

Marcelina NOWAK, Karolina KIJOWSKA, Maciej KABZIŃSKI, Paweł PTASZEK

e-mail: nowakmarcelina4@gmail.com

Katedra Inżynierii i Aparatury Przemysłu Spożywczego, Wydział Technologii Żywności, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

## Wpływ stężenia hydrokoloidu na moc mieszania oraz parametry reologiczne wodnych roztworów gumy guar

### Wprowadzenie

Guma guar (GG) jest galaktomannanem pozyskiwanym z endospermy *Cyamopsis tetragonolobus* L.. Związek ten, z chemicznego punktu widzenia jest długo-łańcuchowym polisacharydem o wysokiej polidispersji, składającym się z liniowego łańcucha  $\beta$ -(1-4)-D-mannopiranozowego oraz pojedynczych  $\alpha$ -(1-6)-D-galaktopira-nozowych łańcuchów bocznych [Casas i in., 2000; Mugdil i in., 2012].

Guma guar znalazła szerokie zastosowanie w przetwórstwie spożywczym - jako środek zagęszczający, emulgujący, wiążący wodę oraz stabilizujący strukturę [Sahraiyian i in., 2013], używany w produkcji: soków i przetworów owocowych, produktów dla dzieci oraz wszelkich artykułów instantyzowanych. [Imeson A., 2010]. Ponadto jest wykorzystywana do sosów, lodów i produktów mleczarskich [Mannarswamy i in., 2010], a także odgrywa ważną rolę jako dodatek do pieczywa bezglutenowego [Mohammadi i in., 2015]. W praktyce przemysłowej układy zawierające gumę guar niejednokrotnie poddawane są operacji mieszania. Operacja ta między innymi może mieć na celu: wytworzenie jednolitej zawiesiny bądź emulsji, wyrównanie temperatury i stężenia w mieszanym ośrodku oraz przyśpieszenie zjawisk fizycznych i reakcji chemicznych [Stręk, 1971]. Bardzo ważnym celem mieszania jest także podtrzymanie układu w ruchu. Wymaga to stosowania specyficznych rodzajów mieszadeł – wolnoobrotowych i wąskoprześwitowych [Kunczewicz, 2012]. Do tej grupy zaliczają się między innymi mieszadła kotwicowe, ramowe oraz wstęgowe [Stręk, 1971].

Pomimo znaczącej liczby publikacji, dotyczących właściwości opisywanego hydrokoloidu, trudno jest znaleźć w literaturze przedmiotu dane opisujące w sposób kompleksowy długotrwałe, wolnoobrotowe mieszanie układów zawierających gumę guar.

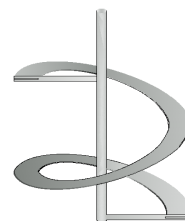
Celem pracy jest zatem określenie zależności parametrów reologicznych i mocy mieszania od stężenia gumy guar w roztworze podczas mieszania prowadzonego w warunkach skokowo zmiennej liczby obrotów mieszadła.

### Badania doświadczalne

**Materiały.** W badaniach wykorzystano wodne roztwory gumy guar firmy *Regis Food Technology*, Polska o stężeniach: 0,4; 0,6; 0,8 oraz 1% o gęstościach odpowiednio: 998,1; 999,3; 1000,7; 1001,9 kg·m<sup>-3</sup>).

**Aparatura.** Próbkę przygotowano przy użyciu mieszarki planetarnej z mieszadłem trzepakowym. Po trwającym 24 h kondycjonowaniu (w celu usunięcia pęcherzyków powietrza) układy poddano mieszanemu w mieszalniku w skali ćwierć technicznej, wyposażonym w zbiornik o pojemności 12 dm<sup>3</sup>, o średnicy  $D = 0,24$  m i wysokości  $H = 0,32$  m. Użyto mieszadła wstęgowego (Rys.1) o średnicy  $d = 0,212$  m, wysokości  $h = 0,212$  m, szerokości wstęgi  $w = 0,032$  m, skoku wstęgi  $p = 0,14$  m, stała Metznera  $k_s = 32,7$ ). Wstępna waldacja układu mieszadło-mieszalnik przy zastosowaniu różnych płynów modelowych i rzeczywistych płynów spożywczych wykazała dużą powtarzalność wyników (różnice między powtórzeniami pomiarów wynosiły mniej niż 3%).

