

## SIMULASI NUMERIK AERODINAMIKA *UNSTEADY* PADA KENDARAAN RODA TIGA PENYANDANG DISABILITAS MENGGUNAKAN METODE *CFD*

**Reyhan Zidane Winarta**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Email: reyhanzidane.21057@mhs.unesa.ac.id

**A. Grummy Wailanduw**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
Email: grummywailanduw@unesa.ac.id

### Abstrak

Penambahan perangkat aerodinamika berupa *front spoiler* pada *leading edge* bodi kendaraan roda tiga listrik memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi aliran udara di sekitar kendaraan. Distribusi aliran yang lebih terarah diharapkan mampu mengurangi gaya hambat yang terjadi saat kendaraan bergerak, sehingga berdampak pada penurunan konsumsi energi dan peningkatan stabilitas laju kendaraan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut kemiringan *front spoiler* terhadap karakteristik aerodinamika, yang dianalisis melalui perubahan nilai koefisien hambat dan koefisien angkat, serta distribusi kecepatan, garis arus, dan tekanan di sekitar bodi kendaraan. Proses analisis dilakukan secara numerik menggunakan metode dinamika fluida komputasional tiga dimensi berbasis aliran tak tunak dengan perangkat lunak *ANSYS Fluent* versi 2025 R1. Variasi sudut yang diterapkan pada model kendaraan meliputi sudut 5 derajat, 12,5 derajat, dan 20 derajat. Simulasi dilakukan dalam empat kondisi kecepatan udara yang direpresentasikan dalam *Reynolds Number* sebesar  $2,05 \times 10^6$ ,  $3,10 \times 10^6$ ,  $4,14 \times 10^6$ , dan  $5,18 \times 10^6$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi sudut 12,5 derajat menghasilkan performa aerodinamika terbaik dengan nilai koefisien hambat paling rendah dan distribusi aliran paling stabil. Efek ini menyebabkan berkurangnya zona turbulen di bagian belakang kendaraan dan peningkatan keterlekatan aliran pada permukaan bodi. Dengan demikian, penggunaan sudut *front spoiler* yang tepat dapat menurunkan gaya hambat secara signifikan, meningkatkan efisiensi energi, serta memperpanjang jarak tempuh kendaraan listrik roda tiga.

**Kata Kunci:** Simulasi numerik, *front spoiler*, efisiensi aerodinamika, kendaraan listrik roda tiga, *Reynolds Number*.

### Abstract

The addition of an aerodynamic device, such as a front spoiler at the leading edge of the electric three-wheeled vehicle's body, has significant potential to enhance airflow efficiency around the vehicle. A more directed airflow is expected to reduce drag forces encountered during vehicle movement, which in turn can lead to reduced energy consumption and improved vehicle stability. This study aims to evaluate the effect of varying the angle of the front spoiler on aerodynamic characteristics, analyzed through changes in drag coefficient and lift coefficient, as well as the distribution of velocity, streamlines, and pressure around the vehicle's body. The analysis is performed numerically using a three-dimensional computational fluid dynamics method with unsteady flow, utilizing the *ANSYS Fluent* 2025 R1 Student Version software. The variations of the spoiler angle applied to the vehicle model are 5°, 12.5°, and 20°. Simulations are conducted under four airflow conditions, represented by Reynolds numbers of  $2.05 \times 10^6$ ,  $3.10 \times 10^6$ ,  $4.14 \times 10^6$ , and  $5.18 \times 10^6$ . The results show that the 12.5° configuration provides the best aerodynamic performance, characterized by the lowest drag coefficient and the most stable airflow distribution. This effect reduces the turbulence zone behind the vehicle and enhances the attachment of the airflow to the vehicle's body surface. Thus, using the optimal front spoiler angle can significantly reduce drag, improve energy efficiency, and extend the electric three-wheeled vehicle's range.

**Keywords:** Numerical simulation, front spoiler, aerodynamic efficiency, electric three-wheeled vehicle, Reynolds number.

### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang transportasi, khususnya kendaraan listrik, mengalami kemajuan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini mendorong para insinyur untuk terus berinovasi dalam menciptakan kendaraan yang tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga ramah lingkungan. Kendaraan listrik mulai banyak digunakan sebagai solusi terhadap berbagai permasalahan global, seperti polusi udara, emisi karbon, serta keterbatasan sumber daya bahan bakar fosil. Salah satu jenis kendaraan listrik yang tengah berkembang adalah kendaraan roda tiga, yang menawarkan solusi transportasi yang terjangkau, efisien, dan dapat diakses oleh

penyandang disabilitas, terutama di negara berkembang seperti Indonesia. Namun demikian, pengembangan kendaraan listrik tidak hanya bergantung pada sistem penggerakannya, melainkan juga pada desain bodi kendaraan yang mampu mendukung performa aerodinamis secara optimal.

Pengembangan desain bodi kendaraan roda tiga yang aerodinamis bertujuan untuk menekan gaya hambat udara ( $C_D$ ) seminimal mungkin. Gaya drag timbul akibat interaksi antara permukaan kendaraan dengan aliran udara di sekitarnya, yang terbagi menjadi drag tekanan dan drag gesekan (Maddumage *et al.*, 2021).

