

FLOW ANALYSIS ON SLOPED SURFACES WITH DIFFERENT INCLINATION ANGLES

Nghiêm Hoàng Long¹, Phạm Văn Duy¹, Lê Đình Anh¹, Trần Thế Hùng^{2*}

¹University of Engineering and Technology - Vietnam National University, Hanoi

²Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	15/02/2023	This paper investigates the influence of inclination angle on flow field, surface pressure, separation and reattachment on the surface. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) with turbulent model $k-\omega$ SST was applied for simulation. The numerical results with sloped angle of 25° were then compared with previous experimental data for validation. The influence of inclination angle was investigated with 10 specific cases, thereby determining aerodynamic characteristics such as pressure distribution, surface flow, separation and reattachment positions on the surfaces. The results indicated that the turbulent model shows a high ability in analyzing complex flow around the sloped surface. The numerical results showed that the separation flow occurs for sloped angles above 15° . Then the flow is reattached again on the horizontal surface to form a recirculation region. The length of recirculation regions increases with sloped angles and reaches a maximum value of around $7h$ for the sloped angle of 90° . The relation between surface flow and pressure distribution on the surface was discussed in detail.
Revised:	11/4/2023	
Published:	16/4/2023	
KEYWORDS		
Wall shear stress		
Inclination angles		
Separation flow		
Reattachment flow		
Simulation		

PHÂN TÍCH DÒNG CHẢY TRÊN BỀ MẶT ĐỐC VỚI CÁC GÓC NGHIÊNG KHÁC NHAU

Nghiêm Hoàng Long¹, Phạm Văn Duy¹, Lê Đình Anh¹, Trần Thế Hùng^{2*}

¹Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

²Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	15/02/2023	Bài báo khảo sát ảnh hưởng của góc nghiêng tới dòng chảy, áp suất bề mặt, vị trí tách, hợp dòng trên bề mặt. Phương pháp trung bình theo Reynolds (RANS) với mô hình chảy rối $k-\omega$ SST được sử dụng cho mô phỏng. Kết quả số với góc nghiêng 25° được so sánh với kết quả thực nghiệm nhằm đánh giá mô hình. Ảnh hưởng của góc nghiêng được khảo sát cho 10 trường hợp cụ thể, từ đó xác định các đặc tính khí động đặc trưng như phân bố áp suất, dòng chảy trên bề mặt, vị trí tách và hợp dòng. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng mô hình rối cho độ chính xác cao trong mô tả dòng chảy trên bề mặt dốc. Mô phỏng số cho thấy hiện tượng tách dòng xuất hiện với góc vát trên 15° . Sau đó, dòng chảy hợp dòng lại trên bề mặt ngang và tạo ra vùng xoáy ngược. Chiều dài vùng chảy ngược tăng với góc dốc và đạt giá trị cực đại khoảng $7h$ cho trường hợp góc vát bằng 90° . Mối tương quan giữa dòng chảy trên bề mặt và phân bố áp suất được khảo sát chi tiết.
Ngày hoàn thiện:	11/4/2023	
Ngày đăng:	16/4/2023	
TỪ KHÓA		
Ma sát bề mặt		
Góc vát		
Tách dòng		
Hợp dòng		
Mô phỏng số		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7340>

* Corresponding author. Email: thehungmfti@gmail.com

1. Giới thiệu

Dòng chảy qua bề mặt vật dạng thành vát thường xuất hiện nhiều trong cuộc sống cũng như trong kỹ thuật, như dòng chảy qua cánh tà máy bay, dòng chảy quanh đuôi thân máy bay, tên lửa, dòng chảy phía sau nhà cao tầng. Dòng chảy dạng này thường được đặc trưng bởi hiện tượng tách, hợp dòng trên bề mặt vật và các xoáy tách dòng lớn sau đuôi [1]. Thêm vào đó, các đặc trưng của dòng đầu vào như vận tốc, độ chảy rối, số Reynolds cũng ảnh hưởng lớn tới đặc tính khí động của mô hình [2], [3].

Việc kiểm soát sự phân tách dòng chảy ở các vị trí góc nghiêng có ý nghĩa quan trọng trong việc tăng độ bền kết cấu, giảm lực cản, tăng tốc độ cho máy bay, tên lửa hay các dòng xe đua. Ví dụ với dòng chảy góc nghiêng ở sườn dốc, đồi núi, đặc trưng dòng chảy sẽ ảnh hưởng đến độ xói mòn, sự phát triển của thực vật và các ngôi nhà ở vị trí quanh sườn dốc [4], [5]. Ngoài ra dòng chảy tại vị trí góc vát trên các tòa nhà cao tầng cũng cần được nghiên cứu để đạt được độ an toàn cho kết cấu, các vùng xoáy của dòng khí cũng gây ảnh hưởng đến các công trình xung quanh [6]. Hay trong ngành công nghiệp thủy điện, các xoáy nước cũng ảnh hưởng nhiều đến hiệu năng, tính an toàn của công trình. Trong lĩnh vực xe thể thao, xe đua việc mô phỏng, kiểm soát dòng chảy cũng rất quan trọng, những thay đổi nhỏ như vị trí, góc nghiêng của các chi tiết như hốc gió, cánh, kính chắn gió... cũng ảnh hưởng đến khí động học của xe và kết quả của cuộc đua [7], [8].

