

## **NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ DI CHUYỂN CỦA DÒNG CHẢY PHÍA SAU HÌNH TRỤ TRÒN**

**Vũ Huy Công<sup>1</sup>**

**Tóm tắt:** Trong nghiên cứu này, cơ chế di chuyển của các khối chất lỏng phía sau hình trụ sẽ được nghiên cứu dựa trên phân tích “Lagrangian Coherent Structure” (LCS) và mô phỏng theo vết đối tượng “particle tracking”. Dòng chảy phía sau hình trụ được phân chia thành những miền chất lỏng riêng biệt và LCS cho phép dự đoán sự di chuyển của các miền chất lỏng đó theo thời gian. Sự di chuyển này có thể định lượng được dựa trên phương pháp LCS. Nghiên cứu cũng làm rõ ảnh hưởng của hệ số Reynold (từ 60-1000) đối với sự di chuyển này.

**Từ khoá:** “Lagrangian Coherent Structure”, hình trụ, cấu trúc dòng chảy, di chuyển.

### **1. ĐẶT VẤN ĐỀ**

Sự xuất hiện phổ biến của các kết cấu có dạng hình trụ trong đời sống hằng ngày đã khiến nó trở thành đề tài nghiên cứu của nhiều công trình khoa học (Vũ *et al.*, 2015). Khi có dòng chảy chảy qua và hệ số Reynold đủ lớn sẽ hình thành các xoáy nước phía sau hình trụ một cách đều đặn. Nguồn gốc của các xoáy này chính là sự di chuyển tuần hoàn của các khối chất lỏng ngay sát phía sau hình trụ. Các xoáy nước sau khi hình thành sẽ di chuyển ra xa và làm thay đổi cấu trúc dòng chảy (Vũ 2017a). Bên cạnh đó sự dao động tuần hoàn của các xoáy nước cũng dẫn đến sự dao động tuần hoàn của các lực tác dụng lên hình trụ. Ngoài ra, sự hình thành các xoáy cũng như tần số dao động của các xoáy nước đều phụ thuộc vào hệ số Reynold (Re).

Trong các nghiên cứu trước đây về dòng chảy xung quanh hình trụ, các tác giả phần lớn tập trung vào nghiên cứu lực tác dụng lên hình trụ và các xoáy sau khi đã đi xa hình trụ (Vũ, 2017b). Với sự phát triển của khoa học kỹ thuật thì sự xáo trộn vật chất hay sự di chuyển của các phần tử vật chất xung quanh các vật cản hình trụ dần dần được nghiên cứu chi tiết. Các nghiên cứu đã tìm thấy các đặc điểm về dòng chảy mà trước đây chúng bị ẩn đi khi dùng các phương pháp thông thường như dựa

trên trường vận tốc, đường đồng mức xoáy v.v.. Vũ (2017a) đã dùng LCS để nghiên cứu về vùng khởi tạo xoáy ngay sát phía sau hình trụ, tuy nhiên kết quả nghiên cứu chỉ dừng lại ở việc xét chiều dài của vùng này. Sự xáo trộn hay vị trí di chuyển của các khối chất lỏng trong vùng này chưa được đề cập đến. Salman *et al.* (2007) dự đoán sự di chuyển cũng như sự biến đổi hình dạng theo thời gian của những miền chất lỏng nhỏ phía sau vật cản có dạng hình trụ pin. Sự xáo trộn đó được thể hiện một cách trực quan giúp người nghiên cứu có thể nhận biết được những khối chất lỏng xuất phát từ đâu và đi về đâu. Tuy nhiên dự đoán đó chưa có mô phỏng hay thí nghiệm kiểm chứng.