Desain aerodinamis pada kendaraan bertujuan untuk meminimalkan gaya hambat udara ( $C_D$ ) yang timbul akibat

interaksi antara aliran udara dan permukaan kendaraan. Gaya hambat ini terbagi menjadi dua komponen utama, yaitu *drag* tekanan dan *drag* gesekan. (Hucho & Sovran, 1993) menyatakan bahwa *drag* aerodinamis dapat menyumbang hingga 50% terhadap konsumsi energi kendaraan pada saat melaju. Oleh karena itu, perbaikan desain bodi, khususnya pada area yang pertama kali bersentuhan dengan aliran udara seperti bagian *leading edge*, menjadi sangat penting untuk meningkatkan efisiensi kendaraan. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah penambahan *front spoiler* yang berfungsi untuk mengendalikan aliran udara agar tidak mengalami separasi dini (Govardhan et al., 2023).

*Front spoiler* merupakan komponen tambahan pada bodi kendaraan yang memiliki peran penting dalam mengatur distribusi aliran udara, mengurangi tekanan stagnasi, serta mengarahkan udara ke bawah kendaraan guna menurunkan gaya hambat total (Szudarek & Piechna, 2021). Berbagai penelitian sebelumnya telah membuktikan efektivitas modifikasi aerodinamis seperti penambahan *rear spoiler*, *diffuser*, *side skirt*, dan *front spoiler* dalam mengendalikan gaya-gaya aerodinamis yang bekerja pada kendaraan. Di antara komponen tersebut, *front spoiler* menjadi salah satu elemen strategis dalam meningkatkan performa aerodinamika secara keseluruhan (Afianto et al., 2022).

Metode simulasi numerik tiga dimensi (CFD 3D) menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menganalisis gaya-gaya aerodinamika pada kendaraan, selain uji terowongan angin dan uji jalan (Katz, 2006). Metode ini dianggap lebih efisien karena mampu memvisualisasikan pola aliran fluida secara detail tanpa memerlukan prototipe fisik dan biaya besar. Meskipun begitu, simulasi CFD 3D juga memiliki keterbatasan karena pendekatan yang digunakan bersifat sistem kontinyu dan tidak selalu mampu merepresentasikan kondisi aliran kompleks secara nyata.

Berdasarkan beberapa penjelasan di atas, maka penelitian ini akan mengkaji lebih dalam tentang pengaruh variasi *front spoiler* yang diterapkan pada kendaraan roda tiga listrik untuk penyandang disabilitas, di mana komponen tersebut dipasang pada bagian *leading edge* bodi kendaraan yang pertama kali menerima aliran udara. Modifikasi ini akan mempengaruhi karakteristik aliran fluida di sekitar kendaraan, yang pada akhirnya berdampak pada besarnya nilai koefisien hambatan ( $C_D$ ) yang dihasilkan.

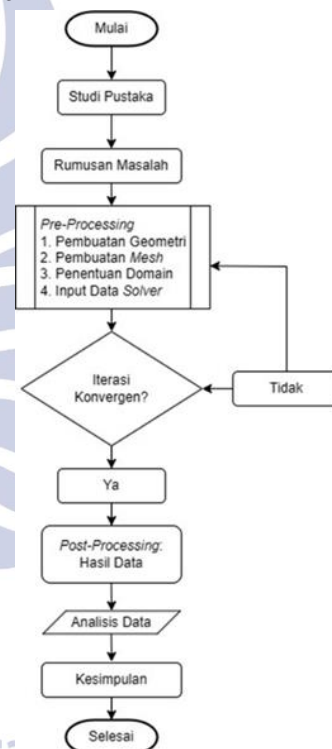
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi karakteristik aliran fluida di sekitar model kendaraan roda tiga listrik, baik pada kondisi standar maupun setelah diterapkan variasi *front spoiler* pada bagian *leading edge* kendaraan. Evaluasi dilakukan melalui hasil visualisasi *velocity contour*, *velocity streamline*, dan *pressure contour*

menggunakan simulasi perangkat lunak *ANSYS Workbench 2025 R1*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui hasil perhitungan koefisien *lift* dan *drag* dari masing-masing model, sehingga dapat dibandingkan dan diketahui variasi yang menghasilkan karakteristik aerodinamika terbaik guna meningkatkan efisiensi kendaraan secara keseluruhan.

Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah untuk menambah pengetahuan mengenai pengaruh pemvariasian *front spoiler* pada bagian *leading edge* dibandingkan dengan model kendaraan roda tiga listrik standar, sehingga dapat dijadikan sebagai acuan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan aerodinamika pada kendaraan listrik ringan, khususnya yang ditujukan bagi penyandang disabilitas.

## METODE

### Flowchart Penelitian



Gambar 1 Flowchart Penelitian

### Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan simulasi numerik unsteady 3D untuk mengetahui aliran pada kendaraan listrik roda tiga.

### Lokasi dan Waktu Penelitian

- Lokasi penelitian  
Lokasi penelitian dilaksanakan di Lab. Aerodinamika Prodi Teknik Mesin UNESA.
- Waktu Penelitian  
Penelitian ini dilakukan mulai dari tanggal 16 Desember 2024 – 24 Maret 2025.

