

NGHIÊN CỨU GIẢM SỨC CẢN KHÍ ĐỘNG CHO MÔ HÌNH XE AHMED BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHUN ĐỀU

RESEARCH ON REDUCING AERODYNAMIC DRAG OF AHMED MODEL USING STEADY BLOWING METHOD

Phan Thành Long^{1*}, Nguyễn Văn Đông¹, La Văn Phương¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: ptlong@dut.udn.vn

(Nhận bài: 10/6/2021; Chấp nhận đăng: 02/7/2021)

Tóm tắt - Phương pháp điều khiển dòng chảy chủ động bằng bộ phun đều được sử dụng để giảm lực cản khí động cho mô hình xe Ahmed đơn giản. Sử dụng phương pháp mô phỏng số, kết hợp mô hình rối $k - \omega$ SST để đánh giá hệ số cản của mô hình xe trong nhiều trường hợp hệ số xung lượng và góc phun khác nhau của bộ phun đều. Kết quả mô phỏng đã cho thấy, lực cản khí động của xe là nhỏ nhất trong trường hợp hệ số xung lượng là $2,21 \times 10^{-3}$ và góc phun là 30° . Trong trường hợp này, hệ số cản của xe là 0,221, giảm 8,67 % so với trường hợp xe không có trang bị bộ phun đều. Ảnh hưởng của bộ phun đều đến phân bố áp suất, cũng như cấu trúc của vết hút phía sau xe cũng được phân tích. Các kết quả trong nghiên cứu này chỉ ra thông số làm việc tối ưu của bộ phun đều, từ đó có thể tiến đến việc áp dụng phương pháp này trong thực tế để giúp giảm lực cản khí động của xe.

Từ khóa - Mô hình xe Ahmed; CFD; điều khiển dòng chảy chủ động; bộ phun đều

1. Đặt vấn đề

Ô nhiễm môi trường và biến đổi khí hậu đang là một trong các thách thức lớn nhất mà nhân loại đang đối mặt. Để giải quyết vấn đề này, một trong các biện pháp đang được nghiên cứu và áp dụng nhiều nhất là cắt giảm sự phụ thuộc vào các nguồn nhiên liệu hóa thạch, thay thế bằng các nguồn nhiên liệu sạch, nhiên liệu tái tạo. Trong lĩnh vực giao thông vận tải, để giải quyết bài toán ô nhiễm môi trường này, đòi hỏi các phương tiện phải giảm lượng tiêu hao nhiên liệu hoặc phải chuyển sang một nguồn nhiên liệu khác thay thế cho nhiên liệu hóa thạch, ví dụ như ô tô điện. Điều này có ý nghĩa rất quan trọng, vì các phương tiện giao thông vận tải là nguyên nhân gây ra 1/4 lượng khí nhà kính cũng như là nguồn gốc chính của việc ô nhiễm môi trường không khí trong các thành phố. Việc giảm lượng tiêu hao nhiên liệu, trong khi vẫn đảm bảo hiệu suất làm việc của các phương tiện giao thông vận tải, đặc biệt là các phương tiện giao thông đường bộ (chiếm khoảng 70 % lượng nhiên liệu tiêu hao của toàn bộ các loại hình phương tiện giao thông), liên quan chặt chẽ đến việc giảm lực cản khí động, vì công suất tiêu thụ của các phương tiện này phụ thuộc chủ yếu vào lực cản khí động [1].

Các phương pháp thường được áp dụng để giảm lực cản khí động của xe bao gồm tối ưu hóa hình dáng khí động của xe [2], điều khiển thụ động dòng chảy qua xe bằng cách lắp thêm một số chi tiết ở phía trước và sau xe, hoặc phương pháp điều khiển chủ động dòng chảy bằng cách sử dụng

Abstract - An active flow control method using steady blowing was applied to reduce aerodynamic drag for a simplified Ahmed model. The numerical simulation method, combined with the $k - \omega$ SST turbulent model was used to evaluate the drag coefficient of the vehicle model in many cases of different momentum coefficients and blowing angles of the steady blowing system. The simulation results showed that, the aerodynamic drag of the Ahmed body was the smallest in the case of the momentum coefficient of 2.21×10^{-3} and the blowing angle of 30° . In this case, the drag coefficient of the vehicle was 0.221, which had been reduced 8.67%, compared to the case without a steady blowing system. The effect of this system on the pressure distribution, as well as the structure of the rear wake at the rear body, was also analyzed. The results in this study indicated the optimal parameters of the steady blowing system, then it could be applied in the real-world situation to reduce the vehicle's aerodynamic drag.

