

Dr inż. Maciej KABZIŃSKI

Dr inż. Paweł PTASZEK

Dr hab. inż. Anna PTASZEK

Prof. dr hab. inż. Mirosław GRZESIK

Katedra Inżynierii i Aparatury Przemysłu Spożywczego

Wydział Technologii Żywności

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

WPŁYW RODZAJU UŻYTEGO MIESZADŁA NA ZAPOTRZEBOWANIE MOCY MIESZANIA ORAZ ZMIANY LEPKOŚCI POZORNEJ ROZTWORÓW MĄCZKI CHLEBA ŚWIĘTOJAŃSKIEGO®

The impact of stirrer type on mixing power consumption and apparent viscosity changes of locust bean gum solutions®

*Badania sfinansowano ze środków pochodzących z dotacji Badania Młodych
nr BM-4767/KIAPS/2014*

Słowa kluczowe: mieszanie długotrwałe, mączka chleba świętojańskiego, lepkość pozorna.

Artykuł przedstawia wpływ rodzaju zastosowanego mieszadła, czasu mieszania oraz prędkości obrotowej mieszadła na zapotrzebowanie mocy oraz zmiany lepkości pozornej płynu podczas mieszania. W charakterze płynu modelowego użyto 1% roztworu mączki chleba świętojańskiego z dodatkiem 0,25% CMC. Badania przeprowadzono przy użyciu stanowiska badawczego, wyposażonego w mieszadła: kotwicowe, ramowe i wstęgowe. Rezultaty eksperymentów wykazały znaczące zmiany zapotrzebowania mocy oraz zmiany charakteru reologicznego płynu, zależne od rodzaju użytego mieszadła.

Key words: long-term mixing, locust bean gum, apparent viscosity.

The paper presents impact of type of using stirrer, mixing time and rotational speed for power consumption and changes of apparent viscosity values of fluid during mixing. As a model food fluid solution of 1% locust bean gum with 0,25% CMC was used. Experiments were performed in a research stand, equipped with anchor, frame and helical ribbon stirrer. The results shown explicit changes of power consumption and rheological character of fluid, dependent on stirrer type.

WSTĘP

Mieszanie jest operacją wykorzystywaną w wielu gałęziach przemysłu. Stosuje się je między innymi w celu wytworzenia jednorodnego roztworu bądź zawiesiny, intensyfikacji procesów wymiany ciepła i masy, a także podtrzymania układów w ruchu [12].

Mieszanie szczególnie miejsce zajmuje w przemyśle spożywczym. Jest ono wykorzystywane między innymi w produkcji różnorodnych ciast [13], sosów, musztard, a także koncentratów zup [8]. Ponadto stosuje się je w procesie produkcji kremów, margaryn i past. Co więcej, w przetwórstwie spożywczym mieszanie umożliwia kształtowanie właściwości reologicznych, sensorycznych i teksturalnych produktu. [4].

Wśród dużej liczby ośrodków poddawanych mieszaniu w technologii żywności, znaczące miejsce zajmują wodne roztwory hydrokoloidów. Układy takie charakteryzują się złożonym charakterem reologicznym, zależnym w wielu wypadkach nie tylko od szybkości ścinania, ale również od czasu prowadzenia operacji.

Jednymi z mediów o właściwościach reologicznie niestabilnych są żele wytworzone na bazie mączki chleba

świętojańskiego (gumy karobowej). Hydrokoloid ten jest galaktomannanem pozyskiwanym z nasion szarańczyna strąkowego (*Ceratonia siliqua* L.) [10]. Guma karobowa jest szeroko stosowana w przemyśle spożywczym w charakterze substancji zagęszczającej i stabilizującej strukturę [1] – wykorzystywanej w produkcji napojów, wyrobów piekarskich, makaronów oraz lodów [1]. Należy zaznaczyć, że w roztworach przygotowywanych na zimno hydrokoloid ten nie żeluje [3], w związku z czym, w celu wytworzenia roztworu na zimno, niezbędny jest dodatek innego hydrokoloidu – najpowszechniej stosuje się gumę ksantanową i gumę guar [2].