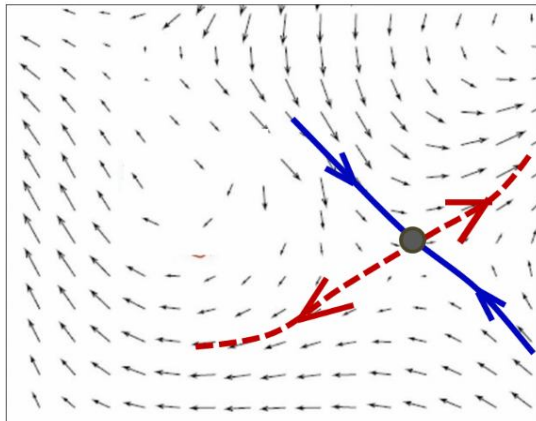
Trong bài báo này, sự di chuyển của các khối chất lỏng sát phía sau hình trụ tròn được nghiên cứu chi tiết dựa phân tích LCS. Nghiên cứu cũng thực hiện mô phỏng vết phần tử để kiểm định lại sự di chuyển của các khối chất lỏng. Ngoài ra, ảnh hưởng của hệ số Reynolds (trong phạm vi từ 60 đến 1000) lên sự di chuyển của các khối chất lỏng sẽ được xem xét, điều này chưa được làm rõ trong các nghiên cứu trước đây. Nghiên cứu đã khẳng định thêm được những ưu điểm của phương pháp LCS ngoài những ưu điểm đã trình bày trong Vũ, (2017a). Điều này đặc biệt có ý nghĩa khi nghiên cứu sự xáo trộn, hay khuếch tán của các phần tử vật chất trong các chuyển động phức tạp.

---

<sup>1</sup> Khoa Xây dựng Thủy lợi - Thủy điện, ĐH Bách khoa Đà Nẵng

## 2. PHƯƠNG PHÁP “LAGRANGIAN COHERENT STRUCTURE”

LCS là những đường ranh giới ẩn phân chia chất lỏng thành những miền riêng và các phần tử vật chất dòng chảy được xem như là không đi qua các đường ranh giới này. Ví dụ như các đường màu đỏ và xanh ở trên hình 1 là những đường LCS. LCS được ứng dụng nhiều trong các nghiên cứu về cấu trúc cũng như sự xáo trộn của các phần tử vật chất. Nó là công cụ hữu hiệu để nghiên cứu về sự xáo trộn và dự báo đường đi của các phần tử. Blake and Kamran, (2008) đã dùng LCS để nghiên cứu và giải thích đường đi của các phần tử không khí xung quanh cánh máy bay. Hay Franco *et al.* (2007) cũng dựa trên LCS để nghiên cứu sự chuyển động của nước khi một con sứa đang bơi. Để tính toán LCS, theo Shadden *et al.*, (2005) cần phải tìm “*Finite-Time Lyapunov Exponent*”, (FTLE). Thông số này thể hiện mức độ phân tán của các phần tử vật chất, và tại nơi có FTLE lớn thì các phần tử sẽ phân tán nhiều. Trong trường FTLE, tập hợp điểm mà FTLE có giá trị lớn được xem như là các đường cấu trúc LCS. Chi tiết về LCS cũng như cách tính toán có thể tham khảo các công trình nghiên cứu của Shadden *et al.*, (2005).



Hình 1. Minh họa đường cấu trúc LCS (màu đỏ, nét đứt là “LCS backward-time”; màu xanh, nét liền là “LCS forward-time”)

## 3. THIẾT LẬP MÔ HÌNH SỐ TRONG FLUENT

LCS được tính toán dựa trên trường véc tơ dòng chảy nên đầu tiên tác giả đã dựa vào bộ

phần mềm Ansys Fluent để tìm trường véc tơ dòng chảy xung quanh hình trụ. Sau đó LCS sẽ được tính toán với cả 2 loại đường là LCS *backward-time* và LCS *forward-time*. Chi tiết về việc tính toán có thể tham khảo thêm trong Vũ, (2017a). Phần thứ hai là việc thực hiện mô phỏng theo vết phần tử cũng được thực hiện trên phần mềm Ansys Fluent. Mô phỏng này sẽ cho phép nhận biết được đường đi của đối tượng nghiên cứu theo thời gian.

Fluent dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn để giải hệ phương trình cơ bản. Phương trình bảo toàn khối lượng có dạng (Ansys Fluent, 2012):

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

trong đó  $\rho$  là khối lượng riêng,  $u$  là vận tốc.

