

Effect of Airfoil Profile Variations on the Rear Wing of a Racing Car on the Downforce Coefficient Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation

Carlen Muhammad Hendra^{1*}, Delima Yanti Sari¹, Arwizet K¹, Fitrah Qalbina¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author : carlenmhendra03@gmail.com

Received July 1st 2025; Revised July 28th 2025; Accepted August 14th 2025

Abstract

Variation of airfoil profile shape in race car rear wings plays a crucial role in generating optimal downforce to improve traction and vehicle stability. The main issue addressed in this study is the lack of clarity regarding which airfoil profile and angle of attack configuration are most effective in producing the highest downforce coefficient (C_{down}). This research aims to analyze the aerodynamic performance of symmetric airfoils NACA 0012 and NACA 0015 at three different angles of attack, namely 9.5° , 19.5° , and 29.5° , using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The simulations were performed under steady-state flow conditions with an appropriate turbulence model to accurately capture pressure distribution and airflow characteristics. Results show that NACA 0012 generated higher and more stable C_{down} values at low to medium angles, with the highest value of 1.4 at 29.5° . In contrast, NACA 0015 exhibited a more gradual performance increase and reached a C_{down} of 1.2 only at the highest angle. The study concludes that slender airfoil profiles like NACA 0012 are more suitable for circuits with sharp corners, while NACA 0015 is better suited for straight tracks requiring progressive aerodynamic stability. This research contributes to optimizing rear wing design based on the aerodynamic demands of race cars.

Keywords: Rear wing; Airfoil; CFD; Coefficient Downforce; Angle of attack

Pengaruh Variasi Profil *Airfoil* pada *Rear Wing* Mobil Balap terhadap *Coefficient Downforce* dengan Menggunakan Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (Cfd)

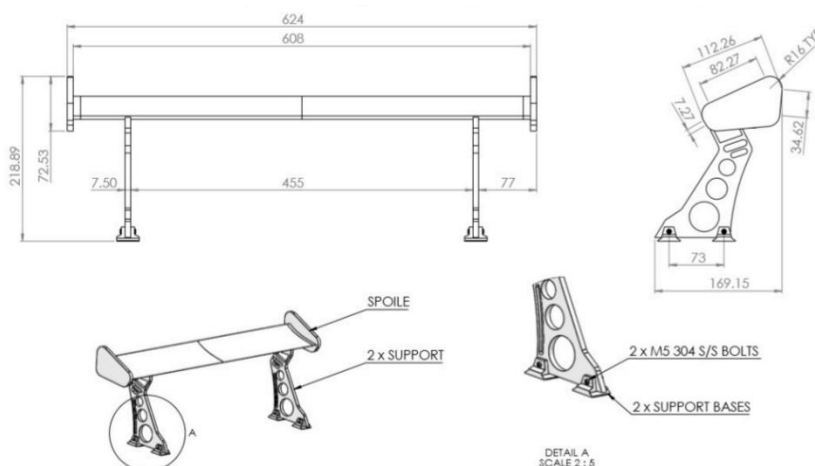
Abstrak

Variasi bentuk profil *airfoil* pada *rear wing* mobil balap berperan penting dalam menghasilkan gaya tekan ke bawah (*downforce*) yang optimal untuk meningkatkan traksi dan stabilitas kendaraan. Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum diketahuinya profil *airfoil* dan konfigurasi sudut serang yang paling efektif dalam menghasilkan *coefficient downforce* (C_{down}) tertinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi profil *airfoil* simetris NACA 0012 dan NACA 0015 terhadap performa aerodinamika *rear wing* pada tiga sudut serang berbeda, yaitu $9,5^\circ$, $19,5^\circ$, dan $29,5^\circ$, dengan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian dilakukan dalam kondisi aliran *steady-state* menggunakan model turbulensi untuk memperoleh distribusi tekanan dan aliran udara yang akurat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa NACA 0012 menghasilkan nilai C_{down} yang lebih tinggi dan stabil pada sudut serang rendah hingga menengah, dengan nilai tertinggi sebesar 1,4 pada sudut $29,5^\circ$. Sementara itu, NACA 0015 menunjukkan peningkatan performa secara bertahap, dan baru mencapai nilai C_{down} sebesar 1,2 pada sudut serang tertinggi. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa profil *airfoil* ramping seperti NACA 0012 lebih sesuai untuk lintasan dengan tikungan tajam, sedangkan NACA 0015 cocok digunakan untuk lintasan lurus yang membutuhkan kestabilan progresif. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan desain *rear wing* yang lebih optimal berdasarkan kebutuhan aerodinamika kendaraan balap.

