

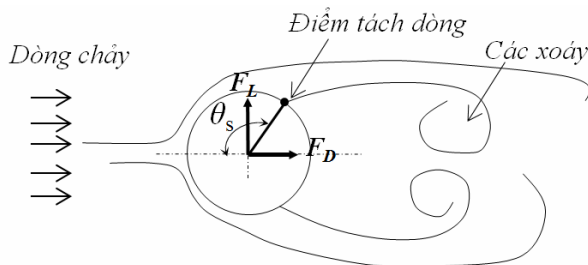
NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM CỦA DÒNG CHẢY XUNG QUANH HÌNH TRỤ TRÒN**Vũ Huy Công¹**

Tóm tắt: Trong bài báo này tác giả đã nghiên cứu sự thay đổi các đặc điểm của dòng chảy xung quanh hình trụ khi hệ số Reynold thay đổi. Các đặc điểm như là hệ số lực cản tác dụng lên hình trụ theo phương dòng chảy (drag force) và phương vuông góc với dòng chảy (lift force), tần số xuất hiện của các xoáy phía sau hình trụ cũng như là góc “tách dòng” trên hình trụ sẽ được nghiên cứu một cách có hệ thống và chi tiết dựa trên mô hình số. Các kết quả cũng được so sánh với kết quả thí nghiệm đã công bố trước đây và thể hiện độ tin cậy cao.

Từ khoá: hình trụ tròn, cấu trúc dòng chảy, xoáy, hệ số lực tác dụng.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự xuất hiện phổ biến của kết cấu hình trụ trong đời sống đã khiến nó trở thành đối tượng nghiên cứu của rất nhiều công trình khoa học ở nhiều lĩnh vực khác nhau. Khi có dòng chảy chảy qua, phía sau hình trụ có thể hình thành các cuộn xoáy và hình trụ có thể chịu tác dụng của các lực theo phương dòng chảy (F_D) và phương vuông góc với dòng chảy (F_L), xem hình 1.



Hình 1. Minh họa dòng chảy xung quanh hình trụ

Kumar và Mittal (2006) đã chỉ ra rằng các cuộn xoáy sẽ bắt đầu xuất hiện phía sau hình trụ khi dòng chảy có hệ số Reynold lớn hơn 47. Các cuộn xoáy này sẽ xuất hiện lần lượt phía sau hình trụ một cách tuần hoàn dẫn đến các lực F_D , F_L cũng dao động tuần hoàn theo. Sự xuất hiện các cuộn xoáy này sẽ làm tăng mức độ xáo trộn của dòng chảy phía sau hình trụ (Kwon và Choi,

1996). Ngoài ra khi dòng chảy chảy trên bề mặt cong của hình trụ sẽ có hiện tượng tách dòng (xem hình 1). Khi hiện tượng này xảy ra, phía sau hình trụ sẽ hình thành 2 vùng gồm vùng phía trong có xoáy với vận tốc nhỏ và vùng phía ngoài không xoáy có vận tốc lớn hơn. Sự thay đổi vị trí điểm tách dòng trên bề mặt hình trụ sẽ quyết định đến bề rộng của vùng xoáy nước phía sau và ảnh hưởng đến sự phân bố áp lực trên hình trụ, do đó ảnh hưởng đến độ lớn các lực tác dụng. Nếu góc tạo bởi 2 điểm tách dòng ở mép trên và mép dưới hình trụ càng lớn thì vùng xoáy phía sau càng mở rộng và ngược lại. Như vậy cấu trúc của dòng chảy xung quanh hình trụ không những phụ thuộc vào sự xuất hiện của các cuộn xoáy mà còn phụ thuộc cả vào góc tách dòng θ_s .

Trong các nghiên cứu trước đây, các tác giả phần lớn tập trung vào thành phần lực F_D . Thành phần lực F_L chưa được nghiên cứu chi tiết nhất là khi hệ số Reynolds thay đổi. Ngoài ra vị trí điểm tách dòng cũng chưa được nghiên cứu nhiều mặc dù góc tách dòng ảnh hưởng lớn đến cấu trúc dòng chảy và nó cũng thay đổi khi hệ số Reynold thay đổi. Bài báo này sẽ nghiên cứu sự thay đổi của các lực, tần số xuất hiện các xoáy và góc tách dòng với hệ số Reynold thay đổi từ 60 đến 200.

