

NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG GÓC TẤN CỦA CÁNH GIÓ SAU ĐẾN TÍNH NĂNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA Ô TÔ

RESEARCH ON THE EFFECT OF THE REAR WING ANGLE OF ATTACK TO THE VEHICLE DYNAMICS

Nguyễn Duy Trường¹,
Lê Trung Hiếu¹, Nguyễn Thanh Tùng^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2024.049>

TÓM TẮT

Cánh gió sau ô tô, thường xuất hiện nhiều trên những chiếc xe hiệu năng cao, và tốc độ lớn, được thiết kế nhằm cải thiện sự ổn định của xe, tăng cường lực bám, khả năng truyền lực bằng cách tạo ra các lực hướng xuống lớn. Khi chạy ở tốc độ cao, cánh gió sau tạo ra các lực hướng xuống lớn, đồng thời cũng tạo ra lực cản khí động lớn. Nếu thiết kế cánh gió cố định về góc tấn, vị trí, góc nghiêng, ... thì hiệu quả động lực học chỉ được tối ưu ở một trạng thái di chuyển nhất định của xe. Nghiên cứu này sẽ tiến hành mô phỏng, đánh giá sự thay đổi của góc tấn tới hiệu quả khí động học của ô tô ở vận tốc cao (100km/h) nhằm tìm ra giá trị tối ưu cho tính năng động lực học của ô tô. Mô hình ô tô được sử dụng trong tính toán là xe có kiểu dáng thể thao dạng hai cửa (Coupe) có cánh gió sau với các góc tấn biến thiên từng khoảng 5 độ. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả của việc thay đổi góc tấn đối với tính năng động lực học của xe, từ đó làm cơ sở cho những nghiên cứu mở rộng sau này.

Từ khóa: Cánh gió; góc tấn; khí động học; động lực học ô tô.

ABSTRACT

High-performance vehicles are often equipped with wings and spoilers to improve their aerodynamics and stability when running at high speed. Those wings and spoilers are designed to improve the vehicle's downforce and control performance. When traveling at high speeds, the rear wing generates significant downforce and creates a substantial amount of air resistance for the vehicle. The wing's design, including its position, angle of attack, wing profile, etc., is only appropriate for certain driving conditions. This study examines the impact of wing angle on vehicle dynamics at high speeds of 100kph or 27.7m/s. A coupe-type vehicle was used in the study, and the wing angle was varied from 0 to 25 degrees. The results have indicated that adjusting the angle of attack of the rear wing can increase the vehicle's downforce, thus improving its overall performance. This finding has the potential to catalyze further exploration and development in future studies.

Keywords: Aerodynamic wing; angle of attack; computational fluid dynamics (CFDs); vehicle dynamics.

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: tung.nguyenthanh@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 14/6/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2024

1. GIỚI THIỆU

Hiệu suất sử dụng nhiên liệu, tiêu thụ pin xe điện, khả năng tăng tốc, bám đường và tính năng ổn định của những

chiếc xe tốc độ cao bị ảnh hưởng lớn bởi các tính năng động lực học. Trong đó các nhân tố khí động học góp phần quan trọng và trở thành yếu tố được xem xét, tính toán trong thiết kế ô tô [1]. Bằng cách tạo ra các lực hướng xuống trên cánh gió, sẽ thay đổi tính năng động lực học của ô tô thông qua các lực khí động [2]. Góc tấn là góc nghiêng của cánh gió so với phương ngang để tạo ra biên dạng giới hạn dòng chảy của không khí khi xe chạy. Bằng việc thay đổi góc tấn có thể tính toán được lực hướng xuống tổng trên toàn bộ xe [3], tuy nhiên để xem xét ảnh hưởng một cách tổng quát, cần đánh giá được sự ảnh hưởng đó đến động lực học toàn xe.

Các nghiên cứu trước đây về khí động học xe đã chỉ ra rằng chỉ với những thay đổi về vị trí của cánh gió sau tác động đáng kể đến tính chất khí động học [4]. Các nghiên cứu về ảnh hưởng của vị trí và hình dạng của cánh gió sau tới tính chất động lực học của xe [5]. Hoặc nghiên cứu về sự so sánh của cánh gió sau với cánh lướt gió đến lực hướng xuống trên xe [6]. Gần đây đã có nhiều nghiên cứu về chiều cao và góc của cánh gió sau để tìm ra giá trị tối ưu đối với từng trường hợp như là tối ưu lực cản, tối ưu lực nâng, sự ổn định [7],...