Đặc biệt trong lĩnh vực hàng không, máy bay hoạt động bằng cách điều khiển các cánh tà, cánh liệng, đuôi đứng để thay đổi dòng khí, tăng lực nâng máy bay. Vì vậy chỉ một vài thay đổi, nhiễu loạn của dòng khí xung quanh các vị trí cánh và đuôi máy bay cũng ảnh hưởng rất lớn đến tính an toàn máy bay. Sự nhiễu loạn dòng khí tại một vị trí góc nghiêng trên vỏ máy bay cũng gây ảnh hưởng đến các ăng ten hay các thiết bị đo áp suất, vận tốc khác trên thân máy bay. Vì vậy cần khảo sát sự thay đổi về dòng chảy tại các bề mặt góc nghiêng khác nhau, từ đó sử dụng các góc nghiêng phù hợp với điều kiện và yêu cầu của từng ngành công nghiệp.

Trong bài báo này, mô hình dạng góc nghiêng đơn giản với các góc nghiêng thay đổi từ 0 tới 90° được khảo sát nhằm phân tích và tổng hợp các đặc trưng khí động của dòng chảy. Phương pháp mô phỏng số dựa trên rời rạc hóa phương trình Navier-Stokes với mô hình rối $k-\omega$ SST được ứng dụng. Kết quả mô phỏng số được so sánh với thực nghiệm nhằm kiểm chứng mô hình. Ảnh hưởng của góc nghiêng tới phân bố áp suất, trường ma sát, vị trí tách, hợp dòng trên bề mặt được khảo sát cụ thể trong nghiên cứu này.

2. Phương pháp tính toán và bố trí mô hình

2.1. Phương pháp tính toán

Phương trình trung bình Navier-Stokes theo Reynolds (RANS) là phương trình chuyển động trung bình theo thời gian của dòng chảy [9]. Các phương trình RANS chủ yếu được sử dụng để mô tả các dòng chảy rối. Các phương trình này có thể được sử dụng với các phép tính gần đúng dựa trên các đặc tính của sự hỗn loạn dòng chảy để đưa ra các giải pháp trung bình theo thời gian gần đúng cho các phương trình Navier-Stokes. Các phương trình này có thể được viết bằng như sau:

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\rho \bar{\delta}_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (1)$$

Trong đó $i, j = 1, 2, 3$; u_i là thành phần vận tốc trung bình; p là áp suất; ρ là mật độ không khí.

Vế trái của phương trình này đại diện cho sự thay đổi động lượng trung bình của một phần tử chất lỏng do sự không ổn định trong dòng chảy trung bình và sự đối lưu của dòng chảy trung bình. Sự thay đổi này được cân bằng bởi lực trung bình của mô hình, ứng suất đẳng hướng do trường áp suất trung bình, ứng suất nhớt và ứng suất biểu kiến ($-\overline{u_i u_j}$) do trường vận tốc dao động, thường được gọi là ứng suất Reynolds.

Trong phương pháp RANS, tensor ứng suất Reynolds phụ thuộc vào độ nhớt động học ν_T . Tham số này được mô tả thông qua động năng chảy rối k và độ tiêu tán năng lượng ε . Các mô

hình dòng chảy rối thường được sử dụng để mô tả các tham số này bao gồm: *Spalart và Allmaras*, $k-\varepsilon$, và $k-\omega$. Đối với mỗi bài toán khác nhau thì lựa chọn mô hình khác nhau. Trong nghiên cứu này sử dụng mô hình chảy rối $k-\omega$ SST. Đây là mô hình hai phương trình, sử dụng cho dòng chảy cần mô tả lớp biên độ chính xác cao [10], [11].

Trong mô hình này, biểu thức ν_T và k phương trình tương tự như các giá trị trong mô hình $k-\varepsilon$. Sự khác biệt nằm ở việc sử dụng phương trình cho ω và ε , như được mô tả chi tiết bởi Wilcox [12], đối với các dòng chảy ở lớp biên, mô hình $k-\omega$ có ưu thế hơn cả trong xử lý vùng gần thành nhót và trong tính toán của nó cho các ảnh hưởng của gradient áp suất dòng chảy. Tuy nhiên, việc xử lý các ranh giới dòng tự do không rối là một trở ngại lớn: điều kiện biên khác không (phi vật lý) trên ω là bắt buộc và tính toán dòng chảy nhạy cảm với giá trị được chỉ định.