¹ Khoa Xây dựng Thủy lợi - Thủy điện, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Đà Nẵng.

2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH SỐ

2.1 Giới thiệu về phần mềm Fluent

Dòng chảy xung quanh hình trụ được mô phỏng hai chiều bằng phần mềm Fluent. Trong phần mềm này, phương pháp thể tích hữu hạn đã được ứng dụng để giải hệ phương trình Navier-Stokes. Áp lực và vận tốc được giải với thuật toán Semi-Implicit Pressure Linked Equation (SIMPLE). Đối với mô hình rối, tác giả đã lựa chọn mô hình Shear Stress Transport (SST) $k-w$ để giải. Lý do sử dụng mô hình này là do ưu điểm của nó so với các loại khác khi mô phỏng dòng chảy tách dòng (Vu et al. 2015). Hệ phương trình cơ bản trong Fluent có dạng như sau:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

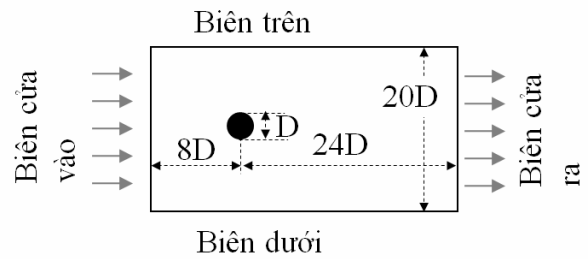
trong đó ρ là khối lượng riêng của nước, t là thời gian, và \vec{v} là vận tốc.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

trong đó p áp suất tĩnh, $\vec{\tau}$ là tensor ứng suất; $\rho \vec{g}$ và \vec{F} lần lượt là trọng lực và ngoại lực tác dụng.

2.2 Thiết lập mô phỏng

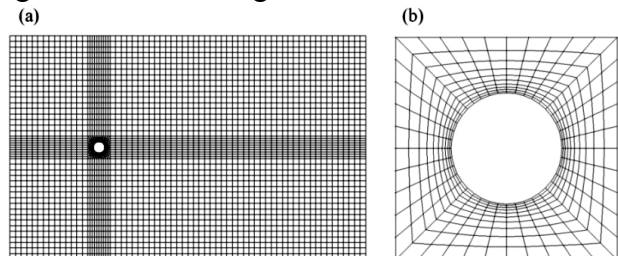
Sơ đồ mô hình của dòng chảy qua hình trụ được thể hiện trên hình 2. Đây là mô hình 2 chiều, với 2 biên hở (biên vào và biên ra), 3 biên kín (biên trên, biên dưới và biên bề mặt hình trụ). Khoảng cách từ biên vào và biên ra của mô hình đến tâm hình trụ lần lượt bằng 8 và 24 lần đường kính hình trụ (D). Hình trụ trong mô hình có đường kính là 4 cm. Biên hai bên được bố trí cách tâm hình trụ một khoảng bằng 10 lần đường kính. Việc bố trí các biên với khoảng cách như vậy để giảm ảnh hưởng của biên đến dòng chảy xung quanh hình trụ (Meneghini et al. 2001). Biên cửa vào được chỉ định là loại “velocity inlet”, biên cửa ra là “pressure outlet”. Biên bề mặt hình trụ được thiết lập là loại biên “No-slip”. Biên trên và biên dưới là loại biên “periodic” nhằm hạn chế tối đa ảnh hưởng của biên đến dòng chảy. Đây là những loại biên được thiết lập nhiều khi mô phỏng dòng chảy qua các vật cản trong các nghiên cứu trước đây (Vu et al., 2015).



