

## TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ CHẾ TẠO HẦM GIÓ QUY MÔ NHỎ ỨNG DỤNG TRONG THÍ NGHIỆM KHÍ ĐỘNG HỌC Ô TÔ

Lưu Thanh Thiên<sup>1</sup>, Hồ Phạm Tường Vy<sup>1</sup>, Bùi Công Hanh<sup>1</sup>  
Phan Thị Trúc Thảo<sup>1</sup>, Lê Quang Trí<sup>1</sup>

### Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày quy trình thiết kế, mô phỏng và chế tạo một mô hình hầm gió quy mô nhỏ với chi phí thấp nhằm phục vụ cho việc quan sát và phân tích đặc tính khí động học xung quanh mô hình ô tô. Dựa trên các nghiên cứu khoa học và tài liệu trước đây, nhóm tác giả đã xác định hình dạng và kích thước phù hợp cho các bộ phận chính trong hầm gió. Sau đó, kết hợp với mô phỏng số để đánh giá phân bố vận tốc và chất lượng dòng chảy trong buồng thử, làm cơ sở hiệu chỉnh và tối ưu hoá thiết kế trước khi chế tạo. Mô hình được gia công từ các vật liệu phổ biến, tích hợp hệ thống tạo khói sử dụng đá khô để trực quan hóa dòng khí. Kết quả thực nghiệm cho thấy dòng khí trong buồng thử đạt được độ ổn định cần thiết, hệ thống tạo khói hoạt động hiệu quả và các hiện tượng đặc trưng như tách dòng và dòng rối phía sau xe được tái hiện rõ ràng. Mô hình này là một giải pháp thử nghiệm hiệu quả, có thể giải quyết nhu cầu về thiết bị thử nghiệm trong môi trường giảng dạy và nghiên cứu có điều kiện thiết bị hạn chế.

**Từ khóa:** ANSYS, dòng rối, khí động học, hầm gió, mô hình xe, mô phỏng.

### CALCULATION, DESIGN AND FABRICATION OF A SMALL-SCALE WIND TUNNEL FOR APPLICATION IN AUTOMOTIVE AERODYNAMIC EXPERIMENTS

#### Abstract

This study presents the design, simulation, and fabrication process of a low-cost, small-scale wind tunnel model intended for observing and analyzing the aerodynamic characteristics around a car model. Based on prior scientific literature and research, the authors determined the appropriate geometry and dimensions for the wind tunnel's main components. Subsequently, numerical simulation was employed to evaluate the velocity distribution and flow quality within the test section, serving as a basis for design calibration and optimization before fabrication. The model was manufactured from common materials and integrated a dry-ice based smoke generation system for airflow visualization. Experimental results indicate that the airflow in the test section achieved the necessary stability, the smoke generation system operated effectively, and characteristic phenomena such as flow separation and wake turbulence behind the vehicle were clearly reproduced. This model is an effective experimental solution that addresses the need for testing equipment in teaching and research environments with limited resources.

**Keywords:** Aerodynamics, ANSYS, car model, simulation, wind tunnel, wake flow.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong ngành công nghiệp ô tô, khí động học là yếu tố then chốt quyết định đến hiệu suất vận hành, mức tiêu hao nhiên liệu và độ ổn định của ô tô. Để đánh giá khí động học một cách chính xác đòi hỏi phải có các thiết bị chuyên dụng như hầm gió, vốn có chi phí và yêu cầu kỹ thuật cao. Trước thực tế đó, nghiên cứu này tập trung vào thiết kế và chế tạo mô hình hầm gió quy mô nhỏ kết hợp với mô hình xe tỷ lệ 1:20, hướng đến ứng dụng trong môi trường học thuật. Mô hình sẽ có ưu điểm là chi phí thấp, cấu trúc đơn giản, dễ gia công phù hợp cho mục đích nghiên cứu và đào tạo.