Phương trình bảo toàn động lượng có dạng (Ansys Fluent, 2012):

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

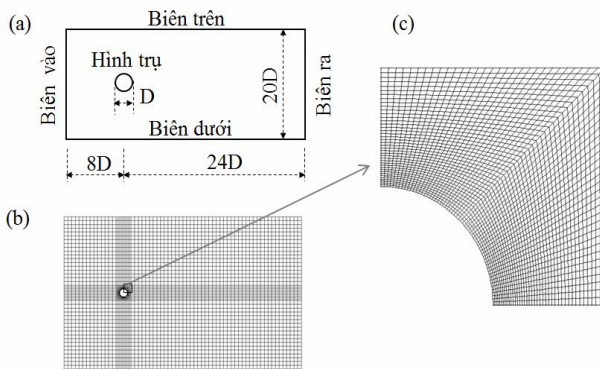
trong đó  $p$  là áp suất,  $\tau$  là tensor ứng suất, và  $F$  là ngoại lực.

Các phương trình được giải theo phương pháp “*semi-implicit pressure linked equations*” (SIMPLE). Mô hình rối được áp dụng là *Shear Stress Transport* (SST) k-w. Đây là mô hình cải tiến dựa trên mô hình chảy rối hai phương trình k-w, một trong những mô hình phổ biến nhất bên cạnh mô hình k-e. Lý do sử dụng mô hình này được giải thích trong Vu *et al.*, (2015).

### 3.1. Mô phỏng trường véc tơ dòng chảy

Mô hình toán hai chiều của dòng chảy qua hình trụ được thể hiện trên hình 2a. 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. Biên hai bên được bố trí cách hình trụ một khoảng bằng 10 lần đường kính. Việc bố trí các biên với khoảng cách như vậy để tránh ảnh hưởng của biên đến kết cấu dòng chảy xung quanh hình trụ (Meneghini *et al.*, 2001). Biên vào là dòng đều  $U_0$  với dạng biên “*velocity inlet*” còn biên ra là biên “*pressure outlet*”. Đây là cặp biên được người sử dụng Fluent sử dụng nhiều khi mô phỏng dòng chảy qua các vật cản (Vu *et al.*, 2015). Biên “*pressure outlet*” có thể

cho phép hiện tượng “back-flow” nên các xoáy nước khi đi ra khỏi biên cửa ra được mô phỏng chính xác.



Hình 2. Thiết lập biên và lưới tính của mô hình, (a) Vị trí các biên, (b) Chia lưới miền tính toán, (c) Chia lưới xung quanh hình trụ.

Miền lưới tính toán cho mô hình được thể hiện trên hình 2. Các ô lưới có hình dạng tứ giác với kích thước nhỏ ở gần hình trụ và ở xa hình trụ có kích thước lớn hơn. Toàn bộ miền tính toán gồm 193920 ô lưới với các ô lưới nhỏ nhất nằm trên hình trụ có kích thước là 0.5mm. Chi tiết lưới xung quanh hình trụ được thể hiện trên hình 2(c). Cách chia lưới này đã được áp dụng thành công trong các nghiên cứu của các tác giả trước như Vũ *et al.* (2015), Vũ (2017a).

Trong các nghiên cứu dòng chảy qua hình trụ sử dụng mô hình số, hệ số lực cản hoặc áp lực trên hình trụ thường được dùng để kiểm tra độ chính xác của mô hình. Trong nghiên cứu này tác giả cũng sử dụng hệ số lực cản để kiểm định mô hình bằng cách so sánh với các kết quả đã được công bố. Hệ số lực cản tác dụng lên hình trụ được tính theo công thức (Robert *et al.*, 2008):

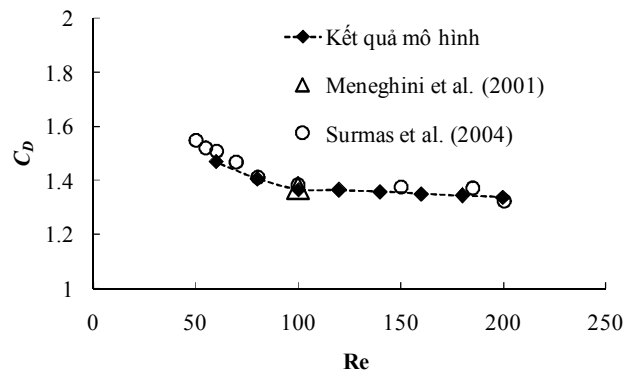
$$C_d = \frac{2F_d}{\rho U_o^2 D} \quad (3)$$

Trong đó:

$U_o$ : vận tốc tại biên vào

$F_d$ : lực cản tác dụng lên hình trụ

$D$ : đường kính hình trụ



Hình 3. Sự thay đổi hệ số  $C_D$  theo hệ số Reynold.