Key words - Ahmed model; Computational Fluid Dynamics (CFD); Active flow control; steady blowing

các bộ kích thích dòng tia để điều khiển dòng chảy qua xe. Các phương pháp này chủ yếu tập trung vào việc giảm sức cản do vệt hút sinh ra phía sau xe. Pankajakshan và các cộng sự sử dụng các tấm lật lắp ở phía sau xe ở góc 15° có thể giúp giảm 15% lực cản khí động [3]. McCallen sử dụng phương pháp tương tự, tuy nhiên, các tấm lật được đặt ở góc 20° và cho kết quả giống nhau [4]. Ngoài ra, Doyle và các cộng sự sử dụng thuật toán di truyền để tối ưu hóa hình dáng tấm lật trên mô hình xe tải 2D. Kết quả cho thấy, lực cản khí động giảm rất đáng kể [5]. Bên cạnh việc giảm sức cản cho xe bằng các phương pháp điều khiển dòng chảy bị động như trên, một số nghiên cứu về việc ứng dụng phương pháp điều khiển chủ động dòng chảy trên xe cũng đã được thực hiện. Seifert sử dụng một cơ cấu trụ tròn xoay để giảm vệt hút phía sau xe, từ đó giúp giảm được 20 % lực cản khí động [6]. Taubert và Wygnanski sử dụng tấm lật có trang bị hệ thống điều khiển chủ động dòng chảy và giúp giảm lực cản khoảng 10 % [7]. Trong khi đó, Manosalvas sử dụng hiệu ứng Coanda để điều khiển dòng chảy trên mô hình xe tải đơn giản [8], Englar sử dụng dòng thổi đều để giảm sức cản khí động của xe và kết quả nghiên cứu cho thấy lực cản này có thể giảm hơn 30% [9]. Tuy nhiên, phương pháp này tiêu tốn nhiều năng lượng để tạo ra dòng thổi đều đó, vì vậy, chưa phù hợp để áp dụng trong thực tế [9]. Một số nhóm nghiên cứu khác, ví dụ F. Aloui [10] đã sử dụng bộ điều khiển sử dụng vật liệu piezoelectric để tạo dòng tia, sử dụng trong bộ điều khiển dòng chảy. Ưu điểm

¹ The University of Danang – University of Science and Technology (Phan Thanh Long, Nguyen Van Dong, La Van Phuong)

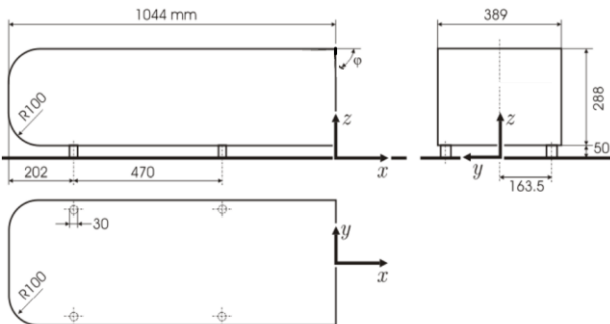
của bộ kích thích dòng tia này là nhỏ gọn, dễ điều khiển, tuy nhiên, vận tốc dòng tia tạo ra không lớn. Trong khi đó, Jonathan McNally và các đồng nghiệp [11] đã sử dụng bộ kích thích microjet để điều khiển dòng chảy phía sau mô hình xe thu nhỏ, kết quả cho thấy hệ số giảm gần 3% so với xe không có trang bị bộ điều khiển chủ động. Bên cạnh đó, ngoài việc sử dụng các bộ kích thích dòng chảy kiểu dòng tia như đã giới thiệu, một số nghiên cứu gần đây đã sử dụng bộ kích thích sử dụng plasma để điều khiển dòng chảy trên các mô hình xe đơn giản [12]. Các bộ kích thích dòng chảy này có hiệu suất cao, tuy nhiên, chi phí vận hành rất lớn, do vậy trước đây chúng thường được ứng dụng để điều khiển dòng chảy trên cánh máy bay.