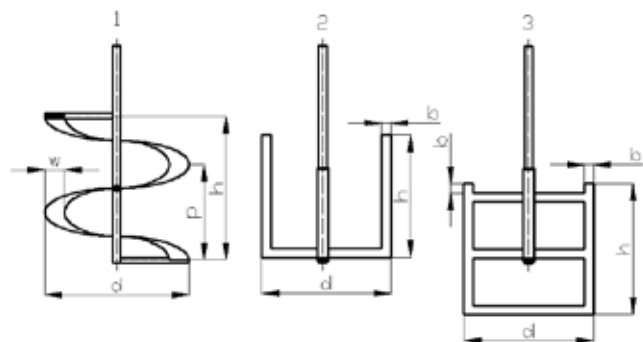
Celem artykułu jest przedstawienie wpływu rodzaju zastosowanego mieszadła na zapotrzebowanie mocy oraz zmiany lepkości pozornej roztworów mączki chleba świętojańskiego w warunkach mieszania długotrwałego przy zmiennej skokowo liczbie obrotów mieszadła.

MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

W badaniach użyto płynu modelowego w postaci wodnego roztworu mączki chleba świętojańskiego o stężeniu 1% (dostawca: Regis Food Technology, Kraków) z 0,25%

dotądkiem karboksymetylocelulozy o gęstości 1003,09 kg·m⁻³ (dostawca: Regis Food Technology, Kraków). Układy do badań przygotowywano przy użyciu miesiarki planetarnej z mieszadłem trzepakowym, po czym odstawiano je na 24 godziny celem odpowietrzenia. Następnie wykonywano właściwe doświadczenie przy użyciu stanowiska badawczego do mieszania nieniuonowskich płynów spożywczych, opisanego w pracy [5]. Eksperyment polegał na przeprowadzeniu trwającej 5 godzin operacji mieszania. Prędkości obrotowe mieszadła wynosiły odpowiednio: 22; 29,5; 37; 44,5 oraz 52 obrotów na minutę.

W badaniach wykorzystano trzy rodzaje mieszadeł wolnoobrotowych: kotwicowe, ramowe oraz wstęgowe. Mieszadła te są powszechnie wykorzystywane do mieszania układów o dużej lepkości [7]. Parametry geometryczne zastosowanych mieszadeł podano na rysunku (1) oraz w tabeli (1).



Rys. 1. Mieszadła: 1 – wstęgowe, 2 – kotwicowe, 3 – ramowe.

Fig. 1. Stirrers: 1 – helical ribbon stirrer, 2 – anchor stirrer, 3 – frame stirrer.

Źródło: Opracowanie własne

Source: The own study

Tabela 1. Parametry geometryczne mieszadeł

Table 1. Geometric parameters of stirrers

| Parametr geometryczny | Mieszadło kotwicowe | Mieszadło ramowe | Mieszadło wstęgowe |
|-----------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| d | 0,19 m | 0,19 m | 0,212 m |
| h | 0,18 m | 0,193 m | 0,212 m |
| w | 0,0133 m | 0,0135 m | 0,029 m |
| p | – | – | 0,141 m |

Źródło: Opracowanie własne

Source: The own study

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów obliczono wartości chwilowej mocy mieszania. Wielkość tę oblicza się za pomocą równania (1) [11]:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_0 \quad (1)$$

gdzie: P – moc chwilowa [W]

M₀ – moment obrotowy [Nm]

n – prędkość obrotowa mieszadła [s⁻¹]

Ponadto, dane pomiarowe posłużyły do wyznaczenia wartości lepkości pozornej, to jest stosunku chwilowej wartości naprężenia ścinającego do szybkości ścinania.

Naprężenie ścinające wyznacza się za pomocą momentu obrotowego przyłożonego na wale mieszadła oraz wysokości i średnicy mieszadła [4] zgodnie z zależnością (2):

$$t = \frac{2 \cdot M_0}{p \cdot h \cdot d^2} \quad (2)$$

gdzie: h – wysokość mieszadła [m]

d – średnica mieszadła [m]

Z kolei szybkość ścinania jest proporcjonalna do liczby obrotów mieszadła. Występująca w wyrażeniu stała k_s jest zależna od parametrów geometrycznych, a dokładnie od średnicy mieszadła oraz mieszalnika.

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

gdzie: k_s – stała Metznera-Otto

W celu określenia zależności pomiędzy liczbą obrotów mieszadła a szybkością ścinania dokonano wyznaczenia stałej k_s według procedury zaproponowanej przez Metznera i Otto [9]. W charakterze wzorcowej cieczy niuonowskiej wykorzystano syrop glukozowy wysokoscukrzony (producent: Cargill Poland, r=1366 kg·m⁻³) z dodatkiem wody (w stosunku 8:2). Pomiar lepkości cieczy wzorcowej wykonano przy użyciu reometru Haake RS 6000, w warunkach wzrastającej szybkości ścinania (w zakresie od 0 do 100 s⁻¹, odpowiadającej zakresowi od 0 do 52 min⁻¹ liczby obrotów mieszadła). Syrop wysokoscukrzony charakteryzowała lepkość niuonowska o wartości 1,5 Pas.