Hình 3 thể hiện hệ số lực cản  $C_D$  từ mô hình tính so sánh với các nghiên cứu khác khi hệ số Reynolds thay đổi từ 60 đến 200. Kết quả cho thấy giá trị mô phỏng và giá trị so sánh có sự tương đồng cao. Điều đó chứng tỏ các thiết lập trong mô hình là đảm bảo và dòng chảy xung quanh hình trụ đã được mô phỏng chính xác.

### 3.2. Mô phỏng Particle tracking

Trong phần này, mô đun phân tán Discrete Phase Modeling (DPM) dựa trên kỹ thuật theo dấu vết chuyển động của phân tử được áp dụng. Mô đun DPM nằm trong bộ phần mềm Ansys - Fluent và có thể chạy song song với mô đun thủy lực. Cơ sở lý thuyết của mô đun DPM là sự cân bằng giữa quán tính phân tử với các lực tác dụng lên phân tử (Ansys Fluent, 2012):

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (4)$$

Trong phương trình trên,  $u$  là thành phần véc tơ của dòng chảy,  $u_p$  là thành phần véc tơ vận tốc của phân tử,  $\rho_p$  là khối lượng riêng của phân tử,  $F$  là lực ngoài bổ sung trên một đơn vị khối lượng phân tử. Biểu thức đầu tiên ở vế bên phải phương trình trên liên quan đến lực cản trên một đơn vị khối lượng phân tử, trong đó  $F_D$  được định nghĩa (Ansys Fluent, 2012):

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (5)$$

Trong đó  $\mu$  là độ nhớt của chất lỏng,  $d_p$  là đường kính của phân tử. Hệ số  $C_c$  là hệ số liên quan đến lý thuyết Stokes. Chi tiết về những lực

này có thể tham khảo thêm trong các tài liệu hướng dẫn của bộ phần mềm Ansys Fluent.

Mục đích của nghiên cứu này là dự đoán sự di chuyển của các khối nước nên các phần tử theo dõi được thiết lập với thuộc tính giống như các phần tử nước. Các phần tử này không biến đổi và tương tác sinh – lý – hóa với nhau trong quá trình chuyển động dưới tác động của dòng chảy. Các phần tử này được thả vào trường dòng chảy ở các vị trí cần nghiên cứu sau khi mô hình đã đạt được sự ổn định về mặt thủy lực. Sự ổn định này được xác định qua sự xuất hiện một cách tuần hoàn các xoáy nước hoặc là dao động tuần hoàn của các lực tác dụng trên hình trụ (xem Vũ, 2017b).

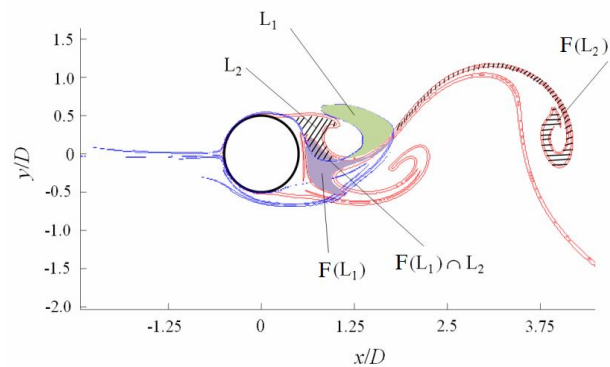
#### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