Kata kunci: *Rear wing*; *Airfoil*; CFD; *Coefficient Downforce*; Sudut serang

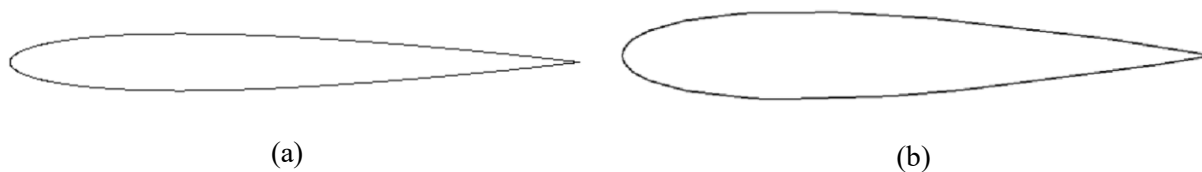
I. PENDAHULUAN

Aerodinamika merupakan salah satu faktor utama dalam dunia balap kendaraan, khususnya pada mobil balap yang dituntut memiliki performa optimal di setiap lintasan. Komponen-komponen aerodinamis seperti *rear wing* berperan penting dalam menciptakan gaya tekan ke bawah (*downforce*) yang meningkatkan daya cengkeram ban terhadap lintasan serta menjaga stabilitas kendaraan saat bermanuver pada kecepatan tinggi. Salah satu parameter penting dalam menilai efektivitas *rear wing* adalah *coefficient downforce* (C_{down}), yaitu rasio yang menunjukkan seberapa besar gaya tekan ke bawah yang dihasilkan oleh suatu bentuk geometri terhadap luas penampang dan kecepatan aliran udara (Katz, 2006). Namun, peningkatan *downforce* sering kali disertai dengan peningkatan hambatan udara (*drag*), sehingga diperlukan desain *rear wing* yang mampu menyeimbangkan kedua gaya tersebut untuk mempertahankan efisiensi performa kendaraan (Toet, 2013).



Gambar 1. *Mechanical Drawing Rear wing* (AL-Rawi & Oumssount, 2020)

Bentuk airfoil pada *rear wing* sangat menentukan karakteristik aliran udara yang melintas di atas dan di bawah permukaan sayap, yang pada akhirnya memengaruhi distribusi tekanan, besarnya *downforce*, dan drag. Penelitian dari (Iljaž et al., 2016) menyebutkan bahwa bentuk kelengkungan (*camber*), ketebalan, serta sudut serang (*angle of attack*) merupakan parameter utama dalam desain aerodinamika. Sementara itu, (Qiu & Zhang, 2023) menunjukkan bahwa modifikasi *trailing edge* dan konfigurasi multi-elemen *rear wing* dapat meningkatkan *coefficient downforce* secara signifikan tanpa menambah drag yang berlebihan. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi performa aerodinamika komponen kendaraan adalah simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD merupakan pendekatan numerik yang memanfaatkan komputasi untuk memprediksi dan menganalisis perilaku aliran fluida secara kuantitatif dan kualitatif (Ejeh et al., 2019). Prinsip dasar CFD didasarkan pada hukum-hukum konservasi massa, momentum, dan energi, yang diterapkan dalam bentuk diskritisasi terhadap domain aliran fluida (Ardany et al., 2021). Dengan metode ini, simulasi fisika aliran dapat dilakukan secara efisien, sehingga sangat cocok untuk studi parametrik pada desain komponen otomotif