Hai phương trình bổ sung theo mô hình chảy rối $k-\omega$:

Phương trình năng lượng động học xoáy:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u j k)}{\partial x_j} = \rho + \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

Phương trình tỉ lệ phân tán:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3)$$

Trong đó hệ số nhót ν_T được xác định như sau:

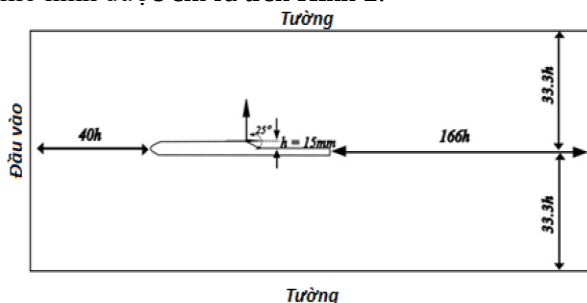
$$\nu_T = 1k_{\max} (1\omega SF_2) \quad (4)$$

Các tham số σ_k , σ_ω , SF là các hệ số cho trước và được xác định tùy thuộc vào vị trí gần hoặc xa bề mặt.

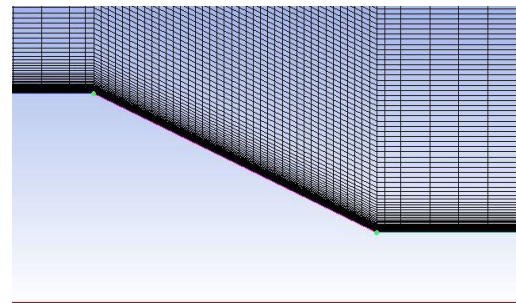
2.2. Bố trí mô hình cho tính toán

Trong bài nghiên cứu này, tính toán mô phỏng quanh bờ dốc với các góc nghiêng khác nhau thay đổi từ 5° tới 90° được thực hiện nhằm đưa ra hình ảnh cụ thể về phân bố áp suất, vận tốc, trường ma sát quanh bề mặt mô hình. Các kết quả mô phỏng được so sánh, kiểm chứng với mô hình thực nghiệm của Giuseppe Ceglia và cộng sự [1].

Vùng tính toán có dạng hình hộp chữ nhật với kích thước dài x rộng = $255h \times 67h$. Trong đó, khoảng cách từ biên trên và biên dưới tới bề mặt của mô hình là bằng nhau. Khoảng cách từ đầu vào tới mũi mô hình là $40h$ và khoảng cách từ đuôi mô hình đến đầu ra là $166h$. Mô hình vùng tính toán và lưới quanh góc nghiêng được chỉ trên Hình 1. Nghiên cứu sử dụng lưới có cấu trúc, được chia trên phần mềm ICEM. Kích thước lưới tại vùng sát bề mặt mô hình được lựa chọn nhỏ, với độ dày nhỏ nhất của điểm được chia với nhiều mật độ lưới khác nhau. Kích thước lưới quanh mô hình được chỉ ra trên Hình 2.