Từ các nghiên cứu kể trên, có thể nhận thấy rằng trong các phương pháp điều khiển dòng chảy chủ động để giảm sức cản khí động của xe, phương pháp sử dụng dòng phun đều để điều khiển dòng chảy có cấu tạo đơn giản, giúp giảm đáng kể lực cản của xe. Tuy nhiên, phương pháp này tiêu tốn nhiều năng lượng, do vậy hiệu quả về mặt tiết kiệm năng lượng không cao. Chính vì vậy, nghiên cứu này sẽ tập trung đánh giá việc giảm sức cản bằng phương pháp phun đều, tại nhiều hệ số xung lượng và góc phun khác nhau, thông qua phương pháp mô phỏng số CFD, để từ đó xác định hệ số lưu lượng và góc phun tối ưu nhất, đảm bảo hiệu suất giảm sức cản khí động cho xe, đồng thời giảm năng lượng tiêu hao để tạo ra dòng phun đều, tăng hiệu quả về mặt năng lượng cho phương pháp điều khiển dòng chảy này. Việc mô phỏng không thực hiện trên mô hình xe thực tế, thay vào đó sẽ được đánh giá trên mô hình xe đơn giản, do Ahmed và các cộng sự đề xuất [13], nhằm đánh giá cấu trúc của vệt hút phía sau xe và ảnh hưởng của nó đến lực cản khí động của xe.

2. Mô hình mô phỏng số

2.1. Mô hình xe Ahmed

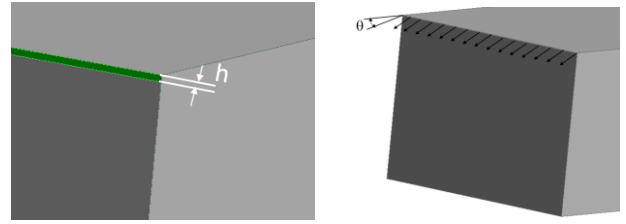
Mô hình xe Ahmed được đề xuất lần đầu vào năm 1984 [13], được sử dụng để nghiên cứu mối quan hệ giữa hình dạng của đuôi xe và lực cản khí động học. Cấu trúc dòng chảy trong vệt hút phía sau xe và lực cản khí động phụ thuộc rất nhiều vào góc nghiêng phía sau φ . Trong nghiên cứu này, mô hình xe Ahmed được sử dụng với góc nghiêng $\varphi = 90^\circ$, là hình dạng đặc trưng của các đuôi xe tải. Kích thước và hình dạng của mô hình xe Ahmed được biểu diễn trong Hình 1.



Hình 1. Kích thước mô hình xe Ahmed với góc nghiêng $\varphi = 90^\circ$

Việc điều khiển dòng chảy bằng phương pháp phun đều được thực hiện thông qua dòng khí được phun qua một khe hở có chiều cao h đặt ở phía trên cùng mặt sau của mô

hình xe. Góc phun θ của dòng khí so với phương nằm ngang có thể thay đổi trong mô hình mô phỏng CFD để tìm ra góc phun tối ưu nhất cho phương pháp này (Hình 2).



Hình 2. Mô hình khe phun và hướng phun của bộ phun đều

2.2. Phương pháp mô phỏng số

Mô hình rối $k - \omega$ SST được sử dụng để mô phỏng dòng chảy qua mô hình xe Ahmed trong trường hợp có và không có dòng phun đều phía sau xe. Đây là mô hình rối được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp cũng như trong học thuật, vì đáp ứng cả hai yêu cầu về độ chính xác của lời giải và thời gian tính toán.

Mô hình rối $k - \omega$ SST bao gồm hai phương trình vận chuyển của động năng rối k và tốc độ tiêu tán riêng ω . Ngoài ra, để tăng xấp xỉ dòng chảy gần bề mặt vật thể, mô hình rối $k - \omega$ SST sử dụng thêm các hàm trộn F_1, F_2 . Hai phương trình chủ đạo của mô hình rối $k - \omega$ SST được biểu diễn như sau [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (2)$$

Trong đó, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng; u_i là các thành phần vận tốc của chất lỏng; G_k, Y_k là tốc độ tạo thành và tiêu tán của động năng rối k ; G_ω, Y_ω là tốc độ tạo thành và tiêu tán của ω ; S_k và S_ω lần lượt là các toán hạng nguồn do người dùng định nghĩa; μ và μ_t lần lượt là hệ số nhớt động lực của chất lỏng và hệ số nhớt rối; σ_k và σ_ω là số Prantl rối của k và ω , được xác định từ việc kết hợp phương trình k và ω :

$$\sigma_i = \frac{1}{F_1 / \sigma_{i,1} + (1 - F_1) / \sigma_{i,2}} \quad \text{với } i = \{k, \omega\} \quad (3)$$

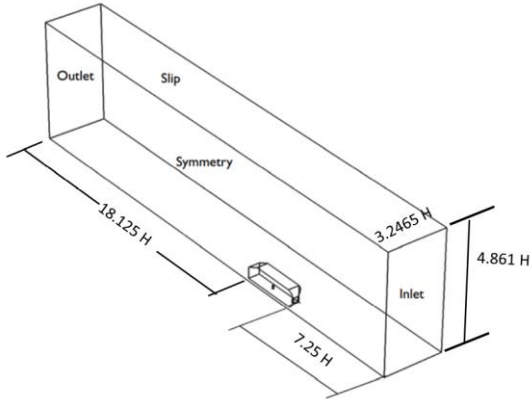
Trong đó, F_1, F_2 là các hàm trộn.

