

## ANALYZING FLOW OF AHMED BODY IN YAW ANGLE CONDITION

Pham Van Duy<sup>1</sup>, Nghiem Hoang Long<sup>1</sup>, Le Dinh Anh<sup>1</sup>, Tran The Hung<sup>2\*</sup><sup>1</sup>University of Engineering and Technology - Vietnam National University, Hanoi<sup>2</sup>Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	14/02/2023	Nowadays, new vehicles are being developed to replace traditional internal combustion engines. These types of vehicles require light weight to save energy, their movement is greatly affected by surrounding objects and wind direction. This paper examines the effect of the yaw on coefficient drag in the process of moving by using the numerical simulation method on the Ansys Fluent software. This simulation is applied on the Ahmed Body ½ scale model by the RANS $k-\omega$ turbulent mode. The research paper builds a grid communting, model selection, identifies aerodynamic characteristics such as coefficient drag and vortex velocity field around the model when moving. The results of this research allows to assess the effects of the yaw angles with the aim of studying reducing drag and increasing aerodynamic performance for the vehicles.
Revised:	11/4/2023	
Published:	16/4/2023	
<b>KEYWORDS</b>		
Aerodynamic		
Yaw angle		
Vortex field		
Velocity		
Separation flow		

## PHÂN TÍCH TRƯỜNG DÒNG CHẢY QUANH MÔ HÌNH XE AHMED TRONG ĐIỀU KIỆN GIÓ NGHIÊNG

Phạm Văn Duy<sup>1</sup>, Nghiêm Hoàng Long<sup>1</sup>, Lê Đình Anh<sup>1</sup>, Trần Thế Hùng<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Trường Đại học Công nghệ - ĐH Quốc gia Hà Nội<sup>2</sup>Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 14/02/2023	Hiện nay, các phương tiện mới đang được chú trọng phát triển nhằm thay thế cho các phương tiện sử dụng động cơ đốt trong truyền thống. Các loại phương tiện này yêu cầu trọng lượng nhẹ để tiết kiệm năng lượng, chuyển động của chúng bị ảnh hưởng nhiều bởi các vật thể xung quanh và hướng gió. Bài báo này khảo sát ảnh hưởng của góc nghiêng tới lực cản khí động trên đường di chuyển bằng phương pháp mô phỏng số trên phần mềm Ansys Fluent. Mô phỏng này được áp dụng trên mô hình Ahmed Body ½ scale bằng mô hình rối RANS $k-\omega$ . Bài nghiên cứu xây dựng lưới tính toán lựa chọn mô hình, xác định được đặc tính khí động như hệ số lực cản và trường vận tốc xoáy xung quanh mô hình khi chuyển động. Kết quả của nghiên cứu này cho phép đánh giá ảnh hưởng của gió nghiêng tới đặc trưng khí động làm cơ sở để nghiên cứu xây dựng hệ thống giảm lực cản và tăng chất lượng khí động cho mô hình.
Ngày hoàn thiện: 11/4/2023	
Ngày đăng: 16/4/2023	
<b>TỪ KHÓA</b>	
Khí động lực học	
Góc gió nghiêng	
Trường xoáy	
Vận tốc	
Tách dòng	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7330>

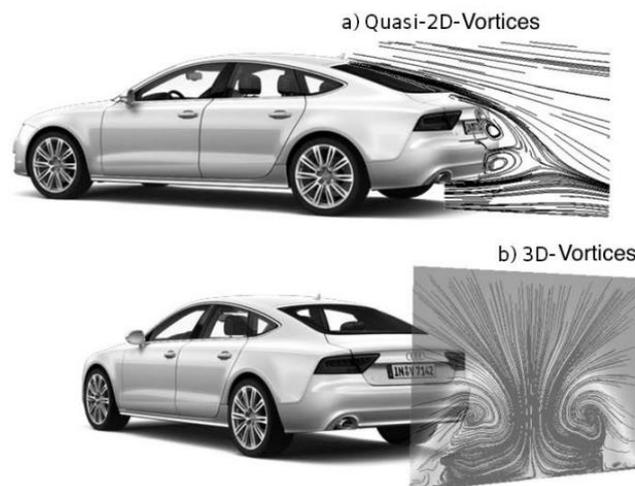
\* Corresponding author. Email: tranthehung\_k24@lqdtu.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Nghiên cứu hiện tượng dòng chảy quanh các phương tiện giao thông trên mặt đất như ô tô, xe buýt được chú trọng trong những năm gần đây. Theo ước tính, lực cản khí động sinh ra do các hiện tượng dòng chảy có thể chiếm tới 50% tổng lực cản của toàn bộ xe trên cao tốc [1]. Giảm lực cản khí động giúp giảm mức nhiên liệu tiêu thụ, nâng cao chất lượng của xe và giảm các vấn đề về ô nhiễm môi trường. Điều này có vai trò quan trọng khi nguồn nhiên liệu hóa thạch đang ngày càng cạn kiệt. Mặc dù xe điện được phát triển và đã đi vào hoạt động, số lượng xe sử dụng nhiên liệu hóa thạch còn tương đối lớn [1].

