

Analisis Aerodinamik Terhadap Kereta Formula Pelajar

Mohd Gadaffi Bin Osman^{1*}, Mohd Fais Bin Ismail¹, Mohammad Aizat Bin Mohd Tajuddin¹

¹Department of Mechanical Engineering, Politeknik Sultan Mizan Zainal Abidin, 23000 Dungun, Terengganu

*Corresponding author E-mail: gadaffi85@gmail.com

Abstrak

Aerodinamik memainkan peranan penting dalam prestasi kereta Formula Pelajar, khususnya dalam mengoptimumkan daya seretan (*drag coefficient*) dan daya tekan (*downforce*). *Drag coefficient* ialah ukuran rintangan sesuatu objek dalam persekitaran bendalir, di mana nilai *drag coefficient* yang lebih rendah menunjukkan daya seretan yang lebih kecil, sekali gus meningkatkan kecekapan pergerakan kenderaan. Sementara itu, *downforce* merupakan daya yang menekan kenderaan ke permukaan jalan, di mana lebih banyak *downforce* akan meningkatkan cengkaman tayar, sekali gus memperbaiki kestabilan dan kawalan kenderaan. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan aerodinamik antara kenderaan lumba yang dilengkapi sayap dan tanpa sayap bagi menentukan kesan reka bentuk terhadap prestasi pemanduan. Kajian dijalankan menggunakan kaedah simulasi bendalir pengiraan tiga dimensi (3D *Computational Fluid Dynamics*, CFD) dengan perisian Autodesk CFD bagi menilai pengaruh kelajuan kenderaan terhadap prestasi aerodinamiknya. Simulasi dilakukan pada lima tahap kelajuan berbeza iaitu 60km/j, 70km/j, 80km/j, 90km/j dan 100km/j. Hasil simulasi menunjukkan bahawa kenderaan dengan sayap mempunyai purata *drag coefficient* lebih tinggi iaitu 0.6042 berbanding tanpa sayap iaitu 0.5541. Walaupun penambahan sayap meningkatkan daya seretan, ia juga membantu meningkatkan daya tekan, yang dapat meningkatkan kestabilan dan kawalan kenderaan pada kelajuan tinggi. Hasil kajian ini dijangka dapat menyediakan panduan dalam mereka bentuk kereta yang lebih cekap dari segi kestabilan dan kelajuan, sekaligus meningkatkan daya saing pasukan dalam perlumbaan.

Kata kunci: Aerodinamik, Analisis, Kereta Formula Pelajar, Simulasi, Kestabilan.

1.0 Pengenalan

Formula Society of Automotive Engineers (FSAE) merupakan sebuah pertandingan kejuruteraan automotif yang berprestij di peringkat antarabangsa, dianjurkan oleh Society of Automotive Engineers (SAE International). Pertandingan ini memberi peluang kepada pelajar kejuruteraan dari seluruh dunia untuk mereka bentuk, membina, dan menguji prototaip kereta lumba berskala kecil. FSAE menilai bukan sahaja prestasi pemanduan, tetapi juga aspek teknikal seperti reka bentuk, kos, inovasi, dan persembahan lisan.

Dalam konteks ini, prestasi aerodinamik kereta Formula Pelajar menjadi salah satu aspek kritikal yang menentukan kejayaan sesebuah pasukan. Reka bentuk aerodinamik yang baik dapat mengurangkan daya seretan (*drag*) dan meningkatkan daya tekan ke bawah (*downforce*) (Singh, A. et al, 2020) yang secara langsung mempengaruhi kestabilan kenderaan, cengkaman tayar, serta kecekapan penggunaan tenaga.

Coefficient of drag (C_d) adalah ukuran utama dalam menilai rintangan aerodinamik sesebuah kenderaan. Umumnya, bagi kereta lumba berskala kecil seperti Formula Pelajar, nilai C_d yang baik adalah dalam lingkungan 0.5 hingga 0.75 (Dharmawan, M. A. et al, 2018) bergantung kepada konfigurasi badan dan komponen aerodinamik yang digunakan. Nilai C_d yang lebih rendah menunjukkan daya seretan yang lebih kecil, yang membolehkan kereta bergerak lebih laju dengan penggunaan tenaga yang lebih efisien. Namun begitu, pengurangan C_d perlu diseimbangkan dengan keperluan untuk menghasilkan *downforce* yang mencukupi bagi meningkatkan cengkaman dan kawalan kenderaan, terutamanya ketika mengambil selekoh pada kelajuan tinggi.

