

Lubomira BRONIARZ-PRESS, Kamila STACHURSKA, Marta STACHURSKA

e-mail: lubomira.broniarz-press@put.poznan.pl

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

## Moc mieszania w mieszalniku z dwoma mieszadłami zamocowanymi na wspólnym wale

### Wstęp

Rozwój nowych technologii spowodował, iż proces mieszania znalazł szerokie zastosowanie w różnego rodzaju gałęziach przemysłu (przykładowo przemysł chemiczny, farmaceutyczny oraz spożywczy). Mieszanie ma na celu uzyskanie z dwóch lub większej liczby składników mieszaniny jednorodnej. Stosuje się je w celu rozwinięcia powierzchni kontaktu układu dwufazowego [Johnsen i Rønningsen, 2003]. Substancje poddawane mieszaniu występują w układach dwufazowych w różnej proporcji. Jedne z nich stanowią fazę ciągłą, a pozostałe tworzą tzw. fazę rozproszoną [Kamiński, 2004]. Na skutek zwiększania częstości obrotów mieszadła następuje wytworzenie silnej cyrkulacji otaczającej go cieczy i powierzchnia rozdziału dwóch faz, przykładowo niemieszających się wzajemnie cieczy, systematycznie zanika. Działające siły masowe (siła wyporu oraz siła ciężkości) są tak duże, iż krople zostają zawieszane ponad mieszadłem. Przy dużych częstościach obrotów warstwa cieczy rozproszonej praktycznie całkowicie zanika. Rozpraszana ciecz ulega rozbiciu na pojedyncze krople w miejscach, w których występują silne naprężenia ścinające. W następstwie cyrkulacji cieczy w mieszalniku, krople cieczy mogą ulegać rozpadowi bądź koalescencji, łączyć się w większe krople [Kamiński, 2004]. Podczas mieszania układów wielofazowych możliwe jest wytworzenie różnego rodzaju emulsji. Rozcieńczone emulsje z zasady wykazują właściwości newtonowskie, a stężone charakteryzują się właściwościami nienewtonowskimi [Kembłowski i in., 2001].

Wyznaczenie minimalnej częstości obrotów mieszadła potrzebnej do otrzymania emulsji nie jest proste, gdyż nie ma ostrej granicy dla tego procesu. Minimalna częstość obrotów mieszadła charakterystyczna dla wytworzenia emulsji zależy od wielu czynników: konstrukcji mieszadła, parametrów geometrycznych mieszalnika, położenia mieszadeł w mieszalniku.

Celem pracy była analiza wpływu odległości między dwoma mieszadłami na wspólnym wale oraz udziału objętościowego fazy rozproszonej na moc mieszania układu typu olej-woda. Wyniki prowadzonych badań pozwoliły określić minimalną częstość obrotów mieszadła potrzebną do wytworzenia emulsji, m. in. w różnych operacjach w przemyśle farmaceutycznym. W trakcie prowadzonych badań wartość  $n_0$  określano na podstawie wizualnego stwierdzenia homogeniczności układu ciecz-ciecz.