Hình 2. Sơ đồ điều kiện biên cho mô hình

Hình 3 thể hiện lưới tính của mô hình số. Các phần tử lưới ở gần hình trụ có kích thước nhỏ hơn nhằm mô phỏng chính xác những thay đổi xung quanh hình trụ trong khi các phần tử lưới ở xa có kích thước lớn hơn. Lưới xung quanh hình trụ có hình dạng thay đổi dần và phù hợp với bề mặt cong của hình trụ, chi tiết lưới được thể hiện trên hình 3(b). Cách chia lưới này đã được áp dụng thành công trong các nghiên cứu của các tác giả trước như Vu et al. (2015).

Trong bài báo này phần kiểm định độ chính xác của mô hình không được trình bày thành một phần riêng. Tính chính xác này sẽ được chứng minh ở phần kết quả thông qua việc so sánh kết quả mô phỏng với một vài kết quả thí nghiệm của các tác giả khác.



Hình 3. (a) Lưới tính miền tính toán, (b) Chi tiết lưới xung quanh hình trụ. (Cứ 6 điểm lưới thì có một điểm lưới được vẽ trên hình)

2.3 Cách tính toán các thông số trong mô hình

2.3.1. Hệ số Reynold (Re)

Vận tốc tại cửa vào mô hình được thiết lập để có hệ số Reynold mong muốn theo công thức (3). Trong nghiên cứu này, phạm vi hệ số Reynold thay đổi từ 60 đến 200.

$$Re = \frac{\rho U_o D}{\mu} \quad (3)$$

Ở đây U_o là vận tốc tại cửa vào, μ là độ nhớt động lực.

2.3.2. Lực tác dụng lên hình trụ

Khi các cuộn xoáy hình thành sẽ dẫn đến sự thay đổi về áp lực xung quanh hình trụ, từ đó hình thành các lực F_D và F_L . Hai lực này được tính toán dựa vào việc tích phân các thành phần do áp lực (*pressure force*) và do ma sát (*friction force*) ở xung quanh hình trụ, thể hiện ở phương trình (4) ~ (8) theo Kundu (1990).

$$F_D = \int_0^{2\pi} R p \cos \theta d\theta + \int_0^{2\pi} R \tau_w \sin \theta d\theta \quad (4)$$

trong đó $R (=D/2)$ là bán kính của hình trụ, τ_w là *shear stress* trên bề mặt hình trụ, θ là góc xác định các vị trí các điểm trên bề mặt hình trụ. Tương tự, lực F_L có thể xác định theo công thức.

$$F_L = \int_0^{2\pi} R p \sin \theta d\theta + \int_0^{2\pi} R \tau_w \cos \theta d\theta \quad (5)$$

Lực F_D được thể hiện ở dạng hệ số không thứ nguyên theo công thức:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U_o^2 D} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta d\theta + \frac{1}{\rho U_o^2} \int_0^{2\pi} \tau_w \sin \theta d\theta \quad (6)$$

Ở đây C_p chính là hệ số áp lực trên bề mặt hình trụ và được định nghĩa:

$$C_p = (p - p_0) / (\frac{1}{2} \rho U_o^2) \quad (7)$$

trong đó p_0 là áp lực tham chiếu ở phía cửa vào.

Tương tự như lực F_D , hệ số C_D cũng được chia làm hai thành phần gồm thành phần do áp lực (C_{Dp}) là biểu thức đầu tiên phía bên phải phương trình (6) và thành phần do ma sát (C_{Df}) là biểu thức thứ hai. Hoàn toàn tương tự, hệ số lực C_L được xác định là:

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U_o^2 D} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \sin \theta d\theta + \frac{1}{\rho U_o^2} \int_0^{2\pi} \tau_w \cos \theta d\theta \quad (8)$$

2.3.3. Tần số xoáy

Tần số xuất hiện các cuộn xoáy (f_s) được thể hiện qua hệ số Strouhal (St), được định nghĩa ở công thức (9).

