



DOI:10.22144/ctujos.2024.427

PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH KHÍ ĐỘNG HỌC CỦA DÒNG XE THỂ THAO TRANG BỊ CÁNH LƯỚT GIÓ SAU

Hà Thanh Liêm, Nguyễn Bảo Lộc* và Phạm Sơn Tùng

Khoa Công nghệ Động lực, Trường Đại học Công nghiệp Thành Phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): nguyenbaoloc@iuh.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 19/02/2024

Sửa bài (Revised): 09/03/2024

Duyệt đăng (Accepted): 13/06/2024

Title: Analysis of aerodynamic characteristics of sports car equipped with rear spoiler

Author(s): Ha Thanh Liem, Nguyen Bao Loc* and Pham Son Tung

Affiliation(s): Faculty of Automotive Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City, Viet Nam

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nội dung nghiên cứu ảnh hưởng của cánh lướt gió sau đến đặc tính khí động lực học của các dòng xe thể thao. Mô phỏng sử dụng Solidworks để thiết kế mô hình xe nguyên bản và xe có gắn cánh lướt gió phía sau, sau đó ứng dụng module Flow Simulation để phân tích đặc tính khí động lực học của mô hình. Kết quả cho thấy hệ số nâng giảm 11,2%, hệ số cản giảm 5,05% và vùng xoáy phía sau đuôi xe có xu hướng xa dần nên giảm sự kìm hãm xe. Các giá trị này được thể hiện thông qua sự phân bố áp suất và vận tốc xung quanh mô hình. Qua đó cho thấy việc gắn thêm cánh lướt gió sau cho các dòng xe thể thao là cần thiết giúp xe ổn định khi chạy tốc độ cao.

Từ khóa: Cánh lướt gió sau, hệ số cản, hệ số nâng, khí động học, solidworks, xe thể thao

ABSTRACT

This article presents research on the effects of rear spoilers on the aerodynamic characteristics of sports cars. The simulation uses Solidworks to design the original car model, and the car with the rear spoiler is applied to the Flow Simulation module to analyze the model's aerodynamic characteristics. The results showed that the lift coefficient decreased by 11.2%, the drag coefficient decreased by 5.05%, and the vortex area behind the rear of the vehicle tended to fade away, reducing the vehicle's restraint. These values are expressed through the pressure and velocity distributions around the model. Therefore, it is proposed that a rear spoiler be added to sports cars to help stabilize them when running at high speed.

Keywords: Aerodynamics, drag coefficient, lift coefficient, rear spoiler, Solidworks, sports car

1. GIỚI THIỆU

Nghiên cứu về khí động lực học ô tô đang ngày càng phát triển và đang trở thành một yếu tố cấp thiết với ngành ô tô hiện tại nhờ biết được ảnh hưởng khí động nhiều người đã cải tiến ô tô của mình phù hợp với điều kiện đi lại trên đường (Hucho, 1987).

Tổng trọng lượng và hình dạng bên ngoài xe là một trong những yếu tố quan trọng nhằm cải tiến đặc tính khí động lực học của xe (Heft et al., 2012). Bài báo này mô tả ngắn gọn mô phỏng đặc tính khí động học đang hoạt động và cách thức hoạt động cũng như cách nó giúp cải thiện chất lượng tốt nhất. Để hiểu biết thêm về khí động lực học ô tô, các nhà nghiên

cứ lần lượt tìm hiểu nghiên cứu đặc tính khí động lực học quanh ô tô bằng hai phương pháp mô phỏng và thực nghiệm.