Các công cụ phân tích Động lực học chất lưu (Computational Fluid Dynamics - CFDs) [8, 9] được sử dụng nhằm tính toán mô phỏng trước khi thử nghiệm xe, đã đạt được sự thành công trong việc ước tính một cách gần đúng các lực khí động, các hệ số cản, các trường vận tốc, áp suất của không khí tác động lên xe. Trong nghiên cứu này phương pháp CFDs được sử dụng để tính toán ảnh hưởng của sự thay đổi góc tấn của cánh gió sau đến tính năng động lực học trên ô tô với các góc lần lượt là 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25° và trường hợp không có cánh gió ở vận tốc cao là $v = 100\text{km/h}$ ($\sim 27,7\text{m/s}$).

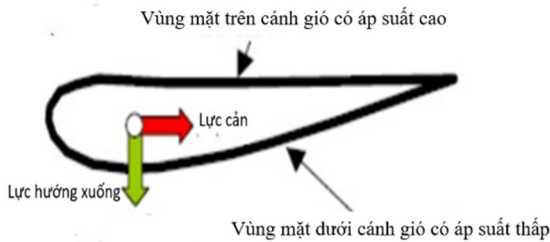
Trong nghiên cứu này ngoài đưa ra được thông số tổng quát như lực cản và lực nâng của toàn bộ xe, đã tính toán được tâm hợp lực khí động. Từ đó tính toán được các lực bám trên từng cầu xe và lực kéo tối đa có thể sinh ra của xe đối với trường hợp có xét đến ảnh hưởng của lực khí động so với trường hợp xe đứng im. Đánh giá được sự thay đổi của góc tấn có ảnh hưởng lớn đến tính chất động lực học của xe, đặc biệt là ở cầu sau, đưa ra được xu hướng thay đổi của lực

hướng xuống trên hai mặt của cánh gió sau là khác nhau khi góc tấn thay đổi đối với dòng xe thể thao hiệu năng cao.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Các lực khí động và lực lên ô tô

Cơ sở của việc tạo lực hướng xuống là Nguyên lý Bernoulli. Không khí di chuyển dọc theo bề mặt trên chậm hơn không khí di chuyển dọc theo bề mặt dưới của cánh gió. Điều này tạo ra chênh lệch áp suất giữa trên và dưới, tạo ra lực hướng xuống (hình 1).



Hình 1. Mô tả lực cản và lực hướng xuống trên cánh gió

Do đó, Lực hướng xuống có thể được định nghĩa là một lực thẳng đứng được tạo ra từ tải trọng khí động học. Phương trình mô tả lực hướng xuống trên ô tô và cánh gió dưới tác dụng của khí động học [10]:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L S_z \quad (1)$$

Trong đó: F_z là lực hướng xuống, C_L là hệ số của lực hướng xuống, S_z là diện tích chiếu theo phương thẳng đứng, ρ là mật độ không khí trong môi trường, v là vận tốc di chuyển của xe.

Lực cản là lực khí động do không khí tác động lên cánh gió và xe (hình 1), có chức năng cản trở chuyển động của xe theo phương tịnh tiến. Lực cản sinh ra chủ yếu do hai nguyên nhân: Chênh áp giữa đầu và đuôi của cánh gió và xe, dòng không khí ma sát khi chuyển động. Phương trình mô tả lực cản trên ô tô và cánh gió dưới tác dụng của khí động học:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D S_x \quad (2)$$

Trong đó: F_x là lực cản, C_D là hệ số cản theo phương chính diện, S_x là diện tích chiếu của xe theo phương chính diện, ρ là mật độ không khí trong môi trường, v là vận tốc di chuyển của xe.

Lực bám dọc trên mỗi cầu xe là lực theo phương thẳng đứng lên cầu xe dưới tác dụng của trọng lực xe, độ dao động của hệ thống treo, lực khí động,... Lực kéo tối đa có thể sinh ra [11] tại mỗi cầu phụ thuộc vào lực bám và hệ số bám của xe được tính theo phương trình (3):

$$F_{ki} \max = F_{bi} \times \varphi, \text{ với } i = 1, 2 \quad (3)$$

Trong đó, $F_{ki} \max$ là lực kéo tối đa có thể sinh ra trên cầu thứ i , F_{bi} là lực bám sinh ra tại cầu thứ i khi xe chuyển động, φ là hệ số bám của đường, ta chọn cố định là 0,7 và bằng nhau tại mỗi cầu xe.