$$St = \frac{f_s D}{U_o} \quad (9)$$

Tần số xoáy f_s cũng chính là tần số dao động của thành phần lực vuông góc với dòng chảy, C_L , và được tính toán thông qua biến đổi Fourier. Trong biến đổi này, dao động tuần hoàn sẽ được chuyển đổi thành dạng đường năng lượng “*spectrum*” với trục hoành là St và trục tung là

năng lượng. Đường chuyển đổi này có thể có một hoặc nhiều đỉnh tùy thuộc vào dao động này có bao gồm nhiều dao động nhỏ ở bên trong hay không, hay nói cách khác dao động này có bị “nhiều” hay không. Nếu là dao động đơn và không bị nhiễu ví dụ như dao động “hình sin” ở hình 4 thì sẽ có một đỉnh, vị trí tương ứng của đỉnh này trên trục hoành sẽ là tần số dao động của nó hoặc hệ số St (Meneghini et al. 2001; Surmas et al. 2004). Kết quả phần này sẽ được trình bày chi tiết trên hình 8.

2.3.4. Góc tách dòng

Theo Kundu (1990) vị trí tách dòng trên bề mặt hình trụ được xác định là điểm có “*shear stress*” bị triệt tiêu, tức là:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad (10)$$

trong đó u là vận tốc dòng chảy và y là khoảng cách tính từ bề mặt hình trụ. Ở đây là bài toán tìm “*shear stress*” trên bề mặt hình trụ nên $y=0$.

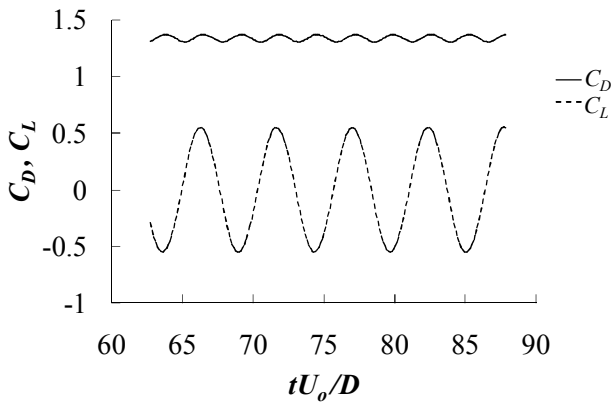
Theo đó, trong nghiên cứu này điểm tách dòng được xác định bằng cách tìm vị trí có “*shear stress*” bằng 0 trên bề mặt hình trụ. Nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng do có sự dao động của xoáy nước nên điểm tách dòng này cũng sẽ dao động theo. Góc tách dòng θ_s cũng như biên độ dao động này sẽ được nghiên cứu chi tiết với các hệ số Reynold khác nhau.

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

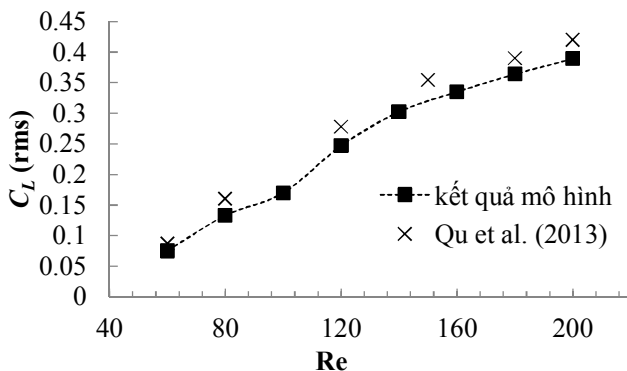
3.1. Hệ số lực C_D , C_L

Hình 4 thể hiện sự thay đổi của hai hệ số lực C_D , C_L theo thời gian trong trường hợp Reynold bằng 200. Chú ý rằng trục hoành trong hình vẽ thể hiện thời gian được khử thứ nguyên bằng cách nhân với (U_o/D) . Từ hình vẽ có thể thấy, hệ số lực C_D có tần số dao động bằng 2 lần tần số dao động của C_L . Tần số dao động của C_L cũng chính bằng tần số của xoáy nước hình thành phía sau hình trụ. Hệ số C_L dao động trong phạm vi giá trị từ -0.5 đến 0.5, lớn hơn nhiều so với biên độ dao động của C_D . Sự thay đổi dấu thể hiện sự thay đổi hướng của lực C_L . Lực này sẽ lần lượt hướng lên và hướng xuống theo chu kỳ dao động của nó. Để tìm độ lớn của

