

Monika MUSIAŁ, Magdalena CUDAK, Joanna KARCZ

e-mail: cudak@zut.edu.pl

Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

## Udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu ciecz-gaz-biofaza w bioreaktorze z mieszadłem CD 6

### Wstęp

Bioreaktory z mieszadłem mechanicznym, z uwagi na liczne zastosowania, są częstym tematem rozważań w literaturze przedmiotu. Badane są w nich procesy przenoszenia pędu, masy i ciepła przebiegające w układach dwu- i trójfazowych [Blakebrough i in., 1966; 2007; Warmoeskerken i in., 1984; Junker i in., 1998; Cudak, 2014]. Pomimo dość obszernych wyników badań rezultaty dotyczące udziału gazu zatrzymanego w cieczy w układzie trójfazowym wytwarzanym przy zastosowaniu mieszadła *Smitha* (CD 6) nie są kompletne.

Mieszadło CD 6 stanowi modyfikację mieszadła turbinowego *Rushtona* [Stręk, 1981; Kamiński, 2004], ma sześć zakrzywionych (wklęsłych) łopatek i jest zalecane do stosowania w przypadku rozpraszania gazu w cieczy. Mieszadło zapewnia niskie wartości naprężeń ścinających w mieszanym płynie [Bakker, 2000].

Junker i in. [2000] badali wpływ rodzaju mieszadła na wydajność fermentacji w bioreaktorze zaopatrzonego w więcej niż jedno mieszadło na wale. Stwierdzili, że zastosowanie zestawu z przynajmniej jednym mieszadłem CD 6 na wale wpływa na wzrost intensywności wnikania masy w porównaniu do wyników uzyskanych dla układu dwóch mieszadeł turbinowych *Rushtona*.

Cudak [2014] przeprowadziła badania doświadczalne udziału gazu zatrzymanego w cieczy oraz mocy mieszania dla układu dwufazowego wodne roztwory sacharozy – powietrze, wytwarzanego w wielolaboratoryjnym mieszalniku wyposażonym w pojedyncze mieszadło szybkoobrotowe (CD 6, A 315 lub *Rushtona*). Wyniki pomiarów opracowała w postaci równań i stwierdziła, że mieszadło CD 6 umożliwia uzyskanie największych wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy w zakresie przeprowadzonych badań. Dotychczas brak jest informacji, w jakim stopniu obecność trzeciej fazy (zawiesiny drożdży) w mieszanym mechanicznie układzie wodny roztwór sacharozy – powietrze może wpływać na poziom udziału gazu zatrzymanego w cieczy w takim trójfazowym układzie.

Badania prezentowane w niniejszej pracy miały na celu określenie wpływu wybranych parametrów na udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu ciecz-gaz-biofaza (zawiesina drożdży) w bioreaktorze z mieszadłem CD 6.

### Badania doświadczalne

**Aparatura.** Pomiaru udziału gazu zatrzymanego w cieczy wykonano w zbiorniku o średnicy wewnętrznej  $D = 0,288$  m. Wysokość słupa mieszaniny ciecz-biofaza  $H$  równała się średnicy mieszalnika  $D$ . W mieszalniku znajdowały się cztery przegrody o szerokości  $B = 0,1D$ . Do mieszania zastosowano mieszadło turbinowe *Smitha* o średnicy  $d = 0,33D$ . Mieszadło zamontowane było na wysokości  $h = 0,33D$  od dna zbiornika. Pierścieniowy dystrybutor gazu o średnicy  $d_d = 0,7d$  był umieszczony w połowie odległości między mieszadłem a dnem mieszalnika. Fazę ciekłą stanowił wodny roztwór sacharozy o czterech różnych stężeniach masowych  $x$  wynoszących kolejno 1%, 2,5%, 5% oraz 10%, fazą gazową było powietrze, a biofazą – zawiesina drożdży o stężeniu masowym 1%.

**Zakres badań.** Parametry fizyczne układu zmieniały się w następujących zakresach:  $\eta$  [Pas]  $\in \langle 1,8 \times 10^{-3}; 3,3 \times 10^{-3} \rangle$ ,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]  $\in \langle 1004; 1041 \rangle$ ,  $\sigma$  [N/m]  $\in \langle 0,072; 0,086 \rangle$ . Badania przeprowadzono, w zakresie burzliwego przepływu cieczy w zbiorniku ( $Re \in \langle 37000; 80000 \rangle$ ), dla czterech wartości natężenia przepływu  $V_g$  powietrza przez mieszalnik ( $V_g$  [m<sup>3</sup>/s]  $\in \langle 1,67 \times 10^{-4}; 5 \times 10^{-4} \rangle$ ), ( $w_{og}$  [m/s]  $\in \langle 8,33 \times 10^{-3}; 2,5 \times 10^{-2} \rangle$ ), gdzie  $w_{og} = 4V_g/(\pi D^2)$ .