Kajian ini dijalankan untuk menganalisis kesan pemasangan sayap hadapan dan belakang pada kereta Formula Pelajar terhadap prestasi aerodinamik. Analisis dilakukan melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tiga dimensi menggunakan perisian Autodesk

CFD pada pelbagai kelajuan. Perbandingan dilakukan antara konfigurasi kereta dengan dan tanpa sayap.

2.0 Kajian Literatur

Kajian aerodinamik telah lama menjadi aspek penting dalam pembangunan kenderaan prestasi tinggi, termasuk dalam reka bentuk kereta lumba berskala kecil seperti Formula Pelajar. Aerodinamik dikenal pasti sebagai faktor utama yang mempengaruhi kecekapan bahan api, kelajuan maksimum, dan kestabilan kenderaan (Mirmahdi, E. et al, 2021). Dalam konteks Formula Society of Automotive Engineers (FSAE), kecekapan aerodinamik menjadi salah satu elemen kritikal dalam penilaian reka bentuk kenderaan kerana ia memberi kesan langsung terhadap kelajuan dan pengendalian di laluan perlumbaan yang kompleks.

Coefficient of drag (C_d) merupakan salah satu penunjuk utama dalam menilai keberkesanan aerodinamik sesebuah reka bentuk. Menurut Katz (2016), nilai C_d yang rendah membantu mengurangkan daya seretan yang dikenakan ke atas kenderaan semasa bergerak, sekaligus membolehkan kelajuan lebih tinggi dicapai dengan penggunaan tenaga yang lebih efisien. Bagi kenderaan lumba kecil, nilai C_d dalam lingkungan 0.5–0.75 dianggap kompetitif, bergantung kepada geometri dan konfigurasi aerodinamik seperti sayap dan *diffuser*. Sementara itu, *downforce* pula penting untuk meningkatkan kestabilan dan kawalan kenderaan, terutamanya semasa mengambil selekoh pada kelajuan tinggi. Penambahan sayap hadapan dan belakang secara signifikan boleh meningkatkan daya tekan ke bawah, seperti yang dibuktikan dalam kajian oleh Morelli (2000), namun sering kali ia juga meningkatkan nilai *drag coefficient*. Oleh itu, jurutera perlu mencari keseimbangan antara rintangan dan kestabilan.

Kaedah *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah banyak digunakan dalam menganalisis prestasi aerodinamik kerana keupayaannya mensimulasikan aliran udara dalam pelbagai keadaan dan reka bentuk tanpa perlu menjalankan ujian terowong angin secara fizikal. Menurut Versteeg dan Malalasekera (2007), CFD menawarkan ketepatan yang tinggi dalam simulasi aliran bendalir tiga dimensi apabila parameter dan sempadan ditetapkan dengan betul. Beberapa kajian terdahulu dalam aplikasi CFD untuk Formula Pelajar (seperti oleh Gupta et al., 2019) menunjukkan bahawa penambahan komponen aerodinamik mampu mengubah aliran udara dengan ketara dan meningkatkan keberkesanan pengendalian kenderaan.

Berdasarkan kajian-kajian terdahulu, dapat dirumuskan bahawa analisis aerodinamik adalah sangat penting dalam reka bentuk kereta Formula Pelajar. Penambahan elemen aerodinamik seperti sayap perlu dianalisis secara kuantitatif bagi memahami kesannya terhadap *drag* dan *downforce*. Maka, kajian ini dilaksanakan untuk mengisi jurang tersebut dengan menggunakan pendekatan simulasi CFD bagi menganalisis perbandingan prestasi antara reka bentuk kereta dengan dan tanpa sayap pada pelbagai kelajuan.

3.0 Metodologi

Kajian ini dijalankan melalui pendekatan simulasi menggunakan perisian berasaskan komputer untuk menganalisis prestasi aerodinamik kereta Formula Pelajar. Proses kajian terbahagi kepada dua peringkat utama iaitu reka bentuk model badan kereta dan simulasi aerodinamik.

3.1 Reka Bentuk Model

Reka bentuk badan kereta lumba Formula Pelajar dibina menggunakan perisian Autodesk Inventor. Dua model 3D telah direka bentuk:

- i. Model pertama merupakan reka bentuk asas badan kereta tanpa sebarang komponen aerodinamik seperti sayap.

- ii. Model kedua pula dilengkapi dengan sayap hadapan dan belakang yang direka bentuk bagi tujuan menghasilkan daya tekan ke bawah (*downforce*).