### 2. TỔNG QUAN

Có 2 loại ống khí động thường được lựa chọn để thiết kế thu nhỏ là ống khí động vòng hở và ống khí động vòng kín. Ống khí động vòng kín, dòng khí tuần hoàn liên tục theo một vòng khép kín, sau khi ra khỏi buồng thử sẽ quay trở lại để tiếp tục chu trình. Ưu điểm là chất lượng dòng khí tốt, ít bị ảnh hưởng bởi môi trường. Nhược điểm là kết cấu phức tạp nên chi phí xây dựng cao. Ngược lại ống khí động vòng hở dòng khí đi một chiều từ môi trường vào buồng thử và xả ra ngoài. Ưu điểm là kết cấu đơn giản nên chi phí xây dựng thấp và do không bị tích tụ khí thải nên tốt

<sup>1</sup>Khoa Cơ khí Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh  
Email: lequangtri@hcmuaf.edu.vn

cho các thí nghiệm đo lực hoặc dùng khói để trực quan hóa dòng chảy. Nhược điểm là chất lượng dòng chảy kém hơn, dễ bị ảnh hưởng bởi môi trường.

Dựa trên các nghiên cứu khoa học và tài liệu trước đây, nhóm nghiên cứu đã xác định được hình dạng và kích thước tối ưu cho các bộ phận trong hầm gió. Tiếp đó, mô phỏng số được thực hiện bằng phần mềm ANSYS Fluent để đánh giá thiết kế, kiểm tra tính khả thi và xác định giới hạn thu nhỏ kích thước so với các yêu cầu lý thuyết ban đầu. Sự kết hợp này giúp giảm đáng kể chi phí chế tạo và tạo ra một mô hình quy mô nhỏ hiệu quả, đồng thời vẫn đảm bảo chất lượng dòng chảy cần thiết cho việc phân tích khí động học.

### 3. THIẾT KẾ TỔNG THỂ HẦM GIÓ

Mô hình được lựa chọn thiết kế theo cấu trúc của ống khí động mạch hở để đơn giản kết cấu, giảm chi phí và thuận tiện trong quá trình chế tạo.

Các thông số thiết kế chi tiết của hầm gió đã được hiệu chỉnh và tối ưu hóa dựa trên các khuyến nghị về lý thuyết khí động học và mô phỏng để ưu tiên tạo ra mô hình với quy mô nhỏ.

Mô hình hoạt động theo dạng hút với quạt hút được đặt ở phía sau buồng khuếch tán. Khi vận hành, không khí sẽ được hút từ môi trường bên ngoài, đi qua buồng tăng tốc, buồng thử, buồng khuếch tán, và sau đó được xả ra ngoài.

#### 3.1 Buồng thử

Buồng thử là khu vực trung tâm, nơi đặt mô hình khảo sát. Kích thước của buồng thử và vận tốc dòng khí đi qua nó là những yếu tố then chốt quyết định kích thước của các bộ phận khác trong hầm gió.

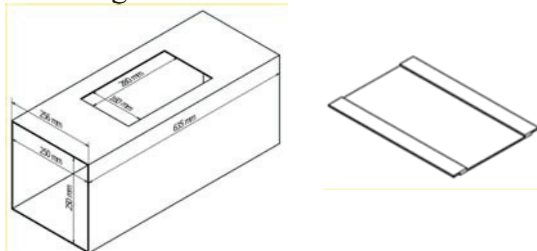
Do hạn chế của cụm quạt sử dụng, vận tốc dòng chảy mong muốn trong buồng thử khoảng

9,5 – 12,5 m/s. Mô hình khảo sát là xe Ford Mustang Mach 1 tỉ lệ 1:20, với kích thước tổng thể là 240 × 95,8 × 66,4 mm (dài × rộng × cao).

Để đảm bảo điều kiện dòng chảy trong buồng thử tương đồng với điều kiện chuyển động thực tế, chọn buồng thử tiết diện vuông có cạnh là 250 mm để đảm bảo tỷ lệ giữa diện tích căn chỉnh diện của mô hình xe ( $A_m$ ) và tiết diện buồng thử ( $A_0$ ) nhỏ hơn 10% [1], thiết kế này tỷ lệ khoảng 8%.

Đường kính thủy lực của buồng thử là 250 mm. Chiều dài buồng thử được chọn là 635 mm, nằm trong khoảng khuyến nghị từ 0,5 đến 3 lần đường kính thủy lực của buồng thử [2], kích thước này đã tính đến phần lắp đặt lưới tổ ong.