### Variabel Penelitian

- Variabel Bebas
  - Model kendaraan listrik roda tiga dengan variasi sudut front spoiler pada leading edge yaitu tanpa front spoiler (standar), sudut  $5^\circ$ ,  $12,5^\circ$ , dan  $20^\circ$ .
- Variabel Terikat pada penelitian ini adalah : *Velocity Contour*, *Velocity Streamline Pressure*, *Contour*, *Coefficient Drag* dan *Coefficient Lift*
- Variabel Kontrol
  - Dimensi Kendaraan :
 

|             |            |
|-------------|------------|
| Panjang (l) | : 2.338 mm |
| Lebar (w)   | : 1.237 mm |
| Tinggi (h)  | : 1.454 mm |
  - Temperatur udara =  $20^\circ\text{C}$
  - Variasi *Reynolds number* yang digunakan adalah  $2,05 \times 10^6$  (20 km/h),  $3,10 \times 10^6$  (30 km/h),  $4,14 \times 10^6$  (40 km/h), dan  $5,18 \times 10^6$  (50 km/h).

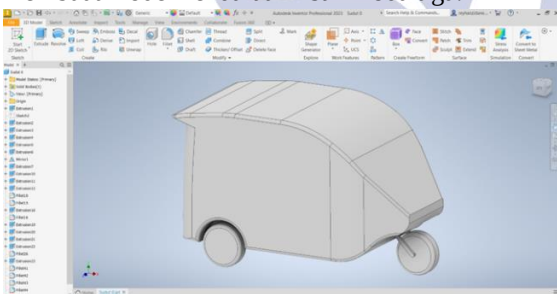
### Teknik Analisa Data

#### Tahap Pre-processing

Pre-processing merupakan tahap awal dalam proses pembuatan dan analisis model menggunakan metode CFD. Tahapan ini terdiri dari beberapa sub-tahapan, antara lain:

- Pembuatan geometri
 

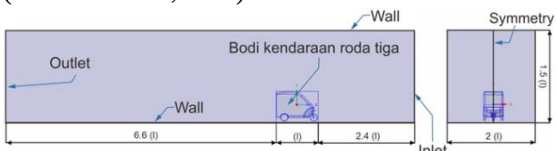
Proses pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan *software Inventor Profesional* untuk membuat model kendaraan listrik roda tiga.



Gambar 2 Pembuatan Geometri

- Pembuatan domain
 

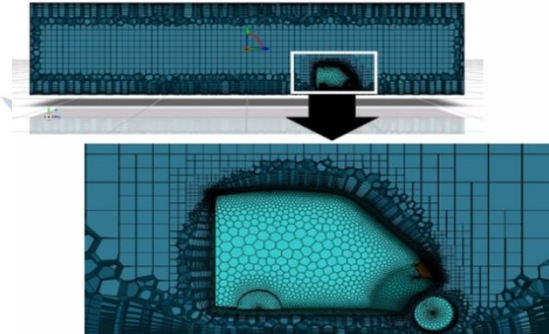
Pada tahap pembuatan domain menggunakan *software ANSYS Spaceclaim*, dengan mengimport geometri yang dibuat pada tahap pembuatan geometri. Dibuat sebuah *boundary layer* yang dimaksudkan untuk menggambarkan keadaan fluida disekitar objek penelitian. Dimensinya mengacu pada penelitian (Madharia et al., 2015).



Gambar 3 Proses Pembuatan Domain

- Pembuatan *mesh*

Proses pembuatan meshing dilakukan dengan menggunakan *ANSYS fluent with fluent meshing*, *Mesh* yang digunakan adalah bentuk *poly-hexcore*, dimana Metode ini mengombinasikan elemen poligonal pada bagian permukaan dengan elemen hexagonal di interior domain. Element poligonal di permukaan memastikan geometri yang kompleks dapat direpresentasikan secara detail, sedangkan element hexagonal di bagian interior menyediakan struktur *mesh* yang teratur dan efisien.



Gambar 4 Pembuatan Meshing

- *Solver Setting*

*Solver setting* mencakup beberapa parameter seperti tipe solver (2D atau 3D). Viscous model yang digunakan adalah *K-epsilon Realizable*. Pada boundary layer condition, inlet dari digambarkan dengan "*velocity inlet*", sedangkan outlet digambarkan sebagai "*velocity outlet*".

#### Tahap Processing

Tahap *processing* memproses kondisi awal untuk mencapai hasil konvergen. Jika belum konvergen, perlu perbaikan mesh dan kembali ke tahap meshing. Jika sudah konvergen, dilanjutkan ke *post-processing*.

#### Tahap Postprocessing

Tahap ini menyajikan hasil iterasi berupa data kuantitatif (seperti distribusi *drag* dan *lift coefficient*) dan kualitatif (seperti kontur kecepatan, *streamline*, dan kontur tekanan), yang menggambarkan aliran udara dan mendukung analisis aerodinamika kendaraan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Validasi Model

Pada proses validasi, akan dibandingkan data antara hasil simulasi *CFD* dengan data hasil eksperimen, yaitu nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ) yang memiliki persentase error terendah serta bentuk tren grafik Koefisien Tekanan ( $C_p$ ).