2.3. Thiết lập các thông số mô phỏng

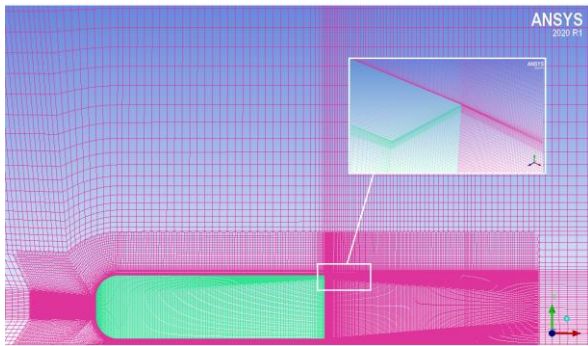
Vùng không gian mô phỏng của dòng chảy qua mô hình xe phải được xác định phù hợp để đảm bảo mô phỏng đầy đủ các hiện tượng dòng chảy, đặc biệt là các dòng chảy xoáy và vệt hút phía sau xe. Tuy nhiên, nếu miền tính toán quá lớn sẽ ảnh hưởng đến tốc độ và tài nguyên tính toán. Trong nghiên cứu này, vùng không gian mô phỏng này được xác định theo đề xuất của Lanfrít [15], có dạng hình hộp chữ nhật với các kích thước được biểu diễn trên Hình 3. Trong đó, H là chiều cao của mô hình xe Ahmed, mặt phẳng XZ trùng với mặt dưới của vùng tính toán, mặt phẳng XY là mặt phẳng đối xứng của vùng tính toán này.

Mô hình lưới cấu trúc lục diện được sử dụng để chia lưới cho miền tính toán, thông qua phần mềm thương mại ANSYS ICFM 2020 [16]. Lưới cấu trúc có chất lượng cao

hơn, thời gian tính toán cũng nhanh hơn so với lưới không cấu trúc. Miền lưới được chia với kích thước nhỏ ở gần mô hình, càng ra xa mô hình các phần tử lưới càng lớn dần. Ở vị trí có gắn thiết bị phun, lưới được chia mịn hơn so với ở các vị trí khác giúp việc tính toán được chính xác hơn (Hình 4).

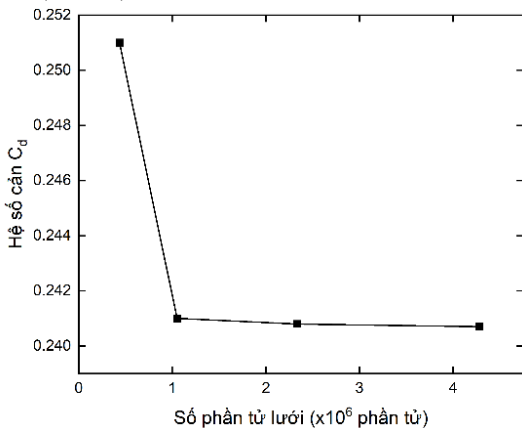


Hình 3. Miền tính toán của bài toán mô phỏng



Hình 4. Mô hình chia lưới của bài toán mô phỏng

Hình 5 biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số cản C_d của mô hình xe Ahmed trong trường hợp không có bộ phun đều vào số lượng phần tử lưới, trong 4 trường hợp: (i) 435.460 phần tử; (ii) 1.052.121 phần tử; (iii) 2.334.453 phần tử và (iv) 4.282.831 phần tử. Kết quả trên hình cho thấy, sự thay đổi hệ số cản là không đáng kể từ trường hợp (ii). Hệ số cản của xe trong trường hợp này là 0,241. Giá trị này thấp hơn so với kết quả thực nghiệm ($C_d = 0,25$) từ tài liệu [13]. Điều này có thể giải thích do trong mô hình mô phỏng đã bỏ qua 4 chân của mô hình xe so với phiên bản xe thực nghiệm (Hình 1).