Trong nghiên cứu về đặc trưng khí động cho mô hình xe, nhiều dạng mô hình chuẩn như mô hình xe Ahmed [2], [3], mô hình xe Windsor [4] và mô hình General Motor [1] đã được sử dụng. Trong đó, mô hình xe Ahmed được sử dụng khá phổ biến trong nghiên cứu dòng chảy quanh đuôi bởi tính đơn giản của mô hình và mang đầy đủ các đặc trưng điển hình của dòng chảy. Mô hình có thân dạng hình hộp chữ nhật với phần đuôi có góc vát thay đổi. Khi góc vát nhỏ, dòng chảy bám sát bề mặt đuôi vát và ko hình thành tách dòng, giúp lực cản của mô hình giảm theo góc vát. Tại góc vát khoảng  $12,5^\circ$ , vùng chảy ngược và hai xoáy dọc xuất hiện trên bề mặt đuôi vát. Cấu trúc này có xu hướng mở rộng và tăng dần khi góc vát tăng, làm tăng đáng kể lực cản của mô hình. Tại góc vát từ  $25-30^\circ$ , cấu trúc xoáy đạt cực đại. Khi góc vát tiếp tục tăng, vùng xoáy ngược và hai dải xoáy dọc bị phá vỡ, lực cản của mô hình giảm. Nghiên cứu dòng chảy quanh đuôi cho mô hình có góc vát  $25^\circ$  và phương pháp giảm lực cản được thực hiện bởi nhiều nhà nghiên cứu [5] – [11]. Đặc trưng dòng chảy quanh mô hình ô tô được chỉ trên Hình 1.

Trong những năm vừa qua, mô phỏng số cho thấy những tiến bộ đáng kể trong việc hiểu rõ dòng chảy xung quanh các phương tiện. Lý do chính cho sự tiến bộ này là các quan sát dòng chảy không còn giới hạn trên một số bề mặt của xe như thực nghiệm mà bao gồm toàn bộ không gian xung quanh xe. Các nghiên cứu sử dụng mô phỏng số đã được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu đặc trưng nhiều dạng dòng chảy và đặc tính khí động của mô hình khác nhau [12] – [14].



**Hình 1.** Các hiện tượng dòng chảy sau ô tô

Điều kiện môi trường cũng là một khía cạnh quan trọng ảnh hưởng trực tiếp tới dòng chảy xung quanh ô tô. Dòng chảy sau mô hình Ahmed là dòng chảy rối với nhiễu loạn lớn, bề mặt nghiên cứu có các xoáy dọc về hướng gió phân tích cấu trúc xung quanh mô hình và lực khí động của mô hình trong điều kiện gió nghiêng. Theo ước tính, khi góc nghiêng tăng từ 0 tới  $15^\circ$ , lực cản tác dụng lên mô hình có thể tăng tới hai lần. Do vậy nghiên cứu dòng chảy của mô hình khi góc nghiêng thay đổi có ý nghĩa quan trọng, giúp đề xuất phương pháp giảm lực cản phù hợp. Các nghiên cứu về dòng chảy quanh mô hình trong điều kiện gió nghiêng được thực hiện bởi

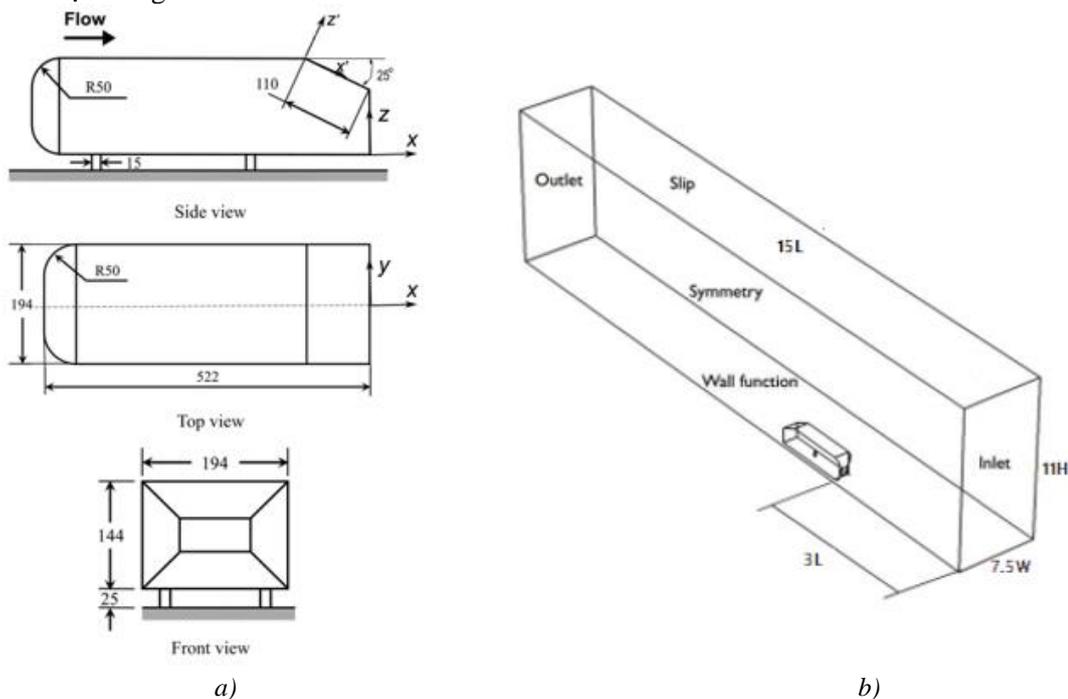
Trần Thế Hùng và cộng sự [2] bằng phương pháp thực nghiệm. Tuy nhiên, góc nghiêng giới hạn nhỏ dưới  $15^\circ$ , với một số tham số nhất định được đo.

