

Jacek STELMACH¹, František RIEGER², Tomáš JIROUT²

e-mail: jacek.stelmach@p.lodz.pl

¹ Katedra Aparatury Procesowej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

² Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze, Česká republika

Hydrodynamika w mieszalniku z mieszadłem ze zwiniętymi śrubowo łopatkami wstęgowymi

Wstęp

Mieszanie biozawiesin jest ważnym procesem przemysłowym, np. w produkcji biogazu. Powinno być ono intensywne, aby zapewnić mikroorganizmom dobre warunki odżywiania, ale na tyle łagodne, aby zminimalizować dezintegrację komórek. Rozrywanie błony (ściany) komórkowej może być powodowane albo mechanicznym działaniem łopatek mieszadła na komórki albo naprężeniami jakie powstają w cieczy podczas jej ruchu burzliwego. Te naprężenia wywodzące się od pulsacji prędkości u' , a niezależne od lepkości płynu, opisuje zależność [Emчев, 1978]

$$\tau_{ij} = -\rho \begin{bmatrix} \frac{u_x'^2}{u_x' u_y'} & \frac{u_x' u_y'}{u_y'^2} & \frac{u_x' u_z'}{u_y' u_z'} \\ \frac{u_x' u_y'}{u_x' u_z'} & \frac{u_y'^2}{u_y' u_z'} & \frac{u_y' u_z'}{u_z'^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Pierwszy znak w indeksie oznacza kierunek osi, do której jest prostopadła powierzchnia dla której obliczane są naprężenia, a drugi znak indeksu oznacza kierunek siły.

Wspomnianym warunkom mieszania biozawiesin powinno odpowiadać mieszadło ze zwiniętymi śrubowo łopatkami przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Mieszadło ze zwiniętymi śrubowo łopatkami wstęgowymi

Mieszadło tego typu może pracować jako szybko- i wolnoobrotowe. W trakcie realizacji grantu POIG.01.03.01-00132/08-00 trójłopatkowe mieszadło tego typu pracowało z częstością obrotową $N = 1 \text{ s}^{-1}$ nieprzerwanie przez ponad dwa lata w fermentorze wytwarzającym biogaz. Informacje dotyczące zapotrzebowania mocy i czasów zmieszania zawarte są w poprzedniej pracy [Rzyski i Stelmach, 2005].

Celem niniejszej pracy było określenie hydrodynamiki oraz naprężeń turbulentnych generowanych przez omawiane mieszadło i porównanie ich z naprężeniami powstającymi podczas mieszania cieczy przez mieszadło turbinowo-tarczowe (Rushtona).

Badania doświadczalne

Aparatura. Badania przeprowadzono w szklanym płaskodennym zbiorniku o średnicy $T = 292 \text{ mm}$ napełnionym wodą do wysokości $H = 300 \text{ mm}$. Trójłopatkowe mieszadło (skok łopatki $s = 300 \text{ mm}$) miało średnicę $D = 150 \text{ mm}$ i było zawieszony w połowie wysokości cieczy. Częstość obrotowa wynosiła $N = 2 \text{ s}^{-1}$. Przeprowadzono pomiary w zbiorniku bez przegród i z czterema standardowymi przegradami ($B = 0,1 \cdot T$).

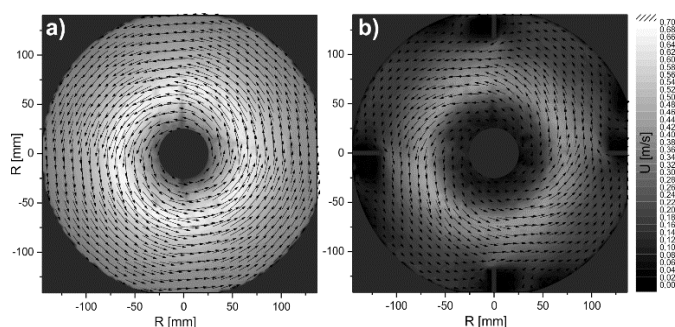
Metodyka. Do określenia pól prędkości użyto systemu PIV firmy LaVision. Obrazy rejestrowano kamerą Imager Pro 4M o rozdzielczości 2048 px x 2048 px z obiektywem Vario-Pancolar 2,7-3,5/35-70 z częstością 2,7 Hz. Zastosowano dwuprzebiegową analizę danych z końcowym rozmiarem analizowanego obszaru 32 px x 32 px

bez nakładkowania. Zmierzono prędkości na wysokościach $h = 50, 100, 150$ i 200 mm nad dnem zbiornika oraz w płaszczyźnie osiowej ok. 2 mm przed przegradą.