**Metodyka.** Operację mieszania prowadzono w czasie 15 minut w warunkach skokowo zmiennej częstości obrotów mieszadła (skok obrotów następował co minutę i wynosił 0,05 s<sup>-1</sup>) w zakresie częstości obrotów wynoszącej 0,2÷1,07 s<sup>-1</sup>. Mierzono zmiany momentu obrotowego w czasie rzeczywistym [Kabziński i Grzesik, 2014].



Rys. 1. Mieszadło wstęgowe

Na podstawie danych rejestrowanych z wykorzystaniem czujnika momentu obrotowego wyznaczono wartości chwilowego zapotrzebowania mocy mieszania:

$$P_{chw} = 2\pi n M_o \quad (1)$$

średniego naprężenia ścinającego [Cullen P.J., 2009]:

$$\tau = \frac{2M_o}{\pi d^2 h} \quad (2)$$

średniej szybkości ścinania [Wilkinson, 1963]:

$$\dot{\gamma} = k_s n \quad (3)$$

oraz lepkość pozorną z uwzględnieniem koncepcji uogólnionego płynu newtonowskiego [Dziubiński i in., 2014]:

$$\eta_{poz} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

Równania opisujące parametry reologiczne dotyczą wartości średnich dla całego mieszalnika.

Pełny opis operacji mieszania wymaga podania również charakterystyki mocy użytego mieszadła, stanowiącej zależność między zastępczą liczbą Newtona dla mieszania

$$Ne_m = \frac{P_{chw}}{n^3 d^5 \rho} \quad (5)$$

a zastępczą liczbą Reynoldsa dla mieszania w układzie podwójnie logarytmicznym [Stręk, 1971]:

$$Re_m = \frac{nd^2 \rho}{\eta_{poz}} \quad (6)$$

Właściwości reologiczne mieszanych układów opisano równaniem Ostwalda - de Waele [Dziubiński i in., 2014]:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (7)$$

W celu uzupełnienia opisu sformułowano dodatkowo równania empiryczne wiążące średnie zapotrzebowanie mocy:

$$\bar{P}_{chw} = a C_{pGG}^b \quad (8)$$

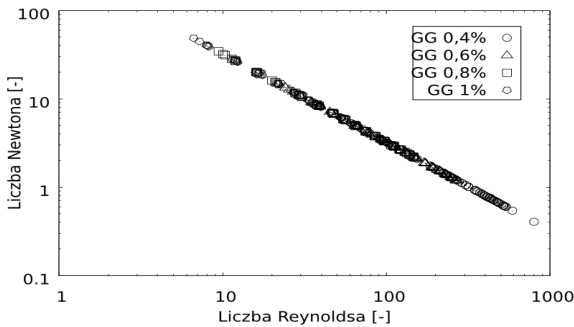
oraz średnią lepkość pozorną ze stężeniem gumy guar w roztworze:

$$\bar{\eta}_{poz} = c C_{pGG}^d \quad (9)$$

Średnia moc chwilowa oraz średnia lepkość zostały uśrednione dla przedziałów czasowych reprezentujących poszczególne wartości obrotów mieszadła.