Na podstawie wyznaczonych wartości lepkości pozornej i chwilowej mocy mieszania obliczono zastępczą liczbę Newtona dla mieszania (liczbę mocy) (równanie 4) oraz zastępczą liczbę Reynoldsa dla mieszania (równanie 5) [12]:

$$Ne_m = \frac{P}{n^3 \cdot d^5 \cdot \rho} \quad (4)$$

$$Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta} \quad (5)$$

gdzie: r – gęstość [kg·m⁻³]

h – lepkość pozorna [Pa·s]

Wartości zastępczych liczb kryterialnych dla mieszania posłużyły do wyznaczenia tak zwanej charakterystyki mocy mieszadeł, to znaczy funkcji Ne(Re) w skali podwójnie logarytmicznej. Ponadto umożliwiły obliczenie parametrów równania (6) dla zastosowanych mieszadeł [6]:

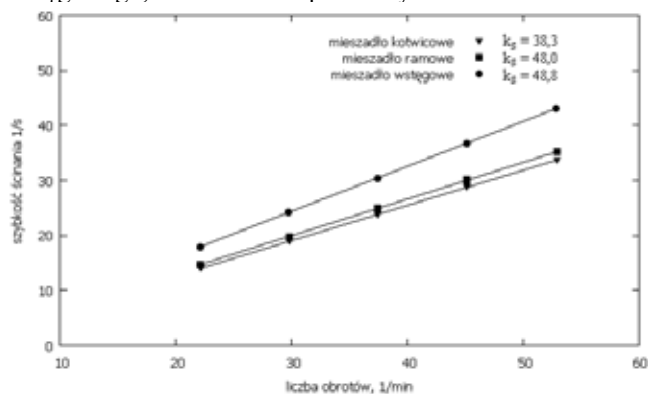
$$Ne = k \cdot Re_m^A \quad (6)$$

gdzie: k, A – współczynniki empiryczne

REZULTATY BADAŃ

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów obejmują wyznaczenie stałej Metznera-Otto dla stosowanych mieszadeł, wartości mocy chwilowej i lepkości pozornej w funkcji czasu mieszania i liczby obrotów mieszadła oraz wyznaczenie charakterystyk mocy dla użytych mieszadeł.

Na (rys. 2) przedstawiono wartości stałych k_s dla mieszadeł: kotwicowego, ramowego oraz wstęgowego. Najwyższa wartość tego parametru jest charakterystyczna dla mieszadła wstęgowego, niższe zaś dla pozostałych mieszadeł.

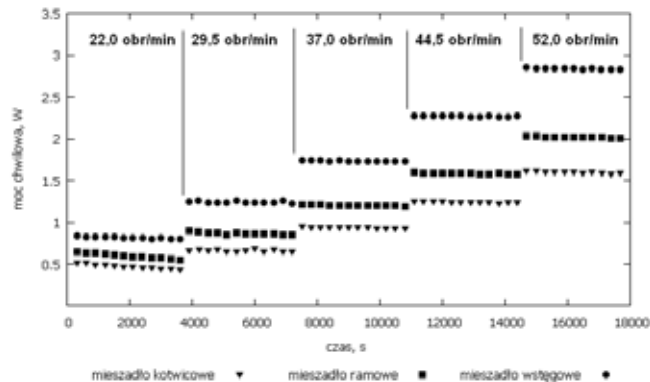


Rys. 2. Wartości stałej Metznera i Otto dla użytych mieszadeł.

Fig. 2. The values of Metzner-Otto constant for stirrers.

Źródło: Opracowanie własne

Source: The own study



Rys. 3. Zależność mocy chwilowej od czasu dla użytych mieszadeł.

Fig. 3. The functions of momentary power consumption with time for stirrers.