Simulasi CFD dilakukan menggunakan beberapa model turbulensi, dilakukan juga uji *Grid Independency* untuk menentukan konfigurasi mesh yang paling optimal. Model turbulensi terbaik dipilih berdasarkan akurasi, kestabilan, dan efisiensi komputasi terhadap geometri.

- Presentase nilai error  $C_D$  dan  $C_P$

**Tabel 1** Persentase error masing-masing model turbulensi

| No | Model                                   | Nilai $C_D$ | Nilai $C_P$ | Error (%) |
|----|-----------------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1  | Eksperimen (Vajra <i>et al.</i> , 2021) | 0.3818      | 0           | 0         |
| 2  | K-Epsilon Standart                      | 0.4733      | 1.007951    | 23.98     |
| 3  | K-Epsilon Realizable                    | 0.3925      | 1.005777    | 2.81      |
| 4  | K-Epsilon RNG                           | 0.4671      | 1.007672    | 22.36     |
| 5  | K-Omega Standart                        | 0.4150      | 1.020481    | 8.7       |
| 6  | K-Omega SST                             | 0.4612      | 1.008014    | 20.79     |
| 7  | Spalart Allmaras                        | 0.4382      | 1.011783    | 14.77     |
| 8  | RSM                                     | 0.4162      | 0.9988603   | 9.01      |
| 9  | Laminar                                 | 0.2476      | 0.9476203   | 35.15     |

Penentuan model turbulensi diawali dengan validasi terhadap data eksperimen Vajra et al. (2021) pada *Reynolds Number*  $1,88 \times 10^6$ . Untuk membandingkan nilai koefisien drag ( $C_D$ ), tekanan ( $C_P$ ), dan persentase error dari berbagai model turbulensi dengan data eksperimen sebagai acuan (error 0%). Model K- $\epsilon$  *Realizable* dipilih karena menunjukkan akurasi tinggi, efisiensi komputasi, serta stabilitas pada geometri kompleks kendaraan roda tiga.

- *Grid Independence Test*

Setelah menentukan model turbulensi yang sesuai, dilakukan uji *grid independence* untuk memilih mesh yang menghasilkan simulasi konvergen dan mendekati hasil eksperimen. Pengujian ini melibatkan variasi ukuran mesh guna menemukan konfigurasi optimal yang tetap efisien secara komputasi. Acuan validasi berasal dari data eksperimen Vajra et al. (2021), dengan *Reynolds Number* sebesar  $1,88 \times 10^6$ , untuk memastikan hasil simulasi memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

**Tabel 2** hasil *grid independence test*

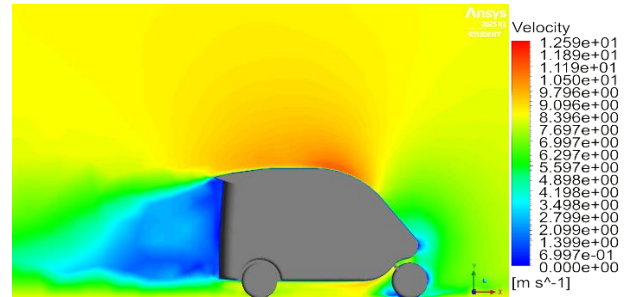
| No | Nodes  | Elemen | Nilai $C_D$ | Eksperimen | Error (%) |
|----|--------|--------|-------------|------------|-----------|
| 1  | 501323 | 370827 | 0.39813     | 0.38178    | 4.3       |
| 2  | 502141 | 371275 | 0.39648     |            | 3.9       |
| 3  | 502784 | 371448 | 0.3925      |            | 2.8       |
| 4  | 502859 | 371553 | 0.3929      |            | 2.9       |
| 5  | 502913 | 371617 | 0.3931      |            | 3.0       |

Dari hasil uji, error terkecil terhadap nilai koefisien drag ( $C_D$ ) tercatat sebesar 2,8%, yang menunjukkan konvergensi terbaik. Ketika *mesh* dibuat lebih kasar, error meningkat secara signifikan, mengindikasikan penurunan akurasi. Sebaliknya, saat jumlah elemen ditingkatkan melewati titik optimal, error justru naik tipis menjadi 3,0%, kemungkinan disebabkan oleh distribusi mesh yang kurang merata.