### Wyniki i dyskusja

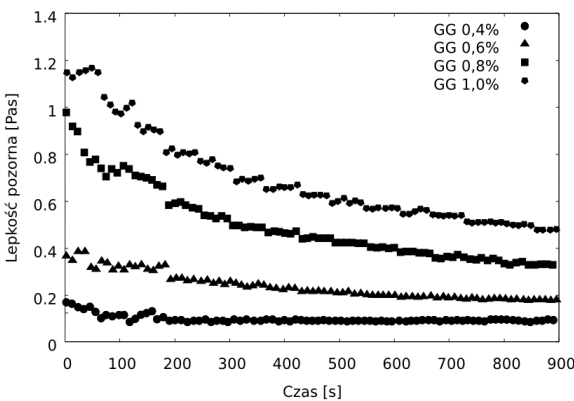
Zasady reometrii mieszadłowej znajdują zastosowanie jedynie w obszarze laminarnym przepływu, stąd w pierwszej kolejności przeanalizowano zależność pomiędzy zastępczą liczbą Newtona  $Ne_m$  a zastępczą liczbą Reynoldsa  $Re_m$ . Wyniki przedstawiono na rys. 2.



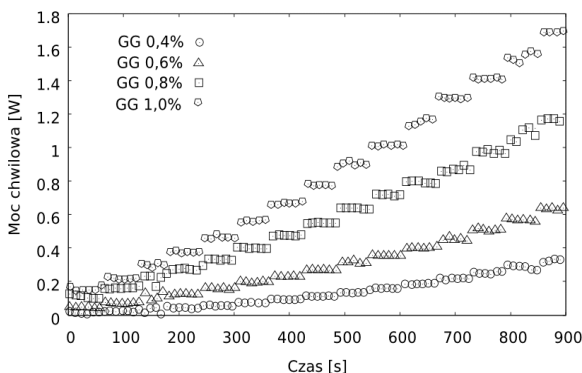
Rys. 2. Charakterystyki mocy mieszadła wstęgowego dla układów zawierających gumę guar.

Przedstawione charakterystyki mocy mają przebieg liniowy, zatem mieszanie we wszystkich rozpatrywanych przypadkach odbywało się w warunkach przepływu laminarnego. Na uwagę zasługuje wynikający z eksperymentu fakt rozszerzenia obszaru laminarnego do wartości liczby Reynoldsa rzędu 900 w przypadku układu o dodatku gumy guar wynoszącym 0,4% (przy czym arbitralnie przyjmowana granica przepływu laminarnego wynosi 10).

Na rys. 3 i 4 przedstawiono zależności wartości lepkości pozornej i mocy chwilowej od czasu.



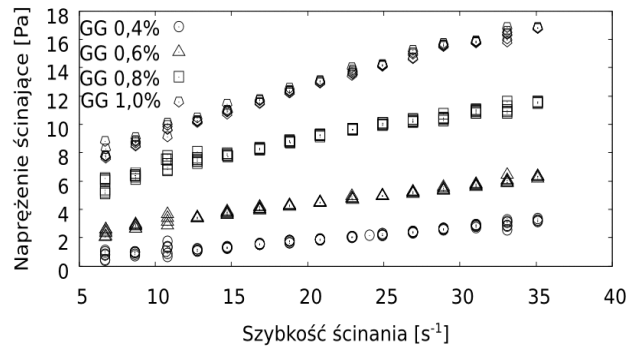
Rys. 3. Zależność lepkości pozornej od czasu dla wodnych roztworów gumy guar.



Rys. 4. Zależność mocy chwilowej od czasu dla wodnych roztworów gumy guar.

Widoczny jest spadek wartości lepkości pozornej w funkcji szybkości ścinania dla wyższych stężeń hydrokoloidu w układzie, co świadczy o właściwościach reologicznych badanych układów, tożsamy z płynami nienewtonowskimi rozrzedzanymi ścinaniem. Spadek ten jest szczególnie wyraźny dla układów zawierających dodatek 0,8 i 1,0% gumy guar, natomiast dla najniższego stężenia tej gumy w układzie brak zależności lepkości pozornej od szybkości ścinania.

Na podstawie powyższych danych sporządzono krzywe płynięcia badanych ośrodków (Rys. 5) oraz wyznaczono wartości współczynników równania *Ostwalda-de Waele*, które podano w tab. 1.