Nhiều nghiên cứu về mô phỏng những dòng khí quanh ô tô và cải tiến sự ảnh hưởng dòng khí đã được thực hiện. Cụ thể các công trình đã được nghiên cứu gần đây, các tác giả Madane et al., (2020) đã nghiên cứu ảnh hưởng của khí động lực học đến cánh lướt gió khi xe ở tốc độ cao thông qua mô phỏng CFD (Computational Fluid Dynamics) bắt đầu từ 0° đến 40° , với độ chênh lệch không đổi là 10° với cánh lướt gió ở trạng thái ổn định về các hướng khác nhau của cùng một mô hình. Kết quả tác giả thu được biểu diễn dưới dạng hình ảnh đồ thị cho thấy khi góc thay đổi, ở các góc độ ban đầu, dòng chảy tự điều chỉnh mà không bị xáo trộn nhiều nhưng khi góc tăng lên hình thành một vùng tuần hoàn phía sau cấu trúc cánh và tạo ra nhiều lực cản. Trong nghiên cứu Prabhu et al. (2020), các tác giả đã sử dụng Solidworks để thiết kế cánh đuôi gió phía sau của ô tô và dùng mô đun Flow Simulation của phần mềm để phân tích đặc tính khí động học nhằm xác định lực cản ảnh hưởng đến mức tiêu hao nhiên liệu của xe.

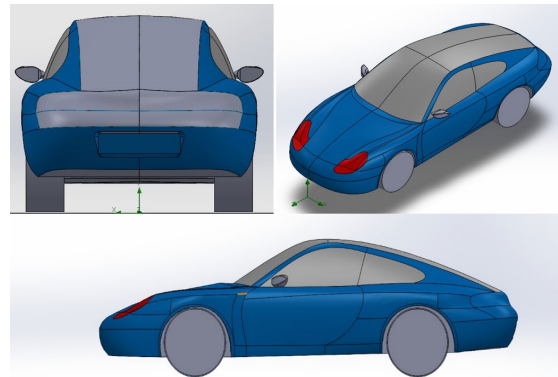
Flow Simulation với hai cánh gió sau khác nhau sử dụng CFD. Phân tích này đã được thực hiện và kết quả thu được ở các vận tốc khác nhau, các giá trị lực cản và lực nâng khác nhau. Các giá trị mô phỏng CFD được trình bày trong kết quả khi sử dụng cánh lướt gió thứ hai cho kết quả tốt hơn ngay cả khi vận tốc tiếp tục tăng. Rõ ràng là các đặc tính khí động học có thể được cải thiện hơn nữa bằng cách thay đổi kiểu dáng bên ngoài của thân xe. Các nhà nghiên cứu (Buljac et al., 2016) đã phân tích khí động học ô tô bị ảnh hưởng bởi cánh gió phía sau hình cánh quạt, được thực hiện bằng cách nghiên cứu tính toán sử dụng phương trình Reynolds-Navier-Stokes, góc gió tối ưu của cánh phía sau đã được xác định là 18° . Kết quả tác giả đạt được nếu không có cánh sau lực nâng của ô tô là dương, trong khi lực nâng khi có đặt cánh sau là âm. Cánh gió sau làm tăng lực cản ô tô không có lợi cho ô tô tiêu thụ nhiên liệu. Nath et al. (2021) đã nghiên cứu giảm lực cản bằng ứng dụng thiết bị khí động lực học trong một chiếc xe đua, mô hình ô tô ba chiều được phát triển trong Solidworks v17. Tính toán bộ động lực học chất lỏng tính toán (CFD). Kết quả mô phỏng và phân tích cho thấy các thiết bị khác nhau tạo ra một số chức năng khác nhau, nhưng lực cản tối đa giảm được tìm thấy trong trường hợp GT với cánh lướt gió và cản sau với mức tối đa giảm 16,53%. Ngoài ra, Yakkundi & Mantha (2018) đã khảo sát ảnh hưởng của cánh lướt gió đến các đặc tính khí động học của ô tô bằng cách tính

toán bộ động lực học chất lỏng tính toán (CFD) được thực hiện với 3 mô hình nhiễu loạn. Kết quả tác giả thu được cho thấy lực nâng giảm, nhưng lực cản tăng lên. Tuy nhiên, lợi ích của việc giảm lực nâng xuống và tăng độ bám đường sẽ bù đắp cho sự gia tăng lực cản, cánh lướt gió thực hiện chức năng của nó ở tốc độ cao.

