępna emulsja poddawana jest działaniu fal elektromagnetycznych o wysokiej częstotliwości, które przemieszczając się przez ciecz powodują powstawanie wgłębień lub pęcherzyków, które pękając generują duże siły ścinające, decydujące o tworzeniu się kropli oleju. O rozmiarze cząstek fazy rozproszonej, w przypadku stosowania tego typu urządzeń, mogą decydować amplituda drgań, natężenie przepływu cieczy czy temperatura procesu. Metoda emulgowania ultradźwiękowego jest uważana za przyjazną środowisku i ekonomiczną. McClements [21] zwraca uwagę, że tej techniki nie powinno się stosować do cieczy o dużej lepkości i dużej objętości. W badaniach wykazano, że metoda emulgacji ultradźwiękowej jest przydatna w otrzymywaniu emulsji mleka i olejów roślinnych czy emulsji zawierających białka mleka i oleje roślinne [20].

W laboratoriach badawczych ciągle poszukuje się skutecznych technik emulgowania. Niewątpliwie ciekawym rozwiązaniem otrzymywania emulsji jest emulgowanie membranowe [3, 11, 32]. W metodzie tej wykorzystuje się porowate membrany. Przez ich pory faza olejowa wtłaczana jest do fazy ciągłej przepływającej wzdłuż powierzchni membrany. Podczas tego procesu występują mechanizmy tworzenia się kropli fazy rozproszonej inne niż w pozostałych metodach. Na końcach kanalików porów tworzą się kropelki fazy rozproszonej, zrywane przez siły ścinające w cieczy przepływającej wzdłuż membrany [3]. Istnieje ścisła zależność pomiędzy rozmiarem porów membrany a wielkością kropli fazy rozproszonej [2, 23]. Zastosowanie membrany o większej średnicy porów spowoduje powstawanie większych kropli fazy rozproszonej, zarówno w emulsji olej w wodzie jak i woda w oleju [22]. O wielkości kropli fazy rozproszonej otrzymywanej techniką membranową decyduje szybkość adsorpcji

emulgatora na powierzchni kropeł. Berot i in. [2] wykazali, że emulsje o/w wytwarzane metodami membranowymi z udziałem białka jako emulgatora, posiadają większy rozmiar cząstek niż te, do których wytworzenia zastosowano SDS (dodecylsulfian sodu) jako emulgator, który charakteryzuje się większą prędkością zmian napięcia powierzchniowego na granicy faz. Istotnym czynnikiem decydującym o rozkładzie wielkości cząstek fazy rozproszonej są również naprężenia ścinające występujące w fazie ciągłej bezpośrednio przy powierzchni membrany. Obraz emulsji otrzymanej przy użyciu ceramicznej membrany mikrofiltracyjnej przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Obraz mikroskopowy emulsji otrzymanych przy użyciu ceramicznej membrany asymetrycznej o wielkości porów 0,8 μm [5].