Rys. 5. Krzywe płynięcia układów zawierających różne stężenia gumy guar

Z danych przedstawionych w tab. 1 wynika, że wraz ze wzrostem stężenia rozpatrywanego hydrokoloidu w układzie wzrasta wartość współczynnika konsystencji (lepkości pozornej), a także maleje wartość wskaźnika płynięcia. Wyjątek stanowi układ zawierający 0,8% dodatek gumy guar, charakteryzujący się najmniejszą wartością wskaźnika płynięcia. Wartość tę, jak i pozostałe, wyznaczono przy zastosowaniu algorytmu *Marquarda-Levenberga*, a wyniki dopasowania (obciążone znikomym błędem) świadczą o wystąpieniu anomalii dla tego stężenia. Bliska jedności wartość wskaźnika płynięcia układu zawierającego gumę guar o stężeniu 0,4% sugeruje ponadto właściwości reologiczne bliskie płynom newtonowskim.

Tab. 1. Wartości parametrów równania *Ostwalda-de Waele*

Układ badany	Współczynnik konsystencji, K [Pas <sup>n</sup> ]	Wskaźnik płynięcia, n [-]
GG 0,4%	0,112	0,939
GG 0,6%	0,802	0,574
GG 0,8%	2,520	0,427
GG 1,0%	3,135	0,472

Rezultaty przeprowadzonych badań w aspekcie energetycznym i reologicznym uogólniono dla różnych stężeń gumy guar w układach poddanych mieszaniu. Do opisu zależności pomiędzy średnią mocą chwilową a stężeniem hydrokoloidu i średnią lepkością pozorną a stężeniem hydrokoloidu użyto przedstawionych wcześniej empirycznych równań potęgowych (8) i (9). Po wyznaczeniu współczynników metodą najmniejszych kwadratów otrzymano:

$$\bar{P}_{chw} = 0,837C_{pGG}^{1,942} \quad (10)$$

$$\bar{\eta}_{poz} = 0,711C_{pGG}^{2,019} \quad (11)$$

Uzyskana wartość wykładnika około 2 wskazuje na istnienie silnie nieliniowej zależności średniej mocy chwilowej oraz średniej lepkości pozornej od stężenia gumy guar. Wartości współczynników i wykładników w równ. (10) i (11) wyznaczono z błędem ok. 3,5%.

## Wnioski

Roztwory o różnym stężeniu gumy guar wykazują podczas mieszania w warunkach skokowo zmiennej częstości obrotowej mieszadła różnorodne zachowania reologiczne, o silnie nieliniowym charakterze. Zachowania te mają znaczący wpływ na zapotrzebowanie mocy mieszania.

Podane równania empiryczne mogą być pomocne do oceny mieszania układów zawierających gumę guar przy doborze właściwych z punktu widzenia energetycznego urządzeń, aby uzyskać jak najlepsze parametry reologiczne wytwarzanego produktu.

### WYKAZ OZNACZEŃ

a, b, c, d – stałe w równaniach empirycznych [-]

$C_{pGG}$  – stężenie gumy guar [%]

d – średnica mieszadła [m]

h – wysokość mieszadła [m]

K – współczynnik konsystencji [ $\text{Pa}^n$ ]

$k_s$  – stała Metznera [-]

$M_o$  – moment obrotowy [Nm]

n – częstość obrotów mieszadła [ $\text{s}^{-1}$ ]

$n'$  – wskaźnik płynięcia [-]

$Ne_m$  – zastępcza liczba Newtona [-]

$P_{chw}$  – chwilowe zapotrzebowanie mocy [W]

$Re_m$  – zastępcza liczba Reynoldsa [-]

$\dot{\gamma}$  - szybkość ścinania [ $\text{s}^{-1}$ ]

$\eta_{poz}$  – lepkość pozorna [Pa·s]

$\rho$  – gęstość [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$\tau$  - naprężenie ścinające [Pa]