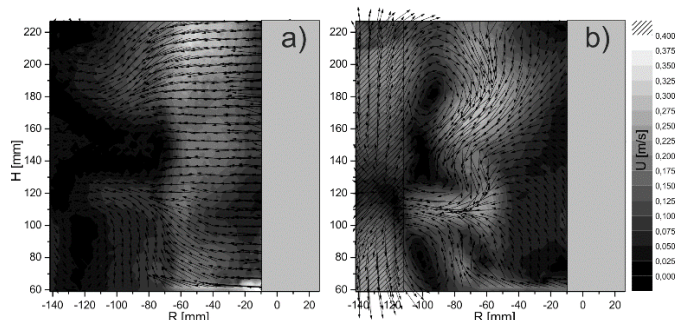
Wyniki i dyskusja

Na rys. 2 przedstawiono mapy prędkości cieczy na wysokościach $h = 150 \text{ mm}$. Przy braku przegród przepływ miał charakter obwodowy, a największe prędkości występowały w rejonie łopatek mieszadła. Przegrady wyhamowywały ruch okrężny (prędkości maksymalne zmniejszały się dwukrotnie w obszarze mieszadła, a pod nim nawet 10-krotnie), ale nadal cyrkulacja cieczy miała charakter obwodowy.

W płaszczyźnie osiowej obserwowano dość złożony ruch cieczy. Przy braku przegród (Rys. 3a) występowały dwa jądra cyrkulacji umiejscowione symetrycznie względem środka wysokości mieszadła. Po zainstalowaniu przegród (Rys. 3b) nadal obserwowano dwa jądra cyrkulacji, ale położone niesymetrycznie. W górnej części mieszalnika jądro cyrkulacji było przesunięte w kierunku dna zbiornika.



Rys. 2. Prędkości na wysokości $h = 150 \text{ mm}$
a) – zbiornik bez przegród, b) – zbiornik z przegradami



Rys. 3. Prędkości w płaszczyźnie osiowej przed przegradą
a) – zbiornik bez przegród, b) – zbiornik z przegradami

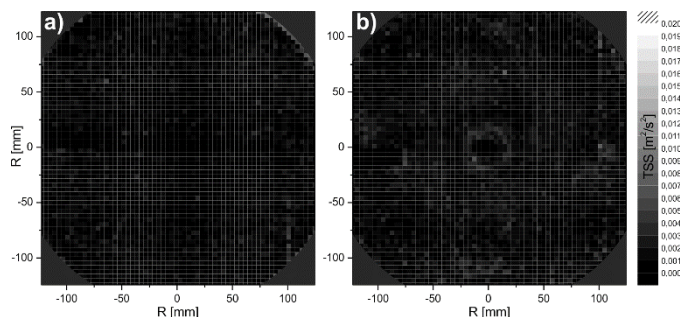
Oprogramowanie systemu PIV umożliwiło obliczenie wartości naprężeń turbulentnych (Reynoldsa) [Gryboś, 1998] w płaszczyźnie pomiarowej. Np. dla płaszczyzny Oxy [LaVision, Manual]:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(U_i - \bar{U})_x (U_i - \bar{U})_y] \quad (2)$$

oraz turbulentnych naprężeń ścinających TSS (Turbulent Shear Stress)