Trong nghiên cứu này, hệ số lực cản của mô hình Ahmed body  $\frac{1}{2}$  scale được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS FLUENT tại số reynold  $2 \times 10^5$ . Góc vát của Ahmed body là  $25^\circ$  và các góc nghiêng nằm trong khoảng  $0^\circ$  đến  $15^\circ$ . Nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng mô hình nghiên cứu đặc tính khí động của mô hình xe Ahmed, đánh giá cấu trúc dòng chảy trên bề mặt nghiêng và các góc nghiêng khác nhau.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mô hình bài toán

Mô hình xe Ahmed body được trình bày bởi Ahmed và cộng sự [3] là mô hình cơ bản nhất để nghiên cứu đặc tính khí động của ô tô, với mỗi góc nghiêng khác nhau thì đặc tính khí động cũng khác nhau. Bởi vậy bài báo này sử dụng mô hình xe Ahmed làm cơ sở để tính toán phân tích lực cản, áp suất và trường ma sát bề mặt lên các góc gió nghiêng khác nhau từ đó làm cơ sở để cải tiến mô hình nhằm có thể sản xuất ra loại xe tiêu tốn ít năng lượng nhất. Ở nghiên cứu này, mô hình  $\frac{1}{2}$  Ahmed body có chiều dài 522 mm, chiều cao 144 mm và rộng 194 mm. Góc vát phía sau đuôi của mô hình là  $25^\circ$ . Kích thước và thông số thiết kế cụ thể của mô hình  $\frac{1}{2}$  Ahmed body được thể hiện trong Hình 2a.



**Hình 2.** Thông số 2D của mô hình xe Ahmed (a) và miền tính toán (b)

Vùng tính toán có dạng hình hộp chữ nhật với kích thước chiều dài  $\times$  chiều rộng  $\times$  chiều cao =  $15L \times 15W \times 11H$  với  $L$  là chiều dài,  $W$  là chiều rộng và  $H$  là chiều cao của mô hình xe Ahmed. Hình 2b hiển thị  $\frac{1}{2}$  miền tính toán. Nghiên cứu này tập trung vào độ lệch của gió tác động lên mô hình, lên các đặc điểm phức tạp của dòng chảy tập trung ở phần phía sau của mô hình. Khoảng cách từ đuôi của xe Ahmed đến đầu ra là 5172 mm giúp đảm bảo thu được toàn bộ vùng xoáy phía sau mô hình.

## 2.2. Phương pháp tính toán và điều kiện biên

Phương pháp trung bình Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) được sử dụng trong tính toán phân bố trường vận tốc và áp suất trung bình quanh mô hình. Phương pháp này dựa trên trung bình phương trình Navier-Stokes và bỏ qua ảnh hưởng của thời gian lên đặc tính của dòng chảy. Mặc dù hạn chế trong phân tích cụ thể đặc tính không dừng của dòng chảy, mô hình RANS được biết cho kết quả tương đối chính xác đối với dòng chảy trung bình, đồng thời giúp giảm thời gian tính toán và được sử dụng rất rộng rãi trong nghiên cứu gần đây [15] – [17]. Phương pháp RANS dựa trên trung bình hóa phương trình Navier-stokes (1) được viết như sau:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \end{cases} \quad (1)$$

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

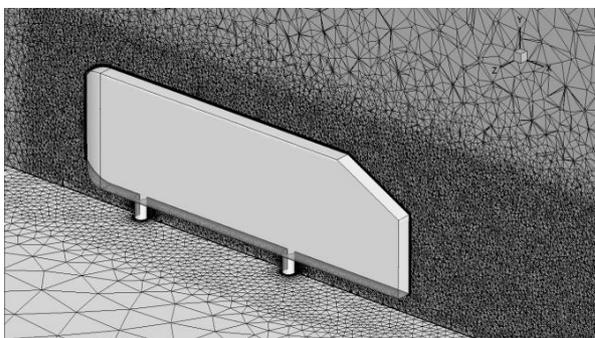
Để tính tới ảnh hưởng của rối, mô hình chảy rối  $k-\omega$  SST được sử dụng trong nghiên cứu này. Đây là mô hình hai phương trình, sử dụng cho dòng chảy gần mô tả lớp biên độ chính xác cao, được phát triển bởi Wilcox và đồng nghiệp [18]. Mô hình kết hợp ưu điểm của mô hình rối  $k-\epsilon$  ở khu vực dòng chảy cách xa đối tượng nghiên cứu, trong khi đó mô hình rối  $k-\omega$  được sử dụng gần bề mặt đối tượng cho tính toán dòng chảy chính xác trong lớp biên. Cụ thể, phương trình cho động năng chảy rối  $k$  và tốc độ tiêu tán rối đặc trưng  $\omega$  trong mô hình SST  $k-\omega$  (2) được tính toán thông qua công thức (2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} &= P + \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1-F_1) \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