Hình 5. Kiểm tra sự độc lập của lưới

Dòng chảy qua mô hình xe Ahmed trong hai trường hợp có và không có bộ phun khí đều được mô phỏng sử dụng phần mềm ANSYS Fluent 2020 [16]. Bài toán sử dụng lời giải ổn định, bộ giải SIMPLEC cho việc liên kết áp suất – vận tốc, chạy trong 2000 vòng lặp để tìm lời giải hội tụ. Điều kiện biên đầu vào được gán với vận tốc không đổi $V_o = 30$ m/s. Trong khi đó, điều kiện biên tại đầu ra là áp suất bằng áp suất khí trời 1 atm và cường độ rối là 5%. Ngoài ra, các mặt giới hạn của miền tính toán được định nghĩa là các thành rắn với điều kiện biên không trượt. Mặt bên được gán với điều kiện biên đối xứng để giúp giảm được một nửa không gian miền tính toán.

Để mô phỏng dòng phun đều, một điều kiện biên được gán cho khe phun phía sau mô hình xe Ahmed. Chiều rộng khe phun là $h = 0,001$ m, vận tốc dòng khí thổi vào qua khe phun được xác định theo vận tốc của dòng khí tự do bên ngoài, $v_j = A \cdot V_o$. Hệ số xung lượng C_μ của dòng tia phun được xác định theo công thức sau:

$$C_\mu = \frac{h \cdot B'}{B \cdot H} \left(\frac{v_j}{V_o} \right)^2 \quad (4)$$

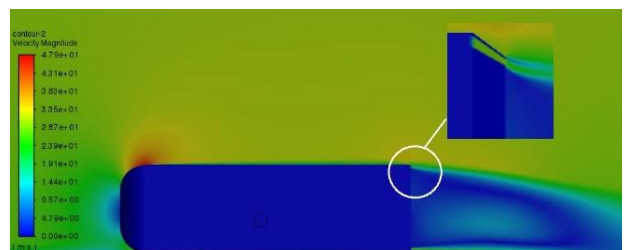
Trong đó, h là chiều rộng của rãnh phun; $B' = 0,385$ là chiều dài của rãnh phun; B , H lần lượt là chiều rộng và chiều cao của mô hình xe Ahmed.

Góc phun của dòng khí sẽ được điều chỉnh tại nhiều giá trị khác nhau để xác định góc phun tối ưu nhất cho phương pháp giảm sức cản bằng bộ phun đều.

3. Kết quả và bàn luận

Dòng chảy của không khí qua xe được mô phỏng trong hai trường hợp: Có và không có trang bị bộ phun đều phía sau xe. Góc phun của dòng khí từ khe hẹp được thay đổi từ $\theta = 0^\circ$ đến $\theta = 60^\circ$ theo hướng chệch xuống dưới mặt sàn, như được mô tả ở Hình 2. Vận tốc của tia phun là $v_j = A \cdot V_o$, với hệ số A được lấy theo 07 giá trị khác nhau, lần lượt là 0,15; 0,3; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,5 [17], tương ứng với 07 giá trị của hệ số xung lượng: $C_\mu = 7,8 \times 10^{-5}$; $3,1 \times 10^{-4}$; $1,24 \times 10^{-3}$; $2,21 \times 10^{-3}$; $3,35 \times 10^{-3}$; $4,9 \times 10^{-3}$; $7,8 \times 10^{-3}$.

Hình 6 biểu diễn phân bố trường vận tốc của dòng chảy qua mô hình xe Ahmed trong trường hợp có dòng khí phun đều phía sau xe với hệ số xung lượng $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$ và góc phun $\theta = 30^\circ$. Kết quả cho thấy, dòng khí từ khe phun đi ra đóng vai trò như tấm chắn chắn phía sau xe để trì hoãn sự tạo thành các xoáy do sự tách rời dòng chảy của không khí phía sau đuôi xe. Ngoài ra, dòng khí từ khe phun này cũng thay đổi cấu trúc vệt hút phía sau xe, làm thay đổi hệ số cản của xe.

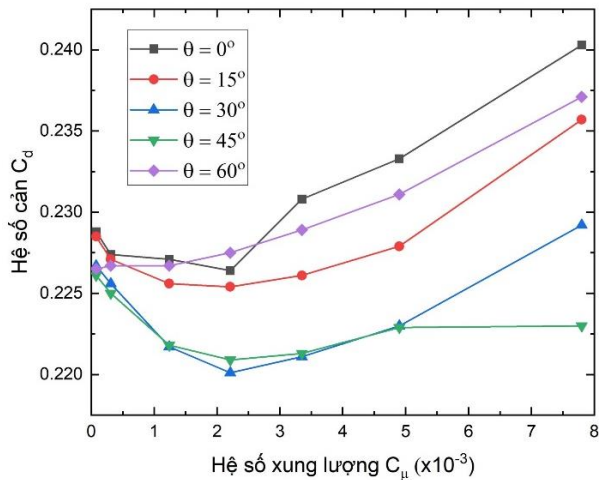


Hình 6. Phân bố vận tốc của dòng khí qua xe với $\theta = 30^\circ$

Kết quả đánh giá hệ số cản của xe trong các trường hợp khác nhau được biểu diễn ở trong Bảng 1 và Hình 7.