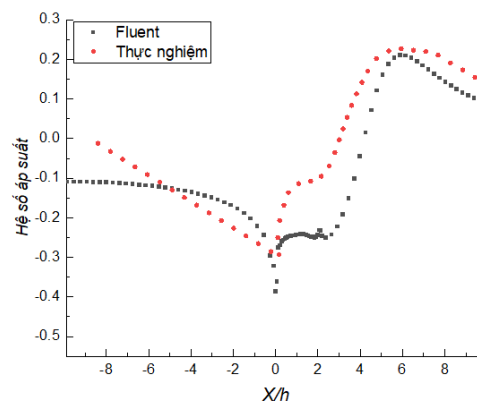
Hình 1. Thiết lập vùng tính toán



Hình 2. Cấu trúc lưới quanh vị trí góc nghiêng

2.3. Mô hình tính toán và so sánh với thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, tính toán mô phỏng quanh bờ dốc với các góc nghiêng khác nhau thay đổi từ 5° tới 90° được thực hiện nhằm đưa ra hình ảnh cụ thể về phân bố áp suất, vận tốc, trường ma sát quanh bề mặt mô hình. Hình 3 đưa ra kết quả phân bố áp suất trên bề mặt mô hình dựa trên mô phỏng số và thực nghiệm bởi Giuseppe Ceglia và cộng sự [1] tại góc nghiêng 25° . Trong đó, h là chiều cao độ dốc của mô hình ($h = 15$ mm, như được chỉ ra trên Hình 1), còn X là vị trí theo phương x . Vị trí $X/h = 0$ tương ứng với điểm bắt đầu góc vát. Có thể thấy rằng, kết quả mô phỏng cho xu hướng trùng với thực nghiệm với vùng áp suất thấp được hình thành tại mép trước của góc nghiêng. Phía sau góc nghiêng, áp suất có xu hướng tăng dần và đạt cực đại tại $X/h = 5$. Mặc dù có sai số giữa mô phỏng số so với thực nghiệm mà nguyên nhân chính là do ảnh hưởng của mô hình tính, sai lệch nằm trong khoảng cho phép. Mô phỏng số có thể dùng để tính toán cho trường hợp các góc nghiêng khác nhau, nhằm đưa ra xu hướng của dòng chảy trên bề mặt vát.



Hình 3. Phân bố hệ số áp suất trên bề mặt bằng mô phỏng số và thực nghiệm

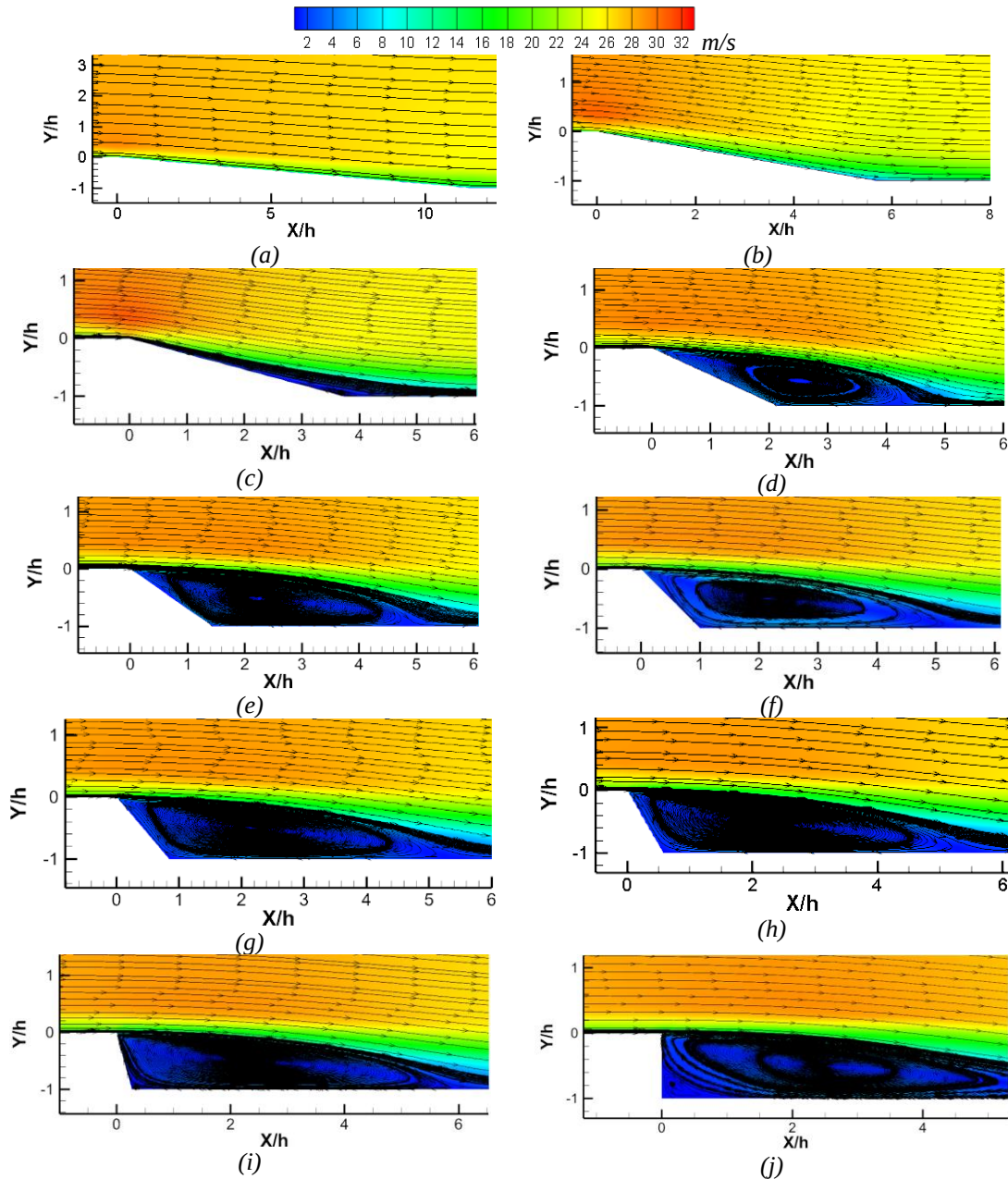
3. Ứng dụng phương pháp trong phân tích dòng chảy và thảo luận