Lực kéo tối đa có thể sinh ra của xe phụ thuộc vào lực bám, hệ số bám của đường và các lực cản khi lực cản lăn, lực

cản dốc, lực cản khí động,... tuy nhiên ở nghiên cứu này, để làm rõ ảnh hưởng của các lực khí động đến động lực học của xe, ta giả thiết bỏ qua các loại cản còn lại, vậy nên lực kéo tối đa có thể sinh ra được tính theo phương trình (4):

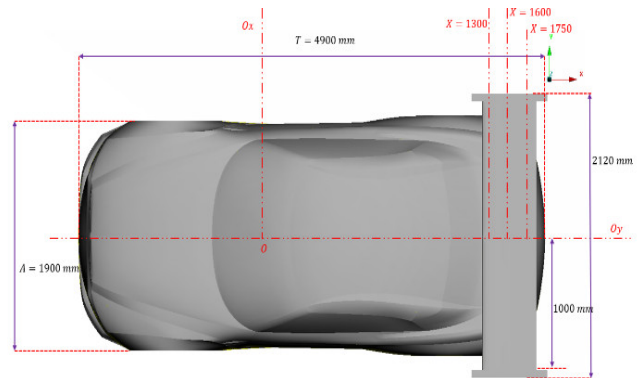
$$F_{kéo \text{ tổng } \max} = F_{k1} \max + F_{k2} \max - F_x \quad (4)$$

Trong đó $F_{kéo \text{ tổng } \max}$ là lực kéo tối đa có thể sinh ra của xe, $F_{k1} \max + F_{k2} \max$ là lực kéo tối đa có thể sinh ra tại cầu thứ 1 và 2 khi xe chuyển động, F_x là lực cản khí động chính diện.

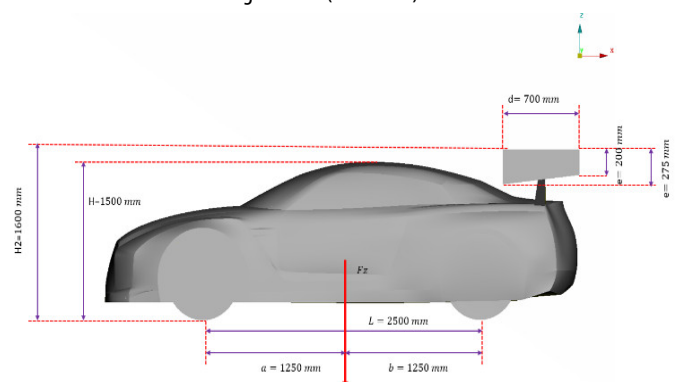
Trong công thức (3) ta có $i = 1$ là tính toán trên cầu trước, $i = 2$ là tính toán trên cầu sau.

2.2. Mô hình ô tô thực hiện tính toán

Mô hình ô tô được sử dụng trong nghiên cứu này là loại xe thường chạy ở tốc độ cao có những đặc điểm như gầm thấp, kiểu dáng hai cửa (Coupe) có các kích thước cơ bản như ở hình 3a và 3b. Đối với loại xe thể thao này, động cơ thường đặt giữa với phân bố trọng tâm xe đồng đều giữa 2 cầu nên ta có vị trí trọng tâm xe như hình 2 và 3 với kích thước chung $A \times T \times H = 4,9 \times 1,9 \times 1,5$ (m), chiều dài cơ sở $L = 2500 \text{ mm}$, phân bố trọng tâm xe $a/b = 1250/1250 \text{ mm}$, khối lượng tính $F_{zt} = 12000 \text{ N}$, trọng lượng bám tính tại mỗi cầu là 6000 N .