Bảng 1. Hệ số cản của mô hình xe Ahmed khi có bộ phun đều

C_μ \ C_d	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
$0,078 \times 10^{-3}$	0,2288	0,2285	0,2267	0,2261	0,2265
$0,31 \times 10^{-3}$	0,2274	0,2271	0,2256	0,225	0,2267
$1,24 \times 10^{-3}$	0,2271	0,2256	0,2217	0,2218	0,2267
$2,21 \times 10^{-3}$	0,2264	0,2254	0,2201	0,2209	0,2275
$3,35 \times 10^{-3}$	0,2308	0,2261	0,2211	0,2213	0,2289
$4,9 \times 10^{-3}$	0,2333	0,2279	0,223	0,2229	0,2311
$7,8 \times 10^{-3}$	0,2403	0,357	0,2292	0,223	0,2371



Hình 7. Hệ số cản của mô hình xe Ahmed theo góc phun và hệ số xung lượng

Ngoài ra, để đánh giá độ giảm hệ số cản của xe Ahmed trong các trường hợp góc phun và hệ số xung lượng khác nhau, tham số ΔC_d được đề xuất như sau:

$$\Delta C_d = 100 \frac{C_d - C_{d_0}}{C_{d_0}} (\%) \quad (5)$$

Trong đó, C_d là hệ số cản của xe được trang bị bộ phun đều tại nhiều trường hợp khác nhau, $C_{d_0} = 0,41$ là hệ số cản của xe trong trường hợp không trang bị bộ phun đều, được xác định từ mô phỏng CFD. Độ giảm hệ số cản của xe trong các trường hợp góc phun và hệ số xung lượng khác nhau được biểu diễn trong Bảng 2.

Bảng 2. Độ giảm hệ số cản của mô hình xe Ahmed tại các góc phun và hệ số xung lượng khác nhau

C_μ \ ΔC_d	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
$0,078 \times 10^{-3}$	-5,06	-5,19	-5,93	-6,18	-6,02
$0,31 \times 10^{-3}$	-5,64	-5,77	-6,39	-6,64	-5,93
$1,24 \times 10^{-3}$	-5,77	-6,39	-8,01	-7,97	-5,93
$2,21 \times 10^{-3}$	-6,06	-6,47	-8,67	-8,34	-5,60
$3,35 \times 10^{-3}$	-4,23	-6,18	-8,26	-8,17	-5,02
$4,9 \times 10^{-3}$	-3,20	-5,44	-7,47	-7,51	-4,11
$7,8 \times 10^{-3}$	-0,29	-2,0	-4,90	-7,47	-1,62

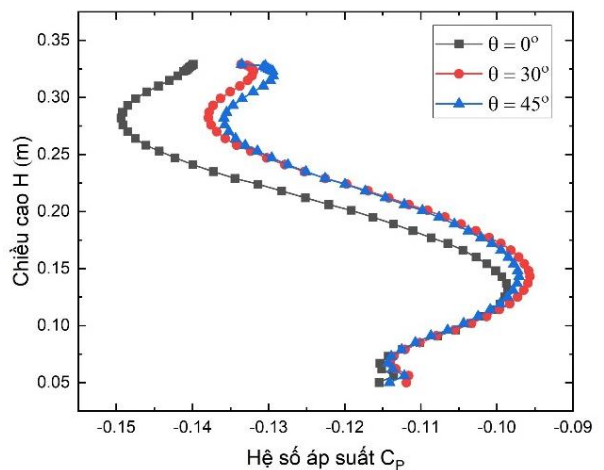
Kết quả mô phỏng từ nhiều trường hợp góc phun và hệ số xung lượng khác nhau được trình bày trên Bảng 1, 2 và Hình 7 cho thấy, tại tất cả các trường hợp của hệ số xung

lượng, góc phun $\theta = 0^\circ$ có độ giảm hệ số cản thấp nhất. Điều này có thể giải thích vì tia phun trong trường hợp này có thể xem như giúp kéo dài đuôi xe, trong khi đó ảnh hưởng đến việc trì hoãn việc tách rời dòng chảy và cấu trúc vệt hút sau xe không đáng kể.