3.1. Phân bố vận tốc

Hình 4 chỉ ra phân bố vận tốc và dòng chảy quanh góc nghiêng cho các trường hợp góc từ 5° tới 90° . Có thể thấy, vùng xoáy xuất hiện quanh mép sau của góc nghiêng với vận tốc nhỏ, trong khi quanh mép trước, vận tốc tăng lên đáng kể. Hiện tượng tách dòng xuất hiện ở đầu của góc nghiêng, vùng xoáy tập trung tại chân của đoạn dốc và lớn dần khi góc nghiêng tăng dần. Tại trường hợp 5° và 10° không xuất hiện vùng xoáy, góc 15° có vùng xoáy rất nhỏ, trong khi kích thước vùng xoáy tăng khi góc nghiêng lớn hơn 25° . Với góc 15° , 25° , sự hợp dòng xảy ra tại khoảng $X/h=4$, góc 35° hợp dòng tại $X/h=5$ và trường hợp 45° , 50° vị trí hợp dòng tại khoảng $X/h=5.5$. Với các góc 60° , 75° và 90° , vị trí hợp dòng tại khoảng lớn hơn $X/h=6$. Các trường hợp góc nghiêng lớn hơn 25° có vùng xoáy cuộn tròn đều, từ đó tồn tại dải vận tốc thấp phân bố đều. Đặc biệt đối với trường hợp góc 90° , có xuất hiện 1 vùng xoáy nhỏ tại chân của dốc. Nguyên nhân là vì góc 90° gây ra sự thay đổi đột ngột của trường dòng chảy.