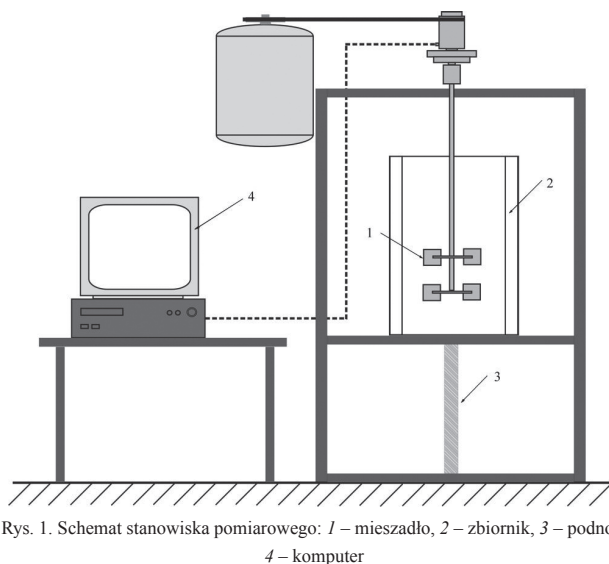
### Badania doświadczalne

#### Stanowisko pomiarowe

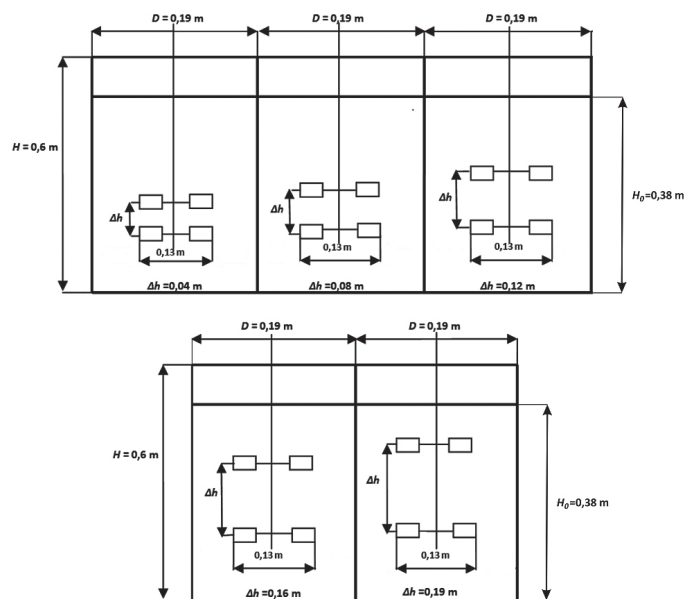
Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym (Rys. 1), którego głównymi elementami były: zbiornik, mieszadła, momentomierz, silnik napędowy mieszalnika i komputer.

W badaniach zastosowano zbiornik o wysokości całkowitej  $H = 0,6$  m oraz średnicy  $D = 0,19$  m wykonany z polimetakrylanu metylu (PMMA) z czterema płaskimi przegrodami o szerokości  $B = 0,03$  m oraz dwa rodzaje mieszadeł ( $d/D = 1/3$ ;  $h/d = 1$ ): mieszadło turbinowe dyskowe z sześcioma łopatkami prostymi Rushtona (RT) oraz mieszadło turbinowe z łopatkami pochylonymi pod kątem  $45^\circ$  (PBT) pompujące w górę. Charakterystykę mieszadeł przedstawiono w tab. 1. Wysokość napełnienia zbiornika wynosiła  $H = 0,38$  m.

Stanowisko zapewniało możliwość zmiany wysokości zawieszenia górnego mieszadła nad dnem zbiornika (Rys. 2). Mieszadło dolne umieszczano na stałej wysokości względem dna zbiornika  $h = 0,13$  m. Mieszadła były zamocowywane na stalowym wale centrycznie zamocowanym (1H18N9T) o średnicy  $0,012$  m.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – mieszadło, 2 – zbiornik, 3 – podnośnik, 4 – komputer



Rys. 2. Schemat układów mieszadeł w zbiorniku

Tab. 1. Geometryczne parametry stosowanych mieszadeł

Typ	Liczba łopatek	Średnica $d$ [m]	Wysokość łopatek [m]	Kąt nachylenia łopatek
RT	6	0,065	0,006	–
PBTU	6	0,065	0,008	$45^\circ$

Silnik indukcyjny z zewnętrznym układem chłodzenia (typ: SHK L-04) o mocy  $P = 1,5$  kW sterowany był falownikiem typu *Vari-speed*, który umożliwiał zmianę częstości obrotów mieszadła w zakresie  $0 \leq n \leq 23,5$  [ $s^{-1}$ ]. Praca falownika kontrolowana była *on-line* przy użyciu oprogramowania *CX-Drive* firmy *OMRON*. Program *CX-Drive*, stanowi integralną część pakietu *CX-One* i umożliwiał zmianę oraz odczyt częstości obrotów mieszadeł.

**Metodyka badań**

Moc mieszania została wyznaczona metodą mechaniczną. Ocenę momentu skręcającego wykonano poprzez pomiar momentu obrotowego mieszalnika z dokładnością  $\pm 0,01$  Nm.