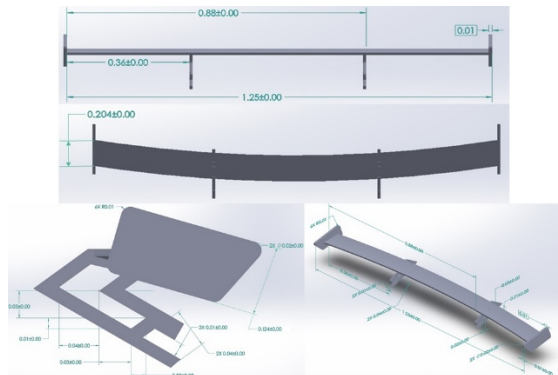
Trong bài báo này, mô phỏng đặc tính khí động lực học của cánh lướt gió sau của dòng ô tô thể thao được nghiên cứu nhằm cung cấp cho người đọc hiểu rõ hơn về sự ảnh hưởng của khí động lực học. Điều đó cũng thể hiện tầm quan trọng trong quá trình sản xuất ô tô. Kết quả mô phỏng được so sánh với mô hình ban đầu. Để đạt được mục tiêu này, phần mềm Solidworks được sử dụng phân tích trong modul Flow Simulation để mô phỏng đặc tính khí động lực học dòng khí.

2. MÔ HÌNH VÀ MIỀN TÍNH TOÁN

Những mẫu xe thể thao 2D tham khảo được sử dụng để xây dựng mô hình 3D của xe nguyên bản với kích thước Dài x Cao x Rộng = 4430 mm x 1305 mm x 1765 mm như Hình 1.



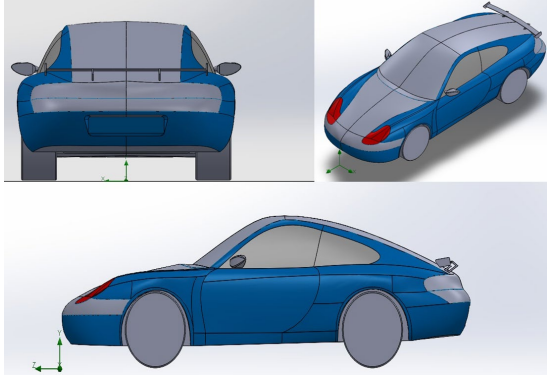
Hình 1. Mô hình xe thể thao nguyên bản



Hình 2. Thông số kích thước cánh lướt gió

Thiết bị cánh lướt gió sau trong Hình 2 được thiết kế dựa vào công trình nghiên cứu của Cakir (2012).

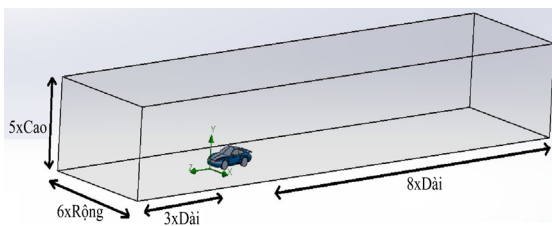
Mô hình ô tô cải tiến có gắn cánh lướt gió đã được phác họa như trong Hình 3.



Hình 3. Mô hình xe thể thao trang bị cánh lướt gió sau

Mô hình 3D được đơn giản hóa hoặc lược bớt một số vị trí phức tạp so với thiết kế 2D (ví dụ như hệ thống gầm được đơn giản hóa, lược bỏ các ống và cần gạt nước, mỗi nối các khe hở nhỏ dưới 10 mm...). Mục đích là để giảm tải nguyên tính toán trong khi vẫn giữ được hình dạng tự nhiên, đảm bảo thể hiện được các đặc tính khí động học của xe.