Để tạo thuận lợi cho việc thay thế mẫu thử trong quá trình thí nghiệm, nhóm nghiên cứu đã tích hợp thêm một nắp mở ở mặt phía trên của buồng thử.



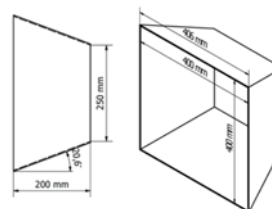
Hình 3.1 Buồng thử

#### 3.2 Buồng tăng tốc

Buồng tăng tốc làm thu hẹp tiết diện, biến áp suất tĩnh thành vận tốc làm tăng dần tốc độ dòng và hướng dòng khí thẳng hàng vào buồng thử.

Với cạnh của buồng thử là 250 mm. Chọn cạnh đầu vào buồng tăng tốc là 400 mm, lớn hơn buồng thử để dẫn khí vào hiệu quả.

Bán kính thủy lực của đầu vào buồng tăng tốc là 200 mm. Chiều dài buồng tăng tốc là 200 mm, nằm trong khoảng từ 0,15 đến 1 lần bán kính lối vào [2]. Do trước buồng tăng tốc không có buồng ổn định, chọn chiều dài lớn nhất sẽ giúp dòng khí kịp ổn định trước khi vào buồng thử.



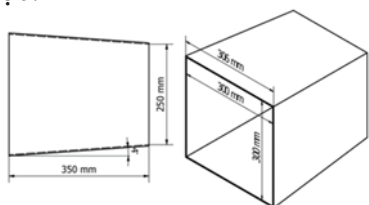
Hình 3.2 Buồng tăng tốc

### 3.3 Buồng khuếch tán

Buồng khuếch tán giúp mở rộng tiết diện, thu hồi áp suất làm giảm tốc độ dòng để hạn chế tổn thất và tránh gây nhiễu ngược ảnh hưởng buồng thử.

Với cạnh của buồng thử là 250 mm. Chọn cạnh đầu ra buồng khuếch tán là 300 mm để phù hợp với tiết diện quạt và đảm bảo tỷ lệ của buồng khuếch tán nhỏ hơn 2,5 [2].

Góc khuếch tán toàn phần nên nằm trong khoảng  $5^\circ - 7^\circ$  (tức là mỗi bên  $2,5^\circ - 3,5^\circ$  để kiểm soát sự tách dòng [2]). Nhưng khi cân nhắc giữ lý thuyết và thực tế, để rút ngắn chiều dài hầm gió nhóm chọn chiều dài buồng khuếch tán là 350 mm, ngắn hơn khuyến nghị vì dòng khí sẽ được làm đều trước bởi lưới tổ ong. Với thiết kế này, góc khuếch tán chỉ lệch  $0,5^\circ$  mỗi bên, có thể chấp nhận được.



Hình 3.3 Buồng khuếch tán.

### 3.4 Quạt

Quạt tản nhiệt loại DC không chổi than có thông số định mức 12V – 1,2A và kích thước 60 mm × 60 mm được sử dụng để tạo dòng trong hầm gió. Sử dụng 25 quạt mắc song song để ghép lại thành cụm có tiết diện 300 mm × 300 mm.

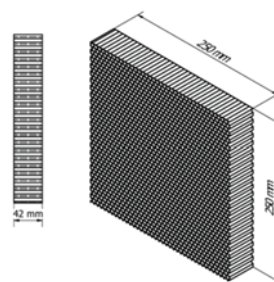


Hình 3.4 Cụm 25 quạt mắc song song

### 3.5 Lưới tổ ong

Lưới tổ ong có chức năng làm thẳng dòng, giảm thiểu các thành phần vận tốc ngang và triệt tiêu xoáy, qua đó định hướng luồng khí trở lại theo phương trục chính.