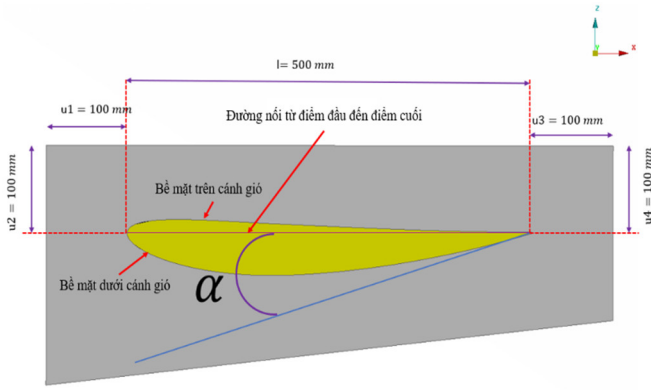


Hình 2. Kích thước chung của ô tô (Plan view)



Hình 3. Kích thước chung của ô tô (Left side view)

Như đã phân tích ở trên, để đạt được sự cân bằng về lực cản và lực hướng xuống, sao cho tạo ra được lực hướng xuống lớn mà lực cản không quá cao. Biên dạng cánh gió là biên dạng cánh NACA 4412 AIRFOIL lộn ngược. Với các kích thước và vị trí như hình 4, với góc tấn α thay đổi trong quá trình chuyển động của xe.

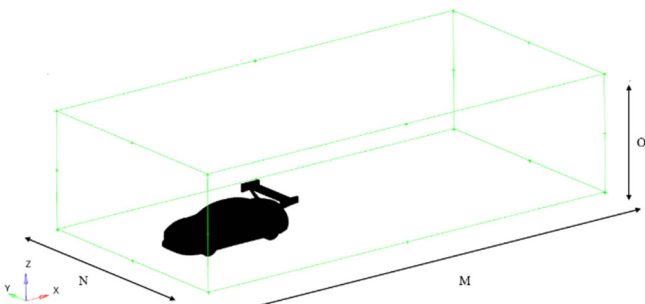


Hình 4. Cấu tạo và kích thước chung cánh gió (Left side view Y = 0)

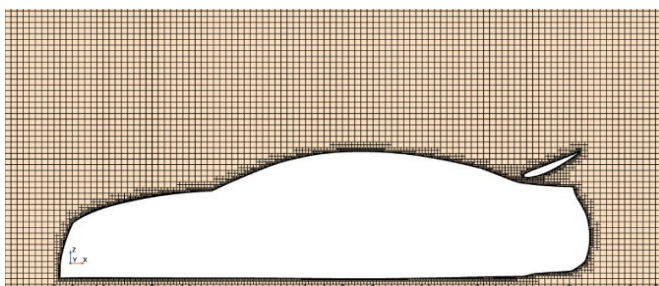
2.3. Phương pháp nghiên cứu

Trong bài toán này nghiên cứu thực hiện phương pháp tính toán CFDs với các phương trình RANS sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Đây là một trong những phương pháp được sử dụng để giải các phương trình đạo hàm riêng và được ứng dụng nhiều trong các bài toán động lực học chất lỏng. Phân chia miền chất lỏng, khí thành các vùng thể tích riêng biệt (phần tử lưới), sau đó giải các phương trình RANS và các định luật bảo toàn trong mỗi phần tử lưới, độ chính xác của mô phỏng chủ yếu được các định bởi chất lượng lưới được chia và các mô hình dòng rối. Mô hình dòng chảy rối Realizable K-Epsilon Two-Layer kết hợp tính toán với phương pháp lớp biên 2 lớp được sử dụng để thực hiện tính toán.

Miền tính toán là vùng không gian bao quanh vật thể, miền tính toán phải có kích thước đủ lớn để dòng không khí ở biên không chịu ảnh hưởng của mô hình. Do đó miền tính toán có kích thước rất lớn, tuy nhiên với chỉ số Reynolds của ô tô khoảng $10,27 \times 10^6$ [11] ta có thể chọn kích thước $M \times N \times O = 14 \times 6 \times 4$ (m) của miền tính toán như hình 5.



Hình 5. Miền tính toán



Hình 6. Lưới tính toán

Trong nghiên cứu này, loại lưới cấu trúc hình lập phương được sử dụng với dao động trong khoảng 9 triệu phần tử lưới đối với mỗi trường hợp. Với các vị trí ở xa xe sử dụng lưới hình lập phương có kích thước cạnh bằng 50mm trong toàn bộ miền tính toán. Ở các vị trí cách xe 120mm, sử dụng lưới có kích thước 25mm, trong vùng cách xe 30mm đến xe sử dụng kích thước 6mm. Đối với miền tính toán có kích thước rất lớn, kích thước của lưới là rất nhỏ và càng nhỏ dẫn đến biến dạng của xe cho phép độ hội tụ khí tính toán rất cao và kết quả tính toán khá chính xác. Các điều kiện biên để mô phỏng là xe chạy ở vận tốc 100km/h, áp suất ở các biên của miền tính toán bằng áp suất không khí là 101325Pa, nhiệt độ không khí 27°C, khối lượng riêng của không khí $1,225 \text{ kg/m}^3$, độ nhớt động học của không khí $1,7894 \times 10^{-5}$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả tính toán