Gambar 2. Geometri NACA 0012 dan NACA 0015

Namun demikian, masih terbatas kajian numerik yang secara spesifik membandingkan pengaruh variasi bentuk profil *airfoil* dan sudut serang terhadap nilai C_{down} dengan pendekatan simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Di sisi lain, metode CFD telah terbukti menjadi pendekatan yang efisien dan presisi dalam memodelkan fenomena aliran fluida kompleks tanpa harus menggunakan terowongan angin yang membutuhkan biaya besar dan waktu lama (Chiplunkar et al., 2023). Oleh karena itu, kajian ini menjadi penting untuk mendalami hubungan antara variasi profil airfoil dan sudut serang dengan performa aerodinamika kendaraan balap.

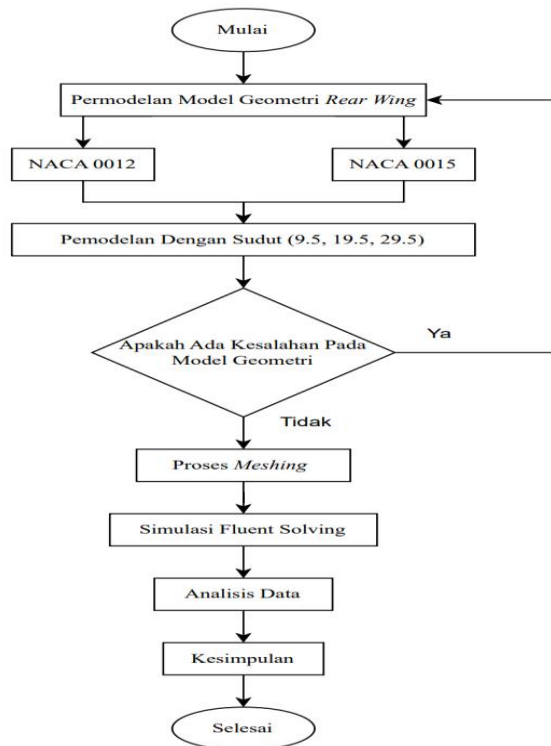
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk profil *airfoil* terhadap nilai *coefficient downforce* pada *rear wing* mobil balap. Analisis dilakukan menggunakan simulasi CFD dengan bantuan perangkat lunak Ansys Fluent, yang mampu mensimulasikan karakteristik aliran udara secara rinci dalam kondisi *steady state* dengan kecepatan 30 m/s sebagai representasi kecepatan rata-rata mobil balap di lintasan.

Hasil dari penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang aerodinamika kendaraan serta menjadi referensi praktis dalam merancang *rear wing* yang lebih optimal. Selain itu, pemanfaatan simulasi CFD diharapkan dapat menjadi alternatif yang efektif bagi industri otomotif dan balap dalam proses pengembangan desain kendaraan yang efisien, stabil, dan kompetitif.

II. METODE PENELITIAN

Studi ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi profil *airfoil* terhadap gaya tekan ke bawah (*downforce*) yang dihasilkan oleh *rear wing* mobil balap. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif, dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sebagai metode untuk mengevaluasi karakteristik aliran fluida pada sekitar *rear wing*. Beberapa bentuk profil *airfoil* simetris digunakan sebagai objek kajian, masing-masing diuji dalam beberapa kondisi sudut serang yang berbeda, dengan kecepatan aliran udara yang dijaga konstan. Simulasi dilakukan dalam kondisi *steady-state*, untuk memperoleh data berupa, aliran udara, serta nilai *coefficient downforce* (C_{down}). Tujuan

utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kombinasi bentuk dan konfigurasi yang paling efektif dalam menghasilkan *downforce* optimal, sehingga dapat memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan performa aerodinamika kendaraan balap. Untuk lebih detailnya dapat dilihat dalam diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3.