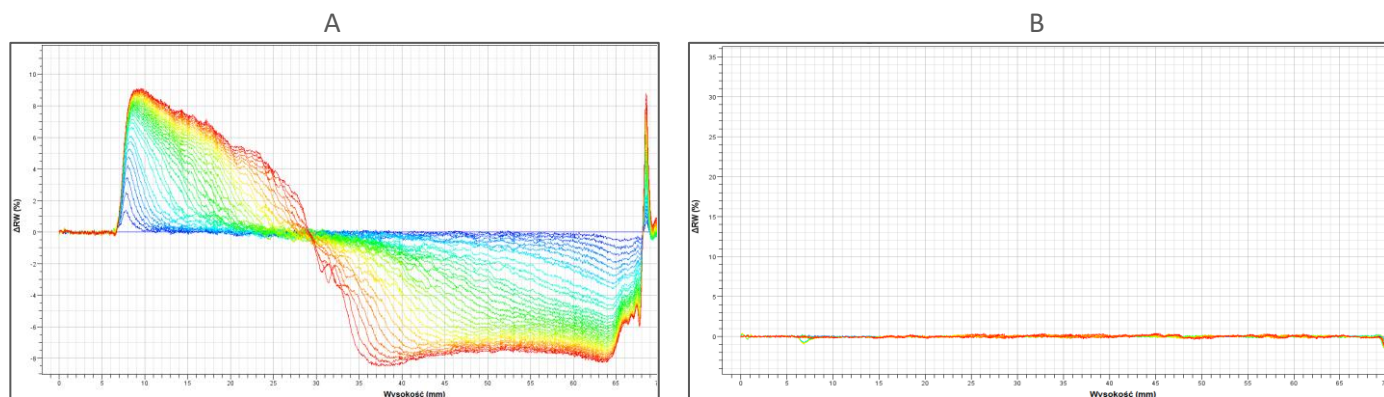
Mikrofluidyzacja to kolejna technika, która znalazła zastosowanie w wytwarzaniu emulsji i w poprawie stabilności układów dyspersyjnych, w tym takich jakim jest mleko. W mikrofluidyzatorach połączono oddziaływanie wysokiego ciśnienia i sił ścinających w kanalikach przepływowych o małych średnicach, co prowadzi do rozbijania kropli do pożądanej wielkości. Konstrukcja mikrofluidyzatorów może być różna. Na przykład istnieją urządzenia, które posiadają element zderzeniowy, na który z kapilar pod kątem kierowane są dwa strumienie cieczy, co zwiększa siłę rozrywania kropli i prowadzi do uzyskania mniejszych rozmiarów cząstek fazy rozproszonej. W porównaniu do homogenizacji ciśnieniowej, mikrofluidyzacja mleka pozwala na otrzymanie emulsji o mniejszej wielkości kropeł. Ma to pozytywny wpływ na właściwości sensoryczne mleka oraz jego właściwości reologiczne, lepkość i teksturę. Dotyczy to też produktów otrzymywanych z takiego mleka, np. jogurtów czy lodów. W badaniach wykazano również, że mleko poddane mikrofluidyzacji oraz produkty na jego bazie mają lepszą strawność [19, 24].

Techniki i metody badania właściwości układów dyspersyjnych

Ocena właściwości fizycznych układu dyspersyjnego polega na przeprowadzeniu analiz pozwalających określić wygląd, morfologię, reologię i podatność na destabilizację. Ocenę wyglądu oraz podatność na destabilizację można przeprowadzić prostą metodą, wykorzystując przezroczyste cylindry laboratoryjne. Po ich napełnieniu należy prowadzić obserwację ewentualnego rozwarstwienia się fazy ciągłej i rozproszonej. Pojawienie się w górnej części cylindra warstwy tłuszczowej pozwala przypuszczać, że w procesie homogenizacji popełniono błąd i układ dyspersyjny jest niestabilny.

Bardziej szczegółową techniką pozwalającą wykryć wady emulsyjnego układu dyspersyjnego jest analiza z wykorzystaniem urządzenia TurbiScan. W urządzeniu tym, wyposażonym w detektory transmisji światła przechodzącego przez próbkę oraz detektor światła wstecznie rozproszonego, mierzone są profile światła impulsowego bliskiej podczerwieni przechodzącego i wstecznie rozproszonego w próbce o określonej objętości i wysokości. Podczas pomiaru następuje skanowanie całej wysokości próbki, a zachodzące zmiany w intensywności

światła przechodzącego i rozproszonego przedstawiane są na wykresie. Procesy destabilizacyjne oceniane są na podstawie zmian sygnałów tych światła, które są zależne od wielkości kropeł fazy rozproszonej i ich udziału objętościowego. Przykład wyników takiego pomiaru przedstawia rys. 2. Krzywe na wykresie ilustrują zależność rozproszenia wstecznego od wysokości próbki.

