

Ryszard WÓJTOWICZ¹, Jan TALAGA¹, Michał DYLAĞ², Jerzy KAMIENSKI¹, Jerzy ROSIŃSKI¹, Wiesław SZATKO¹

e-mail: rwojtowi@pk.edu.pl

¹ Katedra Aparatury Przemysłowej, Instytut Inżynierii Ciepłej i Procesowej, Politechnika Krakowska, Kraków² Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków

Symulacje numeryczne i badania doświadczalne przepływu cieczy w reaktorze rurowym z przegrodami o różnej szerokości

Wstęp

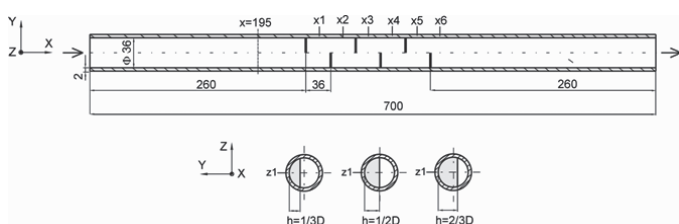
Rurowe reaktory przepływowe stanowią interesującą alternatywę dla powszechnie wykorzystywanych w przemyśle mieszalników mechanicznych z mieszadłami obrotowymi. Charakteryzuje je stosunkowo prosta konstrukcja, niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, ciągłość pracy oraz wysoki stopień zmieszania przy krótkim czasie przebywania cieczy wewnątrz aparatu [Stręk, 1981; Złokarnik, 2001; Paul i in., 2004]. Mogą być zatem wykorzystywane w różnych technologiach przemysłowych, zwłaszcza tam, gdzie stosowanie tradycyjnych mieszalników może być mało ekonomiczne, np. podczas wytwarzania emulsji lub zawiesin o dużych lepkościach [Grece, 1982; Furling i in., 2000], jako reaktory chemiczne z jednoczesną wymianą ciepła [Craig, 1987], także jako bioreaktory, szczególnie dla ziół biologicznych degradalnych z czasem [Paul i in., 2004].

Mieszanie cieczy wewnątrz przepływowego reaktora rurowego odbywa się dzięki burzliwości doprowadzonego strumienia płynu. Zwiększenie intensywności mieszania można uzyskać poprzez wprowadzenie do wnętrza rury odpowiednich elementów np. przegród lub wkładek zaburzających przepływ lub przez odpowiednie ukształtowanie jej ścianek [Stręk, 1981; Paul i in., 2004]. Wewnętrzne elementy w aparacie mogą mieć różną konstrukcję, począwszy od prostych przegród pionowych lub pochylonych o różnej geometrii, poprzez specjalnie ukształtowane elementy spiralne kierujące i rozdzielające strugę cieczy, do tworzących wkładkę odpowiednio ukształtowanych elementów tłoczonych, zbliżonych swoim wyglądem do typowego wypełnienia pakietowego. Ich liczba, długość i rozmieszczenie wewnątrz rury mieszalnika rzutują na charakter i rodzaj przepływu cieczy oraz intensywność jej burzliwości a tym samym tempo przebiegu realizowanych tam procesów.

Celem pracy było przeprowadzenie identyfikacji przepływu cieczy w reaktorze rurowym z przegrodami o różnej szerokości na podstawie wyników symulacji numerycznych CFD [Jaworski, 2005] oraz badań doświadczalnych prowadzonych z wykorzystaniem anemometrii laserowej LDA [Albrecht i in., 2003]. Uzyskane wyniki będą mogły być praktycznie wykorzystane podczas projektowania i optymalizacji konstrukcji przepływowych reaktorów rurowych, np. takich, które mogą znaleźć zastosowanie do koagulacji i flokulacji cząstek stałych i kolidów trudnosedymentujących zawiesin w procesach ochrony środowiska i uzdatniania wody.