Trong dải hệ số xung lượng được xem xét trong nghiên cứu này, dòng khí phun ra với góc phun $\theta = 30^\circ$ và $\theta = 45^\circ$ cho thấy, độ giảm hệ số cản của mô hình xe là lớn nhất. Kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu được thực hiện bởi Roumeas và các cộng sự [18], trong đó cho thấy góc phun hiệu quả nhất là 45° .

Các kết quả trên cũng cho thấy, tại các góc phun khác nhau được mô phỏng trong nghiên cứu này, ứng với mỗi góc phun xác định, độ giảm hệ số cản của mô hình xe tăng dần từ hệ số xung lượng $C_\mu = 0,078 \times 10^{-3}$ và đạt giá trị lớn nhất tại hệ số $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$, sau đó giảm dần khi hệ số xung lượng tăng đến giá trị $7,8 \times 10^{-3}$. Ngoài ra, các kết quả này cũng cho thấy, độ giảm hệ số cản lớn nhất có thể đạt được xảy ra tại góc phun $\theta = 30^\circ$ và hệ số xung lượng $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$, với $\Delta C_d = -8,67\%$, tương ứng với hệ cản của mô hình xe Ahmed là $C_d = 0,2201$.

Ảnh hưởng của dòng phun đều lên áp suất phía sau xe được thể hiện bằng hệ số áp suất C_p . Hình 8 trình bày kết quả phân bố hệ số áp suất khi thay đổi góc phun với xung lượng phun ra $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$. Các hệ số áp suất này được lấy tại tâm mỗi phần tử lưới thuộc đường thẳng giao tuyến của mặt thẳng đứng phía sau của mô hình và mặt phẳng đối xứng.

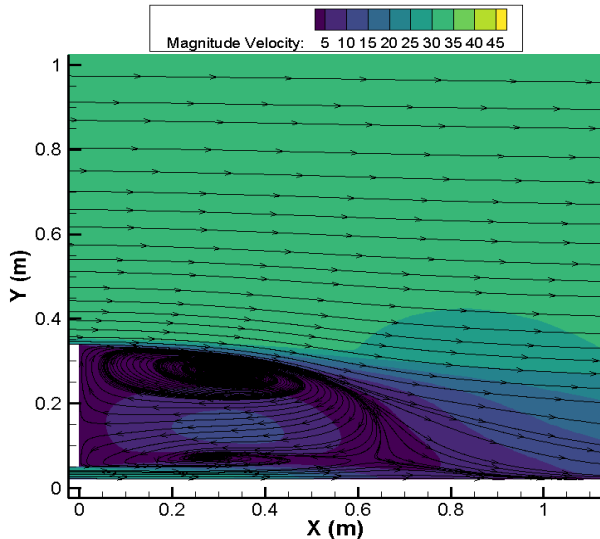


Hình 8. Hệ số áp suất C_p tại mặt sau mô hình xe tại các góc phun khác nhau

Vệt hút phía sau mô hình xe bị chi phối bởi lớp dòng chảy bị tách ra từ bốn mặt của mô hình, tạo ra cấu trúc hình xuyên tuần hoàn trung bình theo thời gian. Sự sụt giảm áp suất phía sau mô hình xe ở $H = 0,28$ m như trên Hình 8 là do các vệt hút của hình xuyên tuần hoàn gần với bề mặt phía sau. Các điểm có hệ số áp suất C_p nhỏ nhất được thấy khi chế độ phun ở góc $\theta = 0^\circ$. Tại góc phun $\theta = 30^\circ$ các điểm có hệ số áp suất lớn chiếm nhiều nhất, do vậy hệ số cản của mô hình xe trong trường hợp này là nhỏ nhất.

Cấu trúc vệt hút phía sau xe trong trường hợp hệ số xung lượng $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$ và góc phun $\theta = -30^\circ$ được biểu diễn như trên Hình 9. Sự thay đổi của hệ số cản là do sự

thay đổi cấu trúc của vệt hút, từ đó ảnh hưởng đến sự phân bố áp suất trên bề mặt phía sau xe. Hình 9 cho thấy, cấu trúc vệt hút phía sau mô hình xe Ahmed có dạng hình xuyên tuần hoàn trung bình theo thời gian, gồm hai xoáy lớn và nhỏ. Các xoáy này hình thành nên các vệt hút tác động lên mặt sau của mô hình xe tạo nên các vùng có áp suất thấp. Tại chiều cao $h = 0,28$ phía sau xe chứa các điểm thuộc vùng này, do đó hệ số áp suất C_p là thấp nhất như được thể hiện ở Hình 8.