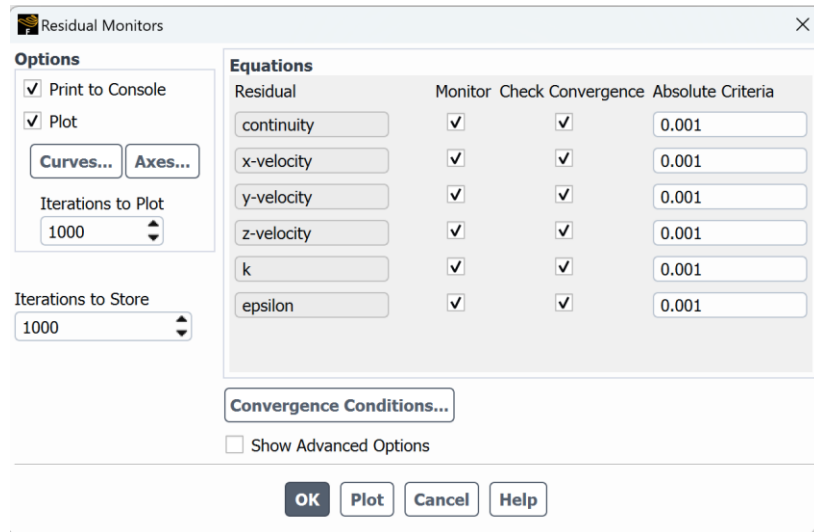
Gambar 3. Diagram Simulasi CFD

Data diperoleh dengan melalui proses simulasi numerik, di mana setiap variasi profil *airfoil* dan sudut serang dianalisis berdasarkan parameter aerodinamika yang telah ditentukan sebelumnya. Selama simulasi, sistem secara otomatis merekam distribusi tekanan dan arah aliran udara di sekitar permukaan *rear wing*. Selanjutnya, hasil simulasi dianalisis untuk mengevaluasi nilai *coefficient downforce* (C_{down}) yang dihasilkan pada masing-masing konfigurasi. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan distribusi gaya dan perubahan pola aliran terhadap karakteristik desain *airfoil*, guna mengidentifikasi bentuk dan sudut yang memberikan kontribusi paling signifikan terhadap peningkatan performa aerodinamika rear wing.

Table 1. Data Input pada *Reference Values*

No.	Input	Nilai
1	Arega (m ²)	1 m ²
2	Density (Kg/m ³)	1.225 Kg/m ³
3	Temperature (K)	288.16 K
4	Velocity (m/s)	30 m/s
5	Viscosity (Kg/ms)	1.7894×10^{-5} Kg/ms

Pada tahap ini, data input digunakan untuk menjalankan simulasi numerik dengan perangkat lunak CFD, yang mencakup penentuan tipe dan karakteristik boundary seperti *inlet*, *outlet*, *wall*, dan *symmetry*. Masing-masing boundary memiliki peran penting dalam menggambarkan kondisi fisik aliran *fluida*, seperti arah dan kecepatan masuk, tekanan keluar, serta interaksi aliran dengan permukaan padat. Penentuan boundary yang tepat berpengaruh langsung terhadap akurasi hasil simulasi