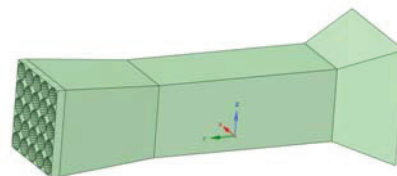
Có hai tiêu chí quan trọng trong thiết kế lưới tổ ong. Một là độ rỗng của lưới phải xấp xỉ 0,8 [1]. Hai là tỷ lệ giữa chiều dài đường kính lưới phải từ 6 - 8 [2]. Trong thiết kế này, nhóm nghiên cứu sử dụng ống nhựa đường kính trong 6 mm dày 0,25 mm để chế tạo lưới tổ ong. Độ rỗng của cấu trúc này khoảng 0,76, đảm bảo khả năng dẫn dòng tốt. Chiều dài ống được chọn là 42 mm, tương đương 7 lần đường kính.



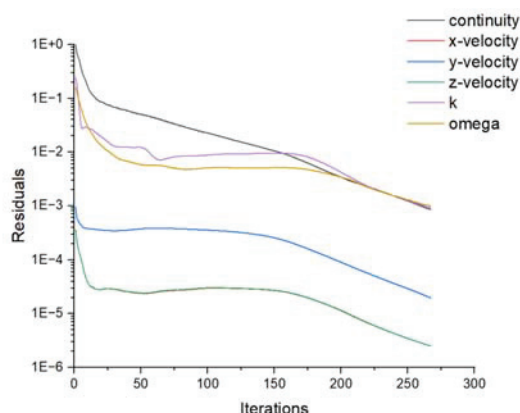
Hình 3.5 Lưới tổ ong

## 4. MÔ PHỎNG KIỂM TRA THIẾT KẾ

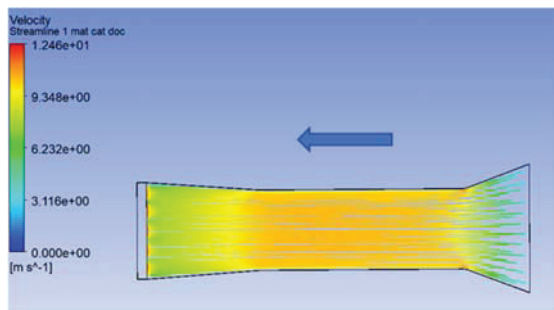
### 4.1 Mô phỏng số 1 (chưa đặt xe trong hầm)



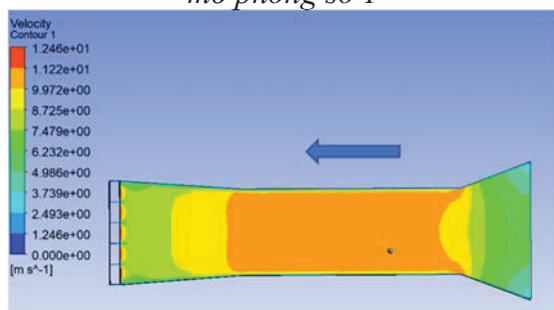
Hình 4.1 Mô hình 3D đưa vào ANSYS



Hình 4.2 Biểu đồ kiểm tra độ hội tụ của mô phỏng số 1



**Hình 4.3** Đường dòng trong ống khí động mô phỏng số 1



**Hình 4.4** Phân bố vận tốc trong ống khí động mô phỏng số 1

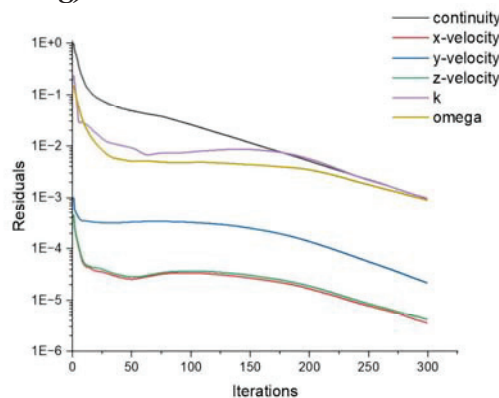
Thiết lập áp suất tương đối tại mặt vào là 0 Pa và mặt ra là -82,42 Pa. Mô hình rối được sử dụng là SST  $k - \omega$ . Chế độ giải được chọn là chế độ ổn định, với giải thuật SIMPLE và số bước lặp là 500 bước. Các thiết lập còn lại được giữ theo giá trị mặc định của phần mềm.