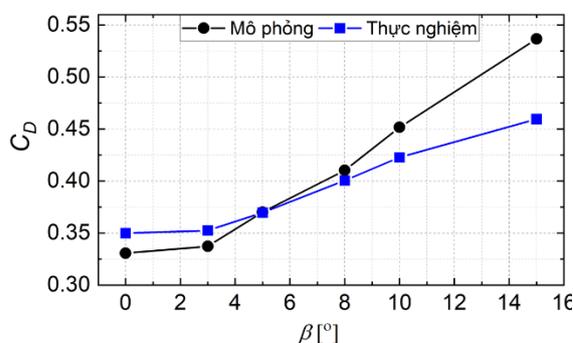
Trong đó hệ số nhớt  $v_t$  được xác định như sau:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)}$$

Lưới không cấu trúc với các phần tử pyramid được sử dụng trên toàn không gian tính toán. Trên bề mặt mô hình Ahmed body, phần tử lưới hexahedron với 20 lớp lưới được khởi tạo nhằm tính toán chính xác dòng chảy trong lớp biên (Hình 3). Trong đó, chiều dày lớp lưới đầu tiên là  $10^{-4}$  m, tương ứng với giá trị  $y^+ = 5$ .



Hình 3. Lưới xung quanh mô hình



Hình 4. Kết quả hệ số lực cản so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm

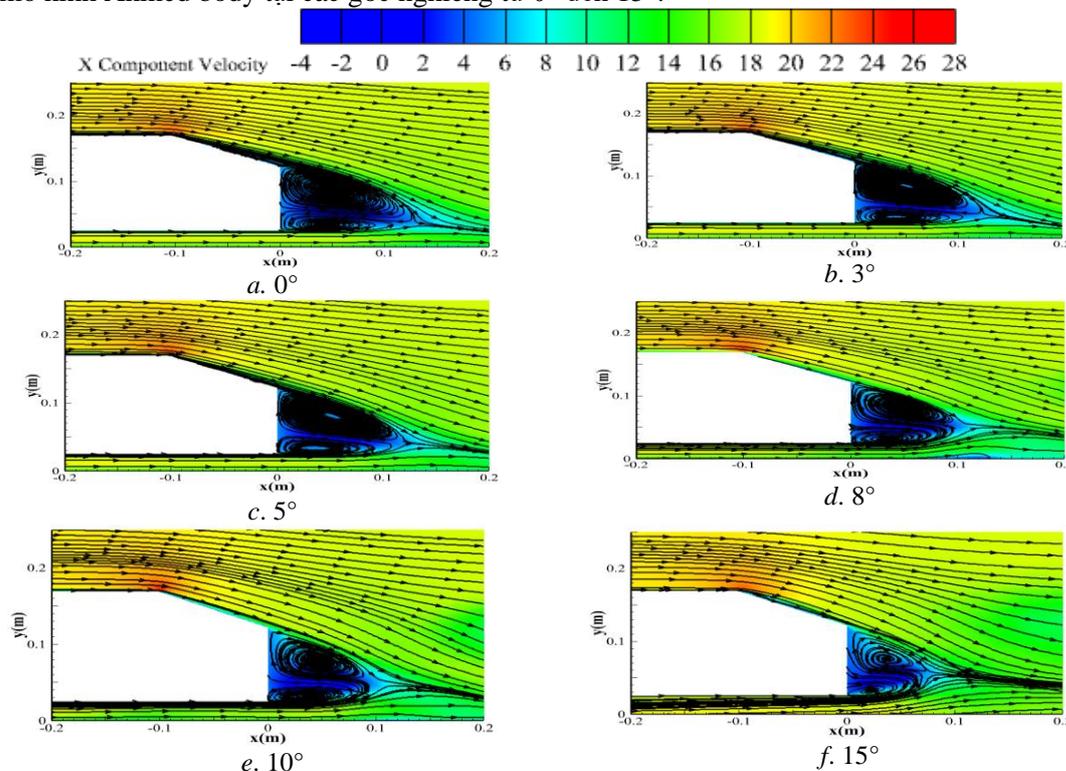
### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Ảnh hưởng của gió nghiêng tới lực cản khí động

Lực cản khí động có vai trò quan trọng trong đánh giá chất lượng khí động của mô hình. Giá trị này có xu hướng tăng khi góc gió nghiêng tăng. Trong phần này lực cản tính toán bằng mô phỏng số được so sánh với kết quả thực nghiệm khảo sát trên mô hình có cùng kích thước nhằm đánh giá hiệu quả của phương pháp trong xác định tham số khí động. Hình 4 đưa ra kết quả tính toán hệ số lực cản cho góc gió nghiêng thay đổi từ  $0^\circ$  tới  $15^\circ$ . Các kết quả thực nghiệm được công bố bởi Trần Thế Hùng và cộng sự [2] trong nghiên cứu trước. Hệ số lực cản tính theo diện tích đặc trưng cắt ngang thân ô tô tại góc nghiêng bằng  $0$ . Có thể thấy rằng xu hướng giữa lý thuyết và thực nghiệm là tương đồng. Cụ thể, hệ số lực cản dường như không thay đổi tại góc nghiêng  $0^\circ$  đến  $3^\circ$  sau đó chúng tăng dần lên theo độ tăng của góc gió nghiêng. Đối với các góc gió nghiêng nhỏ từ  $0^\circ$  đến  $8^\circ$  phép đo hệ số lực cản trên phần mềm mô phỏng rất sát với kết quả thực nghiệm. Điều này khác với nghiên cứu của Meile và cộng sự [19] cho mô hình góc vát  $25^\circ$ , trong đó là hệ số lực cản dường như không đổi tại góc nghiêng từ  $-25^\circ$  đến  $25^\circ$  tại số Reynold là  $2.8 \times 10^6$ . Từ đó cho thấy rằng xu hướng lực cản trong điều kiện gió nghiêng bị ảnh hưởng rất nhiều bởi số Reynold. Kết quả cũng chỉ ra rằng tại góc nghiêng  $15^\circ$ , sai lệch giữa mô phỏng số với thực nghiệm lớn. Điều này có thể giải thích rằng do mô hình mô phỏng số chưa đủ chính xác trong mô phỏng trường dòng chảy không dừng quanh mô hình. Tuy nhiên, việc lựa chọn mô hình tính toán và chia lưới cho kết quả khá tốt với góc gió nghiêng nhỏ.