Miền không gian tính toán là vùng không gian bao quanh vật thể được giới hạn bởi những thông số được tính toán trong quá trình mô phỏng. Miền tính toán cần phải có kích thước cụ thể và đủ lớn được giới hạn bởi các mặt phẳng để đảm bảo dòng không khí không bị tác động bởi mô hình nghiên cứu và không lọt khí ra bên ngoài. Tuy nhiên, ta cũng không thể lựa chọn miền quá rộng và lớn dẫn đến làm lãng phí tài nguyên máy tính, tăng lượng thời gian mô phỏng. Vì vậy, dựa vào các công trình nghiên cứu trước (Corallo et al., 2015; Dang et al., 2015; Tunay et al., 2016), miền không gian tính toán được tính toán phụ thuộc vào kích thước vật thể mô phỏng được trình bày trong Hình 4.



Hình 4. Kích thước miền tính toán

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

3.1. Phương trình toán học mô phỏng

Phương trình Navier-Stokes thường được sử dụng để mô tả chuyển động của dòng lưu chất. Nó bao gồm các phương trình bảo toàn năng lượng và động lượng, phương trình bảo toàn khối lượng (phương trình liên tục). Chất khí được nghiên cứu về đặc tính khí động lực học thì không bị nén nên chỉ áp dụng phương trình bảo toàn động lượng và phương trình liên tục (Shrivastava et al., 2018; Shang, 2019) như sau:

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Phương trình bảo toàn động lượng:

$$\partial_i u_i + u_j \partial_j u_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i p + \nu \partial_j \partial_j u_i \quad (2)$$

Bài báo sử dụng phương trình Reynolds Navier – Stokes trung bình hóa (RANS) để phân tích bài toán khí động lực học ô tô:

$$\partial_i \bar{u}_i = 0$$

$$\partial_i \bar{u}_i + \bar{u}_j \partial_j \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i \bar{p} + \frac{1}{\rho} \partial_j (\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_i}) \quad (3)$$

Trong đó: u, v, w - Vận tốc của phần tử lưu chất theo 3 trục tọa độ x, y, z ; $\partial_i u_i$ - Đạo hàm riêng theo thời gian của u ; ρ - Khối lượng riêng của không khí (kg/m^3); p - Áp suất (N/m^2); ν - Độ nhớt động học của không khí (kg.m/s^{-1}); $\rho \overline{u'_i u'_i}$ - Ứng suất Renolds; τ_{ij} - Ứng suất Ten-sơ.

Hệ số cản biểu thị khả năng chịu được lực cản khí động học. Hệ số càng cao thì lực cản khí động học tác dụng lên vật thể càng lớn. Hệ số cản phụ thuộc vào hình dạng và vị trí của vật. Hệ số nâng biểu thị xu hướng khả năng xe bị nâng lên trong quá trình di chuyển vì vậy cần giảm hệ số nâng để bánh xe tiếp xúc với mặt đường tốt hơn. Duy trì trạng thái ổn định cho xe.

Giá trị hệ số cản và hệ số nâng được tính toán và khai báo trong Goals của Solidworks thông qua công thức (4,5) như sau:

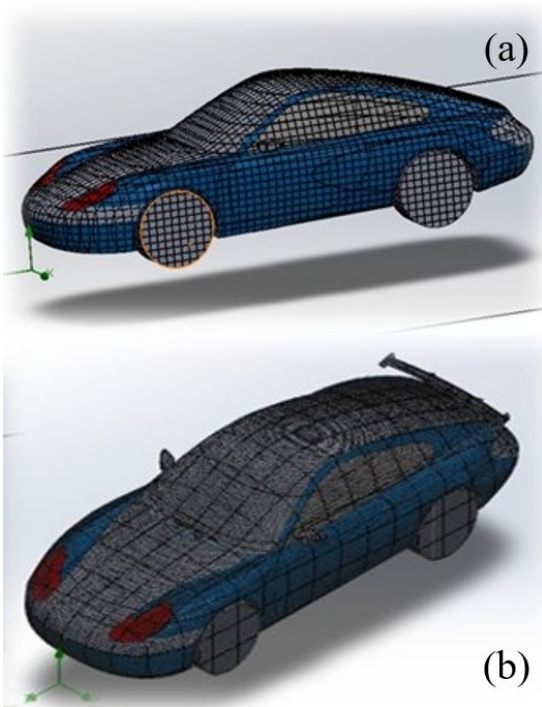
$$C_d = \frac{2 * F_D}{\rho * v^2 * A} \quad (4)$$