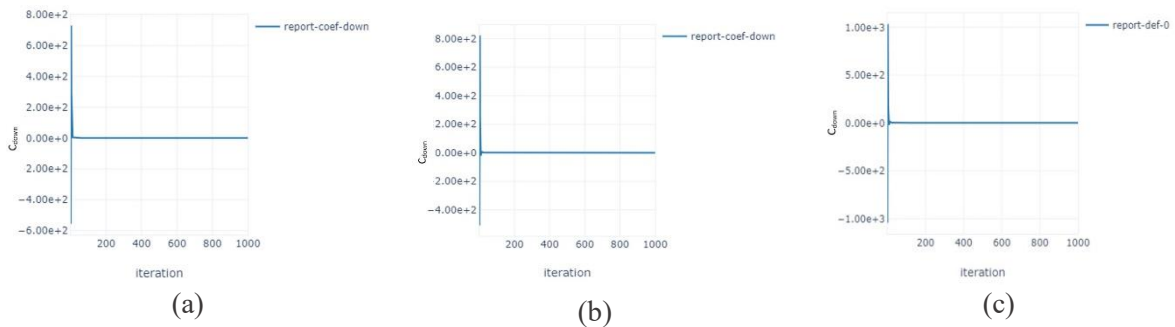
Gambar 4. Input Nilai Batas *Error*

Pada tahap ini, pengguna dapat menentukan batas toleransi kesalahan (*error limit*) yang nilainya bergantung pada jumlah *meshing* dan iterasi yang diterapkan. Semakin rendah nilai *error* yang ditetapkan, maka semakin tinggi tingkat akurasi hasil simulasi yang diperoleh. Dalam hal ini, iterasi tidak berfungsi sebagai batas konvergensi utama. Sebaliknya, proses iterasi akan secara otomatis dihentikan apabila nilai *error* telah mencapai ambang batas yang ditentukan, meskipun jumlah iterasi maksimum belum tercapai. Pengaturan terhadap nilai batas kesalahan ini dapat dilakukan melalui *monitor residual*.

III. HASIL PENELITIAN

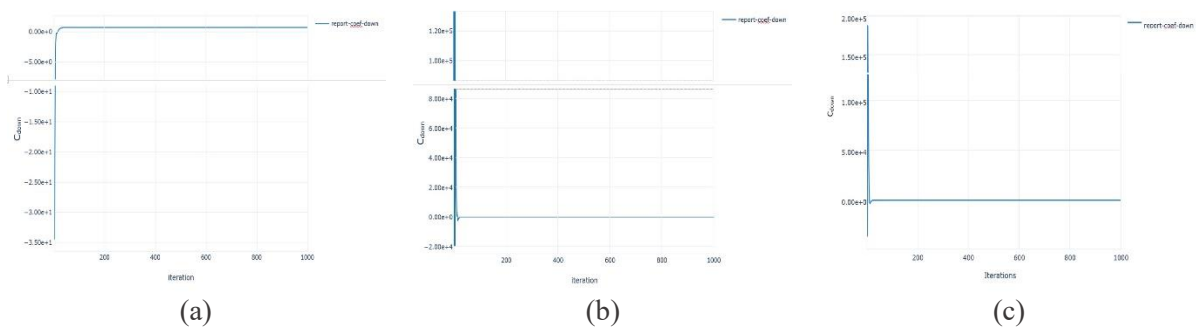
Simulasi dilakukan terhadap dua jenis profil *airfoil* simetris, yakni NACA 0012 dan NACA 0015, masing-masing pada tiga variasi sudut serang yaitu $9,5^\circ$, $19,5^\circ$, dan $29,5^\circ$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *coefficient downforce* (C_{down}) yang dihasilkan oleh setiap konfigurasi *rear wing* bervariasi secara signifikan tergantung pada kombinasi bentuk profil dan besar sudut serangnya.

Untuk profil NACA 0012, *rear wing* pada sudut serang $9,5^\circ$ menghasilkan nilai C_{down} sebesar 1,20, menandakan bahwa bahkan pada sudut yang relatif rendah, *airfoil* ini sudah memberikan gaya tekan ke bawah yang cukup besar. Nilai yang sama, yakni 1,20, juga diperoleh pada sudut serang $19,5^\circ$, menunjukkan kestabilan performa aerodinamika pada kisaran sudut menengah. Namun, saat sudut serang ditingkatkan menjadi $29,5^\circ$, terjadi peningkatan nilai C_{down} menjadi 1,40, yang merupakan nilai tertinggi dalam seluruh simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa profil NACA 0012 masih mampu bekerja secara efektif dalam menghasilkan *downforce*, bahkan pada sudut yang lebih agresif.