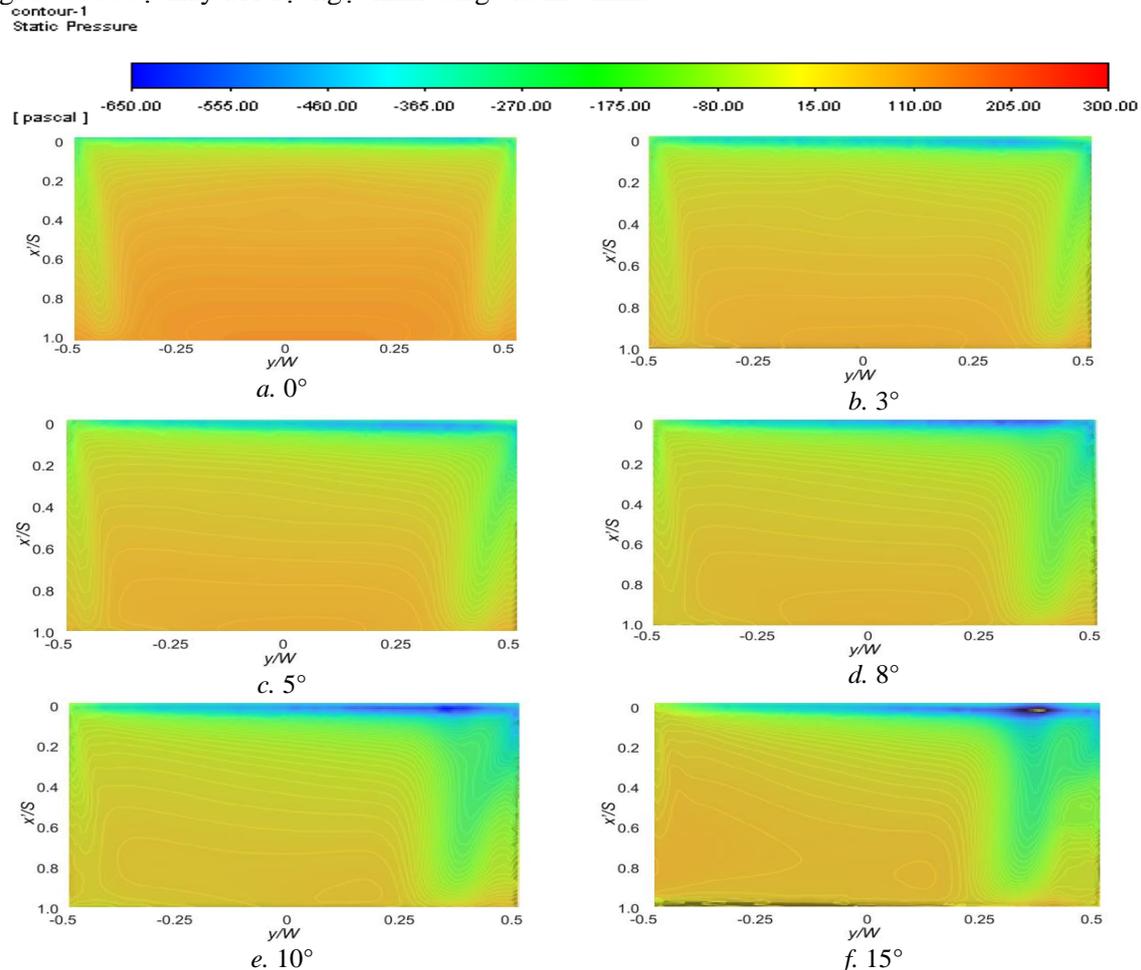
#### 3.2. Dòng chảy xung quanh mặt phẳng đối xứng của mô hình

Trong phần này, trường dòng chảy xung quanh mặt phẳng đối xứng của mô hình được phân tích bằng mô phỏng số cho các góc nghiêng khác nhau nhằm làm rõ hơn cấu trúc xoáy phía sau của mô hình. Hình 5 thể hiện phân bố vận tốc theo phương dọc với các đường dòng chảy xung quanh mô hình Ahmed body tại các góc nghiêng từ  $0^\circ$  đến  $15^\circ$ .