$$C_l = \frac{2 * F_l}{\rho * v^2 * A} \quad (5)$$

Với: $C_{d,l}$ – ứng với hệ số cản và hệ số nâng của xe; $F_{D,l}$ – tương ứng với lực cản và lực nâng của xe, giá trị này được xác định thông qua kết quả mô phỏng khí động lực học (N); v – vận tốc chuyển động của xe ô tô (m/s); A - Diện tích cản chính diện (m^2).

3.2. Chia lưới và điều kiện biên

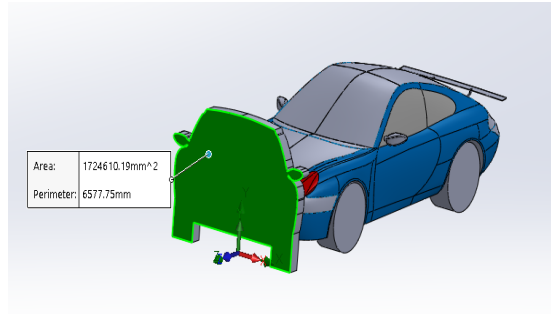
Việc phân nhỏ các vùng không gian mô phỏng trên mô hình thành các phần tử để phân tích khí động học gần đúng bằng phương pháp số chính là chia lưới. Mô hình chia lưới này được thể hiện trong Hình 5.



Hình 5. Mô hình chia lưới ô tô nguyên bản (a) và ô tô cải tiến (b)

Trong bài báo này sử dụng công cụ Mesh của Solidworks để chia nhỏ mô hình ô tô nguyên bản và cải tiến thành các phần tử nhỏ với dạng lưới tứ diện không có cấu trúc để tiến hành phân tích (Liu et al., 2017). Kích thước lưới vừa đủ nhỏ để đảm bảo độ chính xác của kết quả mô phỏng (Hamut et al., 2014; Stęchły et al., 2014) nhằm hạn chế thời gian tính toán và dung lượng máy tính.

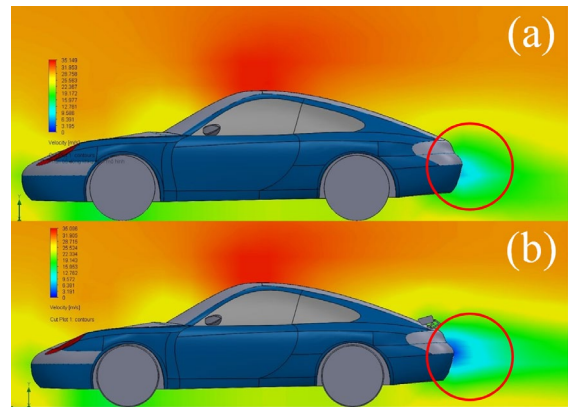
Để thực hiện mô phỏng khí động học thì sau khi chia lưới cần phải đặt các điều kiện biên đầu vào cho mô hình như sau: không khí có khối lượng riêng là 1,225 (kg/m^3) (Hammad et al., 2019), vận tốc của dòng khí là 30 m/s, tiết diện tính toán của mô hình được xác định trong Solidworks (Hình 6).