C_L trong trường hợp hệ số Reynold thay đổi, giá trị trung bình theo thời gian cần được tính toán. Bởi vì giá trị của C_L dao động xung quanh giá trị 0 nên tác giả không sử dụng công thức trung bình để tính, thay vào đó công thức *root mean square* sẽ được áp dụng. Riêng đối với C_D , công thức tính trung bình chung vẫn được áp dụng. Hình 5 thể hiện độ lớn của hệ số lực C_L ứng với các hệ số Reynold khác nhau. Rõ ràng khi vận tốc dòng chảy càng lớn (hệ số Reynold càng lớn) thì hệ số lực tác dụng ngang C_L này lại càng lớn. Kết quả của mô hình cũng được so sánh với kết quả của Qu et al. (2013) và thể hiện sự tương đồng.

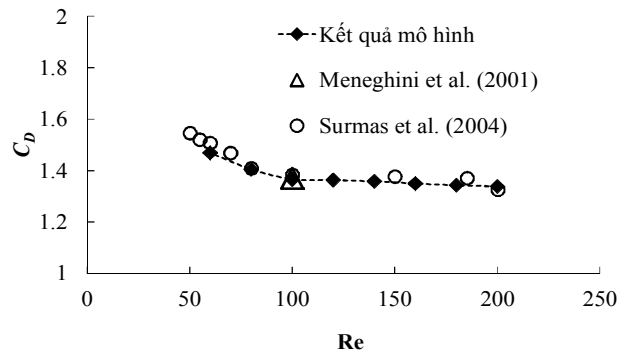


Hình 4. Sự thay đổi của C_D và C_L theo thời gian, trường hợp ví dụ $Re = 200$.



Hình 5. Sự thay đổi của C_L theo hệ số Reynold (C_L tính theo root mean square)

Tác động của hệ số Reynold lên sự thay đổi của hệ số lực C_D được thể hiện trên hình 6. Kết quả cho thấy rằng hệ số này giảm khi Reynold tăng. Khi Reynold tăng từ 60 đến 200 thì C_D giảm 9%. Xu hướng này hoàn toàn tương tự với kết quả nghiên cứu của Surmas et al., 2004.

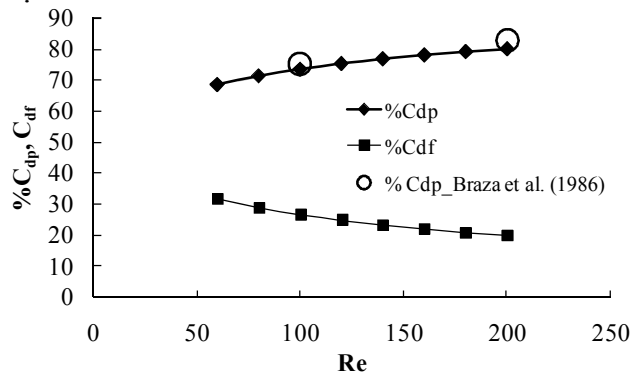


Hình 6. Sự thay đổi hệ số C_D theo hệ số Reynold (C_D tính theo công thức trung bình)

Như đã trình bày ở trên, hệ số lực C_D tác dụng lên hình trụ bao gồm 2 thành phần do áp lực (C_{Dp}) và do ma sát (C_{Df}) tạo ra. Hệ số này có thể viết như sau:

$$C_D = C_{Dp} + C_{Df} \quad (11)$$

Hình 7 thể hiện sự đóng góp của 2 thành phần này trong hệ số C_D khi hệ số Reynold thay đổi. Khi hệ số Reynold tăng lên, thành phần C_{Dp} tăng lên và thành phần C_{Df} giảm xuống. Tỷ lệ giữa 2 thành phần này cũng phù hợp với kết quả của Braza et al. (1986) ở các vị trí $Re = 100$ và 200 .