##### 4.1. Cơ chế di chuyển của khối chất lỏng phía sau hình trụ

Trong phần này, cơ chế di chuyển của các khối chất lỏng ở vùng khởi tạo xoáy sát phía sau hình trụ tròn được xem xét dựa trên phân tích LCS. Vùng khởi tạo xoáy là khu vực chất lỏng bị xáo trộn và di chuyển phức tạp do các xoáy bắt đầu hình thành từ đây rồi mới di chuyển ra xa hình trụ (Vũ, 2017a). Khi hệ số Reynold nhỏ, sự xuất hiện các xoáy này là tuần hoàn và có chu kỳ do đó các khối chất lỏng sát phía sau hình trụ cũng di chuyển một cách tuần hoàn. Hình 4 thể hiện cấu trúc dòng chảy phía sau hình trụ, trong đó đường màu xanh là các đường LCS *forward-time* và đường màu đỏ là các đường LCS *backward-time*. Các đường LCS *forward*, *backward-time* giao nhau và sẽ chia dòng chảy thành các miền nhỏ hơn. Các đường này cho phép xác định rõ khối chất lỏng nào đi vào và khối chất lỏng nào đi ra trong vùng sát phía sau hình trụ. Miền  $L_1$  chính là thể hiện cho khối chất lỏng sẽ đi vào vùng khởi tạo xoáy sát phía sau hình trụ và khi đi vào khối chất lỏng này sẽ nằm ở vị trí  $F(L_1)$  sau thời gian một chu kỳ xoáy. Tương tự như vậy, chất lỏng trong miền  $L_2$  sẽ di chuyển ra vị trí  $F(L_2)$  sau mỗi chu kỳ xoáy. Như vậy, sau mỗi chu kỳ chất lỏng  $L_1$  sẽ di chuyển vào vùng khởi tạo xoáy và nằm ở vị trí  $F(L_1)$  còn chất lỏng  $L_2$  sẽ di chuyển ra khỏi vùng khởi tạo xoáy và nằm ở vị trí  $F(L_2)$ . Ngoài

ra, miền  $L_2$  và  $F(L_1)$  có sự giao nhau và một phần diện tích bị chồng lấp lên nhau (xem hình 4). Sự xuất hiện của vùng chồng lấp này, kí hiệu là  $F(L_1) \cap L_2$  cho thấy trong khối chất lỏng vừa đi vào sẽ có một phần phải đi ra. Diện tích của vùng giao này đã thể hiện mức độ phức tạp của sự di chuyển các khối chất lỏng phía sau hình trụ. Ảnh hưởng của hệ số Reynold lên diện tích vùng giao nhau này sẽ được nghiên cứu chi tiết trong phần 4.3. Như vậy phân tích LCS đã cho thấy được cơ chế di chuyển của chất lỏng, nơi chất lỏng đi vào và đi ra sau mỗi chu kỳ xoáy.

Kết quả cho thấy khi vật cản là hình trụ tròn hoặc hình trụ pin (trường hợp nghiên cứu của Salman *et al.*, 2007) thì đường đi của các khối chất lỏng sát phía sau vật cản là tương tự như nhau trong quá trình hình thành xoáy.



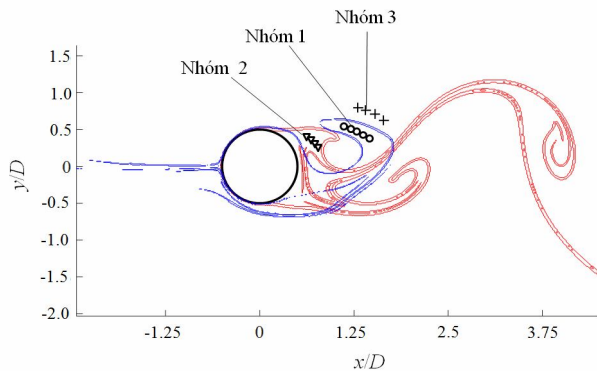
Hình 4. LCS phân chia chất lỏng phía sau hình trụ thành các miền nhỏ riêng lẻ.

