

Magdalena CUDAK

e-mail: cudak@zut.edu.pl

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

Analiza wpływu wybranych parametrów na udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu ciecz-gaz-biofaza

Wstęp

Drożdże mają szerokie zastosowanie w procesach fermentacyjnych w przemyśle winiarskim, piwowarskim, gorzelnictwie i piekarnictwie oraz w procesach biotechnologicznych, m.in. do produkcji biomasy [Libudzisz i in., 2008]. Szybkość przemian metabolicznych drożdży *Saccharomyces cerevisiae* (m.in. drożdży piekarskich) zależy od warunków natlenienia. Z danych literaturowych wynika, że odpowiednie natlenienie układu znacznie zwiększa produkcję biomasy w porównaniu do warunków beztlenowych. Jednocześnie obecność tlenu silnie hamuje fermentację alkoholową. W warunkach tlenowych konieczne jest również odpowiednie dobranie stężenia cukru w pożywce (źródła węgla), aby nie dopuścić do wystąpienia częściowego zahamowania oddychania komórek drożdży (efektu *Crabtree*) [Libudzisz i in., 2008].

Aby uzyskać dobre rozproszenie gazu w układzie konieczne jest dobranie odpowiednich parametrów fizycznych i operacyjnych bioprosesu. Dobre rozproszenie gazu w układzie oraz określenie udziału gazu zatrzymanego w cieczy zależy od wielu czynników, m.in. parametrów geometrycznych zbiornika, mieszadła oraz dystrybutora gazu, rodzaju i częstości obrotów mieszadła, natężenia przepływu gazu w mieszalniku oraz parametrów fizycznych mieszanej cieczy [Stręk, 1981; Kamiński i Niżnik, 2001, 2002; Alves i in., 2002; Moucha i in., 2003; Kamiński, 2004; Adamiak, 2005; Shewale i Pandit, 2006; Achmed i in., 2010; Cudak, 2011; Major-Godłewska i Karcz, 2011, 2012].

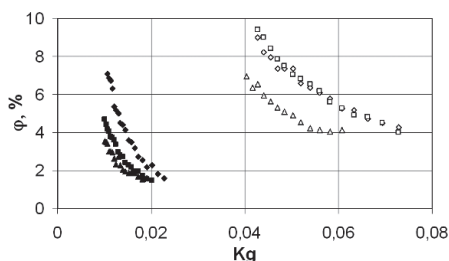
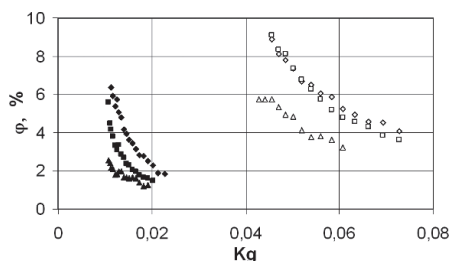
Badania przedstawione w tej pracy miały na celu określenie wpływu wybranych parametrów na udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu ciecz-gaz-biofaza w zbiorniku z mieszadłem.

Aparatura doświadczalna

Pomiary udziału φ gazu zatrzymanego w cieczy zostały przeprowadzone w mieszalniku z przegrodami o objętości roboczej $V_L = 0,2 \text{ m}^3$. Zbiornik o średnicy $D = 0,634 \text{ m}$ był napełniony cieczą do wysokości $H = D$. Do mieszania zastosowano kolejno trzy mieszadła szybkoobrotowych: turbinowe *Rushtona*, turbinowe *Smitha* lub A 315. Podstawowe wymiary mieszalnika i mieszadeł zestawiono w tab. 1 oraz 2.

Tab. 1. Podstawowe wymiary mieszalnika

Lp.	Parametry geometryczne mieszalnika	Wartość parametru
1.	Liczba przegród	$J = 4$
2.	Szerokość przegrody	$B = 0,1D$
3.	Liczba mieszadeł	$i = 1$
4.	Średnica pierścienia dystrybutora gazu	$d_d = 0,7d$
5.	Odległość mieszadła od dna zbiornika	$h = 0,33H$
6.	Odległość dystrybutora gazu od dna zbiornika	$e = 0,5h$

Rys. 1. Zależność $\varphi = f(Kg)$ dla układu 10% wodny roztwór sacharozy-powietrze; ■, ▲, ◆ – $w_{og} = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; □, △, ◇ – $w_{og} = 7,03 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; ◆, ◇ – TR; ■, □ – CD6; △, ▲ – A 315Rys. 2. Zależność $\varphi = f(Kg)$ dla układu 10% wodny roztwór sacharozy-powietrze-1% zawiesina drożdży; ■, ▲, ◆ – $w_{og} = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; □, △, ◇ – $w_{og} = 7,03 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; ◆, ◇ – TR; ■, □ – CD6; △, ▲ – A 315