**Metodyka.** Udział gazu  $\varphi$  zatrzymanego w cieczy obliczano z równania:

$$\varphi = \frac{h_{g-c-b}}{h_{g-c-b} + H} \quad (1)$$

gdzie:

$h_{g-c-b}$  – różnica między wysokością słupa mieszaniny gaz-ciecz-biofaza a wysokością słupa mieszaniny ciecz-biofaza, m;

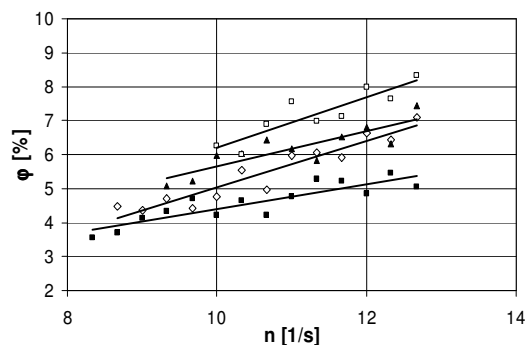
$H$  – wysokość słupa mieszaniny ciecz-biofaza, m

Wartość  $h_{g-c-b}$  określano dla każdego punktu pomiarowego jako średnią z 10 odczytów przyrostu wysokości słupa mieszaniny ciecz-gaz-biofaza na pionowej ścianie zbiornika.

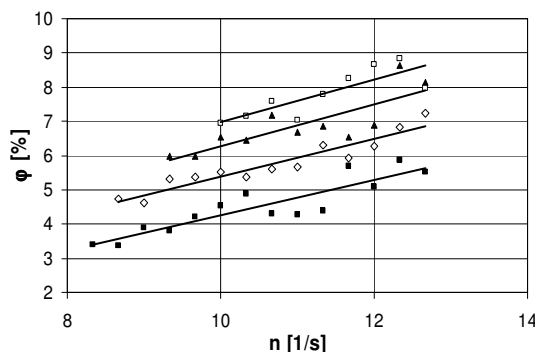
### Wyniki i dyskusja

Wpływ natężenia przepływu gazu, częstości obrotów mieszadła oraz stężenia sacharozy w układzie na udział gazu zatrzymanego w cieczy określono na podstawie około 300 punktów pomiarowych uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań.

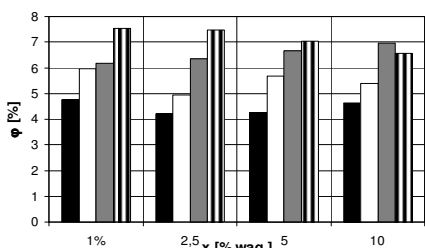
Zależność  $\varphi = f(n)$  dla 1% lub 5% wodnego roztworu sacharozy – powietrze – 1% zawiesina drożdży przedstawiono na Rys. 1-2. Ze wzrostem częstości obrotów mieszadła udział gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się nawet 2,5-krotnie (Rys. 2). Przy założeniu stałej wartości częstości obrotów mieszadła oraz stałej wartości stężenia sacharozy w układzie udział gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się ze wzrostem pozornej prędkości przepływu gazu  $w_{og}$  (Rys. 1-3).



Rys. 1. Zależność  $\varphi = f(n)$  dla układu 1% wodny roztwór sacharozy – powietrze – 1% zawiesina drożdży; ■ –  $w_{og} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  m/s; ◇ –  $w_{og} = 1,39 \cdot 10^{-2}$  m/s; ▲ –  $w_{og} = 1,94 \cdot 10^{-2}$  m/s; □ –  $w_{og} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  m/s

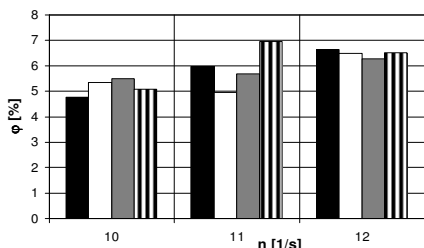


Rys. 2. Zależność  $\varphi = f(n)$  dla układu 5% wodny roztwór sacharozy – powietrze – 1% zawiesina drożdży; ■ –  $w_{og} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  m/s; ◇ –  $w_{og} = 1,39 \cdot 10^{-2}$  m/s; ▲ –  $w_{og} = 1,94 \cdot 10^{-2}$  m/s; □ –  $w_{og} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  m/s