W badaniach napięcia międzyfazowego wykorzystano cyfrowy tensometr *Krüss K9*, który umożliwiał pomiar metodą pierścienia *Du Nouy* w zakresie 1-999 mN/m z dokładnością  $\pm 0,1$  mN/m. Każdorazowo przed pomiarem naczynie dla próbki oraz pierścień platynowy opalano nad palnikiem *Bunsena* w celu usunięcia zanieczyszczeń.

Najpierw do zbiornika wlewano wodę, po czym dodawano określoną objętość oleju. Po wprowadzeniu przedmiotowych cieczy: wody o określonym udziale objętościowym oraz oleju o udziale objętościowym  $\phi_0$  2%, 5%, 10% oraz 15% stopniowo zwiększano częstość obrotów.

Podczas rozwarstwiania się cieczy bliżej dna zbiornika znajdowała się woda, gdyż przeważający był udział objętościowy wody. Do badań wybrano układy typu woda/olej 20–30 i woda/olej 20–70.

Po wizualnym stwierdzeniu jednorodności układu woda-olej rejestrowano wartość minimalnej częstości obrotów mieszadła. Przy dużych częstościach obrotów obserwowano napowietrzanie się badanego układu.

**Materiały**

Właściwości fizykochemiczne badanych cieczy zestawiono w tab. 2, przy czym dla olejów 20–30 i 20–70 wykorzystano dane zawarte w atescie dostarczonym przez producenta (*Instytut Nafty i Gazu* w Krakowie). Wybrane oleje przemysłowe różniły się znacznie lepkością. Lepkość dynamiczna oleju mineralnego 20–70 była 2,27 razy większa niż lepkość oleju mineralnego 20–30.

Tab. 2. Właściwości fizykochemiczne badanych cieczy w temperaturze 20°C

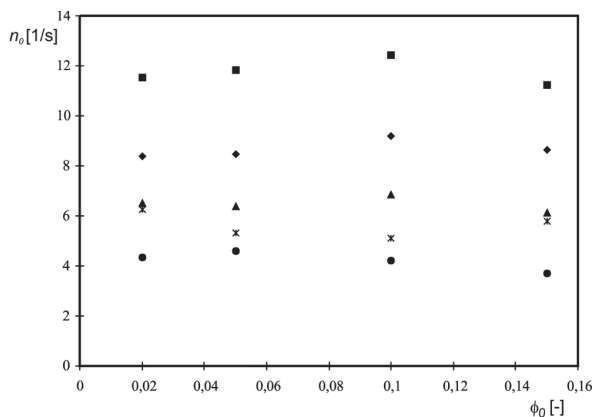
Nazwa cieczy	Gęstość $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość kinematyczna $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$\frac{\rho_{olej}}{\rho_{woda}}$	$\frac{\nu_{olej}}{\nu_{woda}}$	Napięcie międzyfazowe układu woda/olej [mN/m]
woda	998,2	1,002·10 <sup>-6</sup>	–	–	–
olej 20-30	865,5	3,051·10 <sup>-5</sup>	0,867	3,045	2,5
olej 20-70	864,9	6,930·10 <sup>-5</sup>	0,866	6,916	3,2

**Wyniki badań**

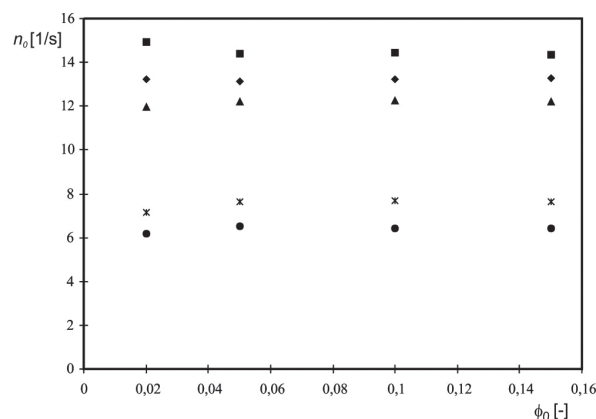
**Minimalna częstość obrotów mieszadła**

Wyniki pomiarów minimalnej częstości obrotów mieszadła  $n_0$  przedstawiono na rys. 3–6 dla dwóch takich samych mieszadeł zamocowanych na wspólnym wale przy odległości między nimi 0,04; 0,08; 0,012, 0,16 i 0,19 m.