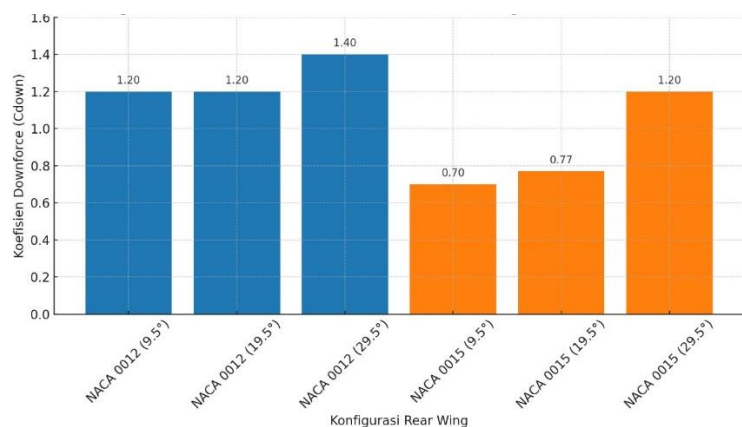
Gambar 5. Grafik *Coefficient Downforce* NACA 0012 pada Sudut Serang (a) $9,5^\circ$ (b) $19,5^\circ$ (c) $29,5^\circ$

Sementara itu, untuk profil NACA 0015, hasil simulasi pada sudut serang $9,5^\circ$ menunjukkan nilai C_{down} sebesar 0,70, yang berarti gaya tekan ke bawah yang dihasilkan masih lebih rendah dibandingkan NACA 0012. Peningkatan sudut ke $19,5^\circ$ hanya menaikkan C_{down} menjadi 0,77, menunjukkan peningkatan yang relatif kecil. Namun, pada sudut serang $29,5^\circ$, nilai C_{down} meningkat cukup signifikan hingga mencapai 1,20, menyamai performa NACA 0012 pada sudut $19,5^\circ$.



Gambar 6. Grafik *Coefficient Downforce* NACA 0015 pada Sudut Serang (a) $9,5^\circ$ (b) $19,5^\circ$ (c) $29,5^\circ$

Untuk menggambarkan hasil ini secara visual, Gambar 6 berikut menyajikan grafik batang perbandingan *coefficient downforce* antar konfigurasi *rear wing*:



Gambar 7. Grafik perbandingan nilai *coefficient downforce* (C_{down})

IV. PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa airfoil tipe NACA 0012 memberikan kinerja aerodinamika yang lebih baik dalam menghasilkan gaya tekan ke bawah (*downforce*), terutama pada sudut serang

rendah hingga menengah. Hal ini terlihat dari nilai *coefficient* downforce (C_{down}) yang relatif tinggi dan stabil pada sudut $9,5^\circ$ dan $19,5^\circ$, serta mengalami peningkatan yang signifikan saat sudut serang mencapai $29,5^\circ$. Capaian ini mengindikasikan bahwa bentuk NACA 0012 mampu menjaga kestabilan aliran udara di sekitarnya, dengan minimnya fenomena *stall* atau pemisahan aliran pada permukaan *airfoil*. Desain geometris NACA 0012 yang ramping memungkinkan distribusi tekanan yang lebih efisien di sepanjang permukaan, sehingga mampu mempertahankan gaya tekan ke bawah dalam kondisi aliran yang tetap terkendali.

Sementara itu, *airfoil* NACA 0015 menunjukkan pola peningkatan gaya tekan ke bawah yang lebih. Pada sudut serang $9,5^\circ$ dan $19,5^\circ$, nilai C_{down} relatif lebih rendah dibandingkan NACA 0012, yang kemungkinan besar disebabkan oleh bentuk profilnya yang lebih tebal. Meskipun desain yang lebih tebal ini memberikan keunggulan dari sisi kekuatan struktur, hal ini juga menyebabkan *airfoil* membutuhkan sudut serang yang lebih besar untuk menghasilkan gaya tekan ke bawah yang maksimal. Baru pada sudut $29,5^\circ$, NACA 0015 menunjukkan performa yang setara dengan NACA 0012, yaitu menghasilkan nilai C_{down} sebesar 1,20.