Rys. 3. Zależność  $\varphi = f(x)$  dla  $n = 11$  1/s; ■ -  $w_{og} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  m/s; □ -  $w_{og} = 1,39 \cdot 10^{-2}$  m/s; ▨ -  $w_{og} = 1,94 \cdot 10^{-2}$  m/s; ▩ -  $w_{og} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  m/s

Przy założeniu stałych wartości pozostałych parametrów nie można jednoznacznie określić wpływu stężenia sacharozy na udział gazu zatrzymanego w cieczy (Rys. 4). Można jedynie stwierdzić, że wpływ ten jest znacznie mniejszy niż wpływ częstości obrotów mieszadła i natężenia przepływu gazu w mieszalniku  $V_g$ .



Rys. 4. Zależność  $\varphi = f(n)$  dla  $w_{og} = 1,39 \cdot 10^{-2}$  m/s; ■ -  $x = 1\%$  wag; □ -  $x = 2,5\%$  wag; ▨ -  $x = 5\%$  wag; ▩ -  $x = 10\%$  wag;

Zależność  $\varphi = f(Kg)$  dla wybranych układów przedstawiono na Rys. 5 – 7. Ze wzrostem liczby przepływu gazu, przy założeniu  $w_{og} = \text{const}$ , udział gazu zatrzymanego w cieczy zmniejsza się (Rys. 5). Udział  $\varphi$  gazu zatrzymanego w cieczy zależy również od wartości pozornej prędkości przepływu gazu  $w_{og}$ . Przy niższych wartościach liczby przepływu gazu  $Kg$ , udział gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się (około 2,5 razy) ze wzrostem pozornej prędkości przepływu gazu  $w_{og}$ . Siła tego wpływu maleje ze wzrostem wartości liczby przepływu gazu  $Kg$ .

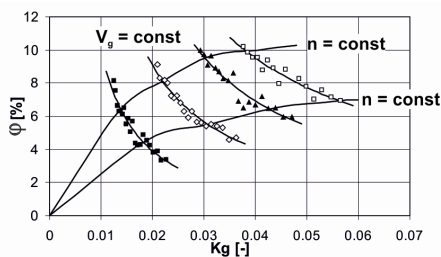
Ze wzrostem stężenia sacharozy w układzie, przy założeniu stałej wartości liczby przepływu gazu  $Kg$  ( $w_{og} = \text{const}$ ), udział gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się ponad dwukrotnie (Rys. 6). Największy wpływ stężenia sacharozy w układzie na udział gazu zatrzymanego w cieczy stwierdzono dla pozornej prędkości przepływu gazu  $w_{og} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  m/s. Wpływ ten maleje ze wzrostem pozornej prędkości przepływu gazu  $w_{og}$  (Rys. 7).

Wyniki badań udziału gazu zatrzymanego w cieczy uwzględniając liczbę przepływu gazu  $Kg$ , liczbę Webera oraz stężenie sacharozy w układzie opracowano w postaci równania:

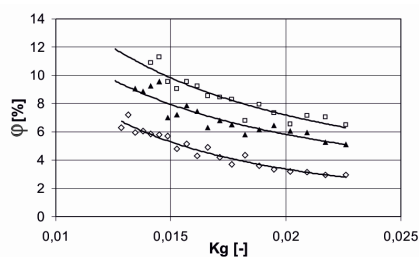
$$\varphi = 1,522 \cdot 10^{-3} Kg^{0,40} We^{0,69} (1 - 9,54x)^{0,17} \quad (2)$$

gdzie:  $Kg = \frac{V_g}{nd^3}$  oraz  $We = \frac{n^2 d^3 \rho}{\sigma}$

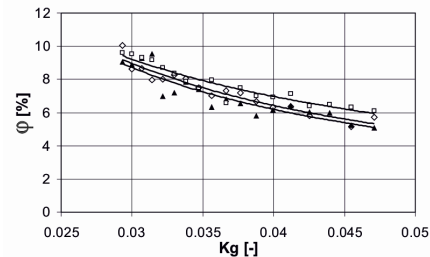
Równanie (2) opisuje wyniki pomiarów z błędem względnym  $\pm 8\%$  w zakresie:  $Kg \in <0,01; 0,06>$   
 $We \in <700; 2000>$   
 $x \in <0,01; 0,1>$ .