Hình 6. Tiết diện cản của mô hình ô tô

4. KẾT QUẢ

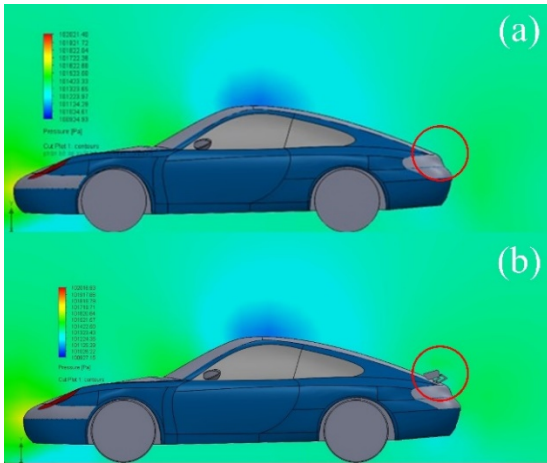
Sử dụng mô-đun Flow Simulation của Solidworks để mô phỏng đặc tính khí động lực học của ô tô. Đầu tiên nghiên cứu tiến hành khảo sát sự phân bố trường vận tốc quanh xung quanh mô hình như sau:



Hình 7. Phân bố trường vận tốc xung quanh mô hình ô tô nguyên bản (a) và ô tô cải tiến (b)

Cột thẳng đứng thang màu sắc từ màu xanh da trời đến màu đỏ thể hiện độ lớn vận tốc tăng dần từ thấp đến cao. Sự khác biệt giữa mô hình xe nguyên bản (Hình 7a) và xe cải tiến (Hình 7b) ở vị trí phía đuôi xe sau khi gắn cánh lướt gió phía sau. Ở Hình 7a xe nguyên bản thì vận tốc sau đuôi xe lớn hơn dựa vào màu sắc của chúng (màu xanh lá cây), sau khi gắn thêm cánh lướt gió phía sau thì vận tốc tại đây bị khuếch tán đi, vì vậy vận tốc tại đây sẽ nhỏ. Điều này sẽ dẫn đến việc phân bố áp suất và dòng xoáy sau đuôi xe thay đổi.

Đối với sự phân bố trường áp suất xung quanh mô hình được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Phân bố trường áp suất xung quanh mô hình ô tô nguyên bản (a) và ô tô cải tiến (b)

Khi quan sát kết quả mô phỏng trong Hình 8, ta dễ dàng nhận thấy áp suất phía sau đuôi xe của Hình 8b có xu hướng tăng lên (phần diện tích màu xanh lá cây nhiều hơn). Giải thích cho điều này là bởi dòng khí xung quanh mô hình tuân theo Định luật Bernoulli (Zhou et al., 2017), tức là vận tốc sẽ tỷ lệ nghịch với áp suất. Khi xe trang bị cánh lướt gió phía sau thì vận tốc giảm dẫn đến áp suất tăng lên.

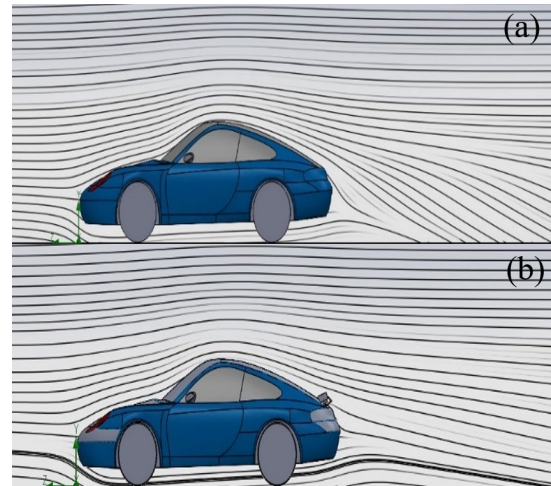
Kết quả mô phỏng vận tốc và áp suất của hai mô hình ô tô được trình bày trong Bảng 1 cho thấy sự thay đổi rõ hơn về khí động lực học đối với ô tô có gắn cánh lướt gió.