Rajah 3.1: Model rekabentuk kereta lumba ATEC PSMZA tanpa sayap hadapan dan belakang.



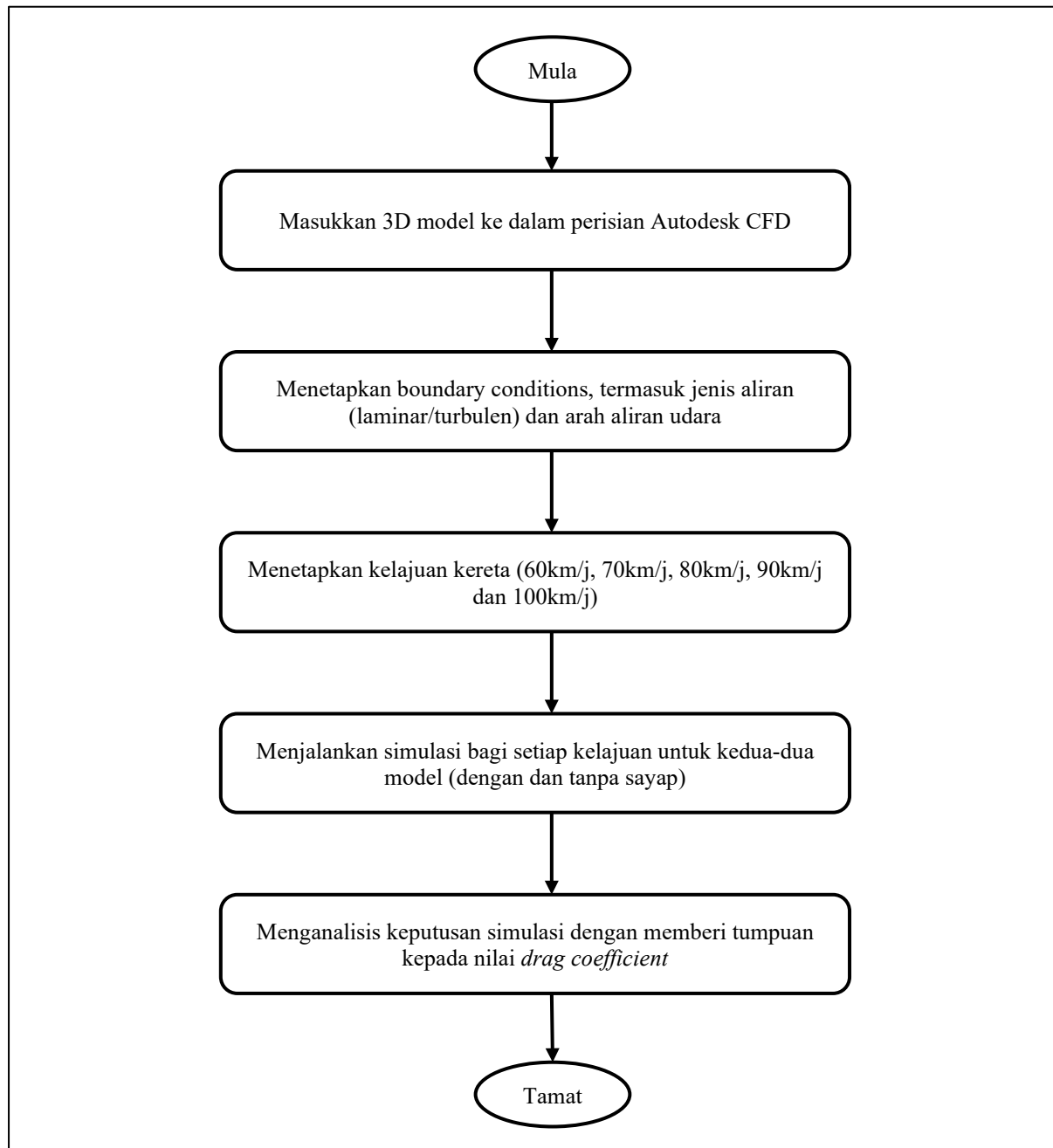
Rajah 3.2: Model rekabentuk kereta lumba ATEC PSMZA dengan sayap hadapan dan belakang.

Rajah 3.1 menunjukkan rekabentuk kereta lumba ATEC PSMZA tanpa rekaan sayap hadapan dan sayap belakang, manakala Rajah 3.2 menunjukkan rekabentuk kereta lumba ATEC PSMZA dengan sayap hadapan dan sayap belakang. Kedua-dua model ini digunakan bagi tujuan perbandingan dalam simulasi aerodinamik.