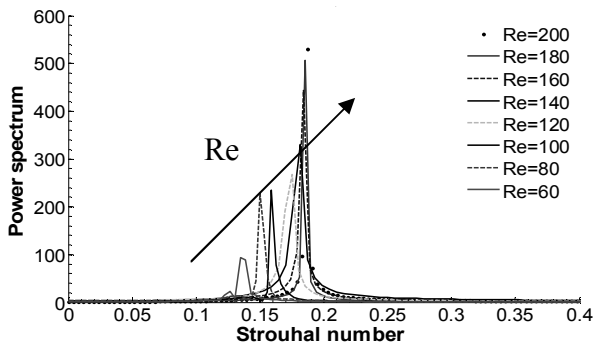


Hình 7. Tỷ lệ phần trăm C_{Df} và C_{Dp} trong C_D

3.2. Tần số xuất hiện xoáy (hệ số Strouhal)

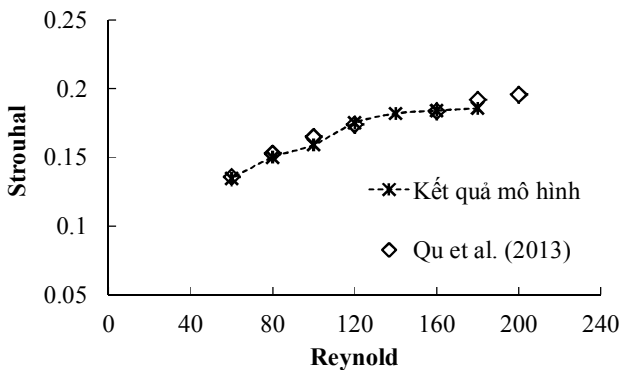
Trong phần này tác giả trình bày nghiên cứu chi tiết về tần số xuất hiện của xoáy phía sau hình trụ. Tần số này được thể hiện thông qua hệ số Strouhal như đã giới thiệu ở phần 2.3.3. Hình 8 thể hiện sự chuyển đổi dao động sang dạng đường năng lượng cho hệ số Reynold từ 60 đến 200. Ứng với mỗi hệ số Reynold khác nhau sẽ có dao động khác nhau và sẽ có một đường chuyển đổi khác nhau. Các dao động này đều là những dao động “hình sin” (xem hình 4) nên

mỗi đường chuyển đổi sẽ có một đỉnh và đỉnh đó tương ứng giá trị Strouhal trên trục hoành.



Hình 8. Phân tích Fourier cho hệ số Strouhal với các hệ số Reynold khác nhau.

Mối quan hệ giữa hệ số Strouhal và hệ số Reynold được thể hiện chi tiết trên hình 9. Trong phạm vi hệ số Reynold nghiên cứu, hệ số Strouhal tăng khi hệ số Reynold tăng. Kết quả mô phỏng cũng được so sánh với kết quả thí nghiệm của Qu et al. (2013) và thể hiện sự thống nhất cao.

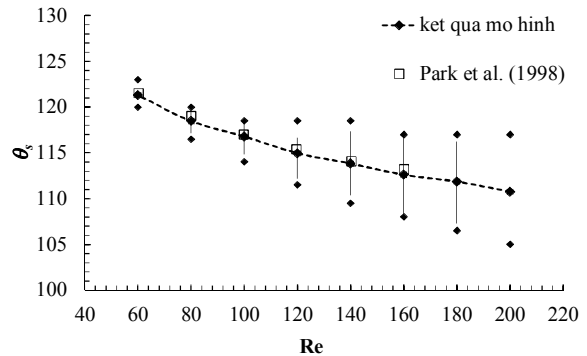


Hình 9. Sự thay đổi của hệ số Strouhal theo hệ số Reynold

3.3. Góc tách dòng

Điểm tách dòng ở hai bên hình trụ không cố định mà có sự dịch chuyển. Khi $Re = 180$ điểm tách dòng ở mép trên này dao động giữa hai vị trí có góc lần lượt là 106.5° và 117° , do đó góc tách dòng trung bình θ_s là 111.8° . Góc tách dòng này ảnh hưởng lớn đến cấu trúc dòng chảy phía sau hình trụ. Hình 10 thể hiện sự thay đổi của góc tách dòng trung bình θ_s khi số Reynold thay đổi. Kết quả này cũng tương tự như kết quả thí nghiệm của Park et al. (1998). Khi hệ số Reynold càng lớn thì góc θ_s càng nhỏ hay nói

cách khác điểm tách dòng càng dịch chuyển về phía thượng lưu. Ngoài ra khi hệ số Reynold tăng, biên độ dao động của điểm tách dòng quanh vị trí trung bình sẽ càng lớn.