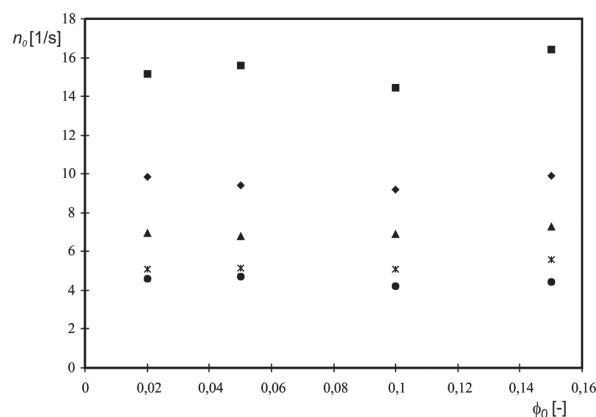
Analiza przebiegu punktów eksperymentalnych wykazała, iż minimalna częstość obrotów mieszadła praktycznie nie zależy od udziału objętościowego fazy rozproszonej w wodzie. Ze wzrostem odległości  $\Delta h$  maleje wpływ udziału objętościowego oleju.



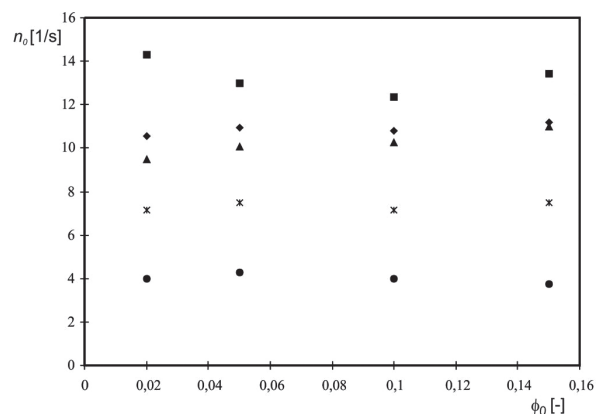
Rys. 3. Zależność  $n_0$  od  $\phi_0$  dla układu mieszadeł dwóch mieszadeł RT, układ woda/olej 20–30: ■ –  $\Delta h = 0,04$  m; ◆ –  $\Delta h = 0,08$  m; ▲ –  $\Delta h = 0,12$  m; ✕ –  $\Delta h = 0,16$  m; ● –  $\Delta h = 0,19$  m



Rys. 4. Zależność  $n_0$  od  $\phi_0$  dla układu mieszadeł dwóch mieszadeł PBT, układ woda/olej 20–30: ■ –  $\Delta h = 0,04$  m; ◆ –  $\Delta h = 0,08$  m; ▲ –  $\Delta h = 0,12$  m; ✕ –  $\Delta h = 0,16$  m; ● –  $\Delta h = 0,19$  m



Rys. 5. Zależność  $n_0$  od  $\phi_0$  dla układu mieszadeł dwóch mieszadeł RT, układ woda/olej 20–70: ■ –  $\Delta h = 0,04$  m; ◆ –  $\Delta h = 0,08$  m; ▲ –  $\Delta h = 0,12$  m; ✕ –  $\Delta h = 0,16$  m; ● –  $\Delta h = 0,19$  m



Rys. 6. Zależność  $n_0$  od  $\phi_0$  dla układu dwóch mieszadeł PBT, układ woda/olej 20–70: ■ –  $\Delta h = 0,04$  m; ◆ –  $\Delta h = 0,08$  m; ▲ –  $\Delta h = 0,12$  m; ✕ –  $\Delta h = 0,16$  m; ● –  $\Delta h = 0,19$  m

Na podstawie uzyskanych danych można wywnioskować, iż dla układu woda-olej minimalna częstość obrotów mieszadła potrzebna do wytworzenia emulsji maleje wraz ze wzrostem odległości pomiędzy mieszadłami.