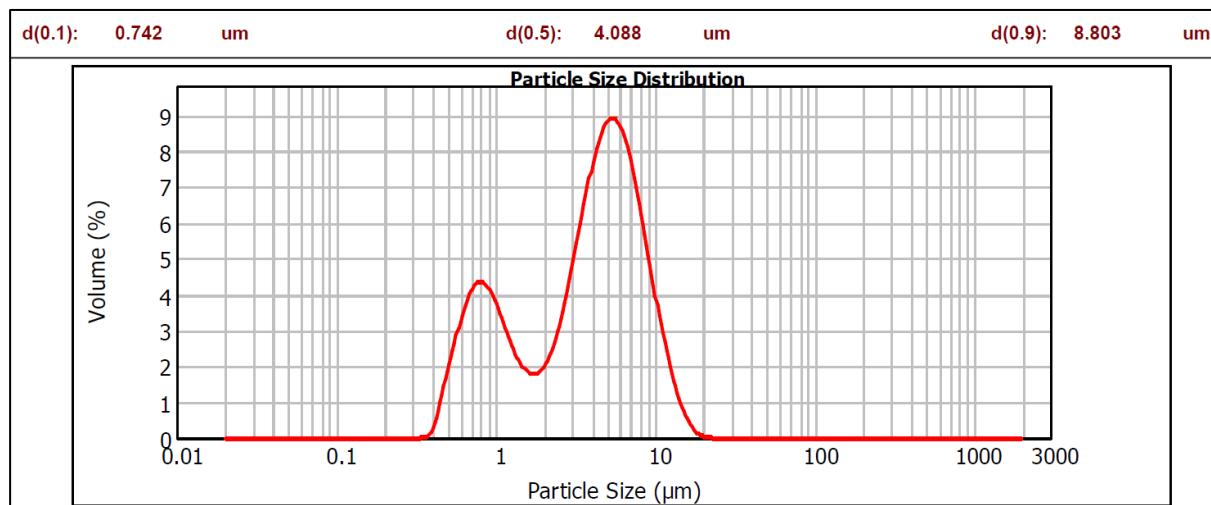


Rysunek 2. Przykładowe wykresy uzyskane w aparacie TurbiScan przedstawiające (A) niestabilną emulsję oraz (B) stabilną emulsję (badania własne).

Oprogramowanie obsługujące urządzenie pozwala wyliczyć współczynnik nachylenia krzywej transmitancji, jak również współczynnik nachylenia krzywej rozproszenia wstecznego oraz podać wartość TSI (Turbiscan Stability Index), tj. wskaźnik stabilności TURBISCAN. Odpowiada on skumulowanej sumie wszystkich zmian rozpraszania wstecznego lub transmisji całej próbki spowodowanych destabilizacją i im wyższa jego wartość, tym bardziej niestabilna jest próbka [16].

Istotną cechą układu dyspersyjnego jest wielkość jego cząstek. Do pomiaru średniego rozmiaru i rozkładu wielkości cząstek wykorzystuje się metodę dynamicznego rozpraszania światła (DLS – Dynamic Light Scattering) lasera, emitującego spolaryzowaną wiązkę światła o określonej długości. Monochromatyczna, spolaryzowana wiązka światła laserowego oświetla próbkę, w której jest ona rozpraszana przez zdyspergowane cząstki i rejestrowana przez detektor. Otrzymane wyniki są analizowane przez oprogramowanie, które określa rozmiar cząstek. W zależności od producenta urządzenia pomiarowego można uzyskać różne wielkości charakteryzujące rozmiar cząstek. Na przykład urządzenie Mastersizer 2000 firmy Malvern umożliwia analizowanie średnic cząstek wyrażonych w μm za pomocą takich wielkości jak: $d(0.1)$, $d(0.5)$, $d(0.9)$, *Span*, $d(4.3)$ i $d(3.2)$. Oprogramowanie oblicza również wielkość powierzchni właściwej analizowanych cząstek wyrażone w m^2/g .

Wymiar $d(0.1)$ określa wielkość cząstki, poniżej którego zawarte jest 10% objętości (masy) próbki. Daje informacje o udziale małych cząstek w badanym materiale. Wymiar $d(0.5)$ wskazuje na przeciętną wielkość cząstek. Wymiar $d(0.9)$ określa wymiar cząstki, poniżej którego zawarte jest 90% objętości (masy) próbki – informuje o wielkości dużych cząstek, które znajdują się w badanym układzie dyspersyjnym. *Span* jest współczynnikiem, którego wartość charakteryzuje szerokość rozkładu wielkości cząstek. Jego niska wartość, oznacza, że badany materiał pod względem wielkości cząstek jest jednorodny. Wielkość $d(3.2)$, nazywana średnicą Sautera, jest średnią ważoną wymiaru cząstek, obliczaną na podstawie ich powierzchni i objętości. Natomiast $d(4.3)$, nazywana średnicą de Brouckera, określa średni rozmiar cząstek mierzony na podstawie ich objętości. Każde oprogramowanie służące do sterowania pomiarem i obliczenia średnic daje możliwość wygenerowania obrazu ilustrującego rozkład wielkości cząstek. Przykładowy rozkład wielkości cząstek w objętości próbki ilustruje rys. 3.