Sau khi thực hiện tính toán mô phỏng, kết quả thu được là giá trị các lực khí động sinh ra khi xe chuyển động thể hiện trong bảng 1. Các kết quả về tổng thể là phù hợp so với kết quả ước tính thực tế trên ô tô. Từ các giá thu được ở bảng 1 sử dụng công thức (3) và (4) tính toán được các lực tác dụng lên ô tô theo từng góc tấn của cánh gió, thu được bảng 2 và 3.

Bảng 1. Kết quả các lực, hệ số cản và tâm hợp lực khí động với cánh gió có góc tấn thay đổi

Góc tấn (độ)	F _z (N)	F _x (N)	F _z cánh gió tổng (N)	F _z mặt trên cánh gió (N)	F _z mặt dưới cánh gió (N)	C _D	Toạ độ tâm hợp lực khí động(x/y/z) (mm)
Không có	76,76	358,05	0	0	0	0,30	233/1,15/1,27
0	-353,20	525,16	-417,9	39,11	-450,8	0,39	353/2,27/1111,30
5	-599,70	553,97	-604,24	-29,97	-567,01	0,41	517,06/0,72/1070,88
10	-762,12	622,35	-763,16	-91,014	-663,73	0,46	613,10/1,5/1052,96
15	-859,80	708,61	-619,80	-105,6	-580,20	0,52	549,07/0,92/1065,2
20	-1001,70	796,59	-600,95	-121,61	-475,04	0,59	508,45/1,39/1072,33
25	-1169,70	884,52	-619,88	-164,33	-446,1	0,65	526,33/0,16/1069,28

Bảng 2. Kết quả lực bám tại mỗi cầu khi xe chuyển động với cánh gió có góc tấn thay đổi, so sánh với trường hợp không có cánh gió

Góc tấn (độ)	F _{b1} tăng thêm (N)	F _{b1} (N)	Tỷ lệ tăng F _{b1} (%)	F _{b2} tăng thêm (N)	F _{b2} (N)	Tỷ lệ tăng F _{b2} (%)
Không có	22,94	5977,06		53,82	5946,18	
0	-88,59	6088,59	1,86	-264,64	6264,64	5,36
5	-111,06	6111,06	2,24	-488,63	6488,63	9,12
10	-111,88	6111,88	2,25	-650,24	6650,24	11,84
15	-148,22	6148,22	2,86	-711,53	6711,53	12,87
20	-189,12	6189,12	3,55	-812,58	6812,58	14,57
25	-212,41	6212,41	3,94	-957,28	6957,28	17,00

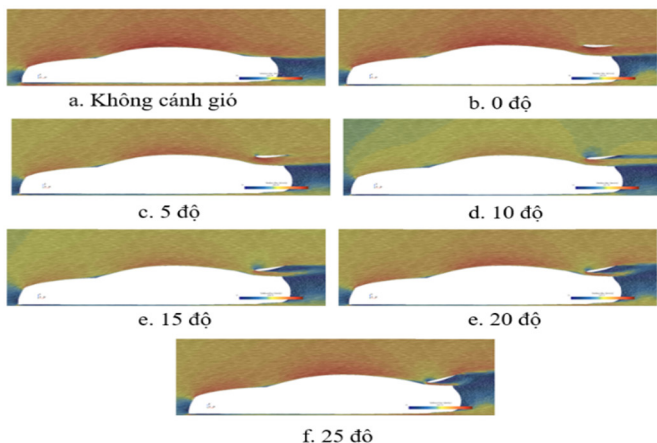
Bảng 3. Kết quả lực kéo tối đa trên mỗi cầu và lực kéo tổng tối đa của xe với cánh gió có góc tấn thay đổi, so sánh với trường hợp không có cánh gió