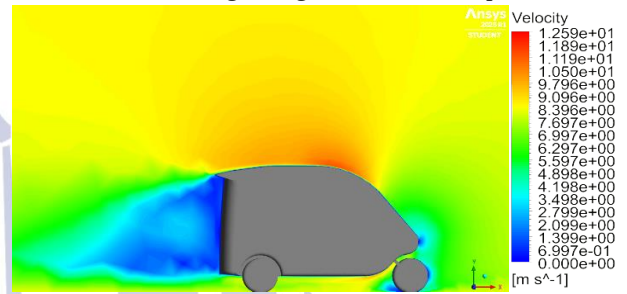
## Hasil Penelitian

### *Velocity Contour* kondisi *Unsteady Re* $3,10 \times 10^6$

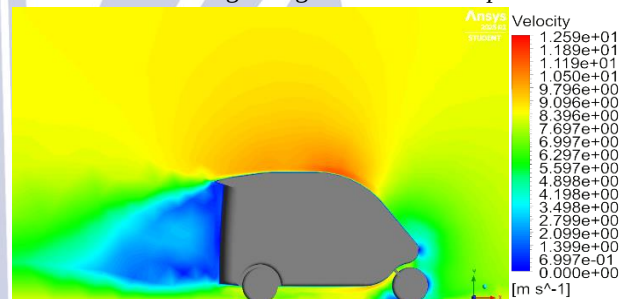
Berikut adalah hasil *velocity contour* pada model kendaraan listrik roda tiga standar dan tiga variasi sudut *front spoiler* pada *leading edge*.



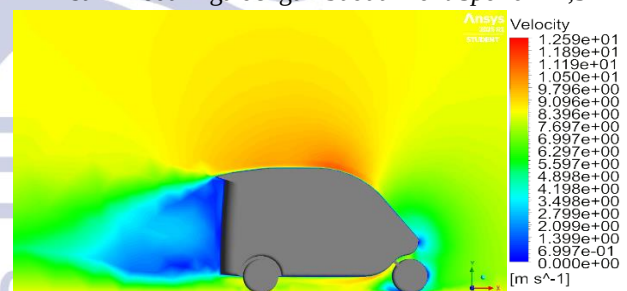
**Gambar 5** *Velocity Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler*  $0^\circ$



**Gambar 6** *Velocity Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler*  $5^\circ$



**Gambar 7** *Velocity Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler*  $12,5^\circ$

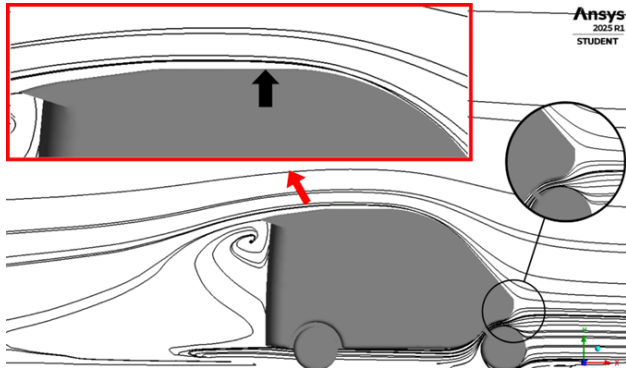


**Gambar 8** *Velocity Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler*  $20^\circ$

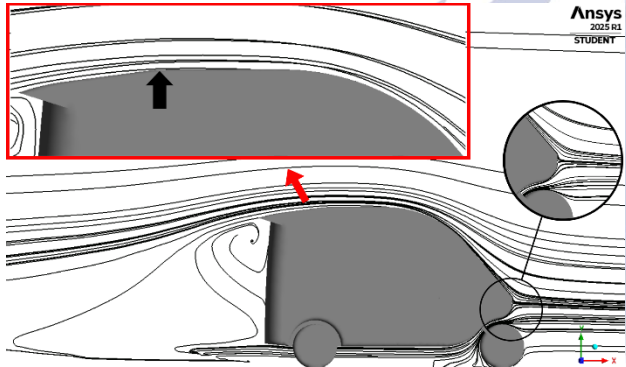
Terlihat penambahan *front spoiler* pada bagian *leading edge* model kendaraan listrik roda tiga memengaruhi distribusi kecepatan aliran di sekitar bodi. Area biru di belakang kendaraan menunjukkan defisit kecepatan, yang mengindikasikan adanya penurunan kecepatan udara setelah melewati bodi kendaraan. Variasi sudut  $12,5^\circ$  menghasilkan area defisit terkecil, menandakan penurunan kecepatan aliran paling minimal dibandingkan variasi lainnya.

### Velocity Streamline kondisi *Unsteady* $Re\ 3,10 \times 10^6$

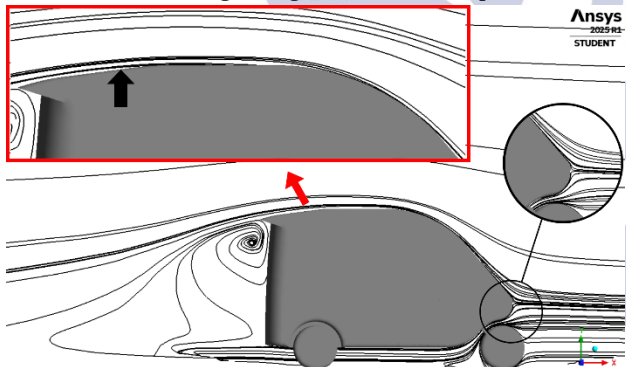
Berikut hasil *velocity streamline* pada model kendaraan listrik roda tiga standar dan tiga variasi sudut *front spoiler*.