Zakres i metodyka badań

Geometrię badanego reaktora pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Geometria reaktora rurowego z przegrodami

Wewnątrz cylindrycznej, poziomej rury o średnicy wewnętrznej $D = 0,036$ [m] i długości całkowitej $L = 0,7$ [m] rozmieszczono naprzemiennie sześć jednakowych, pionowych przegród. Szerokość przegród

zmieniano w zakresie: $h = 1/3D$, $h = 1/2D$ (przegrody o kształcie półkola) oraz $h = 2/3D$, odległość między nimi (podziałka) była stała i równa średnicy reaktora $l = D = 0,036$ [m]. Cieczą modelową przepływającą przez reaktor była woda ($\rho = 998$ [kg/m³], $\mu = 0,001$ [Pa·s]), prędkość jej przepływu dobrano tak, by w przestrzeni rurowej będącej wlotem do reaktora uzyskać warunki przepływu burzliwego ($Re = 5\ 000$).

Symulacje przepływu wykonano w oparciu o wyniki modelowania numerycznego, wykorzystując podczas obliczeń kody numerycznej mechaniki płynów (CFD). Model geometryczny reaktorów i siatki numeryczne tworzone w preprocesorze *Gambit 2.4* [Fluent Inc., 2006]. W każdym z nich wygenerowano podobne jakościowo siatki, zbudowane z elementów czworosiennych (tetrahedral) o łącznej liczbie komórek obliczeniowych wynoszącej: $5,324 \cdot 10^5$ ($h = 1/3D$), $5,761 \cdot 10^5$ ($h = 1/2D$) oraz $5,291 \cdot 10^5$ ($h = 2/3D$).

Przepływ cieczy w aparacie opisano matematycznie za pomocą standardowych równań transportu masy i pędu *Naviera-Stokesa* uśrednianych metodą *Reynoldsa* (RANS). Burzliwość modelowano z wykorzystaniem klasycznego modelu burzliwości *Standard k-ε* i standardowych funkcji przyściennych.

Obliczenia numeryczne prowadzono z wykorzystaniem solvera pakietu obliczeniowego *Ansys Fluent 14.0* [Ansys Inc., 2011], parametry modelu oraz metodykę prowadzenia symulacji opisano szczegółowo w pracy [Wójtowicz, 2013].

Przedmiotem przeprowadzonych badań doświadczalnych była weryfikacja rzeczywistych rozkładów prędkości cieczy w reaktorze rurowym. Reaktor modelowy posiadał parametry geometryczne zgodne z parametrami przyjętymi w trakcie symulacji numerycznych (Rys. 1). Pomiarów chwilowych prędkości przepływu cieczy dokonano za pomocą dwukanałowego dopplerowskiego anemometru laserowego. Jako cząstek traseru przepływu użyto posrebrzanych cząstek szklanych o średniej średnicy równej $10\ \mu\text{m}$. Do akwizycji i przetwarzania sygnałów pomiarowych zastosowano procesor sygnałów typu BSA (*Dantec*). W każdym punkcie pomiarowym realizowano 10000 pomiarów przy częstotliwości próbkowania do 1 kHz. Reaktor rurowy obudowany był prostopadłościennym płaszczem wykonanym z tego samego materiału co rura i przegrody, wypełnionym wodą celem minimalizacji błędów załamania światła przy przejściu wiązek laserowych przez ściankę reaktora. Na podstawie wyników pomiarów chwilowych prędkości cieczy wyznaczano średnie prędkości przepływu, składowe fluktuacyjne prędkości oraz wielkość kinetycznej energii turbulencji.

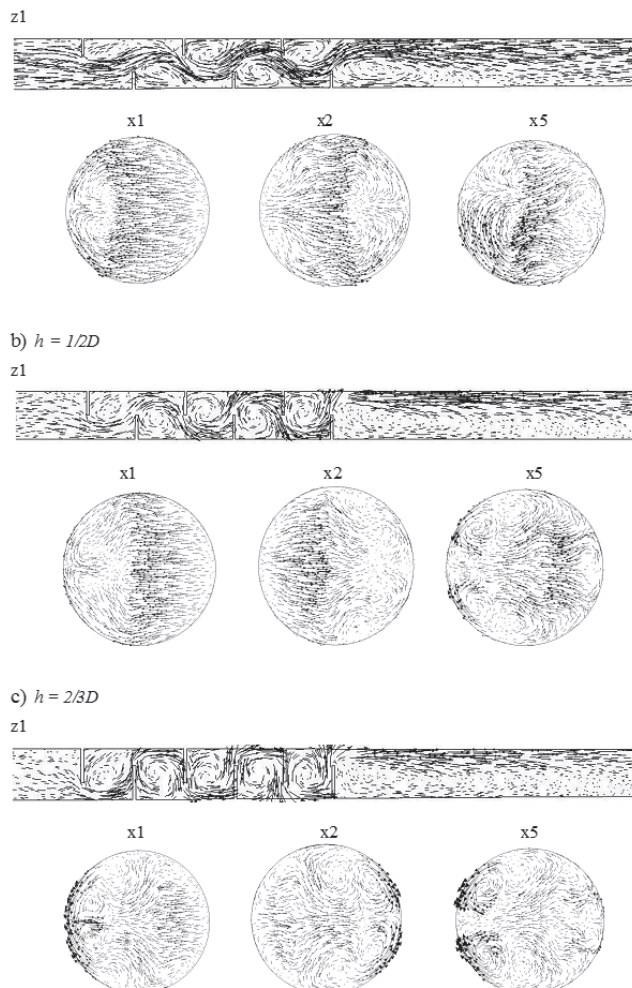
Wyniki badań i wnioski

Na rys. 2 pokazano wektorowe mapy przepływu cieczy w badanych reaktorach, w poziomej (z1) i wybranych, pionowych (x1, x2, x5) płaszczyznach jego przekroju, usytuowanych w jednakowych odległościach odpowiednio za 1, 2 i 5 przegrodą. Profile ilustrujące przepływ potwierdzają celowość stosowania przegród, intensyfikują one bowiem ruch cieczy wewnątrz aparatu, inicjując dodatkowo jej burzliwość.

Ciecz wpływająca do reaktora przed pierwszą przegrodą zmienia swój kierunek i opływa ją, co skutkuje tworzeniem się za kolejnymi przegrodami wyraźnych, kołowych wirów dużej skali, zwiększających sukcesywnie swój rozmiar. Słabszy ruch wirowy widoczny jest natomiast w pionowych płaszczyznach przekroju. Generowane wiry mają wtedy mniejszą średnicę, a ich lokacja zależy od usytuowania przegród

w aparacie, przy czym podobny model przepływu widoczny jest za przegrodami usytuowanymi z tej samej strony rury.

W przypadku przegród najwyższych ($h = 1/3D$) główny, osiowy (w kierunku osi x) strumień przepływu cieczy widoczny jest przede wszystkim blisko osi rury, zaś powstające za przegrodami wiry dużej skali mają wydłużony i eliptyczny kształt (Rys. 2a).