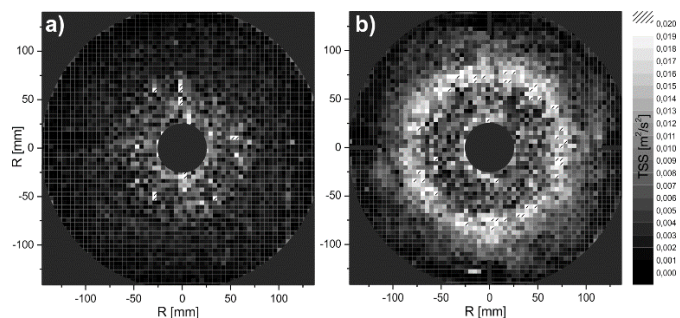
$$TSS = \sqrt{\frac{1}{4} (\tau_{yy} - \tau_{xx})^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

Rys. 4 i 5 przedstawiają rozkłady turbulentnych naprężeń ścinających na wysokościach $h = 50$ i 150 mm nad dnem. Pod mieszadłem, niezależnie czy w zbiorniku były zainstalowane przegrody, czy też nie, występuje równomierny rozkład naprężeń turbulentnych. Największe wartości osiągają wartość $TSS = 0,006 \text{ m}^2/\text{s}^2$, co po uwzględnieniu gęstości wody daje wartość około 6 Pa. Nad mieszadłem rozkład naprężeń był bardzo podobny, a jedynie w pobliżu wału naprężenia osiągały wartość $TSS = 0,014 \text{ m}^2/\text{s}^2$.



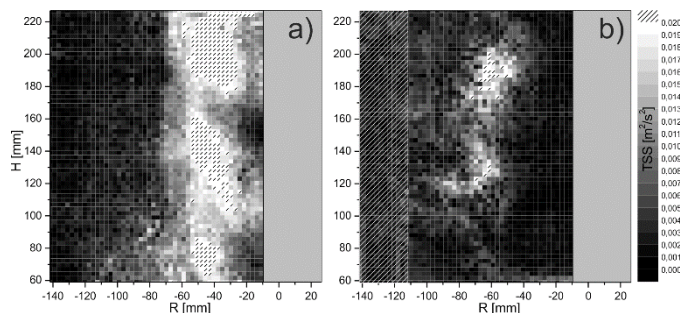
Rys. 4. Naprężenia turbulentne na wysokości $h = 50$ mm
a) – zbiornik bez przegród, b) – zbiornik z przegrodami

Na wysokości mieszadła widoczne były różnice w rozkładach i wartościach naprężeń dla układu z i bez przegród. Przy braku przegród w zbiorniku największe naprężenia występowały wewnątrz mieszadła i osiągały wartość $TSS = 0,014 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Zainstalowanie przegród zmienia nie tylko cyrkulację cieczy (rys. 2 i 3), ale wpływa także na rozkład i wartości naprężeń turbulentnych. W tym przypadku największe wartości przekraczały $0,020 \text{ m}^2/\text{s}^2$ i występowały przy wstęgu łopatek.



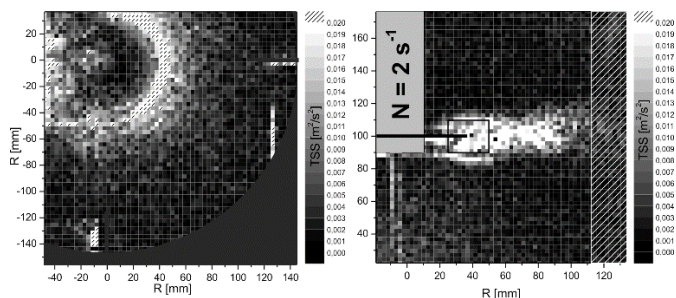
Rys. 5. Naprężenia turbulentne na wysokości $h = 150$ mm
a) – zbiornik bez przegród, b) – zbiornik z przegrodami

Na rys. 6 przedstawiono rozkład naprężeń turbulentnych w płaszczyźnie osiowej. Ze względu na branie do obliczeń (zależn. (2)) różnych składowych nie można bezpośrednio porównywać wartości naprężeń z rys. 5 i 6. Jednak przy braku przegród (Rys. 6a) największe wartości ($TSS > 0,020 \text{ m}^2/\text{s}^2$) występowały w przestrzeni między wałem a łopatkami, podczas gdy w obecności przegród maksymalne wartości obserwowano w pobliżu łopatek mieszadła (Rys. 6b). Należy też zauważyć, że w zbiorniku bez przegród obszar dużych wartości naprężeń był większy.