Hình 10. Sự thay đổi của điểm tách dòng theo hệ số Reynold

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày chi tiết các đặc điểm của dòng chảy xung quanh một hình trụ tròn khi hệ số Reynold thay đổi trong phạm vi từ 60 đến 200. Kết quả mô hình nghiên cứu đã thể hiện sự thống nhất với nhiều kết quả thí nghiệm. Hệ số các lực tác dụng, tần số xuất hiện của xoáy nước (thể hiện qua hệ số Strouhal) cũng như vị trí của điểm tách dòng đã thể hiện sự phụ thuộc lớn vào hệ số Reynold. Khi hệ số Reynold tăng thì hệ số lực tác dụng C_D giảm và C_L tăng, đồng thời góc tách dòng trung bình giảm và hệ số Strouhal tăng. Đặc biệt biên độ dao động của điểm tách dòng cũng tăng khi hệ số Reynold tăng. Kết quả này đã giúp hiểu rõ và chi tiết hơn các đặc điểm quan trọng từ cấu trúc dòng chảy cho đến lực tác dụng lên hình trụ - một kết cấu rất phổ biến trong đời sống. Nghiên cứu này cũng chứng minh sự thành công của mô hình số trong việc mô phỏng dòng chảy xung quanh một vật cản ở hệ số Reynold thấp, từ đó có thể giảm các chi phí trong việc nghiên cứu thí nghiệm đặc biệt là khi nghiên cứu với nhiều kích bản khác nhau.

LỜI CẢM ƠN: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2017-ĐN02-20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Braza, M., Chassaing, P., and Minh, H. H. (1986). “Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder”. *Journal of Fluid Mechanics*, 165, pp. 79–130.
- Kumar, B., and Mittal, S. (2006). “Prediction of the critical Reynolds number for flow past a circular cylinder”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(44–47), pp. 6046–6058.
- Kundu, P. K. (1990). *Fluid mechanics*. Academic Press, pp. 319.
- Kwon, K., and Choi, H. (1996). “Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates”. *Physics of Fluids (1994-present)*, 8(2), pp. 479–486.
- Meneghini, J. R., Saltara, F., Siqueira, C. L. R., and Ferrari JR, J. A. (2001). “Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements”. *Journal of Fluids and Structures*, 15(2), pp. 327–350.
- Park, J., Kwon, K., and Choi, H. (1998). “Numerical solution of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160”. *KSME International Journal*, Vol. 12, pp. 1200-1205
- Qu, L., Norberg, C., Davidson, L. (2013) “Quantitative numerical analysis of flow past a circular cylinder at Reynolds number between 50 and 200”. *Journal of Fluids and Structures*, vol. 39, pp. 347-370.
- Surmas, R., dos Santos, L. O. E., and Philippi, P. C. (2004). “Lattice Boltzmann simulation of the flow interference in bluff body wakes”. *Future Generation Computer Systems, Computational science of lattice Boltzmann modelling*, 20(6), pp. 951–958.
- Vu, H. C., Ahn, J., and Hwang, J. H. (2015). “Numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangement at low Reynolds numbers”. *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1–11.

Abstract:

STUDY OF FLOW AROUND CIRCULAR CYLINDER

In this paper, the variation of the flow characteristics with respect to Reynolds numbers were presented for single cylinder. These characteristics such as drag force, lift force, vortex shedding frequency, and separation angle were carried out in detail based on numerical simulation. The results were also compared to previous experimental data and show a good agreement.

Keywords: circular cylinder, flow structure, vortex street, drag and lift coefficient.

Ngày nhận bài: 28/9/2017

Ngày chấp nhận đăng: 24/11/2017