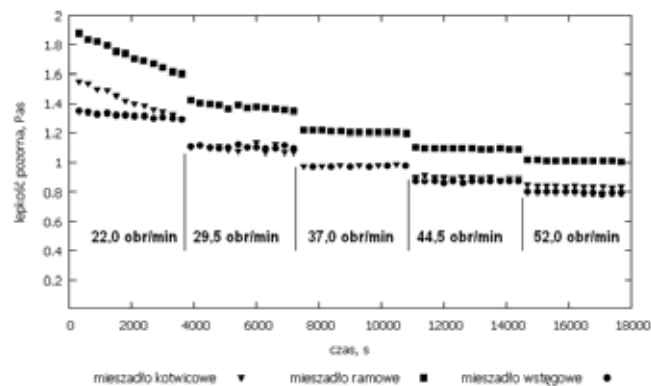
Źródło: Badania własne

Source: The own study

Na kolejnym rysunku (3) zaprezentowano zapotrzebowanie mocy mieszania w funkcji czasu i liczby obrotów mieszadła. Można zaobserwować, że użycie mieszadła wstęgowego skutkuje uzyskaniem najwyższych wartości zapotrzebowania mocy. Również dla tego rodzaju mieszadła obserwuje się większe przyrosty mocy w funkcji liczby obrotów mieszadła. Z kolei najmniejsze zapotrzebowanie mocy jest charakterystyczne dla mieszadła kotwicowego. Wynika to z faktu mniejszej powierzchni roboczej mieszadła kotwicowego, a tym samym mniejszego oporu powstającego w płynie. Ponadto można zaobserwować spadki zapotrzebowania mocy w czasie mieszania, widoczne szczególnie dla mieszadeł

kotwicowego i ramowego, w warunkach najniższych prędkości obrotowych mieszadła.

Zmiany mocy chwilowej podczas mieszania są ściśle związane ze zmianami w obrębie struktury mieszanego materiału, co objawia się zmianami lepkości pozornej. Na rysunku (4) przedstawiono zależność wartości lepkości pozornej od czasu i prędkości obrotowych mieszadła.



Rys. 4. Zależność lepkości pozornej od czasu mieszania dla mieszadeł.

Fig. 4. The functions of apparent viscosity with time for stirrers.

Źródło: Opracowanie własne

Source: The own study

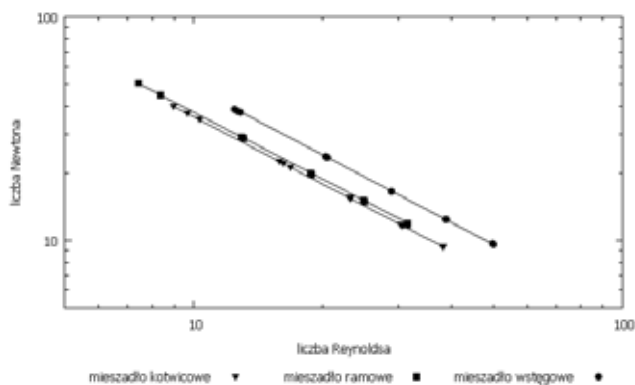
Przedstawione dane ukazują obniżenie lepkości pozornej wraz ze wzrostem liczby obrotów mieszadła. Takie zachowania w czasie mieszania potwierdza nieniuetonowskie właściwości układu, a dokładnie, że jest to płyn rozrzedzany ściąganiem.

Najwyższe wartości lepkości pozornej obserwuje się dla mieszadła ramowego, z kolei najniższe dla mieszadła wstęgowego. Zastosowanie mieszadła ramowego i kotwicowego skutkuje też wyraźnym zmniejszaniem się lepkości pozornej układu w czasie mieszania przy najniższej prędkości obrotowej mieszadła. Dla mieszadła wstęgowego zjawisko to jest mniej widoczne. Różnice wynikają z odmiennej konstrukcji mieszadeł i tym samym różnego oddziaływania na strukturę mieszanego płynu. Mieszadła kotwicowe i ramowe wyposażone są w element roboczy prostopadły względem warstw płynu – stąd obserwowane silne niszczenie struktury płynu. Element mieszający mieszadła wstęgowego położony jest pod pewnym kątem, co skutkuje łagodniejszym ściąganiem układu. Należy zauważyć, że zmiany lepkości pozornej w funkcji czasu zanikają, co wskazuje na stopniowy zanik reologicznej niestabilności płynu.

Oprócz opisu i identyfikacji zmian lepkości pozornej i mocy mieszania w czasie, klasyczne ujęcie operacji mieszania wymaga również podania charakterystyk mocy stosowanych w badaniach mieszadeł. Funkcje te zebrano na rysunku 5.

Pomimo znacznego przekraczania arbitralnie przyjmowanej przez wielu autorów granicy obszaru laminarnego, wynoszącej $Re < 10$, wykresy omawianej zależności przyjmują prostoliniowość, co sugeruje rozszerzenie zakresu laminarnego mieszania badanego układu nawet przy wyższych prędkościach obrotowych mieszadła. Obserwacje te potwierdzają wartości parametru empirycznego A równania (6),

podane w tabeli (2). Wartości parametru k omawianego równania wskazują na jego powiązanie z powierzchnią roboczą mieszadła.