3.2 Simulasi Aerodinamik

Analisis aerodinamik dijalankan menggunakan perisian Autodesk CFD yang menyokong kaedah *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tiga dimensi. Simulasi dilakukan dalam keadaan aliran udara yang mewakili situasi sebenar ketika kenderaan bergerak. Bagi setiap model, simulasi dijalankan pada lima kelajuan yang berbeza iaitu 60 km/j, 70 km/j, 80 km/j, 90 km/j dan 100 km/j. Setiap simulasi menganalisis parameter berikut:

- i. *Coefficient of drag* (C_d)
- ii. Aliran udara di sekeliling badan kereta
- iii. Corak tekanan dan vektor halaju
- iv. Keberkesanan penghasilan downforce



Rajah 3.3: Carta alir analisis menggunakan perisian Autodesk CFD.

Rajah 3.3 menunjukkan carta alir bagi membuat analisis menggunakan perisian Autodesk CFD. Analisis dibuat dengan menetapkan kelajuan kereta pada nilai 60km/j, 70km/j, 80km/j, 90km/j dan 100km/j bagi setiap model iaitu dengan dan tanpa sayap.

Nilai drag coefficient diperolehi melalui formula di bawah:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A} \quad (1)$$

C_d = Coefficient of drag (pekali seretan, tanpa unit)

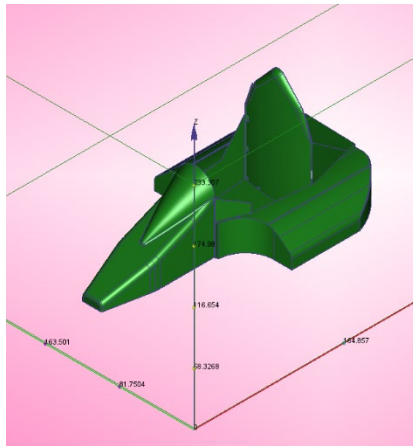
F_d = Daya seretan (*drag force*, dalam Newton, N)

ρ = Ketumpatan udara (*air density*, dalam kg/m³)

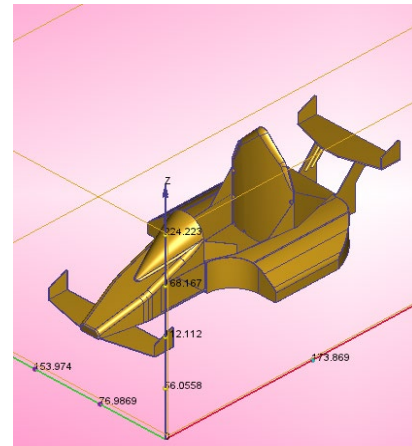
v = Halaju aliran udara relatif terhadap objek (dalam m/s)

A = Kawasan rujukan (*frontal area* objek, dalam m²)

Analisis dibuat terhadap 2 jenis rekabentuk badan kereta lumba ATEC PSMZA iaitu tanpa sayap hadapan dan sayap belakang dan dengan sayap hadapan dan sayap belakang. Simulasi dibuat hanya melibatkan rekabentuk badan kereta tanpa komponen-komponen lain. Rajah 3.4 dan 3.5 menunjukkan 2 jenis rekabentuk badan kereta lumba ATEC PSMZA yang dibuat analisis menggunakan perisian Autodesk CFD.



Rajah 3.4: Simulasi menggunakan Autodesk CFD terhadap rekabentuk badan kereta lumba tanpa sayap hadapan dan belakang.



Rajah 3.5: Simulasi menggunakan Autodesk CFD terhadap rekabentuk badan kereta lumba dengan sayap hadapan dan belakang.

4.0 Hasil dan Perbincangan

Kajian ini membandingkan prestasi aerodinamik dua reka bentuk kereta Formula Pelajar iaitu satu tanpa sayap, dan satu lagi dengan sayap hadapan dan belakang. Simulasi dilakukan menggunakan perisian Autodesk CFD pada lima kelajuan yang berbeza: 60 km/j, 70 km/j, 80 km/j, 90 km/j, dan 100 km/j. Parameter utama yang dianalisis ialah *drag coefficient* (C_d) dan kesan visual aliran udara terhadap bentuk badan kereta.

4.1 Nilai Drag Coefficient

Berikut merupakan keputusan simulasi nilai C_d bagi kedua-dua model:

Jadual 1: Perbandingan nilai *drag coefficient* (C_d) di antara model rekabentuk kereta lumba tanpa sayap dan dengan sayap.