##### 4.2. Mô phỏng particle tracking để kiểm tra sự di chuyển của các khối chất lỏng.

Để chứng minh khối chất lỏng  $L_1$  và  $L_2$  lần lượt là các khối chất lỏng đi vào và đi ra khỏi vùng khởi tạo xoáy, mô phỏng vết phần tử đã được thực hiện. Các phần tử được chia thành 3 nhóm (mỗi nhóm gồm 10 phần tử) được thả tại ba vị trí khác nhau như thể hiện trên hình 5. Trong đó, nhóm thứ nhất và thứ hai được thả tại các vị trí tương ứng với các miền  $L_1$  và  $L_2$ , còn nhóm thứ 3 được thả tại vị trí bất kỳ ở ngoài vùng khởi tạo xoáy. Các nhóm phần tử được thả vào trường dòng chảy ở các vị trí trên sau khi mô hình đã đạt được độ ổn định. Thời gian mô phỏng vết phần tử được tính từ lúc bắt đầu thả



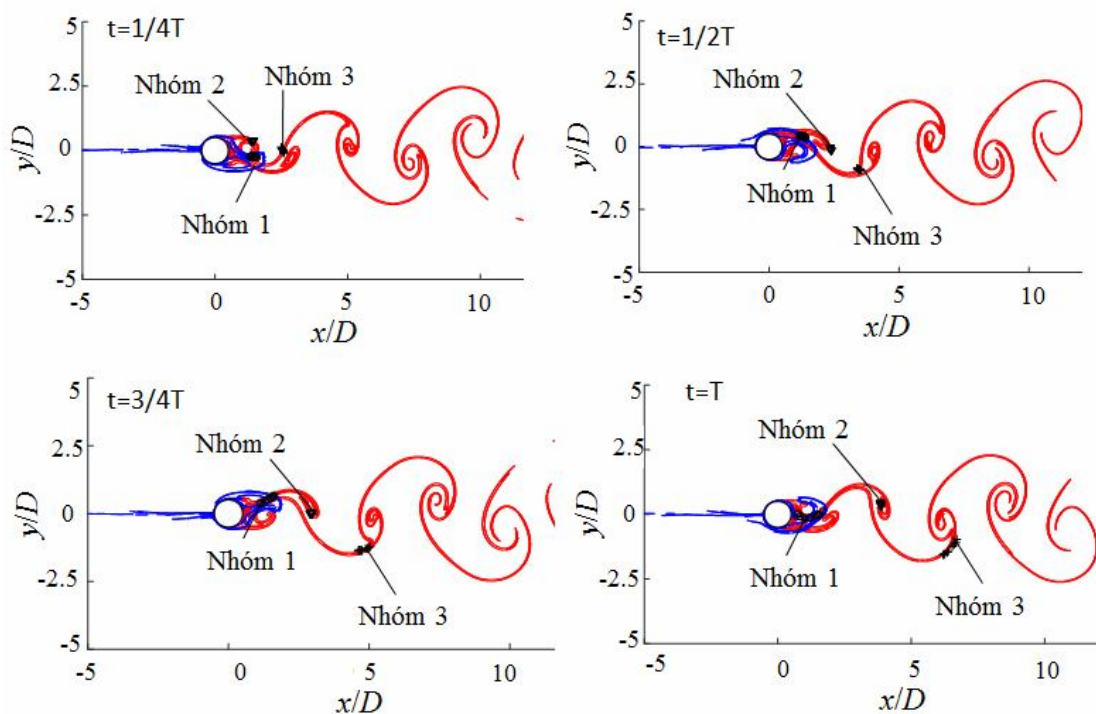
các nhóm phân tử này vào trong môi trường dòng chảy. Nếu gọi thời gian bắt đầu thả là  $t=0$  (hình 5), thì tại các thời điểm điểm  $t=1/4T$ ,  $2/4T$ ,  $3/4T$  và  $t=T$  (trong đó  $T$  là chu kỳ xoáy) vị trí các phân tử được thể hiện như trên hình 6.