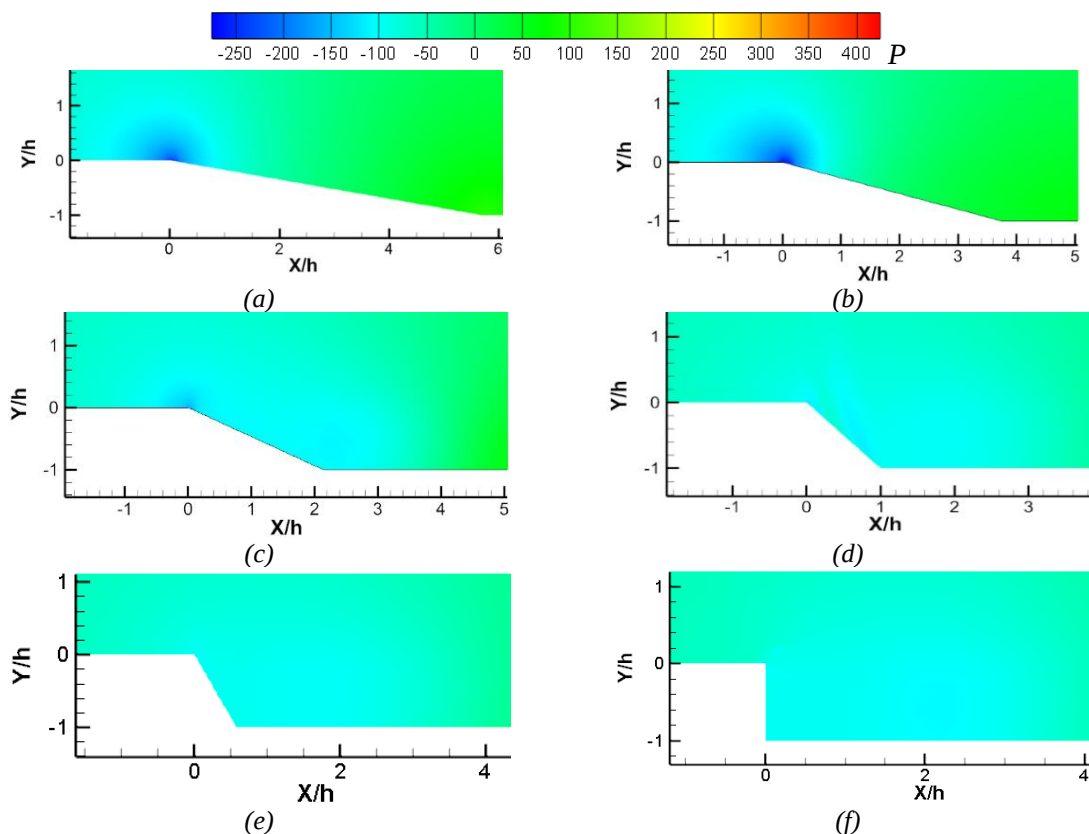
3.2. Phân bố áp suất

Hình 5 đưa ra phân bố áp suất tại bề mặt dốc, có thể thấy vùng áp suất thấp tập trung tại vị trí đầu và chân của dốc. Tại trường hợp 5° hầu như không xuất hiện vùng áp suất thấp. Trường hợp góc 10° , 15° áp suất thấp chỉ tập trung tại vị trí đầu dốc và tăng dần ở cuối dốc. Các trường hợp 25° đến 90° vùng áp suất thấp phân bố đều từ đầu đến cuối dốc, càng tăng góc nghiêng thì vùng áp suất thấp càng giảm. Sự khác biệt đáng kể xuất hiện tại góc nghiêng 5° . Điều này cho thấy rằng, phân bố áp suất ảnh hưởng đáng kể bởi hiện tượng dòng chảy quanh góc nghiêng.

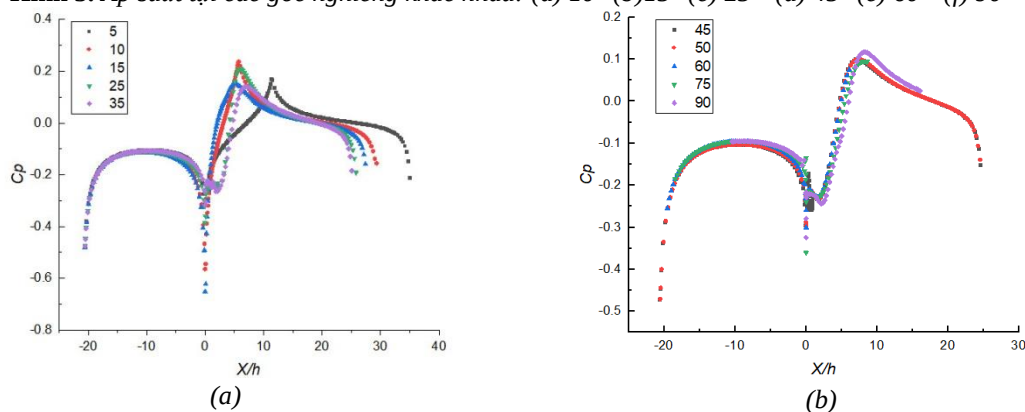


Hình 4. Trường vận tốc và dòng chảy tại các góc nghiêng khác nhau:
 (a) 5° (b) 10° (c) 15° (d) 25° (e) 35° (f) 45° (g) 50° (h) 60° (i) 75° (j) 90°

Hình 6 là đồ thị thể hiện hệ số áp suất tại mặt trên của mô hình. Tại phía trên của đoạn đường nổi ($-15 \leq X/h \leq -5$), áp suất trung bình theo xu hướng điển hình của một mặt phẳng với gradient áp suất bằng không. Có thể thấy hệ số áp suất giảm đột ngột tại vị trí $X/h=0$ là vị trí đầu của góc nghiêng do có sự tách dòng. Hệ số áp suất tăng lại phía sau chân góc nghiêng, tại khoảng $X/h=4$ và đạt giá trị lớn nhất tại khoảng $X/h=8$. Các trường hợp góc nghiêng có chiều cao h cố định nên độ dài góc nghiêng sẽ khác nhau, nên vị trí có hệ số áp suất lớn nhất trên đồ thị có sự khác nhau.



Hình 5. Áp suất tại các góc nghiêng khác nhau: (a) 10° (b) 15° (c) 25° (d) 45° (e) 60° (f) 90°