Rys. 6. Naprężenia turbulentne w płaszczyźnie osiowej
a) – zbiornik bez przegród, b) – zbiornik z przegrodami

Dla porównania na rys. 7 przedstawiono rozkład naprężeń turbulentnych w pobliżu mieszadła turbinowo-tarczowego (*Rushtona*), gdyż przez wiele lat mieszadło tego typu o średnicy około 1/3 średnicy zbiornika (fermentora) było uważane za optymalną konstrukcję do mieszania cieczy w fermentorach [Paul i in., 2004]. W tym przypadku uzyskano zgodność z danymi literaturowymi [Ito i in., 1975; Manhoust, 1992; Galletti i in., 2004]. Wyniki przeprowadzonych badań [Kuras, 2018] wykazały, że mieszadło *Rushtona* powoduje znaczącą dezintegrację mikroorganizmów w mieszalniku w porównaniu z mieszadłem śmigłowym.



Rys. 7. Naprężenia turbulentne w pobliżu turbiny *Rushtona*

Dla obu prezentowanych mieszadeł maksymalne wartości naprężeń turbulentnych są zbliżone i przekraczają wartość $0,020 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (czyli około 20 Pa po uwzględnieniu gęstości mieszanego medium).

Wnioski

Mieszadło ze zwiniętymi śrubowo łopatkami wstęgowymi pracujące w zbiorniku z przegrodami powoduje złożoną i intensywną cyrkulację cieczy w mieszalniku. Powinno to zapewnić dobre warunki do rozwoju mikroorganizmów.

Maksymalne wartości naprężeń burzliwych w podczas mieszania cieczy mieszadłem ze zwiniętymi śrubowo łopatkami wstęgowymi oraz turbiną *Rushtona* są niemal identyczne. Jednak wstępna analiza porównawcza z mieszadłem śmigłowym wskazuje, że naprężenia turbulentne mogą być zbyt słabe, aby dezintegrować komórki mikroorganizmów, a przyczyną obserwowanych uszkodzeń komórek jest mechaniczne działanie łopatek mieszadła. Potwierdzenie tego wniosku wymaga jednak przeprowadzenia dalszych badań porównawczych.

LITERATURA

- DaVis 7.2 Software, Product manual, Item-number: 1005xxx
 Емцев Б.Т., (1978). *Техническая гидромеханика*, Машиностроение, Москва
 Galletti C., Brunazzi E., Pintus S., Paglianti A., Yianneskis M., (2004). A study of Reynolds stresses, triple products and turbulence states in a radially stirred tank with 3-D laser anemometry. *Chem. Eng. Res. Des.*, 82, 1214-1228. DOI: 10.1205/cerd.82.9.1214.44151
 Gryboś R., (1998). *Podstawy mechaniki płynów. Część 2: Turbulencja, Metody numeryczne, zastosowania techniczne*, PWN, Warszawa
 Ito S., Ogawa K., Yoshida N., (1975). Turbulence in impeller stream in a stirred vessel. *J. Chem. Eng. Jap.*, 8, 206-209. DOI: 10.1252/jcej.8.206
 Kuras M., (2018). *Badania wpływu naprężeń tnących na dezintegrację komórek mikroorganizmów*. Praca magisterska, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź
 Mahouast M. (1992). *Reynolds stresses and stirring regimes of a Rushton turbine*. [In:] King R. (ed.) Fluid mechanics of mixing. Fluid Mechanics and Its Applications, vol 10. Springer, Dordrecht, 191-196. DOI: 10.1007/978-94-015-7973-5_22
 Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M., (2004). *Handbook of industrial mixing. Science and practice*, John Wiley & Sons, New Jersey
 Rzymki E., Stelmach J., (2005). Napowietrzanie z użyciem mieszadła ze zwiniętymi śrubowo łopatkami wstęgowymi. *Inż. Ap. Chem.*, 44(5s), 58-62

Praca powstała w ramach grantu OP RDE nr CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000753 „Research center for low-carbon energy technologies” finansowanego przez Ministerstwo Edukacji, Młodzieży i Sportu Republiki Czeskiej (Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky).