

SYLWIA PERYT-STAWIARSKA
ZDZISŁAW JAWORSKI

Instituto Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Wydz. Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Szczecińska

Analiza porównawcza fluktuacji przepływu płynu newtonowskiego oraz nienewtonowskiego przez mieszalnik statyczny SMX

Wprowadzenie

Mieszalniki statyczne są z powodzeniem coraz częściej stosowane w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym, spożywczym czy też kosmetycznym. Jednym z częściej używanych mieszalników statycznych jest mieszalnik SMX. Mieszalnik SMX jest stosowany w wielu gałęziach przemysłu, między innymi do produkcji: polimerów, włókien syntetycznych, żywności czy też tworzyw sztucznych [A].

W ostatnich latach w literaturze przedmiotu opublikowane zostały prace poświęcone hydrodynamice przepływu płynu przez mieszalnik statyczny SMX. Jako przykład można podać tu prace: Hirecha i wsp. [1] oraz Liu i wsp. [2]. Bezpośrednią przyczyną podjęcia studiów literaturowych nad niestabilnościami przepływu było stosunkowo duże odchylenie wyników modelowania numerycznego CFD od wyników pomiarów LDA, szczególnie w zakresie przepływów przejściowych i burzliwych [3]. W celu polepszenia dokładności przewidywań należy poznać strukturę fluktuacji przepływu. Na podstawie studiów literaturowych stwierdzono, że procedury modelowania CFD dla przepływów niestabilnych nie zostały w pełni opracowane. Adamiak i Jaworski [4], na podstawie badań LDA składowej osiowej prędkości średniej i fluktuacyjnej stwierdzili, że przy liczbie $Re = 640$, w przypadku płynu nienewtonowskiego, przepływ mógł mieć charakter przejściowy lub burzliwy. Natomiast Adamiak [3] wykazał, również na podstawie rozkładów składowej osiowej prędkości średniej i fluktuacyjnej, że dla mieszalnika statycznego Kenics oraz SMX przepływ mógł mieć charakter przejściowy przy liczbie $Re \leq 400$ dla płynu newtonowskiego (syrup skrobiowy) oraz przy liczbie $Reynoldsa$ $Re < 200$ dla płynu nienewtonowskiego (roztwór CMC).

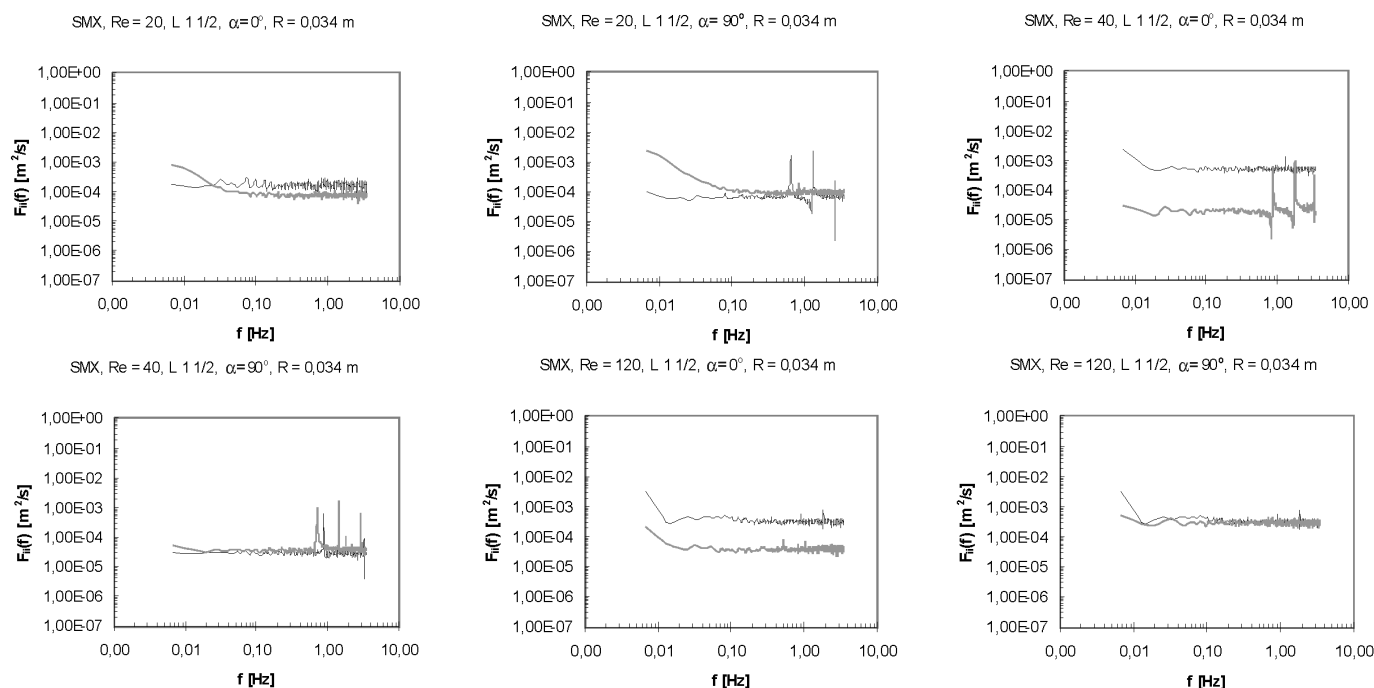
Niestabilności występujące w przepływie mogą być diagnozowane różnymi technikami pomiarowymi, na przykład za pomocą zmiany rozkładów stężeń [5], spadku ciśnienia [6–7] poziomu prędkości średniej i fluktuacyjnej [4] lub analizy widmowej [1, 8–9]. Właśnie zastosowanie analizy widmowej pozwala na poznanie struktury fluktuacji przepływu wewnątrz mieszalnika statycznego, ponieważ z każdym rodzajem wiru związana jest określona częstotliwość fluktuacji prędkości. Wiry, wraz ze wzrostem liczby $Reynoldsa$, zaczynają się coraz szybciej rozwijać i w konsekwencji zanikać na rzecz powstających z nich małych wirów o wysokich częstotliwościach (wirów drobnoskalowych) [10]. Efektem występowania systematycznych struktur wirowych jest pojawienie się charakterystycznego piku (lokalnego maksimum) w spektrum energetycznym, zazwyczaj w zakresie niskich częstotliwości. Natomiast jeśli przepływ jest ściśle stabilny i laminarny oraz nie występują niestabilności, to spektra energetyczne

są jednorodne o prawie zerowym poziomie energii kinetycznej fluktuacji dla różnych liczb falowych (częstotliwości). Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury stwierdzono, że problematyka związana z niestabilnościami przepływu nie została w pełni opracowana. Dlatego celem niniejszej pracy jest analiza niestabilności przepływu w mieszalniku statycznym SMX dla dwóch różnych reologicznie płynów: newtonowskiego i nienewtonowskiego.

W praktyce inżynierskiej mieszalniki statyczne coraz częściej i chętniej są stosowane. O efektywności mieszania w tych aparatach decyduje między innymi ilość wkładek mieszających. Zastosowanie metody LDA pozwala na praktyczny pomiar prędkości w wybranych punktach mieszalnika statycznego. Analiza widmowa, dla uzyskanych w ten sposób wyników, umożliwia ocenę występowania niestabilności w przepływie. W przepływie, który jest niestabilny powstają struktury wirowe odpowiedzialne za mieszanie zarówno w mikro- jak i makroskali. Znajomość hydrodynamiki przepływu, w tym również poziomu fluktuacji prędkości wewnątrz wkładek mieszających, ma znaczący wpływ na dobór właściwej ilości elementów mieszających, a co za tym idzie osiągnięcia właściwego poziomu zmieszania płynu w mieszalniku statycznym. Warto również dodać, że znajomość prędkości oraz poziomu jej fluktuacji, pozwala na weryfikację wyników symulacji numerycznych CFD.

Warunki prowadzenia pomiarów LDA

W celu analizy poziomu fluktuacji prędkości osiowej podczas przepływu płynu newtonowskiego oraz nienewtonowskiego przeprowadzono pomiary anemometryczne LDA (ang. *Laser Doppler Anemometry*) dla mieszalnika statycznego SMX firmy Sulzer. Badania przeprowadzono w pierwszej kolejności dla płynu newtonowskiego (wodnego roztworu syropu skrobiowego, $\eta = 0,062 \div 0,570$ Pa·s), a następnie dla płynu nienewtonowskiego (wodnego roztworu karboksymetylocelulozy, CMC, typ 9H4, $n \approx 0,59$; $K \approx 0,19$ Pa·sⁿ) oraz pięciu wartości liczby $Reynoldsa$: $Re = 20$; 40; 60; 80; 120. Wyniki opracowano przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera (FFT), co pozwoliło na przejście z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości. Pomiary wykonano w zakresie częstotliwości do 5 Hz, ze względu na małą częstotliwość próbkowania wynikającą z ograniczonej przezroczystości roztworu CMC. W związku z tym obserwacja przebiegu funkcji spektralnej dla wyższych częstotliwości nie była możliwa i nie obserwowano spadku wartości funkcji widmowej charakterystycznego dla przepływów burzliwych.



Rys. 1. Spektre energetyczne fluktuacji prędkości składowej osiowej w mieszalniku statycznym SMX, piąta wkładka, $Re = 20; 40; 120$ — CMC, — syrop skrobiowy

Dyskusja wyników

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów LDA sporządzono jednowymiarowe spektra energii kinetycznej fluktuacji prędkości osiowej wewnątrz wkładki mieszającej SMX dla obu badanych płynów: roztworu syropu skrobiowego oraz wodnego roztworu CMC. Dane z pomiarów anemometrycznych zostały opracowane przy zastosowaniu procedury szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Zbadano również, jaki był poziom fluktuacji prędkości płynu newtonowskiego i nienewtonowskiego dla różnych pozycji kątowych α . Stwierdzono, że dla pozycji kątovej $\alpha = 0^\circ$ poziom fluktuacji prędkości osiowej dla danej wartości liczby Reynoldsa był różny dla roztworu syropu skrobiowego oraz roztworu CMC (Rys. 1).

Przykładowo dla $Re = 20$ ($\alpha = 0^\circ$, $R = 0,034$ m) spektra energetyczne dla obu płynów miały podobny przebieg, przy czym fluktuacje dla roztworu CMC były o około pół dekady większe niż dla roztworu syropu skrobiowego.

Wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa dla tej pozycji pomiarowej obserwowano wzrost poziomu fluktuacji dla płynu nienewtonowskiego. Dla $Re = 40$ ($\alpha = 0^\circ$, $R = 0,034$ m) poziom widma energii kinetycznej fluktuacji wynosił około $1 \cdot 10^{-3}$ m^2/s dla roztworu CMC oraz $1 \cdot 10^{-5}$ m^2/s dla roztworu syropu skrobiowego. Ponadto stwierdzono występowanie charakterystycznych, harmonicznie powtarzających się pików dla płynu newtonowskiego. Dla pozostałych wartości liczby Reynoldsa ($Re = 60; 80; 120$) nie odnotowano charakterystycznych pików. Stwierdzono natomiast, że obserwowano dla $Re = 40$ znacznie wyższy poziom fluktuacji prędkości osiowej podczas przepływu płynu nienewtonowskiego przez wkładkę mieszającą SMX – również utrzymywał się dla wyższych wartości Re oraz $\alpha = 0^\circ$.

Z kolei dla pozycji kątovej $\alpha = 90^\circ$ stwierdzono, że spektra energetyczne fluktuacji prędkości osiowej dla obu płynów (newtonowskiego i nienewtonowskiego) były na podobnym poziomie. Należy jednak odnotować, że charakterystyczne, harmonicznie powtarzające się piki występowały w przypad-

ku $Re = 20$ i 40 dla płynu nienewtonowskiego oraz dla $Re = 40$ i płynu newtonowskiego. Przykładowo dla $Re = 20$, $\alpha = 90^\circ$, poziom widma energii kinetycznej fluktuacji kształtował się na poziomie około $4 \cdot 10^{-5}$ m^2/s , natomiast dla $Re = 120$ na poziomie około $2 \cdot 10^{-4}$ m^2/s .

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań anemometrycznych opracowane przy zastosowaniu procedury FFT. Na podstawie otrzymanych wyników możliwa była ocena poziomu fluktuacji prędkości osiowej w mieszalniku statycznym SMX. Po przeanalizowaniu danych eksperymentalnych stwierdzono różny poziom fluktuacji prędkości dla danej wartości liczby Reynoldsa i różnych reologicznie płynów. Silne różnice w poziomie fluktuacji prędkości osiowej w mieszalniku SMX stwierdzono dla pozycji kątovej $\alpha = 0^\circ$.

Otrzymane w ramach niniejszej pracy wyniki mogą być praktycznie zastosowane do weryfikacji wyników symulacji numerycznych CFD, w szczególności do weryfikacji wyników symulacji wielkowirowych (LES).

LITERATURA

1. K. Hirech, A. Arhaliass, J. Legrand: Ind. Eng. Chem. Res. **42**, 1478 (2003).
2. S. Liu, A.N. Hrymak, P.E. Wood: Chem. Eng. Sci. **61**, 1753 (2006).
3. I. Adamiak: Badania anemometryczne i modelowanie numeryczne pól prędkości cieczy w mieszalnikach statycznych, PhD thesis, Politechnika Szczecińska, Szczecin 2003.
4. I. Adamiak, Z. Jaworski: Inż. Chem. i Proc. **22/3B**, 157 (2001).
5. A.A. Jaffer, P.E. Wood: Can. J. Chem. Eng. **76**, 516 (1998).
6. H.Z. Li., C. Fasol, L. Choplin: Trans IchemE. **75A**, 792 (1997).
7. J.Z. Fang, D. J. Lee: Chem. Eng. Sci. **56**, 3797 (2001).
8. S. Peryt, Z. Jaworski: Inż. i Ap. Chem. **41**, 4s, 100 (2002).
9. Z. Jaworski, S. Peryt: 11th Intern. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, CD papers 11-4, Lisbon, 2002.
10. R. Gryboś: Podstawy mechaniki płynów, Tom I, II, Warszawa, PWN, 1998.
11. E. Fourcade, R. Wadley, H. C. J. Hoefsloot, A. Green, P. D. Iedema: Chem. Eng. Sci. **56**, 6729 (2001).
12. <http://www.sulzerchemtech.com/en/DesktopDefault.aspx/tabid-459> listopad 2008