Tab. 2. Podstawowe wymiary mieszadeł

Lp.	Mieszadło	d/D	a/d	b/d	Z	β
1.	Turbinowe <i>Rushtona</i> (TR)	0,33	0,25	0,2	6	
2.	Turbinowe <i>Smitha</i> (CD 6)	0,33	0,25	0,2	6	
3.	A 315	0,33	0,51	0,34	4	45

Badania wykonano dla układu, w którym fazą ciekłą był wodny roztwór sacharozy o stężeniu masowym 10%, fazą gazową – powietrze, a biofazą – zawiesina drożdży o stężeniu masowym 0,5% lub 1%. Parametry fizyczne układu zmieniały się w następujących zakresach: η [Pas] $\in <2 \cdot 10^{-3}; 3,3 \cdot 10^{-3}>$; ρ [kg/m^3] $\in <1020; 1033>$; σ [N/m] $\approx 0,8$. Pomiary wykonano, w zakresie burzliwego przepływu cieczy w zbiorniku ($Re \in <40000; 220000>$), dla pięciu wartości natężenia przepływu V_g powietrza przez mieszalnik:

V_g [m^3/s] $\in <5,56 \cdot 10^{-4}; 2,28 \cdot 10^{-3}>$; w_{og} [m/s] $\in <1,76 \cdot 10^{-3}; 10,55 \cdot 10^{-3}>$ gdzie: $w_{og} = 4V_g/(\pi D^2)$.

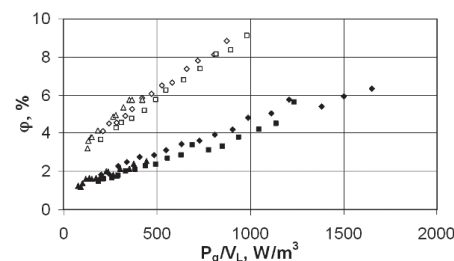
Udział gazu zatrzymanego w cieczy obliczano jako średnią wartość z 10 odczytów wysokości słupa mieszaniny ciecz-gaz-biofaza na pionowej ścianie mieszalnika.

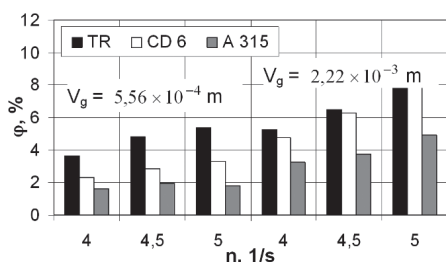
Wyniki badań

Wpływ natężenia przepływu gazu, częstości obrotów mieszadła n , stężenia zawiesiny drożdży oraz typu mieszadła na udział gazu zatrzymanego w cieczy analizowano na podstawie około 500 punktów pomiarowych uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań.

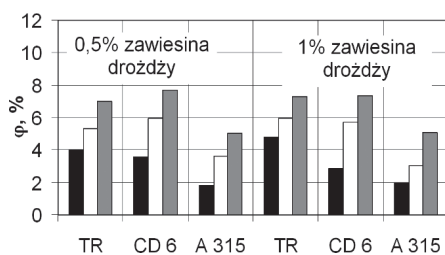
Zależność $\varphi = f(Kg)$ dla układów 10% wodny roztwór sacharozy-powietrze oraz 10% wodny roztwór sacharozy-powietrze-1% zawiesina drożdży przedstawiono na rys. 1 i 2. W obu przypadkach, przy założeniu stałej wartości liczby przepływu gazu $K = V_g/(nd^3)$, najwyższe wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy zależą od natężenia przepływu gazu przez mieszalnik V_g . W przypadku niższych natężeń przepływu gazu przez mieszalnik, najwyższe wartości φ uzyskano dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Rushtona* (TR). Dla wyższych wartości V_g , wartości udziału φ gazu zatrzymanego w cieczy otrzymane dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Smitha* (CD 6) są porównywalne z wynikami uzyskanymi dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Rushtona* (TR). Wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy zmniejszają się ze wzrostem wartości liczby przepływu gazu Kg . Wpływ ten zmniejsza się ze wzrostem natężenia przepływu gazu przez mieszalnik.