Hình 5. Trường vận tốc xung quanh mô hình

Có thể thấy rằng kích thước vùng xoáy sau đuôi có xu hướng giảm dần khi góc nghiêng tăng. Tại góc nghiêng bằng không, tách dòng xuất hiện từ mép trước của đuôi vát với chiều dài vùng xoáy khoảng  $1H$ . Tuy nhiên tại góc nghiêng  $15^\circ$ , chiều dài vùng xoáy khoảng  $0.8H$ . Vùng xoáy sau đuôi đặc trưng bởi vận tốc thấp, làm giảm áp suất trên mặt đáy đứng và tăng lực cản của mô hình. Kết quả phân bố dòng chảy cũng chỉ ra rằng, vận tốc có xu hướng tăng tại mép trước của góc vát do sự thay đổi đột ngột hình dáng của mô hình.

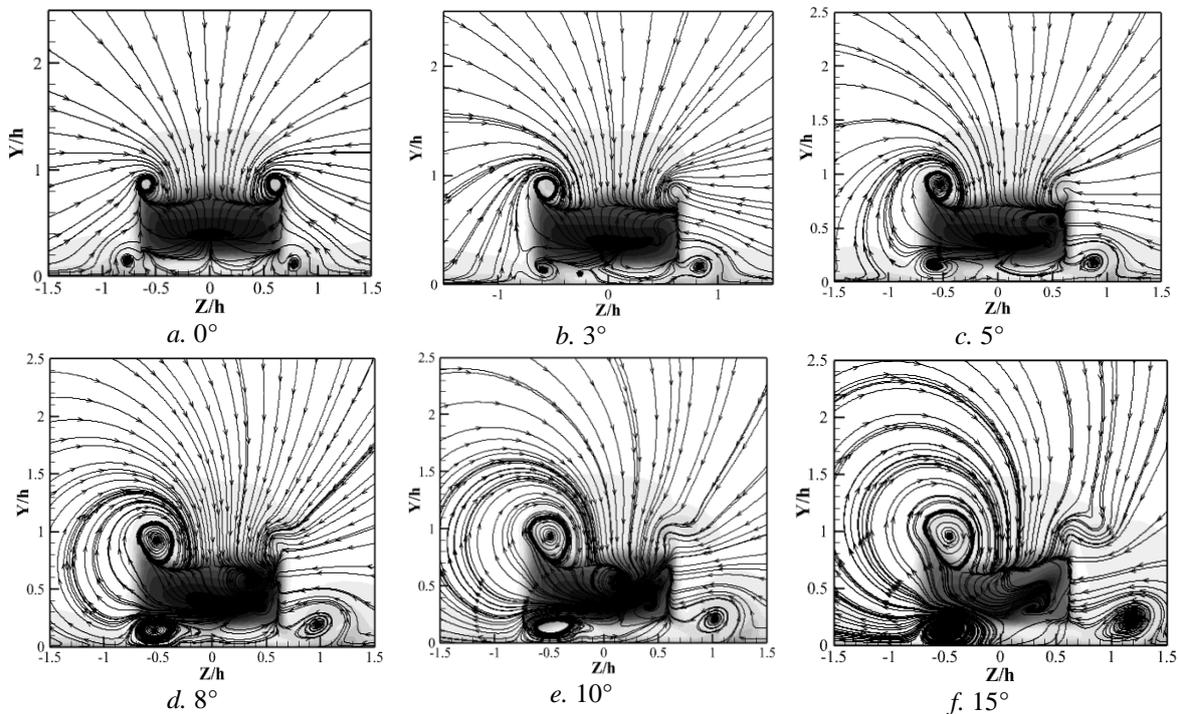


**Hình 6.** Phân bố trường áp suất trên bề mặt vát

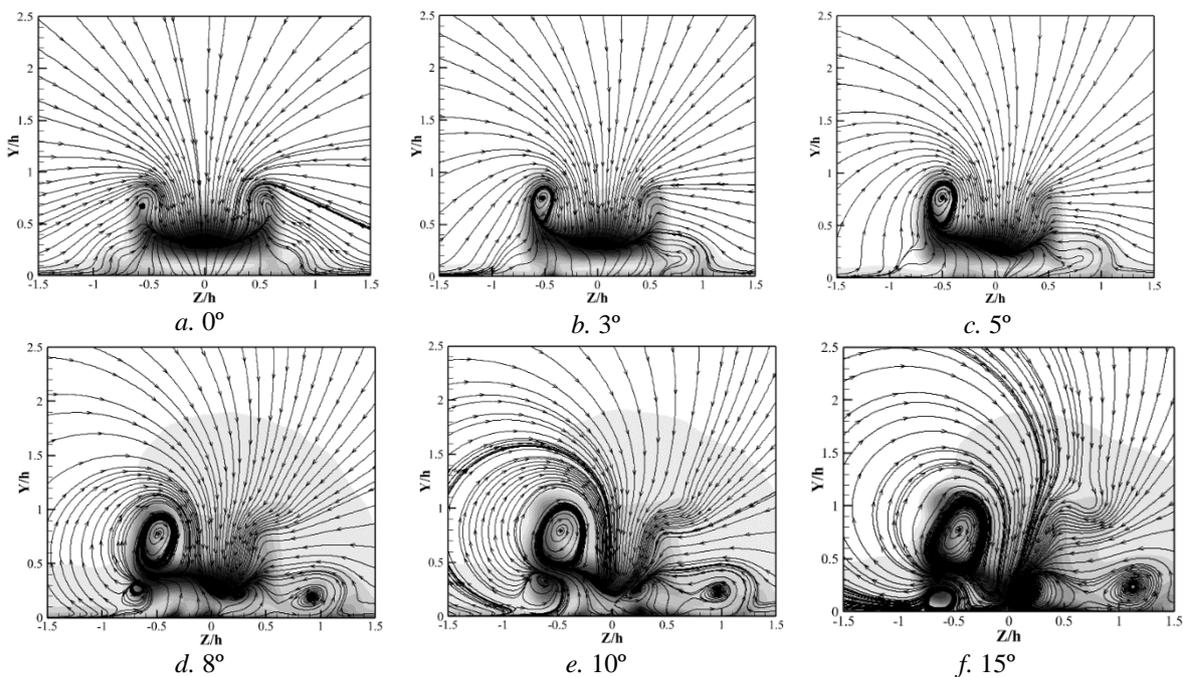
Hình 6 đưa ra phân bố áp suất trên bề mặt vát cho các góc gió nghiêng khác nhau từ  $0$  tới  $15^\circ$ . Tại góc nghiêng bằng  $0$ , phân bố áp suất trên bề mặt đối xứng theo phương dọc. Sự xuất hiện của dải xoáy dọc C-pillar dẫn tới hình thành hai vùng áp suất thấp trên bề mặt đuôi. Sát mép trước của mô hình, vùng áp suất thấp được hình thành do sự xuất hiện của vùng chảy ngược trên bề mặt. Tính đối xứng bị mất đi khi tăng góc nghiêng của mô hình. Trên bề mặt đón gió, vùng áp suất thấp được mở rộng do sự phát triển của dải xoáy C-pillar trên vùng này. Vùng áp suất thấp trên vùng chắn gió (bên trái) có xu hướng thu nhỏ và biến mất tại góc gió nghiêng bằng  $15^\circ$ .

Từ các kết quả trên có thể thấy rằng hai dải xoáy dọc trên bề mặt đuôi vát là nguyên nhân chính dẫn tới sự thay đổi lực cản của mô hình. Để có cái nhìn cụ thể và chi tiết hơn, đường dòng trên bề mặt vuông góc phía sau mô hình được phân tích, như chỉ ra trên Hình 7. Ở đây đường dòng được phân tích vẽ dựa trên vận tốc theo phương  $Z$  và  $Y$  cho các góc nghiêng thay đổi