Dla układu z dwoma mieszadłami typu 2RT minimalna częstość obrotów mieszadła potrzebna do wytworzenia emulsji jest mniejsza niż dla układu mieszadeł 2PBT, tłoczących ciecz w dół mieszalnika. Mieszadła tarczowe wytwarzają duże naprężenia ścinające, z kolei mieszadła z łopatkami pochylonymi (PBT) powodują zwiększenie osiowej składowej prędkości cieczy tłoczonej w dół kosztem prędkości promieniowej, co wymaga zwiększenia częstości obrotów mieszadła w celu wytworzenia emulsji. Podczas zwiększania częstości obrotów mieszadła obserwowano-

no napowietrzanie się układu. Na podstawie wykreślonych krzywych stwierdzono, iż rodzaj stosowanego mieszadła ma wpływ na wytwarzanie emulsji, co potwierdza wcześniejsze obserwacje *Wozniwodzkiego* [2003].

**Moc mieszania**

Dla badanego układu dwufazowego olej-woda określona została zależność liczby *Newtona* od liczby *Reynoldsa*  $Ne_m = f(Re_m)$ . W analizie danych doświadczalnych wykorzystano następujące moduły:

$$Ne_m = \frac{P}{n_0^3 d^5 \rho_e} \tag{1}$$

$$Re_m = \frac{n_0^3 d^5 \rho_e}{\eta_e} \tag{2}$$

gdzie:

- $P$  – moc mieszania [W]
- $n_0$  – minimalna częstota obrotów mieszadła [ $s^{-1}$ ],
- $d$  – średnica mieszadła [m],
- $\rho_e$  – gęstość emulsji [ $kg \cdot m^{-3}$ ],
- $\eta_e$  – lepkość emulsji [Pa·s].

Wartości gęstości oraz lepkości emulsji wyznaczano ze wzorów [Stręk, 1981]:

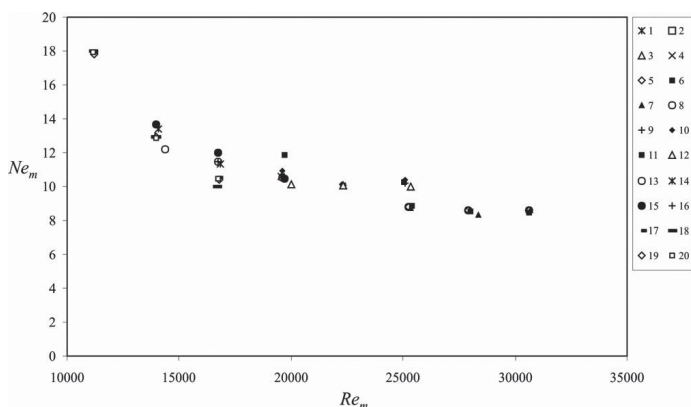
$$\rho_e = \phi_o \rho_o + \phi_w \rho_w \tag{3}$$

$$\eta_e = \phi_o \eta_o + \phi_w \eta_w \tag{4}$$

gdzie:

- $\rho_o$  – gęstość oleju [ $kg \cdot m^{-3}$ ],
- $\rho_w$  – gęstość wody [ $kg \cdot m^{-3}$ ],
- $\eta_o$  – lepkość oleju [Pa·s],
- $\eta_w$  – lepkość wody [Pa·s],
- $\phi_o$  – udział objętościowy oleju [-],
- $\phi_w$  – udział objętościowy wody [-].

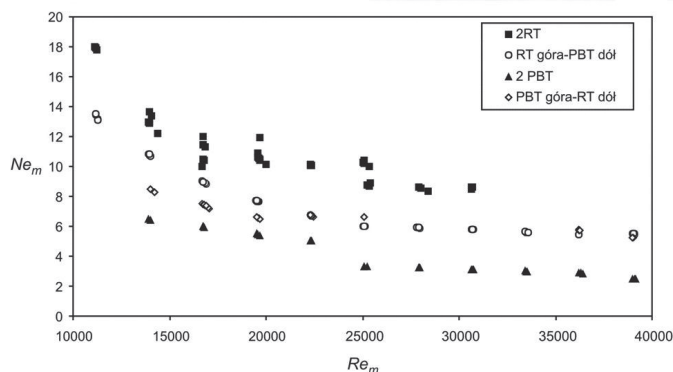
Badania mocy mieszania wykonano dla dwóch różnych olejów jako faz rozproszonych: oleju 20–30 i oleju 20–70 oraz kombinacji mieszadeł: 2RT, 2PBT, RT(góra)-PBT(dół) oraz PBT(góra)-RT(dół). Obraz zmiany liczby mocy *Newtona* od liczby *Reynoldsa*, udziału objętościowego oleju i odległości między mieszadłami przedstawiono dla wybranych układów na rys. 7.