Góc tấn (độ)	F_{k1} max (N)	F_{k2} max (N)	$F_{kéo}$ tổng max (N)	Tỷ lệ tăng $F_{kéo}$ tổng max
Không có Wing	4183,94	4162,33	7988,22	
0	4262,01	4385,25	8122,10	1,68
5	4277,74	4542,04	8265,81	3,47
10	4278,32	4655,17	8311,13	4,04
15	4303,75	4698,07	8293,22	3,82
20	4332,38	4768,80	8304,6	3,96
25	4348,69	4870,01	8334,26	4,33

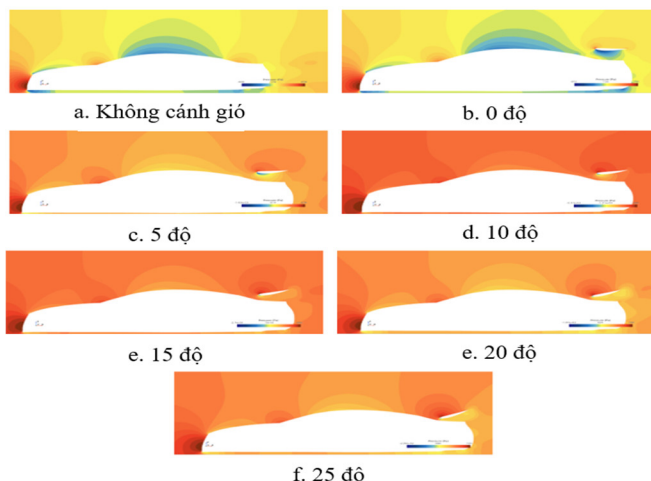
3.2. Đánh giá

Kết quả dòng chảy vận tốc tại mặt cắt $Y = 0$ tại các trường hợp không có và có cánh gió xoay với các góc tấn lần lượt $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ được kết quả như hình 5. Nhận thấy khi không có và có cánh gió với góc tấn 0° thì dòng chảy có tốc độ cao ở cả các vùng trên đỉnh xe và dưới gầm xe, nhiều loạn không khí xuất hiện các vùng áp suất thấp và cuộn xoáy ở đằng sau xe chỉ do các dòng không khí từ đỉnh xe và gầm xe giao nhau tạo nên. Khi thay đổi các góc tấn của cánh thì xuất hiện thêm các vùng cuộn xoáy phía sau cánh do sự thay đổi đột ngột biên dạng cánh theo phương Ox gây nên. Càng tăng góc tấn thì 2 vùng xoáy càng gần nhau và giao thoa với nhau, kéo vùng cuộn xoáy lên cao hơn so với trường hợp không có và có cánh gió góc tấn 0° .

Kết quả dòng chảy áp suất tại mặt cắt $Y = 0$ tại các trường hợp không có và có cánh gió xoay với các góc tấn lần lượt $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ được kết quả như hình 6. Khi không có và có cánh gió với góc tấn 0° thì do dòng chảy vẫn là dòng chảy mượt bao quanh biên dạng xe và cánh gió nên chênh áp, theo định luật Becnuli, chủ yếu do sự chênh lệch và quãng đường di chuyển của dòng không khí giữa gầm xe và biên dạng trên xe, dẫn chênh lệch quãng đường giữa phía trên (upper) và phía dưới (lower) cánh gió. Lúc này tâm hợp lực khí động có xu hướng dịch chuyển theo phương Ox về phía sau xe, do áp suất theo phương Oz tăng lên về phía sau, làm cho trọng tâm xe có phần dịch chuyển về phía sau so với trường hợp không có cánh. Khi đó vùng áp suất âm phía dưới là tác nhân chính tạo ra lực hướng xuống trên cánh gió.



Hình 7. Kết quả trường hợp vận tốc (Left side view $Y = 0$)



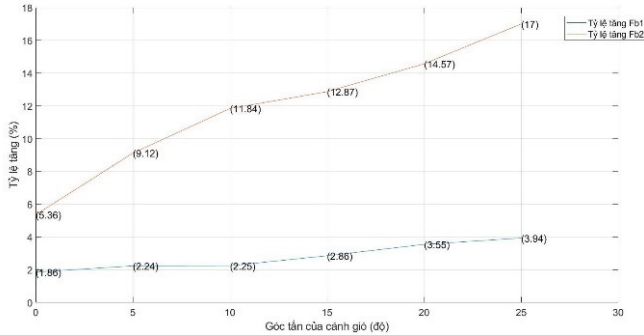
Hình 8. Kết quả trường hợp áp suất (Left side view $Y = 0$)