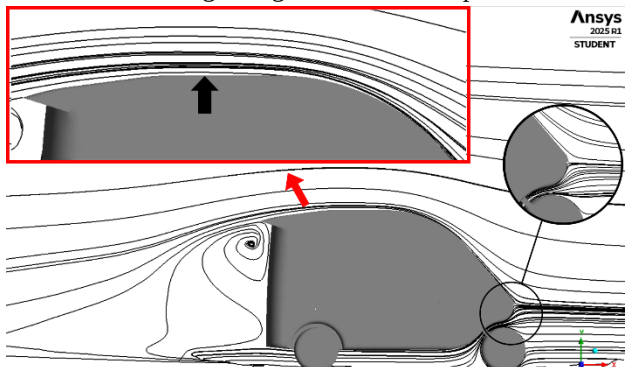
**Gambar 9** *Velocity Streamline* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 0°



**Gambar 10** *Velocity Streamline* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 5°



**Gambar 11** *Velocity Streamline* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 12,5°

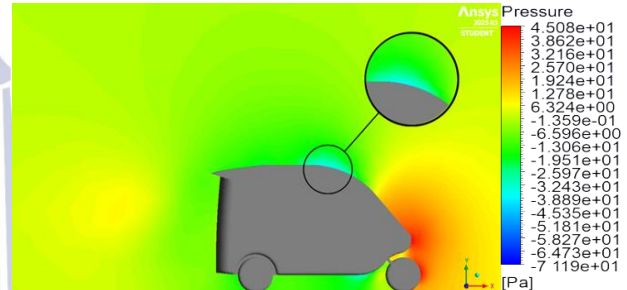


**Gambar 12** *Velocity Streamline* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 20°

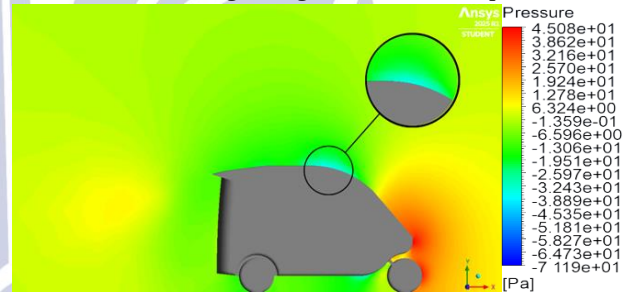
Terlihat bahwa penambahan *front spoiler* dengan sudut 12,5° dapat menunda separasi lebih lama, menjaga aliran udara tetap melekat pada bodi kendaraan sebelum akhirnya terpisah. Dengan distribusi kecepatan yang lebih merata, aliran udara tetap stabil hingga bagian belakang, sehingga separasi yang terjadi menjadi lebih lambat dan memperkecil pembentukan *wake*.

### *Pressure Contour* kondisi *Unsteady* $Re\ 3,10 \times 10^6$

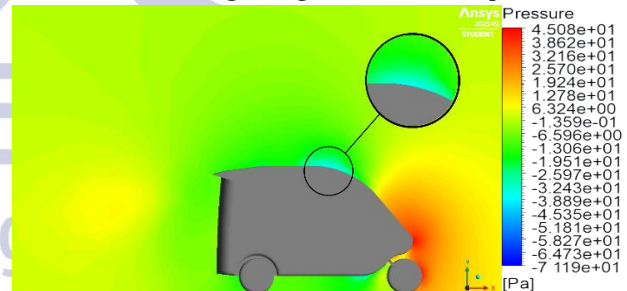
Berikut adalah hasil *pressure contour* pada model kendaraan listrik roda tiga standar dan tiga variasi sudut *front spoiler* pada *leading edge*.



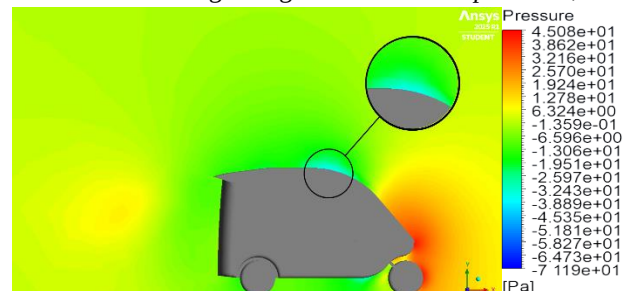
**Gambar 13** *Pressure Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 0°



**Gambar 14** *Pressure Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 5°



**Gambar 15** *Pressure Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 12,5°



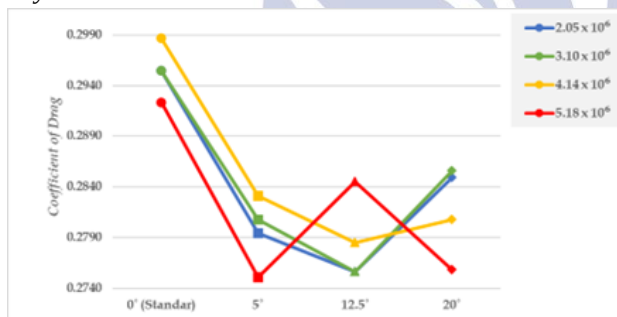
**Gambar 16** *Pressure Countor* pada Model kendaraan Listrik Roda Tiga dengan Sudut *Front Spoiler* 20°