Rys. 7. Zależność  $Ne_m = f(Re_m)$  dla 2RT układ woda-olej 20–70: 1 – 2%,  $\Delta h = 0,04$  m; 2 – 5%,  $\Delta h = 0,04$  m; 3 – 10%,  $\Delta h = 0,04$  m; 4 – 15%,  $\Delta h = 0,04$  m; 5 – 2%,  $\Delta h = 0,08$  m; 6 – 5%,  $\Delta h = 0,08$  m; 7 – 10%,  $\Delta h = 0,08$  m; 8 – 15%,  $\Delta h = 0,08$  m; 9 – 2%,  $\Delta h = 0,12$  m; 10 – 5%,  $\Delta h = 0,12$  m; 11 – 10%,  $\Delta h = 0,12$  m; 12 – 15%,  $\Delta h = 0,12$  m; 13 – 2%,  $\Delta h = 0,16$  m; 14 – 5%,  $\Delta h = 0,16$  m; 15 – 10%,  $\Delta h = 0,16$  m; 16 – 15%,  $\Delta h = 0,16$  m; 17 – 2%,  $\Delta h = 0,19$  m; 18 – 5%,  $\Delta h = 0,19$  m; 19 – 10%,  $\Delta h = 0,19$  m; 20 – 15%,  $\Delta h = 0,19$  m

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż liczba mocy mieszania wzrasta wraz ze zwiększeniem odległości pomiędzy mieszadłami. Ponadto obserwuje się, iż wpływ odległości pomiędzy mieszadłami na moc mieszania występuje dla  $\Delta h/d \leq 2$ . Powyżej tej wartości nie stwierdzono wpływu odległości między mieszadłami na moc mieszania.

Na podstawie danych doświadczalnych przedstawionych na rys. 8 stwierdzono, iż rodzaj zastosowanego mieszadła wpływa na wartość liczby *Newtona*. Podczas mieszania układu za pomocą dwóch turbin *Rushtona* odnotowuje się największe wartości liczby *Newtona*, z kolei dla układu mieszadeł 2 PBT stwierdza się najmniejszą moc mieszania, co świadczy o efektywnej pracy mieszalnika.



Rys. 8. Zależność  $Ne_m = f(Re_m)$  dla czterech różnych kombinacji mieszadeł

**Wnioski**

Na podstawie badań eksperymentalnych stwierdzono, iż minimalna częstota obrotów mieszadła zależy od rodzaju stosowanego mieszadła i jest odwrotnie proporcjonalna do wysokości zawieszenia mieszadła. Im większa jest odległość pomiędzy układem mieszadeł: PBT-RT, RT-PBT, 2RT, 2PBT, tym mniejsza jest minimalna częstota obrotów mieszadła potrzebna do wytworzenia emulsji.

Wykazano również, iż moc mieszania układów dwufazowych typu woda-olej zależy od stosowanego mieszadła, a nie zależy od udziału objętościowego fazy olejowej. Dla kombinacji mieszadeł 2RT wartości liczby *Newtona* były największe.

**LITERATURA**

Johnsen E.E., Rønningsen H.P., 2003. Viscosity of ‘live’ water-in-crude oil emulsions: experimental work and validation of correlations. *J. Petrochem. Sci. Eng.*, **38**, 23-36. DOI: 1016/S0920-4105(03)00020-2

Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa

Kembłowski Z., Sęk J., Krynke K., 2001. Własności reologiczne emulsji typu olej w wodzie w funkcji jej struktury. *Inż. Chem. Proc.*, **22**, nr 3C, 711-716

Stręk F., 1981. *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa

Skelland A.H.P., Ramsay G.G., 1987. Minimum agitator speeds for complete liquid-liquid dispersion. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, nr 1, 77-81. DOI: 10.1021/ie0006a014

Wozniwodzki S., 2003. *Badanie procesu mieszania złożonych układów technologicznych w mieszalnikach smukłych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań

*Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej 32/368.*