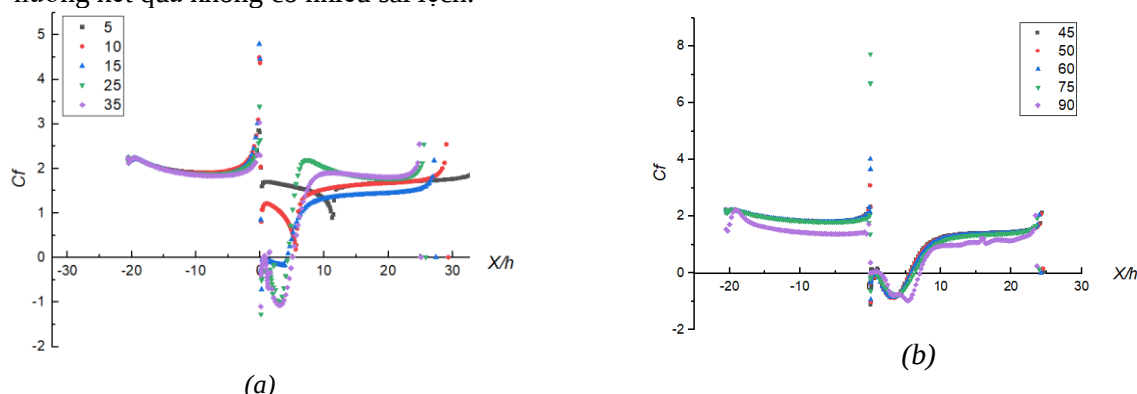


Hình 6. Hệ số áp suất tại các góc nghiêng: (a) Hệ số áp suất tại các góc nghiêng $5-35^\circ$
(b) Hệ số áp suất tại các góc nghiêng $45-90^\circ$

3.3. Đặc trưng về hệ số ma sát và vị trí hợp dòng, tách dòng

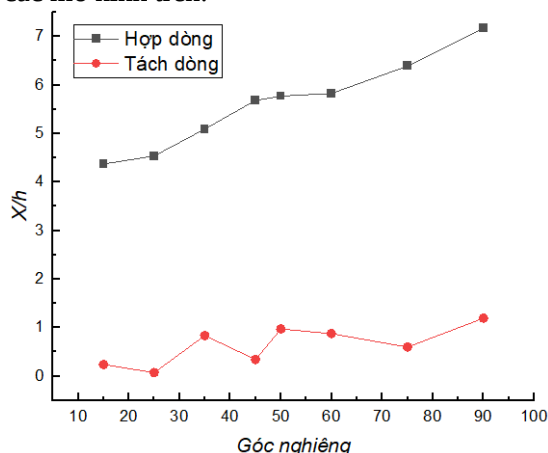
Để hiểu rõ hơn về hiện tượng tách, hợp dòng trên bề mặt mô hình, trường ma sát theo phương x trên bề mặt mô hình được phân tích. Điểm tách dòng được xác định là vị trí khi đường ma sát cắt trục hoành và thay đổi từ dương sang âm, trong khi điểm hợp dòng được xác định là vị trí đường ma sát cắt trục hoành và thay đổi từ âm sang dương. Các kết quả về đường ma sát được hiển thị trên hình 7. Có thể thấy rằng, tại góc vát 5 và 10 thì không có tách dòng trên bề mặt với đặc trưng dương của hệ số ma sát. Tại vị trí góc nghiêng, giá trị hệ số ma sát bề mặt thay đổi với biên độ lớn do ảnh hưởng của vùng xoáy. Tuy nhiên hiện tượng tách và hợp dòng xuất hiện với các góc nghiêng lớn hơn 10° , hình thành vùng xoáy và chảy ngược trên bề mặt mô hình. Tại các góc

nghiêng từ 5° - 35° , đồ thị có nhiều sự khác biệt về kết quả. Còn các trường hợp từ 45° - 90° , xu hướng kết quả không có nhiều sai lệch.



Hình 7. Hệ số ma sát bề mặt tại các góc nghiêng: (a) Hệ số ma sát tại các góc nghiêng 5° - 35°
(b) Hệ số ma sát tại các góc nghiêng 45° - 90°

Hình 8 tổng hợp vị trí tách hợp dòng trên bề mặt góc nghiêng. Có thể thấy rằng, hiện tượng tách dòng xảy ra sát mép trước của góc nghiêng và có sự thay đổi giữa các góc nghiêng khác nhau. Chiều dài vùng xoáy có xu hướng tăng khi góc nghiêng tăng. Với các góc nghiêng được khảo sát, chiều dài vùng xoáy nằm trong khoảng từ $4.5h$ tới $7.5h$. Cần chú ý rằng so với mô hình dạng đối xứng có vát thay đổi trong các nghiên cứu trước đây [13] – [16], chiều dài vùng tách hợp dòng trên mô hình 2D thường lớn hơn rất nhiều. Điều này xuất hiện do sự khác biệt đáng kể về cấu trúc dòng chảy trên các mô hình trên.



Hình 8. Vị trí hợp dòng và tách dòng với từng trường hợp góc nghiêng

4. Kết luận

Nghiên cứu đã khảo sát được sự ảnh hưởng của dòng chảy tới vị trí góc nghiêng bằng việc mô phỏng lực khí động trên phần mềm thương mại điện tử Ansys Fluent. Mô hình rối được chọn để giải quyết bài toán đó là RANS $k-\omega$ SST với mô hình dựa theo thực nghiệm của Giuseppe Ceglia và cộng sự [1] với các góc gió nghiêng được xét từ 5° đến 90° . Các kết quả đạt được của bài nghiên cứu như sau:

Kết quả mô phỏng gần với thực nghiệm. Sự khác biệt đáng kể về phân bố vận tốc, áp suất xảy ra với góc nghiêng bằng 5° , 10° và 15° . Với góc nghiêng lớn hơn 25° , hiện tượng về dòng chảy và phân bố vận tốc, áp suất tương đồng.