Na rys. 3. przedstawiono wpływ jednostkowej mocy mieszania na udział gazu zatrzymanego w cieczy ($\varphi = f(P_g/V_L)$). Stwierdzono, że ze wzrostem P_g/V_L zwiększa się znacznie (nawet 2-3 krotnie) udział gazu zatrzymanego w cieczy. Wpływ ten jest tym większy, im wyższe jest

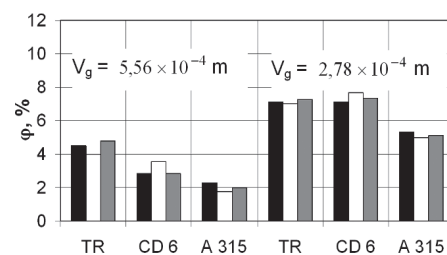
Rys. 3. Zależność $\varphi = f(P_g/V_L)$ dla układu 10% wodny roztwór sacharozy-powietrze-1% zawiesina drożdży; ■, ▲, ◆ – $w_{og} = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; □, △, ◇ – $w_{og} = 7,03 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$; ◆, ◇ – TR; ■, □ – CD6; △, ▲ – A 315



Rys. 4. Zależność $\varphi = f(n)$ dla układu 10% wodny roztwór sacharozy-powietrze – 1% zawiesina drożdży



Rys. 5. Zależność $\varphi = f(\text{typ mieszadła})$ $n = 4,5$ 1/s,
 ■ – $V_g = 5,56 \cdot 10^{-4}$ m³/s; □ – $V_g = 1,67 \cdot 10^{-4}$ m³/s;
 ■ – $V_g = 2,78 \cdot 10^{-3}$ m³/s



Rys. 6. Zależność $\varphi = f(\text{typ mieszadła})$ $n = 4,5$ 1/s,
 ■ – 0% zawiesina drożdży; □ – 0,5% zawiesina drożdży;
 ■ – 1% zawiesina drożdży

natężenie przepływu gazu w mieszalniku. Przy założeniu stałej wartości jednostkowej mocy mieszania P_g/V_L wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy otrzymane dla trzech przebadanych mieszadeł różnią się nieznacznie. Różnice te zwiększają się ze wzrostem jednostkowej mocy mieszania P_g/V_L .

Wpływ częstości obrotów mieszadła na udział gazu zatrzymanego w cieczy przedstawiono w postaci zależności $\varphi = f(n)$ na rys. 4. Ze wzrostem częstości obrotów mieszadła, w całym zakresie pomiarowym, udział gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się nawet ponad 2-krotnie. Przy założeniu stałej wartości częstości obrotowej mieszadła udział gazu zatrzymanego w cieczy zwiększa się, w przypadku mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub *Smitha* ponad 2,5 razy ze wzrostem natężenia przepływu gazu V_g w mieszalniku.

Wpływ typu mieszadła na udział gazu zatrzymanego w cieczy pokazano na rys. 5. Wyniki uzyskane dla 0,5% zawiesiny drożdży w większości przypadków wskazują, że nieco wyższe wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy φ otrzymano dla mieszalnika z mieszadłem CD 6. Zwiększenie stężenia z 0,5% do 1% natomiast powoduje, że wyższe wartości φ otrzymano dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Rushtona*. Różnice pomiędzy wartościami otrzymanymi dla mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Smitha* oraz turbinowym *Rushtona* zmniejszają się ze wzrostem natężenia przepływu gazu V_g .

Wpływ stężenia zawiesiny drożdży na udział gazu zatrzymanego w cieczy przedstawiono na rys. 6. Przy założeniu stałych wartości częstości obrotów mieszadła oraz natężenia przepływu gazu przez mieszalnik stwierdzono niewielki wpływ stężenia zawiesiny drożdży na udział gazu zatrzymanego w cieczy.

Wyniki badań udziału gazu zatrzymanego w cieczy uwzględniając liczbę przepływu gazu Kg oraz liczbę *Webera* przedstawiono w postaci zależności

$$\varphi = aKg^bWe^c \quad (1)$$

Wartości współczynnika a , wykładników b , c zestawiono w tab. 3.

Tab. 3. Wartości współczynników a oraz wykładników b , c w równ. 1

Lp.	Mieszadło	$a \cdot 10^4$	b	c	$\pm \Delta$
1.	Turbinowe <i>Rushtona</i> (TR)	1,041	0,250	0,919	6
2.	Turbinowe <i>Smitha</i> (CD6)	1,013	0,548	1,036	8
3.	A 315	6,496	0,565	0,742	11

Równ. (1) obowiązuje w następującym zakresie zmiennych $Kg \in <0,01; 0,09>$; $We \in <800; 3800>$.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że największy (nawet 2-3 krotny) wpływ na udział gazu zatrzymanego w cieczy mają częstość obrotów mieszadła oraz natężenie przepływu gazu w mieszalniku.