Khi thay đổi các góc tấn của cánh gió tăng lên, thì luồng không khí phía sau xe càng khó lưu thông qua vùng đuôi xe, do bị cản lại phần lớn tại cánh, làm cho áp suất ở các vùng trên đỉnh xe như trần xe, nắp capo,... tăng mạnh. Do vậy khi này tâm lực khí động lại có xu hướng dịch chuyển nhẹ theo phương Ox về phía trước (bảng 1). Khi càng tăng các góc tấn của cánh gió thì vùng không khí cuộn xoáy tại cánh gió càng có xu hướng dịch chuyển xuống dưới và về phía sau của phía dưới cánh gió (hình 7) do vậy vùng áp suất thấp phía dưới cánh cũng có xu hướng dịch chuyển tương tự (hình 8). Làm cho sự chênh áp theo phương Oz của phía dưới cánh giảm, tăng theo phương Ox do vậy lúc này lực hướng xuống theo phương Oz của phía dưới cánh có xu hướng giảm, tuy nhiên do phần phía trên cánh đã được quay nghiêng, vùng áp suất cao trên phía trên cánh có xu hướng dịch chuyển về phía trước theo phương Ox, làm cho lực hướng xuống trên phía trên cánh có xu hướng tăng lên (bảng 1). Do vậy, tổng lực hướng xuống trên cánh gió vẫn có xu hướng tăng, tuy nhiên càng tăng góc tấn thì do sự dịch chuyển của vùng áp suất âm dưới phía dưới cánh và sự dịch chuyển của vùng áp suất cao trên phía trên cánh, dẫn cánh gió bị nghiêng làm tăng diện tích cản chính diện và tăng sự thay đổi đột ngột về hình dạng của cánh gió làm chênh áp theo phương Ox càng tăng mạnh. Kết quả là lực cản theo phương Ox và hệ số cản khí động C_D tăng mạnh (bảng 1).

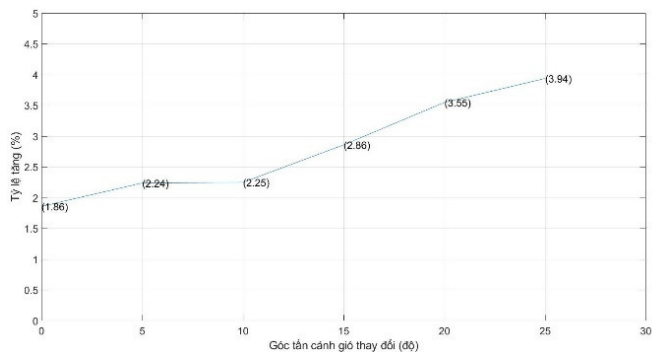
Khi xe chuyển động với vận tốc cao trên đường, trong trường hợp với các giả thiết như trên, thì dưới tác động của các lực khí động sẽ gây ra sự phân bố lại trọng tâm xe. Làm cho các lực bám tại các bánh xe chủ động có sự thay đổi. Do tạo ra được các lực hướng xuống lớn khi góc tấn của cánh gió tăng lên, trọng tâm hợp lực khí động có xu hướng dịch chuyển về phía sau xe theo phương Ox. Do đó lực bám tại các bánh xe cầu sau được tăng lên rất nhiều, lớn nhất là 17% tại góc tấn là 25° , còn các bánh xe trước chỉ tăng lên một chút, lớn nhất là 3,94% tại góc tấn là 25° .

Lực bám tăng giúp ổn định chuyển động khi xe chạy ở tốc độ cao. Bánh xe và mặt đường luôn tiếp xúc với nhau, hạn chế các hiện tượng trượt quay khi tăng tốc và trượt lết khi phanh, tăng cường khả năng truyền lực đến các bánh xe

chủ động. Tuy nhiên đối với cánh gió khi tạo ra lực bám lớn thì cũng tạo ra lực cản lớn, hai yếu tố này ảnh hưởng đến tổng lực kéo tối đa có thể tạo ra của xe, sau khi đã thắng các lực cản. Kết quả của xu hướng tăng này được thể hiện trong hình 9 và 10.