Rysunek 3. Przykładowy obraz rozkładu wielkości cząstek w emulsji typu o/w uzyskany w aparacie Mastersizer 2000 firmy Malvern (badania własne).

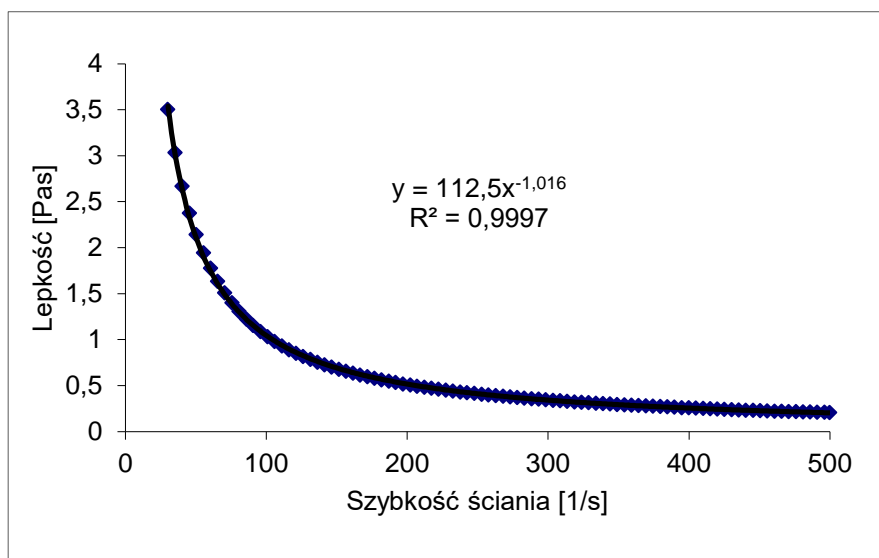
Liczba pików na tych wykresach świadczy o liczbie rodzajów obiektów występujących w próbce i w przybliżeniu określa jakie wielkości cząstek występują w badanym materiale. Rysunek 3 przedstawia dimodalny rozkład wielkości cząstek układu dyspersyjnego, w którym występują zarówno cząstki o średnicy poniżej 0,724 μm , jak również duże powyżej 8,803 μm .

Do określenia wielkości cząstek rozproszonych w fazie ciągłej można również wykorzystać tradycyjne metody, do których zaliczamy analizę obrazu mikroskopowego. Należy jednak pamiętać, że kuleczki tłuszczowe poddane homogenizacji mają przeciętny rozmiar poniżej 1 μm . Uniemożliwia to poprawne wyznaczenie widocznych obiektów w obrazie otrzymanym przy użyciu mikroskopu biologicznego. Jego możliwości techniczne, tj. maksymalne powiększenie 1000x, nie pozwala zmierzyć średnicy. W takim przypadku możliwe jest wykorzystanie bardziej skomplikowanych urządzeń jakimi są mikroskopy konfokalne czy skaningowe. Mikroskop konfokalny pozwala z większym kontrastem i lepszą rozdzielczością, a tym samym precyzją, ocenić zawarte w fazie ciągłej cząstki fazy rozproszonej. Wynika to z wykorzystania oświetlenia punktowego, które odbite od powierzchni obiektu, znajdującego się w odległości ogniskowej danego obiektywu, trafia do detektora. Część odbitego światła zostaje zredukowana przez specjalnej konstrukcji przysłony, umożliwiając zwiększenie jakości otrzymanego obrazu.

Ważnych informacji o układzie dyspersyjnym dostarcza również ocena jego właściwości reologicznych. Należą one do cech fizycznych produktów, związanych z ich reakcją na przyłożenie siły. Wieloskładnikowa budowa spożywczych układów dyspersyjnych powoduje, że z punktu widzenia reologii, czyli nauki o odpowiedzi układów rzeczywistych na przyłożone do nich naprężenia zewnętrzne, produkty spożywcze mogą wykazywać się właściwościami typowymi dla cieczy lub dla ciał stałych. Dlatego też, wykonanie pomiarów tych cech nie jest proste i wymaga posiadania specjalistycznych urządzeń nazywanych reometrami. Nowoczesne reometry mierzące właściwości reologiczne mogą pracować w trybie rotacyjnym lub oscylacyjnym. Tryb pracy rotacyjny pozwala wyznaczyć krzywe płynięcia. W trybie oscylacyjnym możliwe jest określenie, których cech materiału jest więcej, tzn. czy w próbce przeważają właściwości lepkie czy sprężyste. Zebranie danych podczas pracy reometru rotacyjnego pozwala wykreślić zależność pomiędzy naprężeniem stycznym a szybkością ścinania i wyznaczyć model reologiczny oraz wyliczyć wartość lepkości przy różnych szybkościach ścinania. Obrazem krzywej lepkości dla cieczy newtonowskiej może być linia