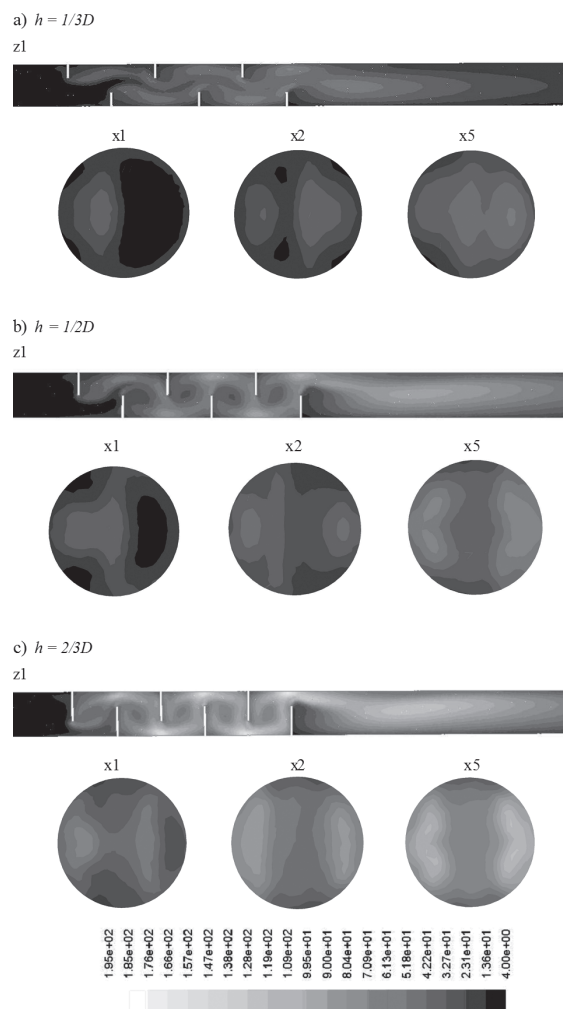
Rys. 2. Wektorowe mapy przepływu cieczy w badanych reaktorach w poziomej (z1) i pionowych (x1, x2, x5) płaszczyznach ich przekrojów a) $h = 1/3D$, b) $h = 1/2D$, c) $h = 2/3D$

Zwiększenie szerokości przegród skutkuje (Rys. 2b,c) odchyleniem strugi przepływu głównego w kierunku ścianki reaktora. Wiry powstające za przegrodami przyjmują kołowy kształt i zwiększają swój rozmiar, obejmując – w przypadku przegród najszerzych ($h = 2/3D$) – swoim zasięgiem całą przestrzeń między przegrodami (Rys. 2c). Na przedstawionych mapach widoczny jest również niesymetryczny rozkład prędkości cieczy w strefie, gdzie nie ma już przegród (za ostatnią, 6. przegrodą). W obszarze tym, w pobliżu ścianki rury reaktora widoczne są większe prędkości cieczy będące wynikiem zakłócenia przepływu przez przegrody.

Podczas prowadzonych symulacji numerycznych analizowano również wpływ szerokości stosowanych przegród na burzliwość przepływu cieczy w reaktorze. Parametrem dla którego dokonano porównań była intensywność turbulencji I , definiowana jako stosunek uśrednionych w czasie wartości pulsacji prędkości do średniej prędkości przepływu u_w , przyjętej jako prędkość cieczy na wlocie do reaktora:

$$I = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u_w} \quad (1)$$

Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 3, w celu ułatwienia porównania mapy wykonano w tej samej skali.