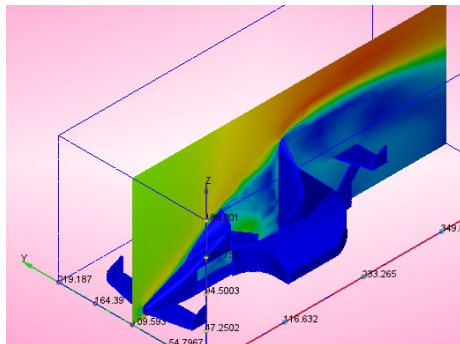
Kelajuan (km/j)	Tanpa Sayap (C_d)	Dengan Sayap (C_d)
60	0.5625	0.6157
70	0.5606	0.6108
80	0.5507	0.6102
90	0.5449	0.5967
100	0.5518	0.5878

Jadual 1 menunjukkan perbandingan nilai drag coefficient (C_d) di antara model rekabentuk kereta lumba tanpa sayap dan dengan sayap. Dari jadual di atas, dapat dilihat bahawa nilai *drag coefficient* adalah lebih tinggi apabila sayap dipasang. Ini sejajar dengan jangkaan bahawa penambahan komponen aerodinamik seperti sayap akan meningkatkan rintangan udara akibat bertambahnya permukaan pendedahan kepada aliran. Walau bagaimanapun,

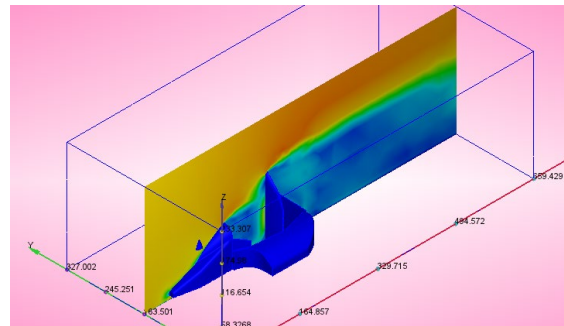
peningkatan ini berada dalam julat yang masih boleh diterima dalam konteks perlumbaan, khususnya kerana penambahan sayap memberikan manfaat tambahan dari aspek *downforce* (Dharmawan, M. A. et al, 2018).

4.2 Perbincangan Prestasi Aerodinamik

Walaupun reka bentuk dengan sayap menunjukkan nilai C_d yang lebih tinggi, komponen ini membantu meningkatkan daya tekan ke bawah (*downforce*) yang penting untuk kestabilan kereta semasa mengambil selekoh (Springman, H. 2022). *Downforce* yang lebih tinggi memberikan cengkaman yang lebih baik antara tayar dan permukaan litar, membolehkan pemandu mengambil selekoh pada kelajuan lebih tinggi tanpa kehilangan kawalan.



Rajah 4.1: Corak aliran udara pada rekabentuk badan kereta lumba dengan sayap hadapan dan belakang.



Rajah 4.2: Corak aliran udara pada rekabentuk badan kereta lumba tanpa sayap hadapan dan belakang.

Selain itu, Rajah 4.1 menunjukkan corak aliran udara lebih terkawal dan terarah bagi reka bentuk dengan sayap berbanding reka bentuk tanpa sayap yang mencetuskan lebih banyak *wake turbulence* di bahagian belakang seperti yang ditunjukkan pada rajah 4.2. *Turbulens* ini bukan sahaja menyumbang kepada kehilangan tenaga, malah boleh menyebabkan kestabilan kenderaan terjejas terutamanya pada kelajuan tinggi.

4.3 Implikasi terhadap Reka Bentuk Kereta Formula Pelajar

Hasil kajian ini menunjukkan bahawa penambahan sayap, meskipun meningkatkan *drag*, namun ianya dapat memberikan kelebihan dari segi kestabilan aerodinamik. Oleh itu, pasukan Formula Pelajar disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan komponen aerodinamik secara strategik, dengan reka bentuk yang mengoptimumkan keseimbangan antara *drag* dan *downforce*. Ini boleh dilakukan dengan pemilihan sudut serangan (*angle of attack*) yang sesuai iaitu 10° - 12° untuk sayap belakang dan 5° - 10° untuk sayap hadapan (Springman, H. 2022).