### LITERATURA

Casas J.A., Mohedano A.F., Garcia-Ochoa F. (2000). Viscosity of guar gum and xanthan/guar gum mixture solutions. *J. Sci. Food . Agr.*, 80, 1722-1727. DOI: 10.1002/1097-0010(20000915)80:12%3C1722::AID-JSFA708%3E3.0.CO;2-X

Cullen P.J. (2009). *Food Mixing: Principles and Applications*. Wiley-Blackwell Ltd., 1-72

Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J. (2014). *Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe reologii*. Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź, 30-61 (ISBN: 9788372836410)

Imeson A. (2010). *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*. Wiley-Blackwell, 275-292

Kabziński M., Grzesik M. (2014). Stanowisko badawcze do mieszania nieniułtonowskich płynów spożywczych. *Post. Tech. Przetw. Spoż.*, 2, 34-36.

Kono H., Otaka F., Ozaki M. (2014). Preparation and characterization of guar gum hydrogels as carrier materials for controlled protein drug delivery. *Carbohydrate Polymers*, 111, 830-840. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.05.050

Kunecwicz Cz. (2012). *Mieszanie cieczy wysokolepkich. Podstawy procesowe*. Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź, 19-216 (ISBN 978-83-7283-463-8)

Mannarswamy A., Munson-McGee S.H., Andresen P.K. (2010): D-optimal designs for the Cross viscosity model applied to guar gum mixtures. *J. Food Eng.*, 97, 403-409. DOI: 10.1080/01496395.2014.958499

Metzner A.B., Otto R.E. (1957). Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE J.*, 3, 3-10. DOI: 10.1002/aic.690030103

Mohammadi M., Azizi M.-H., Neyestani T.R., Hosseini H., Mortazavian A.M. (2015). Development of gluten-free bread using guar gum and transglutaminase. *J. Ind. Eng. Chem.*, 21, 1398-1402. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.06.013

Mudgil D., Barak Sh., Khatkar B.S. (2012). Effect of enzymatic depolymerization on physicochemical and rheological properties of guar gum. *Carbohydrate Polymers*, 90, 224-228. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.04.070

Sahraiyani B., Naghipour F., Karimi M., Davoodi M.G. (2013): Evaluation of *Lepidium sativum* seed and guar gum to improve dough rheology and quality parameters in composite rice-wheat bread. *Food Hydrocolloids*, 30, 698-703. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2012.08.013

Stręk F. (1971): *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa, 17-119 (ISBN: 8320402891)

Wilkinson W.L. (1963). *Ciecze nieniułtonowskie*. WNT, Warszawa, 18-37

**Czasopismo naukowo-techniczne**  
**INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA**  
 Chemical Engineering and Equipment  
 ukazuje się od 1961 roku

Czasopismo jest poświęcone problemom obliczeń procesowych i zagadnieniom projektowo-konstrukcyjnym aparatury i urządzeń stosowanych w przemysłach przetwórczych, w tym szczególnie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, rolno-spożywczym, jak również w energetyce, gospodarce komunalnej i w ochronie środowiska.

Przeznaczone jest zarówno dla pracowników badawczych, projektantów, konstruktorów, jak i dla menadżerów oraz inżynierów ruchomych.

W czasopiśmie publikowane są artykuły naukowe o szerokim spektrum tematycznym, obejmującym problematykę procesów i operacji jednostkowych inżynierii chemicznej, bio- i nanotechnologie, inżynierię biomedyczną, recykling, bezpieczeństwo procesowe oraz obliczenia i projektowanie aparatów w aspekcie poprawy wydajności, lepszego wykorzystania surowców, oszczędności energii i ochrony środowiska.

Publikowane prace są recenzowane przez specjalistów. Autorzy artykułów opublikowanych w „Inżynierii i Aparaturze Chemicznej” uzyskują 7 punktów (od 2015 r.) do oceny parametrycznej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.