Bảng 1. So sánh giá trị vận tốc và áp suất phía sau đuôi xe hai mô hình ô tô trong hình 7 và Hình 8

Mô hình ô tô	Nguyên bản	Có gắn cánh lướt gió	So sánh
Vận tốc (m/s)	15,977	12,762	Giảm 3,215 (20,12%)
Áp suất (Pa)	101422,33	101323,43	Giảm 98,9 (0,1%)

Hình 9 bên dưới mô phỏng vùng xoáy phía sau đuôi xe. Trong Hình 9a cho thấy vùng xoáy của xe nguyên bản tập trung nhiều hơn và gần sát phía đuôi xe. Trong khi Hình 9b của xe có gắn cánh lướt gió thì vùng xoáy này có xu hướng phân tán ra xa phía sau xe. Điều này giúp cho xe hạn chế bị giữ lại trong quá trình di chuyển tốc độ cao tương tự trong các

nguyên cứu trước đây (Ruia et al., 2015; Palanivendhan et al., 2021).



Hình 9. Vùng xoáy phía sau mô hình ô tô nguyên bản (a) và ô tô cải tiến (b)

Cuối cùng dựa vào các mô phỏng xác định được lực cản, lực nâng, hệ số cản và hệ số nâng của mô hình ô tô nguyên bản và mô hình ô tô có gắn cánh lướt gió phía sau được thể hiện qua Bảng 2.

Bảng 2. So sánh hệ số cản (Cd) và hệ số nâng (Cl) của hai mô hình ô tô

Mô hình ô tô	Nguyên bản	Có gắn cánh lướt gió	So sánh
Lực cản (N)	364,895	346,47	Giảm 18,425
Hệ số cản	0,384	0,364	Giảm 0,02 (5,05%)
Lực nâng (N)	385,505	342,19	Giảm 43,315
Hệ số nâng	0,405	0,36	Giảm 0,045 (11,2%)

Các kết quả mô phỏng và Bảng 2 cho thấy ảnh hưởng của cánh lướt gió đối với ô tô thể thao rất là quan trọng. Nó giúp cho dòng ô tô thể thao di chuyển ổn định và hạn chế được tiêu hao nhiên liệu, điều này tương tự như các nghiên cứu trước đây (Cakir, 2012; Ayyagari et al., 2017; Verma et al., 2021).

5. KẾT LUẬN

Solidworks được sử dụng trong nghiên cứu để xây dựng mô hình 3D của dòng xe thể thao nguyên bản và xe có trang bị thêm cánh lướt gió phía sau

đuôi xe. Sau quá trình phân tích đặc tính khí động lực học của hai mô hình xe trong trường vận tốc, áp suất và vùng xoáy phía sau xe bằng mô-đun Flow Simulation trình bày được sự khác biệt về sự ảnh hưởng của không khí tác dụng lên hai mô hình. Kết quả nghiên cứu thể hiện mô hình xe có gắn cánh lướt gió phía sau có hệ số cản giảm 0,02 và hệ số nâng

giảm 0,045 so với mô hình xe nguyên bản. Nghiên cứu này giúp người đọc hiểu rõ hơn về tầm quan trọng của việc sử dụng cánh lướt gió phía sau cho dòng xe thể thao trong việc giảm lực cản và giảm lực nâng. Nó đặc biệt hữu ích cho việc thiết kế chế tạo ra các kiểu dáng cánh lướt gió sau và là nguồn tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu CFD khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