Hình 9. Tỷ lệ lực bám tăng lên so với không có cánh gió



Hình 10. Tỷ lệ tăng lực kéo khi góc tấn thay đổi so với không có cánh gió

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu tính toán mô phỏng phản ứng của xe xe hiệu năng cao dạng coupe sử dụng phương trình RANS kết hợp mô hình Realizable K-Epsilon Two-Layer với mô phỏng CFD và xác định được các lực và hệ số cản của mô hình xe một cách đáng tin cậy. Từ đó đánh giá được các đặc tính động lực học của không khí ảnh hưởng đến xe như lực bám tại mỗi cầu xe và xu hướng thay đổi lực bám tăng dần khi góc tấn của cánh gió sau tăng dần tối đa bằng 3,94% tại cầu trước và 17% tại cầu sau so với khi xe không có cánh gió sau. Bên cạnh đó các kết quả cũng cho thấy các lực kéo tối đa mà xe có thể sinh ra có xu hướng tăng dần khi góc tấn của cánh gió tăng, tối đa 4,33% tại góc tấn 25 độ. Do ảnh hưởng lẫn nhau của lực bám tăng lên và lực cản khí động cùng tăng lên khi góc tấn tăng dẫn tới lực kéo tối đa có thể sinh ra tăng lên tuy nhiên hiệu quả chưa rõ rệt.

Các kết quả nghiên cứu cho phép giải quyết được một số vấn đề mà thí nghiệm động lực học ô tô thực tế còn hạn chế: thử nghiệm được ở nhiều trường hợp và điều kiện khác nhau, từ đó giúp cho tiến hành tối ưu các thông số của cánh gió sau. Trên cơ sở kết quả hiện tại thì trong tương lai nghiên cứu có thể mở rộng ở các dải vận tốc khác nhau có thể xây dựng bộ dữ liệu để điều khiển cách gió sau chủ động.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Pfadenhauer M., *Aerodynamics of Road Vehicles, 5th edn.* SAE International, Warrendale, ISBN 978-0-7680-7977-7, 2016.
- [2]. Jasinski W., Selig M., *Experimental study of open-wheel racecar front wings.* SAE Tech. Pap., 1998. DOI:10.4271/983042.
- [3]. K. Burgin, P.C. Adey, J.P. Beatham N., "Wind tunnel tests on road vehicle models using a moving belt simulation of ground effect," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986. DOI:10.1016/0167-6105(86)90087-5.
- [4]. Kieffera W., Moujaesb S., Armbyab N., "CFD study of section characteristics of formula Mazda race car wings," *Mathematical and Computer Modelling*, 2006. DOI: 10.1016/j.mcm.2005.03.011.
- [5]. Jingdong Cai, Saurabh Kapoor, Tushita Sikder, Yuping He, N., Effects of Active "Aerodynamic Wings on Handling Performance of High-Speed Vehicles," *SAE Technical Paper*, 2017. DOI: 10.4271/2017-01-1592.
- [6]. F. J. Granados-Ortiz, P. Morales-Higueras, J. Ortega-Casanova N., "3D CFD simulation of the interaction between front wheels&brake ducts and optimised five-element F1 race car front wings under regulations," *Alexandria Engineering Journal*, 2023. DOI: 10.1016/j.aej.2023.02.011
- [7]. Krzysztof Kurec, Michał Remer, Tobiasz Mayer, Sylwester Tudruj, Janusz Piechna N., "Flow control for a car-mounted rear wing," *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.12.034.
- [8]. Katz J., Luo H., Mestreau E., Baum J., Lohner R., "Viscous flow simulation of an open-wheel race car," *SAE Publ.*, 1998. DOI: 10.4271/983041.
- [9]. Ranzenbach R., Barlow J.B., "Cambered airfoil in ground effect - an experimental and computational study," *SAE Publ.*, 1996. DOI: 10.4271/960909.
- [10]. Shinji Kajiwara, "Passive variable rear-wing aerodynamics of an open-wheel racing car," *Original Paper*, 2017. DOI: 10.1007/s41104-017-0021-9.
- [11]. Luu Van Tuan, *Giao trình Ly thuyet o to.* Bach Khoa Publishing House, Hanoi, 2020.
- [12]. Tran Thanh Tung, *Car aerodynamics simulation.* Master Thesis, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, 2009.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Duy Truong, Le Trung Hieu, Nguyen Thanh Tung
Hanoi University of Science and Technology, Vietnam