Theo kết quả mô phỏng, dòng khí trong buồng tăng tốc được thu hẹp, tăng tốc dần và hướng thẳng vào buồng thử. Tại buồng thử, dòng chảy ổn định, thẳng, song song, vận tốc phân bố tương đối đều thành một vùng màu cam đậm (khoảng 10,4 m/s), chứng tỏ cụm quạt vẫn tạo đủ lực hút. Tại buồng khuếch tán dù góc khuếch tán lớn hơn khuyến nghị khoảng  $0,5^\circ$  mỗi bên, nhưng dòng khí vẫn giảm tốc dần một cách ổn định, không bị tách dòng nghiêm trọng, không ảnh hưởng dòng khí trong buồng thử chứng tỏ buồng khuếch tán vẫn hoạt động đúng chức năng. Tuy nhiên, do cấu trúc rời rạc tâm quạt hút mạnh hơn ở rìa làm vận tốc tại mặt hút không đồng nhất có thể ảnh hưởng đến chất lượng dòng chảy ở cuối buồng thử. Để khắc phục cần lắp một lưới tổ ong ở đầu buồng thử để ổn định dòng tăng tốc vào và một lưới tổ ong ở cuối buồng thử giúp cân bằng, làm ổn định dòng

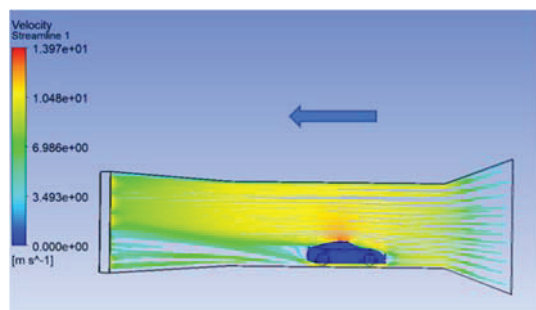
khí ở cuối buồng thử, hạn chế ảnh hưởng của lực hút chênh lệch giữa các quạt.

Tổng thể, các buồng đã được thiết kế hợp lý và vận hành hiệu quả; tuy nhiên, vẫn cần bổ sung thêm lưới tổ ong để nâng cao chất lượng và độ ổn định của dòng khí trong buồng thử.

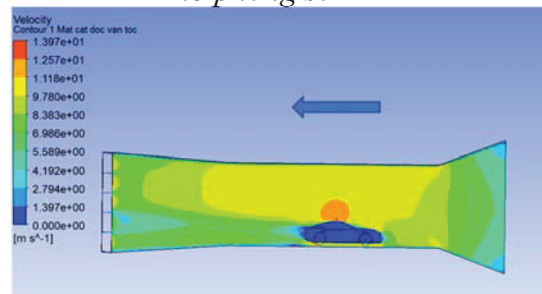
#### 4.2 Mô phỏng số 2 (đã đặt mô hình xe bên trong)



**Hình 4.5** Biểu đồ kiểm tra độ hội tụ của mô phỏng số 2



**Hình 4.6** Đường dòng trong ống khí động mô phỏng số 1



**Hình 4.7** Phân bố vận tốc trong ống khí động mô phỏng số 1

Hầm gió hoạt động hiệu quả, có thể quan sát được các hiện tượng khí động học xung quanh mô hình xe. Vận tốc dòng chảy tự do

trước xe là 9,6 m/s. Vùng rối vẫn nằm trọn trong buồng thử chứng tỏ buồng thử đã được thiết kế hợp lý, nhưng để vùng rối đó vẫn nằm trọn trong buồng thử thì vị trí đặt xe nên cách đầu buồng thử từ 170 – 190 mm.

### 5. CHẾ TẠO MÔ HÌNH

Mô hình xe được in 3D bằng vật liệu PLA, sau đó được xử lý làm mịn bề mặt.

Buồng thử được chế tạo bằng mica trong suốt để thuận tiện cho việc quan sát thí nghiệm. Các buồng tăng tốc và buồng khuếch tán sử dụng vật liệu Alu để giảm chi phí và đơn giản hóa quá trình chế tạo.