Dari hasil pengamatan, terlihat bahwa perbedaan *pressure contour* antara model kendaraan standar dan yang menggunakan variasi sudut kemiringan tidak terlalu signifikan. Namun, pada gambar yang diperlihatkan, model dengan sudut kemiringan  $12,5^\circ$  menunjukkan area stagnasi yang lebih kecil di bagian depan dibandingkan dengan model standar atau variasi lainnya. Ini mengindikasikan bahwa variasi sudut kemiringan tersebut lebih aerodinamis, memfasilitasi aliran udara yang lebih lancar di atas kendaraan, dan dengan demikian dapat menurunkan nilai *coefficient drag* ( $C_D$ ). Penambahan *front spoiler* pada sudut  $12,5^\circ$  juga membantu memperpanjang *bubble separation* dengan membuat aliran udara tetap menempel lebih lama pada permukaan kendaraan, yang mengurangi ukuran *wake* dan berkontribusi pada peningkatan efisiensi bahan bakar kendaraan.

#### Data Coefficient Drag dan Coefficient Lift

Berikut ini merupakan data  $C_D$  dan  $C_L$  yang dijelaskan dalam bentuk grafik untuk melihat perubahan yang terjadi pada model kendaraan Listrik roda tiga dengan variasi sudut *front spoiler* pada *leading edge* berdasarkan variasi *Reynold Number*.

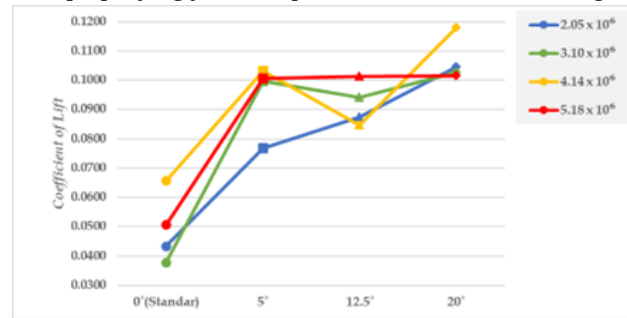


**Gambar 17** Grafik data *Coefficient Drag* pada model kendaraan listrik roda tiga.

Koefisien Drag ( $C_D$ ) menggambarkan hambatan udara yang dialami kendaraan akibat interaksi dengan aliran udara di sekitarnya. Semakin rendah nilai ( $C_D$ ) semakin sedikit gaya hambat yang diterima, yang berdampak pada peningkatan efisiensi energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi sudut *front spoiler* pada *leading edge* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penurunan nilai  $C_D$ . Sudut  $12,5^\circ$  menghasilkan  $C_D$  terendah, yaitu 0,2756 pada *Reynolds Number*  $2,05 \times 10^6$  dan  $3,10 \times 10^6$ , dengan aliran yang lebih teratur dan zona *wake* yang lebih kecil di belakang kendaraan.

Pada kecepatan tinggi dengan *Reynolds Number*  $5,18 \times 10^6$ , nilai  $C_D$  pada sudut  $12,5^\circ$  mengalami sedikit peningkatan menjadi 0,2845. Kondisi ini mengindikasikan bahwa aliran udara menjadi lebih sensitif terhadap geometri permukaan kendaraan pada kecepatan tinggi, yang menyebabkan terjadinya separasi aliran lebih cepat dan memperbesar *wake*. Meskipun demikian, sudut  $12,5^\circ$  tetap menunjukkan performa terbaik secara keseluruhan,

memberikan pengurangan *drag* yang signifikan, meningkatkan efisiensi aerodinamika, dan memperpanjang jarak tempuh kendaraan listrik roda tiga.



**Gambar 18** Grafik data *Coefficient Lift* pada model kendaraan listrik roda tiga.

Koefisien Angkat ( $C_L$ ) menggambarkan gaya angkat yang terjadi akibat perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah kendaraan. Semakin kecil nilai  $C_L$ , semakin stabil kendaraan tersebut. Dalam penelitian ini, variasi sudut *front spoiler* pada *leading edge* menunjukkan pengaruh terhadap nilai  $C_L$ . Sudut  $12,5^\circ$  menghasilkan nilai  $C_L$  yang lebih rendah dan stabil dibandingkan dengan sudut lainnya, seperti  $20^\circ$ . Pada *Reynolds Number*  $2,05 \times 10^6$ ,  $3,10 \times 10^6$ , dan  $4,14 \times 10^6$ , nilai  $C_L$  untuk sudut  $12,5^\circ$  berada di kisaran 0,0874–0,0940, yang ideal untuk menjaga stabilitas kendaraan roda tiga listrik tanpa menghasilkan gaya angkat yang berlebihan.

Fenomena ini dapat dijelaskan oleh distribusi tekanan yang optimal pada sudut  $12,5^\circ$ , di mana aliran udara yang terpisah di bagian depan menghasilkan tekanan rendah di permukaan atas kendaraan. Ini membantu menjaga gaya angkat yang rendah, yang meningkatkan kestabilan kendaraan. Pada kecepatan lebih tinggi ( $Re\ 5,18 \times 10^6$ ), meskipun nilai  $C_L$  sedikit meningkat, distribusi tekanan tetap lebih merata, sehingga tidak menyebabkan ketidakstabilan yang signifikan. Oleh karena itu, sudut  $12,5^\circ$  memberikan keseimbangan yang optimal antara pengurangan gaya hambat dan pengendalian gaya angkat, menjadikannya konfigurasi aerodinamis terbaik untuk kendaraan listrik roda tiga.