Perbedaan ini menegaskan bahwa pemilihan bentuk *airfoil* pada *rear wing* perlu mempertimbangkan karakteristik kebutuhan kendaraan secara spesifik. Apabila prioritas utama adalah menghasilkan gaya tekan ke bawah yang tinggi dengan respon cepat di lintasan berliku, maka profil seperti NACA 0012 akan lebih cocok digunakan. Sebaliknya, jika kendaraan membutuhkan kestabilan aerodinamis yang meningkat secara progresif dengan resiko separasi aliran yang lebih rendah, maka NACA 0015 bisa menjadi pilihan yang tepat, terutama pada kondisi kecepatan tinggi dan lintasan lurus.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi profil *airfoil* memberikan dampak yang nyata terhadap nilai *coefficient* downforce yang dihasilkan rear wing mobil balap. *Airfoil* tipe NACA 0012 menunjukkan performa aerodinamika yang lebih optimal dibandingkan NACA 0015 pada sudut serang rendah hingga menengah. Hal ini terlihat dari nilai *coefficient* downforce yang lebih tinggi dan stabil pada sudut $9,5^\circ$ dan $19,5^\circ$, serta peningkatan lebih lanjut pada sudut $29,5^\circ$. Kinerja ini mengindikasikan bahwa bentuk geometris NACA 0012 mampu menjaga kestabilan aliran fluida dan menghasilkan distribusi tekanan yang efektif, sehingga menghasilkan gaya tekan ke bawah yang besar tanpa menyebabkan gangguan aliran seperti *stall*.

Sebaliknya, *airfoil* NACA 0015 memerlukan sudut serang yang lebih besar untuk mencapai performa aerodinamika yang sebanding. Nilai *coefficient* downforce yang lebih rendah pada sudut serang $9,5^\circ$ dan $19,5^\circ$ menunjukkan bahwa profil yang lebih tebal pada NACA 0015 belum cukup menghasilkan efek tekanan yang signifikan hingga sudut $29,5^\circ$. Barulah pada sudut tersebut, NACA 0015 mampu mencapai nilai C_{down} yang setara dengan NACA 0012.

Dari perbandingan tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemilihan bentuk dan sudut serang *airfoil* pada *rear wing* sangat menentukan efektivitas gaya tekan ke bawah yang dihasilkan. Untuk kebutuhan kendaraan balap yang memerlukan traksi tinggi di tikungan dan respon aerodinamika yang cepat, profil ramping seperti NACA 0012 menjadi pilihan yang lebih sesuai. Namun, pada lintasan lurus atau kondisi yang membutuhkan peningkatan gaya tekan secara bertahap dan stabil, NACA 0015 tetap menjadi alternatif yang layak dipertimbangkan.

VI. REFERENSI

- Aerowoles. (2015, December 6). Retrieved March 10, 2025, from Wordpress.com website: <https://aerowoles.wordpress.com/2015/12/06/penggunaan-kata-aero/>.
- Agathangelou, B., & Gascoyne, M. (1998). Aerodynamic design considerations of a Formula 1 racing car. *SAE Transactions*, 107, 2245–2256.