**Hình 5.1** Mô hình khí động học khung vỏ ô tô sau gia công



**Hình 5.2** Lắp thêm đèn led trong buồng thử

### 6. HỆ THỐNG TẠO KHÓI

Để trực quan hóa dòng chảy nhám nghiên cứu sử dụng khói từ đá khô  $\text{CO}_2$ .

Hệ thống tạo khói được thiết kế gồm bốn bộ phận chính: buồng khói chính, buồng phụ, ống dẫn khói và đầu phun.

Đầu phun khói: chuyển tiếp từ tiết diện tròn ( $\text{Ø}32$  mm) sang tiết diện có kích thước  $65 \times 10$  mm, hai đầu được bo cong bán kính R5. Thiết kế này cho phép dòng khói phủ đều lên toàn bộ mô hình xe, phù hợp với đa số mẫu xe thông dụng, trừ xe tải và xe khách.

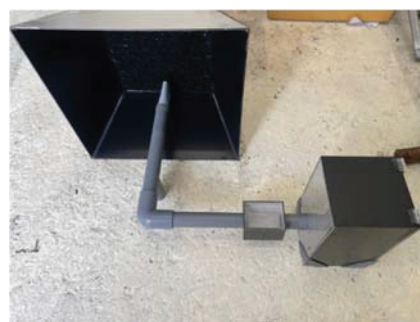
Ống dẫn khói sử dụng ống nhựa có đường kính ngoài 34 mm (đường kính trong 32 mm),

phù hợp với tiết diện mặt thoát khói trên đầu phun.

Buồng khói chính có kích thước  $136 \times 136 \times 226$  mm, được tối ưu sau nhiều lần thử nghiệm để đảm bảo đá khô thăng hoa ổn định, khói ra đậm và đều.

Buồng phụ có kích thước  $60 \times 60 \times 80$  mm, đóng vai trò điều tiết áp suất và vận tốc khói, giúp ổn định dòng khói trước khi đi vào buồng thử.

Ngoài ra, để đảm bảo dòng vào không bị rối, khoảng cách từ ống dẫn khói đến buồng tăng tốc nên tối thiểu 6 lần đường kính đặc trưng của vật cản [7]. Cụ thể trong thiết kế này, khoảng cách được chọn là 204 mm, tương đương 6 lần đường kính ngoài của ống dẫn khói ( $\text{Ø}34$  mm).



**Hình 6.1** Hệ thống tạo khói

### 7. THỬ NGHIỆM HOẠT ĐỘNG TRÊN MÔ HÌNH THỰC TẾ

#### 7.1 Cách vận hành và nguyên lý hoạt động

Sử dụng khoảng 300 – 400g đá khô đập nhỏ, cho vào buồng tạo khói chứa sẵn một lượng nước vừa đủ theo vạch định mức trên buồng. Đá khô thăng hoa tạo ra khói trắng lạnh ( $\text{CO}_2$  + hơi nước), làm tăng áp suất cục bộ trong buồng khói.

Buồng khói có lỗ trên để hút không khí ngoài vào cân bằng áp suất, lỗ dưới nối với ống dẫn khói. Khi khói được tạo ra, do  $\text{CO}_2$  nặng hơn không khí, cộng với sự chênh lệch áp suất giữa bên trong buồng khói và đầu ra, khói sẽ tự động bị đẩy ra theo lỗ dưới dẫn vào buồng phụ để ổn định dòng rồi tiếp tục vào hầm gió.

Khi bật quạt, tạo vùng áp suất thấp, hút khói và không khí từ bên ngoài qua buồng tăng tốc, buồng thử, buồng khuếch tán và xả ra ngoài. Nhờ vậy, dòng khói được đưa vào để mô phỏng chuyển động dòng khí quanh mô hình xe.