Hình 5. Vị trí thả của các nhóm phân tử tại  $t=0$ , (kích thước của phân tử được phóng to)

Hình vẽ 6 thể hiện kết quả mô phỏng theo vết phân tử của 3 nhóm phân tử trên và đồng thời

thời các đường LCS cũng được thể hiện đính kèm. Từ hình vẽ dễ dàng nhận thấy rằng các phân tử ở nhóm 1 với vị trí thả ban đầu là  $L_1$  đã dần dần di chuyển vào vùng khởi tạo xoáy và cuối cùng nằm ở vị trí  $F(L_1)$ . Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết luận ở phần trên. Tương tự như vậy, các phân tử nhóm 2 sau một chu kỳ cũng di chuyển ra khỏi vùng khởi tạo xoáy và tiến đến vị trí  $F(L_2)$ . Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy rằng nhóm phân tử thứ 3 đã không di chuyển vào vùng khởi tạo xoáy sát phía sau hình trụ mà di chuyển về phía hạ lưu. Cũng cần nói thêm rằng, các phân tử thuộc nhóm 3 trong quá trình di chuyển về phía hạ lưu sẽ dần dần bám sát các đường LCS *backward-time* đúng như tính chất của LCS được nhận xét trong Vũ (2017a). Các kết quả về mô phỏng vết phân tử này đã góp phần thể hiện được sự di chuyển của các khối chất lỏng phía sau hình trụ, cho thấy nơi xuất phát và điểm đến của các khối chất lỏng.



Hình 6. Vị trí của các nhóm phân tử theo thời gian (kích thước của các phân tử được phóng to lên).

#### 4.3. Ảnh hưởng của hệ số Reynold lên sự di chuyển của khối chất lỏng.

Khi hệ số Reynold tăng lên, các khối chất lỏng phía sau hình trụ cũng di chuyển phức

tạp hơn. Trong phần này, nghiên cứu sẽ thể hiện tỉ lệ chất lỏng trong miền  $F(L_1) \cap L_2$  so với tỉ lệ chất lỏng trong miền  $L_2$  khi hệ số Reynold thay đổi từ 60 đến 1000. Đây là tỉ lệ

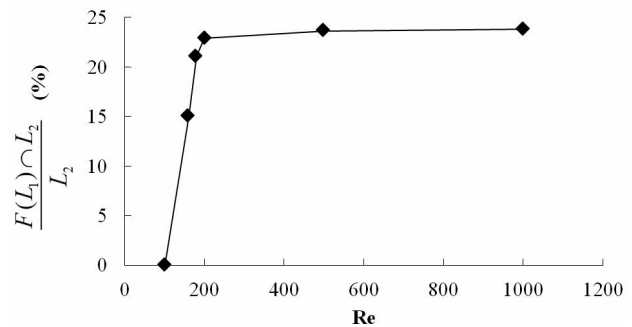
chất lỏng đi vào rồi đi ra trên tổng số chất lỏng đi vào vùng khởi tạo xoáy. Tỷ lệ các khối chất lỏng này tương ứng với tỉ lệ diện tích của các miền giới hạn chất lỏng đó. Diện tích của các miền này được tính toán theo công thức 6 (Franco *et al.*, 2007).

$$A(L_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{n-1} [x_j y_{j+1} - x_{j+1} y_j] \quad (6)$$

Trong đó  $x_j$  và  $y_j$  tọa độ của điểm thứ  $j$  trên đường bao hình thành nên miền diện tích  $L_i$ . Tất cả các đường LCS đều được vẽ trên phần mềm Matlab nên tọa độ các điểm này được trích xuất với sự trợ giúp của Matlab.

Hình vẽ 7 thể hiện sự thay đổi của  $F(L_1) \cap L_2 / L_2$ . Theo các nghiên cứu trước đây, các xoáy nước bắt đầu hình thành sau hình trụ khi hệ số Reynold lớn hơn 47. Khi không hình thành xoáy nước thì dòng chảy gần như đối xứng ở nửa trên và dưới hình trụ. Khi hệ số Reynold tăng lên, vùng khởi tạo xoáy bắt đầu hình thành và các khối nước bắt đầu di chuyển xáo trộn. Tại  $Re < 100$ , vùng giao nhau  $F(L_1) \cap L_2$  không xuất hiện. Theo nghiên cứu của Vũ (2017a) lúc này vùng khởi tạo xoáy đã bắt đầu xuất hiện và kéo dài phía sau hình trụ. Khi hệ số Reynold nằm trong phạm vi từ 100-200, tỉ lệ  $F(L_1) \cap L_2 / L_2$  tăng nhanh. Trong phạm vi hệ số Reynold này chiều dài vùng khởi tạo xoáy giảm nhanh và tiến đến ổn định tại  $Re = 200$  (Vũ, 2017a). Đây cũng chính là giá trị của hệ số Reynold để phân biệt dòng chảy tầng và dòng chảy rối. Khi  $200 < Re < 1000$  tỉ lệ  $F(L_1) \cap L_2 / L_2$