Rys. 5. Charakterystyki mocy użytych mieszadeł.
Fig. 5. The power characteristics of used stirrers.

Źródło: Badania własne

Source: The own study

Tabela 2. Wartości parametrów równania charakterystyki mocy dla mieszadeł

Table 2. The values of power characteristic equations for stirrers

| | k | A |
|---------------------|--|--------------------------------------|
| Mieszadło kotwicowe | 357,748 ($\pm 8,1 \cdot 10^{-7}$) | -1 ($\pm 8,79 \cdot 10^{-7}$) |
| Mieszadło ramowe | 373,627 ($\pm 9,18 \cdot 10^{-7}$) | -1 ($\pm 1,02 \cdot 10^{-7}$) |
| Mieszadło wstępowe | 481,148 ($\pm 1,029 \cdot 10^{-6}$) | -1 ($\pm 7,447 \cdot 10^{-10}$) |

Źródło: Badania własne

Source: The own study

WNIOSKI

1. Skonstruowane i opisane w publikacji [5] stanowisko pomiarowe umożliwia wiarygodny odczyt parametrów mieszania w czasie rzeczywistym.
2. Zapotrzebowanie mocy mieszania zależy od prędkości obrotowej mieszadła oraz od powierzchni roboczej mieszadła.
3. Lepkość pozorna układu zawierającego mączkę chleba świętojańskiego spada w funkcji prędkości obrotowej mieszadła.
4. W warunkach niższych wartości prędkości obrotowej mieszadła roztwór mączki chleba świętojańskiego wykazuje właściwości reologiczne zależne od czasu ścinania. Intensywność zmian lepkości pozornej jest ponadto uzależniona od rodzaju użytego mieszadła.
5. Zastosowanie wolnoobrotowych mieszadeł wąskoprześwitowych do mieszania układu zawierającego mączkę chleba świętojańskiego skutkuje rozszerzeniem obszaru laminarnego przepływu do wartości liczby Reynoldsa wynoszących odpowiednio 31 (mieszadło ramowe), 39 (mieszadło kotwicowe) i 50 (mieszadło wstępowe).

LITERATURA

- [1] BARAK S., MUGDIL D. 2014. *Locust bean gum: Processing, properties and food applications – A review*. International Journal of Biological Macromolecules, nr 66, 74-80.
- [2] BEMILLER J. N. 2011. *Pasting, paste, and gel properties of starch-hydrocolloid combinations*. Carbohydrate Polymers, nr 86, 386-423.
- [3] CASAS J. A., GARCIA-OCHOA F. 1999. *Viscosity of solutions of xanthan/locust bean gum mixtures*. Journal of Science of Food and Agriculture, nr 79, 25-31.
- [4] CULLEN P. J. 2009. *Food Mixing: Principles and Applications*. Wiley-Blackwell, Oxford, 1-110.
- [5] KABZIŃSKI M., GRZESIK M. 2014. *Stanowisko badawcze do mieszania nieniuetonowskich płynów spożywczych*. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, nr 2, 34-36.
- [6] KOCH R., NOWORYTA A. 1995. *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 306.
- [7] KUNCEWICZ Cz. 2012. *Mieszanie cieczy wysoko lepkich. Podstawy procesowe*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 28-215.
- [8] MARTINEZ-PADILLA L. P., CORNEJO-ROMERO L., CRUZ-CRUZ C. M., JAQUEZ-HUACUJA C. C. 1998. *Rheological characterization of a model food suspension containing starch using three different geometries*. Journal of Food Process Engineering, nr 22, 55-79.
- [9] METZNER A. B., OTTO R. E. 1957. *Agitation of Non-Newtonian fluids*. AIChE Journal, nr 3, 3-10.
- [10] POLLARD M. A., FISCHER P. 2006. *Partial aqueous solubility of low-galactosecontent galactomannans – what is the quantitative basis?* Current Opinion in Colloid & Interface Science, nr 11, 184-190.
- [11] SANCHEZ PEREZ J. A., RODRIGUEZ PORCEL E. M., CASAS LOPEZ J. L., FERNANDEZ SEVILLA J. M., CHISTI Y. 2006. *Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactors*. Chemical Engineering Journal, vol. 124, 1-5.
- [12] STREK F. 1971. *Mieszanie i mieszalniki*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 17-119.
- [13] SHEHZAD A., CHIRON H., DELLA VALLE G., LAMRINI B., LOURDIN D. 2012. *Energetical and rheological approaches of wheat dough mixing with a spiral mixer*. Journal of Food Engineering, nr 110, 60-70.