từ  $0^\circ$  đến  $15^\circ$ . Tại góc nghiêng  $0^\circ$  ta thấy được sự đối xứng của hai xoáy phía trên. Các C-pillar thu được là các xoáy tròn đều nhau từ hai phía. Tại bề mặt dưới, hai xoáy bên cũng được hình thành, là kết quả của sự tương tác giữa dòng chảy quanh mô hình và bề mặt dưới. Khi góc nghiêng tăng

tới  $3^\circ$ , xoáy bên phân đón gió mở rộng, tuy nhiên xoáy bên bề mặt khuất gió giảm. Tại bề mặt dưới, xoáy bên phân đón gió có xu hướng bám sát bề mặt vật trong khi xoáy bên vùng khuất gió đi xa mô hình. Các nhận xét trên càng được thể hiện rõ ràng khi góc nghiêng tiếp tục tăng.



**Hình 7.** Trường vận tốc phía sau xe



**Hình 8.** Trường vận tốc cách xe một khoảng 0,1 m

Hình 8 thể hiện trường vận tốc phía sau thân xe với khoảng cách 0,1m. Với kết quả này có thể quan sát được trạng thái trường dòng chảy các C-pillar thay đổi như thế nào khi giá trị  $x$  thay đổi. Theo quan sát ta thấy với góc nghiêng  $0^\circ$  khoảng cách 30 cm sau mô hình không còn xuất hiện

các vùng xoáy nữa, điều này khác với các góc nghiêng còn lại khi vùng xoáy phía bên trái của phía sau mô hình phát triển lớn dần từ góc nghiêng  $3^\circ$  đến  $15^\circ$ . Góc nghiêng  $8^\circ$  và  $10^\circ$  xuất hiện thêm một xoáy nhỏ bên phải mô hình. Đặc biệt với góc nghiêng lớn nhất xuất hiện bốn trường xoáy hỗn loạn. So sánh giữa Hình 7 và Hình 8 thấy được vùng xoáy phía bên trên bên phải mô hình tất cả đều không xuất hiện khi dòng chảy cách xa mô hình, còn đối với vùng xoáy phía bên trái bên trên mô hình càng phát triển lớn hơn với các góc nghiêng lớn hơn. Có một điều thú vị đối với các trường hợp có góc nghiêng đó là càng xa mô hình các dòng xoáy bên phải có xu hướng xoáy kéo xuống dưới, dễ dàng quan sát được chúng ở góc nghiêng  $15^\circ$ .