- AL-Rawi, M., & Oumssount, A. (2020). *One-Way Fluid Structure Interaction of a Go-Kart Spoiler Using CFD Analysis*. *Figure 1*, 51. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020049051>
- Ardany, M. D., Pandiangan, P., & Hasan, M. (2021). Lift Force of Airfoil (NACA 0012, NACA 4612, NACA 6612) With Variation of Angle of Attack and Camber: Computational Fluid Dynamics Study. *Computational And Experimental Research In Materials And Renewable Energy*, 4(2), 80. <https://doi.org/10.19184/cerimre.v4i2.28372>
- Black Hawk, J. (2025). voltex. In *Black Hawk Japan*. https://www.blackhawkjapan.com/collections/vendors?q=voltex&srltid=AfmBOop8cx_j1g-A4EkX2fzHdIGiJsGJf54zfCuNY9FeP5VeNqbfV44
- Chiplunkar, V., Gujar, R., Adiverekar, A., Kulkarni, R., & Thonge, A. (2023). Computational fluid dynamics analysis for an active rear-wing design to improve cornering speed for a high-performance car. *Materials Today: Proceedings*, 77, 887–896.
- Ejeh, C. J., Akhabue, G. P., Boah, E. A., & Tandoh, K. K. (2019). Evaluating the influence of unsteady air density to the aerodynamic performance of a fixed wing aircraft at different angle of attack using computational fluid dynamics. *Results in Engineering*, 4, 100037.
- Hidayat, M. F. (2016). Dengan Ansys Fluent. *Analisa Aerodinamika Airfoil Naca 0021 Dengan Ansys Fluent M*.
- Iljaž, J., Škerget, L., Štrakl, M., & Marn, J. (2016). Optimization of SAE formula rear wing. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 62(5), 263–272. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3240>
- Jameson, A., Martinelli, L., & Vassberg, J. C. (2006). Using Computational Fluid Dynamics for Aerodynamics - a critical assessment. *Proceedings of ICAS*, 1–24. http://aero-comlab.stanford.edu/fatica/papers/jameson_fatica_hpc.pdf
- Karudin, A. (2020). Analisis Numerik Pengaruh Sudut Sudu Pengarah Difuser Jet Swirling dan Grille Terhadap Distribusi Sifat-Sifat Termodinamika Udara dalam Ruang Terkondisi. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi*, 20(2), 117–128. <https://doi.org/10.24036/invotek.v20i2.789>
- Katz, J. (2006). Aerodynamics of race cars. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38, 27–63. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>
- ÖZTEMEL, M. A., AKTAŞ, F., & YÜCEL, N. (2023). Aerodynamic analysis of car rear spoiler with computational fluid dynamics for different angles and profiles. *International Journal of Energy Studies*, 8(4), 649–665. <https://doi.org/10.58559/ijes.1362690>
- Qiu, Z., & Zhang, H. (2023). Aerodynamics-based design of the rear wing of a sports car. *Applied and Computational Engineering*, 11(1), 310–317. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/11/20230245>
- Raj, R. R., Tharakaram, N., & Prakash, N. (2022). Design and CFD analysis of a rear wing of a motorsport car. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 14(1), 58–62. <https://doi.org/10.4273/ijvss.14.1.14>
- Setiawan, J., & Darmawan dan Harto Tanujaya, S. (2022). Komparasi Simulasi CFD Pada Turbin Cross-Flow Dengan Model Turbulen k-ε STD dan RNG k-ε CFD Simulation Comparative Study on Cross-Flow Turbine with STD k-ε and RNG k-ε Turbulence Models. *Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi*, 4, 153–162.

- Singh, J., Singh, J., Singh, A., Rana, A., & Dahiya, A. (2015). Study of NACA 4412 and Selig 1223 airfoils through computational fluid dynamics. *International Journal of Mechanical Engineering*, 2(6), 17–21. <https://doi.org/10.14445/23488360/ijme-v2i6p104>
- Toet, W. (2013). Aerodynamics and aerodynamic research in Formula 1. *The Aeronautical Journal*, 117(1187), 1–26.
- Yang, Z., Gu, W., & Li, Q. (2011). Aerodynamic design optimization of race car rear wing. In *2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering* (pp. 642–646). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSAE.2011>.
- Zaheer, Z., Reby Roy, K. E., Nair, G. S., Ragipathi, V., & Niranjana, U. V. (2019). CFD analysis of the performance of different airfoils in ground effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 1355(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1355/1/012006>