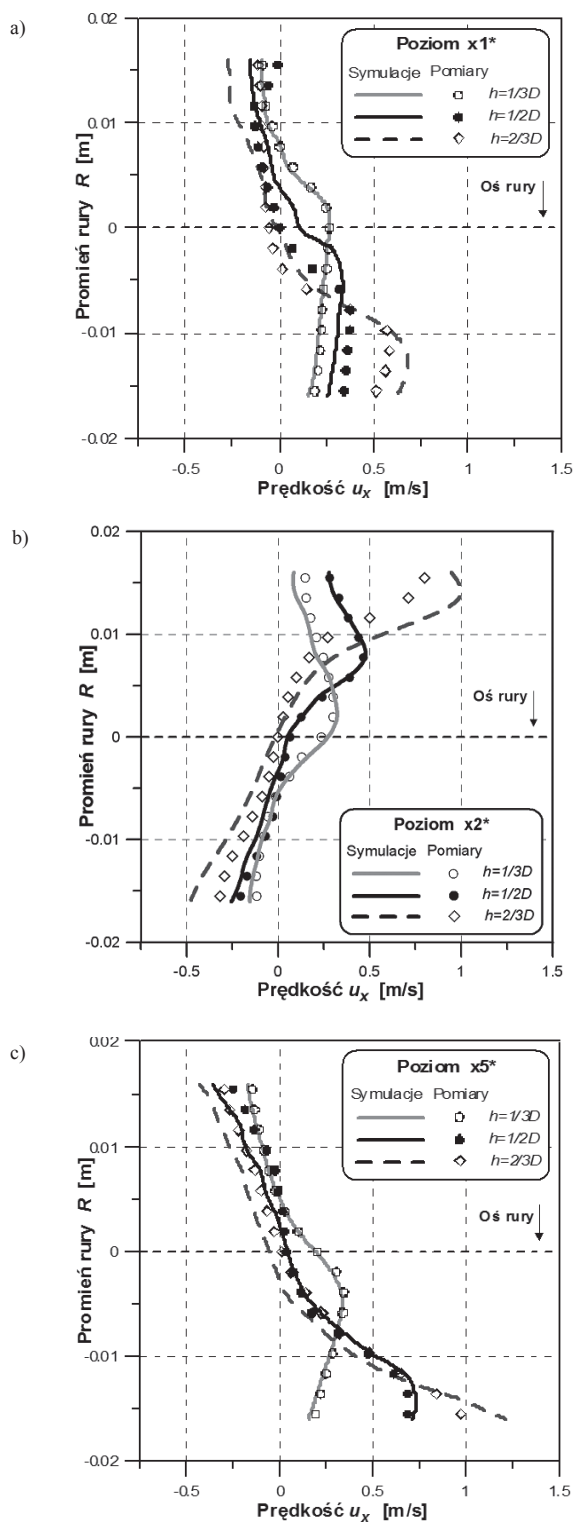


Rys. 3. Konturowe mapy intensywności turbulencji I [%] w badanych reaktorach w poziomej (z1) i pionowych (x1, x2, x5) płaszczyznach ich przekrojów a) $h = 1/3D$, b) $h = 1/2D$, c) $h = 2/3D$

Prezentowane mapy potwierdzają istotny wpływ geometrii i wymiarów przegród na burzliwość przepływu cieczy wewnątrz reaktora. Za kolejnymi przegrodami burzliwość cieczy rośnie, osiągając wartości maksymalne blisko ścianki rury, na linii przedłużenia przegród. Intensywny przepływ cieczy (wysokie wartości intensywności turbulencji) widoczny jest również w każdym z reaktorów w ich końcowej części, w obszarze za przegrodami. Tam jednak strefę najwyższej burzliwości wyznaczono nie w sąsiedztwie ścianek lecz bliżej osi aparatu.

Wyznaczone numerycznie wartości intensywności turbulencji różnią się i zależą od szerokości stosowanych przegród. Ich zakres dla przegród o szerokości $h = 1/3D$, $1/2D$ i $3/2D$ wynosi odpowiednio $I = 4 \div 62\%$, $4 \div 115\%$ oraz $4 \div 195\%$. Oznacza to że w aparacie z przegrodami najszerzymi maksymalna intensywność turbulencji cieczy była około trzykrotnie wyższa niż w reaktorze, gdzie przegrody były najwęższe. Uwagę zwraca również fakt wysokich wartości intensywności ($I > 100\%$) dla aparatów z przegrodami pośrednimi ($h = 1/2D$) i najszerzymi ($h = 2/3D$). Wskazuje to na znacznie wyższe wartości pulsacyjnych składowych prędkości niż średnia prędkość przepływu, w obszarach, gdzie burzliwość cieczy generowana jest przez przegrody.

Na wykresach zamieszczonych na rys. 4 przedstawiono przykładowo porównanie wartości średnich prędkości u_x (składowa wzdłużna w kierunku przepływu w rurze) wyznaczonych na podstawie symulacji numerycznych (linie ciągłe) z prędkościami wyznaczonymi na podsta-