- Hucho, W. H. (1987). *Aerodynamics of Road Vehicles*. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd.
- Heft, A., Indinger, T., & Adams, N. (2012). *Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations*. SAE Technical Paper.. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0168>
- Madane, P., Pande, K., Gote, P., & Dongare, P. (2020). Study and Overview of Aerodynamic Active Rear Wing of High speed Vehicles. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(7), 4127-4132.
- Prabhu, L., Krishnamoorthi, S., Gokul, P., Sushan, N., Harshed, P. H. H., & Jose, A. (2020). Aerodynamics analysis of the car using Solidworks flow simulation with rear spoiler using CFD. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 993 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/993/1/012002>
- Buljac, A., Džijan, I., Korade, I., Krizmanić, S., & Kozmar, H. (2016). Automobile aerodynamics influenced by airfoil-shaped rear wing. *Int.J Automot. Technol.* 17, 377–385. <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0039-4>
- Nath, D. S., Pujari, P. C., Jain, A., & Rastogi, V. (2021). Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car. *Adv. Aerodyn*, 3(4). <https://doi.org/10.1186/s42774-020-00054-7>
- Yakkundi, V., & Mantha, S. (2018). Effect of Spoilers on aerodynamic properties of a car. *International Journal of Scientific Research and Review*, 7(3), 271-280.
- Cakir, M. (2012). *CFD study on aerodynamic effects of a rear wing/spoiler on a passenger vehicle*. Mechanical Engineering Masters Theses, Santa Clara University, California.
- Corallo, M., Sheridan, J., & Thompson, M.C. (2015). Effect of aspect ratio on the near-wake flow structure of an Ahmed body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.09.006>
- Dang, T. P., Gu, Z., & Chen, Z. (2015). "Numerical simulation of flow field around the race car in case: Stationary wheel and rotating wheels". *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 25(8), 1896-1911. <https://doi.org/10.1108/HFF-04-2014-0107>
- Tunay, T., Yaniktepe, B., & Sahin, B. (2016). Computational and experimental investigations of the vortical flow structures in the near wake region downstream of the Ahmed vehicle model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 159, 48-64. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.10.006>
- Shrivastava, A., Singh, D. K., & Mishra, P. M. (2018). Aerodynamic analysis of the vehicle using the Solidwork Flow Simulation. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*, 4(3), 1-5. <https://doi.org/10.23883/IJTER.2018.4159.BGW57>
- Shang, J. J. S. (2019). Landmarks and new frontiers of computational fluid dynamics. *Advances in Aerodynamics*, 1(5). <https://doi.org/10.1186/s42774-019-0003-x>
- Hamut, H. S., El-Emam, R. S., Aydin, M., & Dincer, I. (2014). Effects of rear spoilers on ground vehicle aerodynamic drag. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 24(3), 627-642. <https://doi.org/10.1108/HFF-03-2012-0068>
- Stęchły, K., Weceł, G., & Ingham, D. B. (2014). CFD modelling of air and oxy-coal combustion. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 24(4), 825-844. <https://doi.org/10.1108/HFF-02-2013-0066>
- Liu, C., Yu, W., Chen, Z. & Li, X. (2017). Distributed poly-square mapping for large-scale semi-structured quad mesh generation. *Computer-Aided Design*, 90, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.05.005>
- Hammad, M., Qureshi, K., & He, Y. (2019). *Safety and Lateral Dynamics Improvement of a Race Car Using Active Rear Wing Control*. SAE Technical Paper. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0643>
- Zhou, H., Wang, L., Cheng, J., & Ma, Y. (2017). Numerical Study of Bernoulli Effect on Bus Controllability and Driving Safety. *Transportation Research Record*, 2637(1), 74-82. <https://doi.org/10.3141/2637-09>
- Ruia, S., & Dixit, A. (2015). CFD Study of Aerodynamic Performance of A Popular Vehicle's Outer Body Shape and Analysis of The Effect of Aerodynamic Aids. *International*

Journal of Mechanical Engineering and Technology, 6(10), 171-193.

Palanivendhan, M., Chandradass, J., Bannaravuri, P. K., Philip, J., & Shubham, K. (2021).

Aerodynamic simulation of optimized vortex generators and rear spoiler for performance vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7228-7238.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.537>

Ayyagari, D. T. & He, Y. (2017). Aerodynamic analysis of an active rear split spoiler for

improving lateral stability of high-speed vehicles. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, 12(3/4).

<https://doi.org/10.1504/IJVSMT.2017.089978>

Verma, R. P., Chaudhary, N. K. & Avikal, S. (2021).

Effect of direction of lip spoiler on the aerodynamic performance of a small passenger vehicle. *Materialstoday: Proceedings*, 46(20), 10301-10305.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.44>