Hình 9. Cấu trúc vệt hút phía sau mô hình xe tại $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$ và $\theta = 30^\circ$

4. Kết luận

Phương pháp giảm sức cản bằng cách điều khiển dòng chảy chủ động thông qua bộ phun khí đều phía sau mô hình xe Ahmed được nghiên cứu thông qua phương pháp mô phỏng số CFD. Bộ phun khí đều được xem xét đánh giá tại nhiều hệ số xung lượng và góc phun khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ phun khí làm việc tối ưu tại hệ số xung lượng $C_\mu = 2,21 \times 10^{-3}$ và góc phun $\theta = 30^\circ$. Tại chế độ này, hệ số cản của mô hình xe Ahmed giảm 8,67%. Ảnh hưởng của bộ phun khí đều đến sự phân bố áp suất và cấu trúc vệt hút phía sau mô hình xe, từ đó ảnh hưởng đến sự thay đổi hệ số cản của xe cũng được phân tích và đánh giá.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo, Việt Nam với đề tài có mã số: B2020-DNA-03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hucho. W.H, "Aerodynamics of Road Vehicles", *Society of Automotive Engineers, Inc.* Warrendale.
- [2] Choi. H, Lee. J, Park. H, "Aerodynamics of Heavy Vehicles", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Tập 46, 2014, Trang 441 – 468.
- [3] Pankajakshan. R, Mitchell. B, "Full Scale simulations of drag reduction devices for class 8 trucks", *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses and Trains*, 2007.
- [4] McCallen, Salari. R, Ortega. K, "Does effort to reduce truck aerodynamic drag-joint experiments and computations lead to smart design", *Tech. Rep., Lawrence Livermore National Laboratory*, Livermore, CA, 2004.
- [5] Doyle. J, Hartfield.R, "Aerodynamic optimization for freight trucks using a genetic algorithm and CFD", *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2008.
- [6] Seifert. A, Stalnov. O, Sperber. D, "Large trucks drag reduction using active flow control", *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses and Trains*, 2007.
- [7] Taubert. L, Wagnanski. I, "Preliminary experiments applying active flow control to a 1/24th scale model of a semi-trailer truck", *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses and Trains*, 2007.
- [8] Manosalvas. E. D, Economon. D. T, Othmer. C, Jameson. A, "Computational Design of Drag Diminishing Active Flow Control Systems for Heavy Vehicles" *8th AIAA Flow Control Conference*, 2016.
- [9] Englar. R. J, "Improved pneumatic aerodynamics for drag reduction, fuel economy, safety and stability increase for heavy vehicles", *SAE 2005 Commercial Vehicle Engineering, Congress and Exhibition, SAE Paper 2005-01-3627*, Chicago, Illinois, USA.
- [10] Tounsi. N, Mestiri. R, Keirsbulck. L, Oualli. H, Hanchi. S, and Aloui. F, "Experimental Study of Flow Control on Bluff Body using Piezoelectric Actuators", *Tạp chí Applied Fluid Mechanics*, Tập 9, 2016, Trang 827 – 836.
- [11] McNally. J, Fernandez. E, Robertson. G, Kumar. R, Kunihiko. T, "Drag reduction on a flat-back ground vehicle with active flow control", *Tạp chí Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Tập 145, 2015, Trang 292 – 303.
- [12] Hui. Z, Hu. X, Guo. P, Wang. Z and Wang. J, "Separation Flow Control of a Generic Ground Vehicle Using an SDBD Plasma Actuator", *Tạp chí Energies*, Tập. 12, 2019, Trang 3805.
- [13] Ahmed S.R., Ramm. G., Faltin. G., "Some Salient Features of the Time Average Ground Vehicle Wake", *Tạp chí SAE*, 1984, Trang 840300.
- [14] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications" *AIAA*, Tập 32, 1994, Trang 1598 – 1605.
- [15] M. Lanfrit, "Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics with Fluent", *Fluent Inc*, 2005.
- [16] <https://www.ansys.com>, truy cập ngày 25/05/2021
- [17] Charles-Henri Bruneau, "Active procedures to control the flow past the Ahmed body with a 25° rear window" *Int. J. Aerodynamics*, Tập 1, 2011, Trang 299 – 317.
- [18] Rouméas, M; Gillieron. P; Kourta. A, "Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry", *Comput & Fluid*, Tập 38, 2009, Trang 60-70.