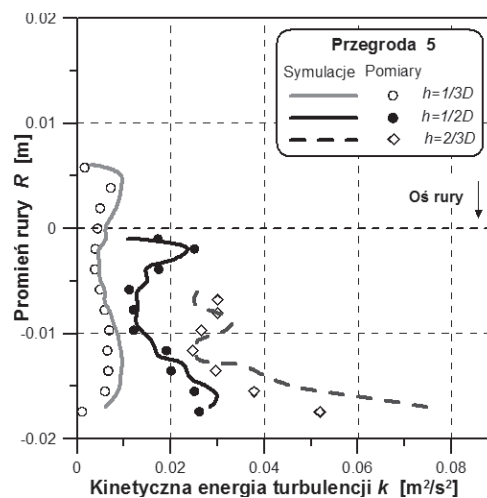
Rys. 4. Porównanie wyników symulacji i wyników pomiarów składowej prędkości średniej u_x dla badanych reaktorów o różnej szerokości przegród i poziomym przekroju a) $x1^*$, b) $x2^*$, c) $x5^*$

wie pomiarów LDA (punkty). Przedstawione tu porównanie dotyczy wybranych poziomów w reaktorze, tj. $x1^*$, $x2^*$ i $x5^*$ (linii będących przecięciem płaszczyzny poziomej z1 odpowiednio z płaszczyznami pionowymi $x1$, $x2$ i $x5$) (Rys. 1).

Wyniki średnich prędkości przepływu cieczy uzyskane w oparciu o przeprowadzone symulacje numeryczne są w dużym stopniu zgod-

ne z wynikami pomiarów prędkości w reaktorze. Średni błąd względny wynosił odpowiednio dla poszczególnych przekrojów pomiarowych 24,8; 16,3 i 19,4%.

Porównanie wyników obliczeń wielkości kinetycznej energii turbulencji na podstawie symulacji numerycznych i pomiarów przedstawiono przykładowo na wykresie zamieszczonym na rys. 5, dla przekroju leżącego w płaszczyźnie 5. przegrody (linii przechodzącej przez oś reaktora i będącej przedłużeniem przegrody). W przypadku reaktorów o szerokości przegród $h = 1/3D$ i $h = 1/2D$ uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników symulacji z wynikami pomiarów (średni błąd względny wynosił odpowiednio 15,8 i 13,2%). Natomiast dla reaktora z najszerszymi przegradami tj. $h = 2/3D$, otrzymano większą rozbieżność wyników symulacji i pomiarów, zwłaszcza w obszarze w pobliżu ścianki rury reaktora. W tym przypadku maksymalny błąd względny wynosił 47,2%.



Rys. 5. Porównanie kinetycznej energii turbulencji na podstawie wyników symulacji i wyników pomiarów w płaszczyźnie 5. przegrody dla trzech badanych reaktorów o różnych szerokościach przegród

LITERATURA

Albrecht H.E., Borys M., Damaschke N., Tropea, C., 2003. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Ansys Inc., 2011. *Ansys Fluent User's Guide*. Ansys Inc., Canonsburg

Craig T.O., 1987. Heat transfer during polymerization in motionless mixers. *Polym. Eng. Sci.*, 27, 1386-1389. DOI: 10.1002/pen.760271806.

Fluent Inc., 2006. *Gambit 2.4 User's Guide*. Fluent Inc., Lebanon

Furling O., Tanguy P.A., Choplin L., Li H.Z., 2000. *Solid liquid mixing at high concentrations with SMX static mixers* [in:]: Proceedings of the 10th European Conference on Mixing, Delft, Netherlands, 93-100. DOI: 10.1016/B978-044450476-0/50013-3

Grece H.P., 1982. Dispersion phenomena in high viscosity immiscible fluid systems and application of static mixers as dispersion devices in such systems. *Chem. Eng. Com.*, 14, 225-227. DOI: 10.1080/00986448208911047

Jaworski Z., 2005. *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej*. Exit, Warszawa

Paul E.L., Atiemo-Obeng W.A., Kresta S.M., 2004. *Handbook of industrial mixing: Science and Practice*. Wiley & Sons Inc., New Jersey

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

Wójtowicz R., 2013. Modelowanie przepływu cieczy w reaktorze rurowym. *Inż. Ap. Chem.*, 52, nr 1, 4-5

Złokarnik M., 2001. *Stirring – Theory and Practice*. Wiley-VCH, Weinheim

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego 0264/B/H03/2011/40 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.