prosta lub krzywa, w przypadku, gdy produkt wykazuje cechy płynu rozrzedzanego bądź zagęszczanego ścinaniem [8]. Wygląd krzywej płynięcia śmietany, która wykazuje cechy płynu rozrzedzanego ścinaniem przedstawia rys 4.



Rysunek 4. Krzywa lepkości śmietany wyznaczona podczas pomiarów w reometrze rotacyjnym (badania własne)

Na tym samym rysunku przedstawiono wartości współczynników i postać przekształconego modelu Ostwalda de Waele, pozwalającą wyliczyć wartość lepkości pozornej przy różnych szybkościach ścinania. Wzór tego najprostszego modelu reologicznego lepkości przedstawia równanie:

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

gdzie:

K - współczynnik konsystencji [Pa·sⁿ],

$\dot{\gamma}$ - szybkość ścinania [s⁻¹],

n – wskaźnik płynięcia [-].

Z uwagi na różnorodny skład wynikający z parametrów produkcji i różnych dodatków technologicznych stosowanych przez zakłady mleczarskie, układy dyspersyjne produktów mleczarskich cechują się dużą zmiennością mierzonych parametrów. Opisanie cech morfologicznych, scharakteryzowanie właściwości reologicznych czy określenie ich stabilności jest niezbędne do projektowania nowych produktów i tworzenia nowych technologii.

Literatura

1. Bai L. and McClements D.J. (2016). Extending Emulsion Functionality: Post-Homogenization Modification of Droplet Properties. *Processes*, 4, 2-18.
2. Berot S., Giraudet S., Riaublanc A., Anton M., Popineau Y. (2003). Key Factors in Membrane Emulsification. *Chemical Engineering Research and Design*, 81, 9, 1077-1082.