## PENUTUP

### Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi *CFD* mengenai dampak penambahan *front spoiler* pada *leading edge* terhadap karakteristik aerodinamika kendaraan listrik roda tiga, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Penambahan *front spoiler*  $12,5^\circ$  menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih merata (*velocity contour*), pola aliran yang lebih terarah dan stabil (*streamline*), serta tekanan yang lebih seimbang di sekitar bodi kendaraan (*pressure contour*). Zona *wake* di belakang kendaraan mengecil, separasi aliran melambat, dan *drag* menurun. Hal ini membuat

kendaraan lebih efisien secara aerodinamika, mengurangi konsumsi daya listrik, dan memperpanjang jarak tempuh.

- Penambahan sudut *front spoiler* secara umum menurunkan koefisien *drag* ( $C_D$ ), dengan penurunan paling signifikan pada sudut  $12,5^\circ$ . Sudut ini memberikan  $C_D$  terendah pada  $Re\ 2,05 \times 10^6$  hingga  $4,14 \times 10^6$ , sehingga hambatan udara berkurang dan konsumsi daya listrik menurun. Meskipun  $C_D$  sedikit meningkat pada  $Re\ 5,18 \times 10^6$ , aliran yang lebih stabil tetap membantu mengurangi total hambatan dan meningkatkan efisiensi jarak tempuh.
- Penambahan *front spoiler*  $12,5^\circ$  menurunkan koefisien lift ( $C_L$ ), dengan nilai paling stabil dibandingkan sudut lainnya. Pada  $Re\ 2,05 \times 10^6$  dan  $3,10 \times 10^6$ ,  $C_L$  berkisar antara 0,0874–0,0940, dan turun menjadi 0,0846 pada  $Re\ 4,14 \times 10^6$ . Pada  $Re\ 5,18 \times 10^6$ , meskipun  $C_L$  sedikit meningkat, nilainya tetap aman. Penurunan drag dan kestabilan lift mengurangi beban motor dan konsumsi daya listrik.
- Sudut  $12,5^\circ$  terbukti sebagai konfigurasi terbaik pada  $Re\ 2,05 \times 10^6$ ,  $3,10 \times 10^6$ , dan  $4,14 \times 10^6$ , menghasilkan  $C_D$  terendah yang mengurangi hambatan aerodinamika dan meningkatkan efisiensi daya listrik. Dengan *drag* yang lebih rendah, kendaraan menghemat energi dan mengurangi konsumsi daya. Pada  $Re\ 5,18 \times 10^6$ , meskipun terjadi sedikit peningkatan  $C_D$ , efeknya terhadap konsumsi daya masih dapat diterima. Hambatan yang lebih rendah juga memperpanjang jarak tempuh kendaraan.

### Saran

Dari simulasi yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas variasi sudut kemiringan *leading edge* agar dapat memperoleh informasi lebih rinci mengenai perubahan fenomena aerodinamis, khususnya pada sudut yang lebih banyak untuk meningkatkan efisiensi aliran udara.
- Penggunaan komputer dengan spesifikasi tinggi perlu dipertimbangkan untuk mempercepat proses simulasi, sehingga data dapat diperoleh lebih efisien dan variasi yang lebih banyak dapat dianalisis dalam waktu singkat.
- Penelitian selanjutnya sebaiknya menganalisis pengaruh aksesoris kendaraan, seperti spion dan pelindung roda depan, yang dapat memengaruhi aliran udara dan koefisien drag dan lift, untuk hasil yang lebih realistis.

### DAFTAR PUSTAKA

- Afianto, D., Han, Y., Yan, P., Yang, Y., Elbarghthi, A. F. A., & Wen, C. (2022). Optimisation and Efficiency Improvement of Electric Vehicles Using Computational Fluid Dynamics Modelling. *Entropy*, 24(11). <https://doi.org/10.3390/e24111584>
- Govardhan, D., Narasimha Rao, M. V., Srinivasa Rao, P., Kumar, I., & Vijaya Lakshmi, M. (2023). Adjoint shape optimization of Ahmed body to improve aerodynamics. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.410>
- Hucho, W. H., & Sovran, G. (1993). *Aerodynamics of road vehicles*. 485–537.
- 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>
- Maddumage, W., Perera, M., Attalage, R., & Kelly, P. (2021). Power management strategy of a parallel hybrid three-wheeler for fuel and emission reduction. *Energies*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/en14071833>
- Szudarek, M., & Piechna, J. (2021). Cfd analysis of the influence of the front wing setup on a time attack sports car's aerodynamics. *Energies*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/en14237907>
- Vajra, G. A., Tobing, S., & Iskandar, I. (2021). Analisis Aerodinamika Bodi Mobil Hemat Energi Kelas Urban Menggunakan Simulasi Computational Fluid Dynamics. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(2), 210. <https://doi.org/10.32497/jrm.v16i2.2552>