Các trường hợp góc nghiêng 5° và 10° không xảy ra hiện tượng tách dòng. Hiện tượng tách dòng xảy ra tại mép trước của góc nghiêng và điểm hợp dòng nằm trong khoảng từ $4.5h$ tới $7.5h$

với các góc nghiêng lớn hơn 15° . Vận tốc trên bề mặt mép trước của góc nghiêng tăng lên đáng kể. Vùng xoáy ngược trên bề mặt góc nghiêng có xu hướng mở rộng khi góc nghiêng tăng.

Áp suất, hệ số áp suất trên bề mặt góc nghiêng tăng dần và ít sự chênh lệch trên bề mặt đối với các trường hợp góc nghiêng lớn hơn.

Để cung cấp kết quả chính xác hơn, các phương pháp tính toán khác như sử dụng phương pháp xoáy lớn, phương pháp mô phỏng trực tiếp cho bài toán ba chiều cần được thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] G. Ceglia, M. Chiatto, C. S. Greco, F. D. Gregorio, G. Cardone, and L. de Luca, "Active control of separated flow over 2D back-facing ramp by an array of finite-span slotted synthetic jets," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 129, 2021, Art. no. 110475.
- [2] T. H. Tran, T. Ambo, T. Lee, L. Chen, T. Nonomura, and K. Asai, "Effect of boattail angles on the flow pattern on an axisymmetric afterbody surface at low speed," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 99, pp. 324–335, 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.07.034.
- [3] L. Chen, K. Asai, T. Nonomura, G. Xi, and T. Liu, "A review of Backward-Facing Step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 6, pp. 194–216, January 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.004.
- [4] H. Xiao, J. L. Wu, S. Laizet, and L. Duan, "Flows over periodic hills of parameterized geometries: A dataset for data-driven turbulence modeling from direct simulations," *Comput. Fluids*, vol. 200, October 2020, doi: 10.1016/j.compfluid.2020.104431.
- [5] Z. Zhou, T. Wu, and X. Yang, "Reynolds number effect on statistics of turbulent flows over periodic hills," *Phys. Fluids*, vol. 33, no. 10, 2021, Art. no. 105124.
- [6] R. Thibault and G. J. Poitras, "Uncertainty evaluation of friction velocity measurements by oil-film interferometry," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 139, no. 5, 2017, doi: 10.1115/1.4035461.
- [7] T. H. Tran, M. Anyoji, T. Nakashima, K. Shimizu, and A. D. Le, "Experimental Study of the Skin-Friction Topology Around the Ahmed Body in Cross-Wind Conditions," *J. Fluids Eng.*, vol. 144, no. 3, 2022, doi: 10.1115/1.4052418.
- [8] T. H. Tran, M. Hijikuro, M. Anyoji, T. Uchida, T. Nakashima, and K. Shimizu, "Deflector effect on flow behavior and drag of an Ahmed body under crosswind conditions," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 231, 2022, Art. no. 105238.
- [9] O. Reynolds, "On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion," in *Proceedings of the Royal Society-Mathematical and Physical Sciences*, 1995, vol. 451, no. 1941, pp. 5–47.
- [10] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [11] T. H. Tran, D. A. Le, T. M. Nguyen, C. T. Dao, and V. Q. Duong, "Comparison of Numerical and Experimental Methods in Determining Boundary Layer of Axisymmetric Model," in *International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation and Sustainable Development*, 2022, pp. 297–302.
- [12] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, 3rd Ed., Dcw Industries, Incorporated, 2006.
- [13] W. M. Presz and E. T. Pitkin, "Flow separation over axisymmetric afterbody models," *J. Aircr.*, vol. 11, no. 11, pp. 677–682, 1974, doi: 10.2514/3.60403.
- [14] T. H. Tran, "The Effect of Boattail Angles on the Near-Wake Structure of Axisymmetric Afterbody Models at Low-Speed Condition," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/7580174.
- [15] T. H. Tran and L. Chen, "Optical-Flow Algorithm for Near-Wake Analysis of Axisymmetric Blunt-Based Body at Low-Speed Conditions," *J. Fluids Eng.*, vol. 142, no. 11, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1115/1.4048145.
- [16] V. Gentile, F. F. J. Schrijer, B. W. van Oudheusden, and F. Scarano, "Afterbody effects on axisymmetric base flows," *53rd AIAA Aerosp. Sci. Meet.*, January 2015, pp. 1–15, doi: 10.2514/6.2015-1535.