Wpływ typu mieszadła na udział gazu zatrzymanego mieszadła zależy, w przypadku mieszalnika z mieszadłem turbinowym *Rushtona* lub *Smitha*, od natężenia przepływu gazu w mieszalniku.

We wszystkich przebadanych układach najniższe wartości udziału gazu zatrzymanego w cieczy otrzymano dla mieszalnika z mieszadłem A 315.

Wpływ stężenia zawiesiny drożdży na φ jest nieznaczny.

Oznaczenia

- B – szerokość przegrody, [m]
- d – średnica mieszadła, [m]
- D – wewnętrzna średnica mieszalnika, [m]
- d_d – średnica dystrybutora gazu, [m]
- e – odległość dystrybutora gazu od dna zbiornika, [m]
- h – odległość mieszadła od dna zbiornika, [m]
- H – wysokość słupa cieczy w mieszalniku, [m]
- n – częstość obrotów mieszadła, [1/s]
- P_g – moc mieszania dla układu ciecz-gaz-biofaza, [W]
- V_g – objętościowe natężenie przepływu gazu, [m³/s]
- V_L – objętość robocza cieczy, [m³]
- η – dynamiczny współczynnik lepkości, [Pa·s]
- ρ – gęstość cieczy, [kg/m³]
- σ – napięcie powierzchniowe cieczy, [N/m]
- φ – udział gazu zatrzymanego w cieczy
- $Kg = V_g/(nd^3)$ – liczba przepływu gazu
- $Re = nd^2\rho/\eta$ – liczba *Reynoldsa*
- $We = n^2d^3\rho/\sigma$ – liczba *Webera*

LITERATURA

- Adamiak R., 2005. *Badania warunków dyspergowania gazu w cieczy w mieszalnikach różnej skali*. Praca doktorska, Pol. Szczecińska, Szczecin
- Ahmed S.U., Ranganathan P., Pandey A., Sivaraman S., 2010. Computational fluid dynamics modeling of gas dispersion in multi impeller bioreactor. *J. Biosci. Bioeng.*, **109**, 6, 588-597. DOI: 10.1016/j.jbiosc2009.11.014
- Alves S.S., Maia C.I., Vasconcelos J.M.T., 2002. Experimental and modeling study of gas dispersion in a double turbine stirred tank. *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 3, 487-496. DOI: 10.1016/S0009-2509(01)00400-6
- Cudak M., 2011. Process characteristics for the mechanically agitated gas-liquid systems in the turbulent fluid flow. *Przem. Chem.*, **90**, 9, 1628-1632
- Kamiński J., 2004. *Mieszanie układów wielofazowych*. WNT, Warszawa
- Kamiński J., Niżnik J., 2001. Gas hold-up for gas-liquid system agitated with dual impellers. *Inż. Chem. Proc.*, 2001, 3C, 591-597
- Kamiński J., Niżnik J., 2002. The impact of the second impeller on the effects of gas dispersion in liquid. *Inż. Ap. Chem.*, **41**, nr 33, 4s, 335-336
- Libudzisz Z., Kowal K., Żakowska Z., 2008. *Mikrobiologia techniczna*, t. 2, PWN, Warszawa
- Major-Godlewska M., Karcz J., 2011. Zawartość gazu w cieczy w zbiorniku wielokolaboratoryjnym z mieszadłem i pionowymi przegrodami rurowymi. *Inż. Ap. Chem.*, **50**, 4, 20-21
- Major-Godlewska M., Karcz J., 2012. Agitation of a gas-solid-liquid system in a vessel with high Speer impeller and vertical tubular coil. *Chem. Pap.*, **66**, 6, 566-573. DOI: 10.2478/s11696-012-0148-0
- Moucha T., Linek V., Prokopowa E., 2003. Gas hold-up, mixing time and gas-liquid volumetric mass transfer coefficient of various multiple configurations: Rushton turbine, pitched blade and techmix impeller and their combinations. *Chem. Eng. Sci.*, **58**, 9, 1839-1846. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00682-6
- Shewale S.D., Pandit A.B., 2006. Studies in multiple impeller agitated gas-liquid contactors. *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 2, 489-504. DOI: 10.1016/j.ces.2005.04.078
- Stręk F., 1981. *Mieszanie i mieszalniki*. WNT, Warszawa