5.0 Kesimpulan dan Cadangan Kajian Lanjutan

5.1 Kesimpulan

Kajian ini telah menjalankan analisis aerodinamik ke atas dua reka bentuk kereta Formula Pelajar menggunakan simulasi CFD tiga dimensi melalui perisian Autodesk CFD. Simulasi terhadap rekabentuk badan kereta lumba ini membuktikan bahawa penambahan sayap sebagai komponen aerodinamik dapat meningkatkan prestasi aerodinamik. Purata nilai *drag coefficient* bagi rekabentuk model dengan sayap adalah lebih tinggi iaitu 0.6042 berbanding tanpa sayap iaitu 0.5541.

Secara keseluruhan, walaupun reka bentuk dengan sayap menghasilkan lebih banyak seretan, ia menawarkan kelebihan dari segi kestabilan aerodinamik dan pengendalian, yang amat penting dalam situasi perlumbaan sebenar yang melibatkan selekoh tajam dan perubahan kelajuan mendadak. Ini menunjukkan rekabentuk model kereta lumba dengan sayap lebih baik untuk perlumbaan yang menggunakan litar yang mencabar.

5.2 Cadangan Kajian Lanjutan

Berdasarkan dapatan kajian ini, beberapa cadangan untuk kajian masa hadapan adalah seperti berikut:

- i. Ujian Terowong Angin Sebenar (*Wind Tunnel Test*)
Hasil simulasi CFD boleh disahkan dengan ujian fizikal di dalam terowong angin bagi meningkatkan ketepatan dan kebolehpercayaan keputusan.
- ii. Analisis Sudut Serangan (*Angle of Attack*)
Kajian tambahan boleh dijalankan untuk menganalisis bagaimana variasi sudut sayap memberi kesan terhadap keseimbangan antara *drag* dan *downforce*.
- iii. Pengaruh Bentuk Lain Seperti *Diffuser* atau *Splitter*
Kajian boleh diperluas untuk menilai kesan komponen aerodinamik lain seperti *diffuser*, *canards*, atau *undertray* terhadap prestasi keseluruhan.
- iv. Simulasi dalam Keadaan Berselekoh (*Cornering Flow Simulation*)
Menjalankan simulasi yang meniru keadaan selekoh boleh memberi gambaran lebih realistik terhadap prestasi aerodinamik semasa perlumbaan.
- v. Analisis Struktur dan Berat
Kajian ini juga boleh digabungkan dengan analisis struktur dan berat bagi memastikan bahawa penambahan komponen aerodinamik tidak mengurangkan kecekapan jisim kenderaan.

References

- Barnard, R. H. (2020). *Road vehicle aerodynamic design: An introduction (3rd ed.)*. Routledge.
- Dharmawan, M. A., Ubaidillah, Nugraha, A. A., Wijayanta, A. T., & Naufal, B. A. (2018). *Aerodynamic analysis of formula student car*. AIP Conference Proceedings, 1931(1), 030048. <https://doi.org/10.1063/1.5024107>
- Gupta, A., Chauhan, P., & Sharma, P. (2019). *CFD analysis of FSAE cars with and without aerodynamic devices*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 8(4), 354–359.
- Katz, J. (2016). *Race car aerodynamics: Designing for speed (2nd ed.)*. Bentley Publishers.
- Mirmahdi, E., Karimi, M., Khoubrou, A., & Sajed, S. (2021). *The effect of aerodynamic forces on automotive design and reducing fuel consumption*. International Journal of Robotics and Automation, 7, 36–41.
- Morelli, A. (2000). *A New Aerodynamic Approach to Advanced Automobile Basic Shapes*. SAE Technical Paper Series, 2000-01-0491. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0491>.
- Ravi Kumar B., Nitesh Varshan M., Kannan T. (2019). *Aerodynamic design optimization of an automobile car using computational fluid dynamics approach*. Australian Journal of Mechanical Engineering, Volume 19, 2021 – Issue 5. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1654963>
- Rivaldo Gere Gurky, Mohammad Adhitya. (2024). *Front wing aerodynamic analysis of formula 1 cars in 2018 and 2019 with computational fluid dynamics (CFD)*. AIP Conf. Proc. 2710, 030006 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0167186>

- Singh, A., Jain, A., & Sharma, A. (2020). *Designing a 3-D model of bodywork of a vehicle with low coefficient of drag and high downforce*. Materials Today: Proceedings, 28(Part 4), 2197–2204. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.253>
- Springman, H. (2022, Summer). *Aerodynamics update: Justifying aero and setting goals*. Duke FSAE. Retrieved from <https://www.dukefsae.com/single-post/aerodynamics-update-summer-2022-justifying-aero-and-setting-goals>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.)*. Pearson Education.