Rys. 5. Zależność  $\varphi = f(Kg)$  dla układu 5% wodny roztwór sacharozy – powietrze -1% zawiesina drożdży; ■ -  $w_{og} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  m/s; ◇ -  $w_{og} = 1,39 \cdot 10^{-2}$  m/s; ▲ -  $w_{og} = 1,94 \cdot 10^{-2}$  m/s; □ -  $w_{og} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  m/s;



Rys. 6. Zależność  $\varphi = f(Kg)$  dla  $w_{og} = 8,33 \cdot 10^{-3}$  m/s; ◇ -  $x = 2,5\%$  wag; ▲ -  $x = 5\%$  wag; □ -  $x = 10\%$  wag;



Rys. 7. Zależność  $\varphi = f(Kg)$  dla  $w_{og} = 1,94 \cdot 10^{-2}$  m/s; ◇ -  $x = 2,5\%$  wag; ▲ -  $x = 5\%$  wag; □ -  $x = 10\%$  wag;

Średnica mieszadła w czasie pomiarów była zawsze taka sama i wynosiła  $d = 0,095$  m.

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przypadku bioreaktora z mieszadłem CD 6 na zwiększenie udziału gazu zatrzymanego w cieczy największy wpływ ma częstość obrotów mieszadła  $n$  oraz natężenie przepływu powietrza  $V_g$  przez mieszalnik. Przy założeniu stałych wartości natężenia przepływu gazu  $V_g$  oraz stężenia  $x$  sacharozy w układzie ze wzrostem częstości obrotów mieszadła ( $n$  [1/s]  $\in <8,33; 12,67>$ ) udział  $\varphi$  gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się prawie 2,5 krotnie. Nieco mniejszy, prawie dwukrotny, wzrost udziału  $\varphi$  gazu zatrzymanego w cieczy otrzymano ze wzrostem natężenia przepływu gazu  $V_g$  [m<sup>3</sup>/s]  $\in <1,67 \cdot 10^{-4}; 5 \cdot 10^{-4}>$  (przy założeniu  $n = \text{const}$  i  $x = \text{const}$ ). Wpływ stężenia sacharozy w układzie na udział gazu zatrzymanego w cieczy jest znacznie mniejszy i zależy od pozostałych parametrów.

### OZNACZENIA

- $d$  – średnica mieszadła, m
- $D$  – wewnętrzna średnica mieszalnika, m
- $d_d$  – średnica dystrybutora gazu, m
- $h$  – odległość mieszadła od dna zbiornika, m
- $H$  – wysokość słupa mieszaniny ciecz-biofaza w mieszalniku, m
- $Kg$  – liczba przepływu gazu,
- $n$  – częstość obrotów mieszadła, 1/s
- $Re$  – liczba Reynoldsa, ( $= nd^2 \rho / \eta$ )
- $We$  – liczba Webera,
- $V_g$  – objętościowe natężenie przepływu gazu, m<sup>3</sup>/s
- $\eta$  – dynamiczny współczynnik lepkości, Pas
- $\rho$  – gęstość cieczy, kg/m<sup>3</sup>
- $\sigma$  – napięcie powierzchniowe cieczy, N/m
- $\varphi$  – udział gazu zatrzymanego w cieczy

### LITERATURA

Bakker A., 2000. *The Online CFM Book*. (03.2015): <http://www.bakker.org/cfm>

Blakebrough N., Sambamurthy K., 1966. Mass transfer and mixing rates in fermentation vessels. *Biotechnol. Bioeng.*, **8**, nr 1, 25-42. DOI: 10.1002/bit.260080104

Blakebrough N., Sambamurthy K., 2007. Performance of turbine impellers in sparger-aerated fermentation vessels. *J. App. Chem.*, **14**, nr 10, 413-422. DOI: 10.1002/jctb.5010141001.

Cudak M., 2014. Analiza wpływu wybranych parametrów na udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu ciecz-gaz-biofaza. *Inż. Ap. Chem.*, **53**, nr 1, 13-14

Cudak M., 2014. Hydrodynamic characteristics of mechanically agitated air - aqueous sucrose solutions. *Chem. Proc. Eng.*, **35**, nr 1, 97-107. DOI: 10.2478/cpe-2014-0007

Junker B. H., Stanik M., Barna C., Salmon P., Buckland B. C., 1998. Influence of impeller type on mass transfer in fermentation vessels. *Biopro. Biosys. Eng.*, **19**, nr 6, 403-413. DOI: 10.1007/s004490050540.

Junker B. H., Mann Z., Hunt G., 2000. Retrofit of CD-6 (Smith) impeller in fermentation vessels. *App. Biochem. Biotech.*, **89**, 67-83. DOI: 10.1385/ABAB:89:1:67

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

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

Warmoeskerken M.M.C.G., Speur J., Smith J.M., 1984. Gas-liquid dispersion with pitched blade turbines. *Chem. Eng. Comm.*, **25**, 11-29