ít có sự thay đổi bởi lúc này vùng khởi tạo xoáy đã hình thành ổn định.



Hình 7. Ảnh hưởng của hệ số Reynold lên tỉ lệ chất lỏng đi vào rồi đi ra phía sau hình trụ

## 5. KẾT LUẬN

Dựa trên phân tích LCS và phương pháp mô phỏng theo vết đối tượng, nghiên cứu đã chỉ ra cơ chế di chuyển của các khối chất lỏng phía sau hình trụ trong quá trình các xoáy nước hình thành. Sự di chuyển của các khối chất lỏng cũng như điểm đến và đi của nó được thể hiện một cách rõ ràng, trực quan. Thêm vào đó, ảnh hưởng của hệ số Reynold lên lượng chất lỏng đi vào rồi đi ra cũng được định lượng. Khi hệ số Reynold nằm trong phạm vi từ 100-200, tỉ lệ này tăng lên nhanh chóng và sau đó gần như không thay đổi khi  $200 < Re \leq 1000$ . Với những kết quả tìm được, nghiên cứu này có thể làm cơ sở cho việc dự đoán sự chuyển động hay khuếch tán của các phần tử vật chất phía sau hình trụ, ví dụ như các hạt bùn cát có khối lượng nhỏ, các vi sinh vật trôi nổi theo dòng chảy.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Vũ, H. C., (2017a). “Nghiên cứu cấu trúc dòng chảy xung quanh hình trụ tròn sử dụng “ Lagrangian Coherent Structure.” Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường. Số 57, trang 19-25.
- Vũ, H. C., (2017b). “Nghiên cứu đặc điểm của dòng chảy xung quanh hình trụ tròn.” Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường. Số 59, trang 114-119.
- Blake, M. C., and Kamran, M. (2008) “Vortex Shedding over a Two-Dimensional Airfoil: Where the Particles Come from.” Aerospace letters, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 3, pp. 545-547.
- Anslys Fluent (2012). Theory guide, Version 2012.
- Franco, E., Pekarek, D. N., Peng, J., and Dabiri, J. O. (2007). “Geometry of unsteady fluid transport during fluid–structure interactions.” *Journal of Fluid Mechanics*, 589, 125–145.

- Robert W. F., Philip, J. P., and Alan, T. Mc. (2008). *Introduction to Fluid mechanics, Seventh Edition*, pp. 412.
- 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), 327–350.
- Salman, H., Hesthaven, J. S., Warbuton, T., and Haller, G., (2007) "Predicting transport by Lagrangian coherent structures with a high-order method." *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 21, pp. 39-58.
- Shadden, S. C., Lekien, F., and Marsden, J. E. (2005). "Definition and properties of Lagrangian coherent structures from finite-time Lyapunov exponents in two-dimensional aperiodic flows." *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 212(3–4), 271–304.
- 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), 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*, 1–11.

#### **Abstract:**

#### **STUDY ON TRANSPORT MECHANISM OF FLOW BEHIND A CIRCULAR CYLINDER**

*In this study, the transport mechanism of flow behind a circular cylinder will be investigated based on Lagrangian Coherent Structure (LCS) analysis and particle tracking simulation. The flow behind the cylinder is divided into different regions and their movements will be predicted over time. This transport can be quantified based on LCS method. The study also highlights the effect of the Reynolds coefficients (60-1000) on this transport mechanism.*

**Keywords:** Lagrangian coherent structure, circular cylinder, flow structure, transport,

---

*Ngày nhận bài:* 01/3/2018

*Ngày chấp nhận đăng:* 21/5/2018