#### 4. Kết luận

Bài báo này trình bày phương pháp mô phỏng CFD bằng phần mềm thương mại Ansys Fluent với độ chính xác bậc 2 cho các trường hợp góc nghiêng khác nhau của mô hình  $\frac{1}{2}$  Ahmed body. Mô hình rối  $k-\omega$  SST được sử dụng để mô phỏng các trường hợp góc gió nghiêng thay đổi từ 0 tới  $15^\circ$ . Các kết quả từ mô phỏng được so sánh với thực nghiệm thực hiện trên ống thổi khí động tại Đại học Hiroshima, Nhật Bản, cho thấy rằng mô phỏng khá sát với thực nghiệm; từ đó giúp làm giảm thời gian nghiên cứu và kinh phí cho các hoạt động về sau. Mô phỏng cũng cho thấy độ hội tụ không tốt trong trường hợp góc nghiêng lớn, tuy nhiên ưu điểm của mô hình rối này đó là mô tả được các dòng xoáy phía sau góc vát của mô hình từ đó có được cái nhìn trực quan hơn về sự ảnh hưởng khi các góc gió nghiêng thay đổi.

Các trạng thái dòng chảy khác nhau tại mỗi trường hợp khác nhau cho thấy được với các góc nghiêng càng cao thì lực cản càng tăng cao, xuất phát từ sự phát triển của dải xoáy C-pillar trên bề mặt đuôi vát. Phân tích dòng chảy trên bề mặt vuông góc sau đuôi vát cho thấy dòng xoáy trên vùng đón gió phát triển trong khi xoáy trên vùng khuất gió có độ lớn giảm dần khi tăng góc nghiêng của mô hình. Kết quả của nghiên cứu hiện tại làm cơ sở trong phân tích, đánh giá ảnh hưởng của gió nghiêng tới đặc trưng khí động của mô hình.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Choi, J. Lee, and H. Park, "Aerodynamics of heavy vehicles," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 46, pp. 441–468, 2014, doi: 10.1146/annurev-fluid-011212-140616.
- [2] 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.
- [3] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, "Some Salient Features of the Time -Averaged Ground," *SAE Trans.*, vol. 93, pp. 473–503, 1984.
- [4] J. Howell, A. Sheppard, and A. Blakemore, "Aerodynamic drag reduction for a simple bluff body using base bleed," *SAE Trans.*, vol. 112, pp. 1085–1091, 2003.
- [5] G. Vio, S. Watkins, P. Mousley, J. Watmuff, and S. Prasad, "Flow structures in the near-wake of the Ahmed model," *J. Fluids Struct.*, vol. 20, no. 5, pp. 673–695, 2005, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.03.006.
- [6] S. Krajnović and L. Davidson, "Flow around a simplified car, part 1: large eddy simulation," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 127, pp. 907 - 918, 2005.
- [7] M. Miozzi, A. Capone, F. Di Felice, C. Klein, and T. Liu, "Global and local skin friction diagnostics from TSP surface patterns on an underwater cylinder in crossflow," *Phys. Fluids*, vol. 28, no. 12, 2016, doi: 10.1063/1.4968525.
- [8] T. T. Hung, 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] T. Tunay, B. Sahin, and V. Ozbolat, "Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 57, pp. 165–176, 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.04.016.
- [10] D. Kim, H. Lee, W. Yi, and H. Choi, "A bio-inspired device for drag reduction on a three-dimensional model vehicle," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 11, no. 2, 2016, doi: 10.1088/1748-3190/11/2/026004.

- 
- [11] A. Kasai, S. Shiratori, I. Kohri, Y. Kobayashi, D. Katoh, H. Nagano, and K. Shimano, "Large-Scale Separated Vortex Generated in a Wake Flow of Ahmed's Body," *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 102, no. 2, pp. 373–388, 2019, doi: 10.1007/s10494-018-9950-2.
- [12] A. D. Le, B. Minh, T. V. Hoang, and T. H. Tran, "Modified Savonius Wind Turbine for Wind Energy Harvesting in Urban Environments," *J. Fluids Eng.*, vol. 144, no. 8, 2022, Art. no. 081501.
- [13] A. D. Le and T. H. Tran, "Improvement of Mass Transfer Rate Modeling for Prediction of Cavitating Flow," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 15, no. 2, pp. 551–561, 2022.
- [14] T. H. Tran, C. T. Dao, D. A. Le, and T. M. Nguyen, "Numerical study for flow behavior and drag of axisymmetric boattail models at different Mach number," in *Regional Conference in Mechanical Manufacturing Engineering*, 2022, pp. 729–741.
- [15] C. T. Dinh, D. Q. Vu, and K. Y. Kim, "Effects of Rotor-Bleeding Airflow on Aerodynamic and Structural Performances of a Single-Stage Transonic Axial Compressor," *Int. J. Aeronaut. Sp. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 599–611, 2020, doi: 10.1007/s42405-019-00239-5.
- [16] H. Viswanathan, "Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 3, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1007/s40430-021-02850-8.
- [17] T. H. Tran, H. Q. Dinh, H. Q. Chu, V. Q. Duong, C. Pham, and V. M. Do, "Effect of boattail angle on near-wake flow and drag of axisymmetric models: a numerical approach," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, pp. 563–573, Feb. 2021, doi: 10.1007/s12206-021-0115-1.
- [18] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, Third Edition, Dcw Industries, Incorporated, 2006.
- [19] W. Meile, T. Ladinek, G. Brenn, A. Reppenhagen, and A. Fuchs, "Non-symmetric bi-stable flow around the Ahmed body," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 57, pp. 34–47, 2016, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.11.002.