### 7.2 Thử nghiệm hoạt động

Vận tốc dòng khí đo được tại buồng thử trong mô hình thực tế (khi chưa đặt mô hình xe) đạt khoảng 10,4 m/s, tương đồng với kết quả thu được từ mô phỏng, nên có thể giả định rằng vận tốc dòng khí trước xe (khi đặt mô hình xe vào) là khoảng 9,6 m/s. Số Reynolds của thí nghiệm là:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1.22 \cdot 9,6 \cdot 0,24}{1,8 \cdot 10^{-5}} \approx 1,56 \cdot 10^5$$

Mặc dù giá trị này còn nhỏ so với  $Re$  của xe thực tế, nhưng nó vẫn đủ lớn để tái hiện được các đặc trưng dòng chảy cơ bản như điểm tách dòng và hình dạng vùng rối một cách đáng tin cậy.

Kết quả thực nghiệm trực quan hóa bằng khói có sự tương đồng cao với phân bố vận tốc trên mô phỏng. Cụ thể, dòng khói bám tốt trên mũi xe và thân xe, sau đó tách rõ rệt tại cạnh sau của xe, khớp với vị trí chuyển đổi vận tốc đột ngột được dự đoán trong mô phỏng. Sự xuất hiện của vùng khói bị khuấy động mạnh mẽ phía sau xe cũng khớp vùng vận tốc thấp được dự đoán, khẳng định mô hình hầm gió đã tái tạo thành công các hiện tượng khí động học quan trọng.



**Hình 7.1** Đầu phun xoay theo phương đứng.



**Hình 7.2** Đầu phun xoay theo phương ngang.

Dòng khí trong buồng thử tương đối ổn định có thể quan sát được các hiện tượng khí động học xung quanh mô hình xe. Dòng khí đi vào buồng thử trật tự, ổn định và không có nhiễu. Dòng khí bám tốt vào bề mặt đầu và mũi xe, vùng rối sau xe được tái hiện rõ ràng. Kết quả thử nghiệm tương đồng với mô phỏng.

## 8. KẾT LUẬN

Công trình nguyên cứu đã thiết kế và chế tạo thành công một mô hình hầm gió quy mô nhỏ phục vụ đánh giá đặc tính khí động học xung quanh mô hình xe. Mô hình hầm gió được tối ưu về cấu trúc và vật liệu nhằm giảm chi phí nhưng vẫn đảm bảo khả năng tạo dòng khí ổn định trong buồng thử. Hệ thống tạo khói sử dụng đá khô hoạt động hiệu quả, cho phép quan sát trực quan dòng khí đi qua mô hình xe, tái hiện rõ ràng hiện tượng tách dòng và vùng rối phía sau xe. Kết quả thực nghiệm có độ tương đồng cao với kết quả mô phỏng, khẳng định độ tin cậy của thiết kế.

Mô hình có thể tích hợp thêm các thiết bị đo lực để thu thập dữ liệu định lượng phục vụ phân tích sâu hơn. Khi đó cần tối ưu lại cụm quạt để nâng vận tốc và điều chỉnh lại lưới tổ ong ở cuối buồng thử.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Jewel B. Barlow, William H. Rae Jr., và Alan Pope, “*Low-Speed Wind Tunnel Testing*”, ấn bản lần thứ 3, Wiley-Interscience, 1999.
- [2] Md. Arifuzzaman và Mohammad Mashud, “*Design Construction and Performance Test of a Low Cost Subsonic Wind Tunnel*”, IOSR Journal of Engineering, tập 2, số 10, trang 83–92, 2012.
- [3] Tô Hoàng Tùng, “*Nghiên cứu cải thiện dạng khí động học vỏ xe khách lắp ráp tại Việt Nam*”, luận án Tiến sĩ Kỹ thuật cơ khí động lực, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, 2016.
- [4] Phan Thành Long và Nguyễn Quang Cư, “*Thiết kế và mô phỏng ống khí động vòng kín cỡ nhỏ, làm việc ở tốc độ thấp*”, Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng, tập 18, số 11, trang 27 – 32, 2020.
- [5] Joseph Katz, “*Race Car Aerodynamics Design for Speed*”, trang 23-45, 1995.
- [6] B. Worthey, “*Subsonic Wind Tunnels*”, The Wind Tunnel Connection, 2006.
- [7] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), “*OSHA Technical Manual (OTM) – Section III: Chapter 3 – Ventilation Investigation*”, U.S. Department of Labor. Truy cập ngày 25 tháng 5, 2025.

**Ngày nhận bài:** 02/10/2025