3. Charcosset C. (2009). Preparation of emulsions and particles by membrane emulsification for the food processing industry. *Journal of Food Engineering*, 92, 241–249.
4. Chen L., Ao Z., Ge X., Shen W. (2020). Food-Grade Pickering Emulsions: Preparation, Stabilization and Applications. *Molecules*, 25, 3202-3226.
5. Dajnowiec F., Banaszczuk P., Kubiak A., Biegaj M., Zander L. (2016). The study on oil droplet size distribution in o/w emulsions prepared by the use of the asymmetric membrane. *Polish Journal of Natural Sciences*, 3, 4, 665–680.
6. Degrand L., Michon C., Bosc V. (2016). New insights into the study of the destabilization of oil-in-water emulsions with dextran sulfate provided by the use of light scattering methods. *Food Hydrocolloids*, 52, 848–856.
7. Dickinson E. (2009). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1473–1482.
8. Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J. (2014). *Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe reologii*, Monografia Politechnika Łódzka
9. Escobar D., Clark S., Ganesan V., Repiso L., Waller J., Harte F. (2011). High-pressure homogenization of raw and pasteurized milk modifies the yield, composition, and texture of queso fresco cheese. *Journal of Dairy Science*, 94(3), 1201–1210.
10. Foudazi R., Qavi S., Masalova I., Malkin A. Y. (2015). Physical chemistry of highly concentrated emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 220, 78–91.
11. Gijsbertsen-Abrahamse A., van der Padt A.J., Boom R.M. (2004). Status of cross-flow membrane emulsification and outlook for industrial application. *Journal of Membrane Science*, 230, 149–159
12. Gul L., Akgun A. (2023). Effect of High-Pressure Homogenization and Fat Content on Yogurt Fermentation Process. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*, 7, 4, 455–468.
13. Hoang T.K.N., Deriemaeker L., La V.B., Finsy R. (2004). Monitoring the simultaneous ostwald ripening and solubilization of emulsions. *Langmuir*, 20(21), 8966-8969.
14. <https://colloid-mills.com/> (dostęp:21.12.2024 r.)
15. <https://sjp.pwn.pl/szukaj/uk%C5%82ad%20dyspersyjny.html> (dostęp:21.12.2024 r.)
16. https://www.lambdasystem.pl/technologie/wskaznik_stabilnosci_turbiscan_tsi-255.html (dostęp:21.12.2024 r.)
17. Ichimura T., Osada T., Yonekura K., Horiuchi H. (2022). A new method for producing superior set yogurt, focusing on heat treatment and homogenization. *Journal of Dairy Science*, 105, 4, 2978-2987.
18. Innocente N., Biasutti M., Venir E., Spaziani M., Marchesini G. (2009). Effect of high-pressure homogenization on droplet size distribution and rheological properties of ice cream mixes. *Journal of Dairy Science*, 92, 5, 1864 – 1875.
19. Kavinila S., Nimbkar S., Moses J.A., Anandharamakrishnan C. (2023). Emerging applications of microfluidization in the food industry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100537.
20. Maindarkar S., Dubbelboer A., Meuldijk J., Hoogland H., Henson M. (2014). Prediction of emulsion drop size distributions in colloid mills. *Chemical Engineering Science*, 118, 114–125.
21. McClements D.J. (2016). *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*. Boca Raton, FL: CRC Press
22. Nakashima T., Shimizu M., Kukizaki M. (2000). Particle control of emulsion by membrane emulsification and its applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 45, 47-56.
23. Nazir A., Schroën K., Boom R. (2010). Premix emulsification: A review. *Journal of Membrane Science*, 362, 1–11.
24. Ozturk O. K., Turasan H. (2021). Applications of microfluidization in emulsion-based systems, nanoparticle formation, and beverages. *Trends in Food Science & Technology*, 116 (10), 609-625.
25. Perazzo A., Preziosi V., Guido S. (2015). Phase inversion emulsification: Current understanding and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 222, 581–599.
26. Pongsawatmanit R., Harnsilawat T., McClements D.J. (2006). Influence of alginate, pH and ultrasound treatment on palm oil-in-water emulsions stabilized by β -lactoglobulin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 287(1-3), 59–67.
27. Samoichuk K., Verkholantseva V., Palianychka N., Kovalyov A., Dmytrevskiy D., Horielkov D., Chervonyi V., Voitsekhivskiy V. (2024.) Analysis of the hypotheses of milk fat phase dispersion and structural features of



- homogenizers, Chapter 3 in: Priss O., Glowacki S., Kiurcheva L., Holiachuk S., Samoichuk K., Verkholtantseva V. et al.; Priss, O. (Ed.) (2024). Food technology progressive solutions. Tallinn: Scientific Route OÜ, 268.
28. Schwartz T., Shoseyov O. (2022). Defibrillated microcrystalline cellulose as an efficient emulsion stabilizer – Study of food-grade Pickering emulsions resistant to extreme conditions. LWT – Food Science and Technology, 155, 113006.
 29. Serdaroğlu M., Burcu Öztürk B., Kara A. (2015) An Overview of Food Emulsions: Description, Classification and Recent Potential Applications. Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology, 3, 6, 430-438.
 30. Taha A., Ahmed E., Ismaiel A., Ashokkumar M., Xu X., Pan S., Hu H. (2020). Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions. Trends in Food Science & Technology, 105, 363–377.
 31. Urban K., Wagner G., Schaffner D., Röglin D., Ulrich J. (2006). Rotor-stator and disc systems for emulsification processes. Chemical Engineering and Technology, 29, 1, 24-31.
 32. Van der Graaf S., Schroen C., Boom R. (2005). Preparation of double emulsions by membrane emulsification – a review. Journal of Membrane Science, 251(1-2), 7–15.
 33. Vigneux M.P.B., Villeneuve W., Pouliot Y., Britten M. (2022). Increasing the proportion of homogenised fat in cheese milk: Effect on cheese-making properties. International Dairy Journal, 126, 105254.
 34. Yang Y., Fang Z., Chen X., Zhang W., Xie Y, Chen Y, Liu Z., Yuan W. (2017). An Overview of Pickering Emulsions: Solid-Particle Materials, Classification, Morphology, and Applications. Frontiers in Pharmacology, 8, 287.