

SIMULASI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN DAN VARIASI JUMLAH *VORTEX GENERATOR DELTA-SHAPE* TERHADAP KARAKTERISTIK AERODINAMIKA PADA KENDARAAN GARED IV

Ardito Surya Nugraha

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: arditosurya.22008@mhs.unesa.ac.id

Dr. A. Grummy Wailanduw, M.Pd., M.T.

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: grummywailanduw@unesa.ac.id

Abstrak

Meningkatnya konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi mendorong pengembangan kendaraan yang memiliki karakteristik aerodinamika lebih baik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan *vortex generator* (VG) tipe *Delta-Shape* terhadap karakteristik aerodinamika mobil hemat energi Garuda Revolution Diesel IV (GARED IV). Penelitian dilakukan menggunakan metode simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan perangkat lunak ANSYS Fluent pada kondisi *steady-state*. Variasi penelitian meliputi model standar (tanpa VG) serta penambahan VG sebanyak 1, 3, dan 5 buah dengan tiga variasi bilangan Reynolds sebesar $2,16 \times 10^6$; $2,7 \times 10^6$; dan $3,24 \times 10^6$ yang diperoleh dari kecepatan aliran udara 40 km/jam, 50 km/jam, dan 60 km/jam. Variabel yang dianalisis meliputi nilai koefisien *drag* serta karakteristik aliran fluida berupa *pressure contour* dan *velocity contour*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan VG berpengaruh terhadap penurunan nilai koefisien *drag* dan perubahan karakteristik aliran fluida di belakang kendaraan. Variasi VG = 5 menghasilkan koefisien *drag* terendah pada seluruh bilangan Reynolds, yaitu sebesar 0,2255 pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$; 0,2227 pada $Re = 2,7 \times 10^6$; dan 0,22 pada $Re = 3,24 \times 10^6$. Kondisi tersebut didukung oleh peningkatan tekanan pada daerah *wake* dan penyempitan *wake region* pada *velocity contour*.

Kata Kunci: *Computational Fluid Dynamics*, *vortex generator*, koefisien *drag*, aerodinamika, mobil hemat energi.

Abstract

The increasing energy consumption and greenhouse gas emissions from the transportation sector have encouraged the development of vehicles with better aerodynamic characteristics. This study aims to analyze the effect of adding Delta-Shape type vortex generators (VG) on the aerodynamic characteristics of the Garuda Revolution Diesel IV (GARED IV) energy-efficient vehicle. The study was conducted using a numerical simulation method based on Computational Fluid Dynamics (CFD) with ANSYS Fluent software under steady-state conditions. The research variations included the standard model (without VG) and the addition of 1, 3, and 5 vortex generators with three Reynolds number variations of 2.16×10^6 , 2.7×10^6 , and 3.24×10^6 , obtained from air flow velocities of 40 km/h, 50 km/h, and 60 km/h. The analyzed variables included the drag coefficient and fluid flow characteristics in the form of pressure contours and velocity contours. The simulation results showed that the addition of vortex generators affected the reduction of the drag coefficient and altered the fluid flow characteristics behind the vehicle. The VG = 5 variation produced the lowest drag coefficient at all Reynolds numbers, namely 0.2255 at a Reynolds number of 2.16×10^6 , 0.2227 at $Re = 2.7 \times 10^6$, and 0.22 at $Re = 3.24 \times 10^6$. This condition was supported by an increase in pressure in the wake region and a reduction in the wake region shown in the velocity contour.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics*, *vortex generator*, drag coefficient, aerodynamics, energy-efficient vehicle.

PENDAHULUAN

Meningkatnya emisi gas rumah kaca akibat sektor transportasi menjadi salah satu tantangan utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Sektor transportasi menyumbang sekitar seperempat emisi karbon dioksida global dan merupakan salah satu sektor dengan konsumsi energi terbesar (Sari & Sofwan, 2021). Peningkatan jumlah kendaraan bermotor setiap tahun menyebabkan konsumsi bahan bakar semakin tinggi sehingga diperlukan berbagai upaya untuk meningkatkan efisiensi energi kendaraan.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah peningkatan performa aerodinamika kendaraan (Al-Saadi et al., 2022). Hambatan aerodinamis (*drag*) berpengaruh langsung terhadap kebutuhan daya kendaraan dan

konsumsi bahan bakar. Semakin kecil gaya *drag* yang bekerja pada kendaraan maka energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan kecepatan kendaraan juga semakin rendah.

Berbagai metode pengendalian aliran telah dikembangkan untuk mengurangi drag aerodinamis, salah satunya adalah *vortex generator* (VG). *Vortex generator* merupakan perangkat aerodinamika pasif yang menghasilkan pusaran kecil untuk meningkatkan energi lapisan batas sehingga mampu menunda *flow separation* dan memperkecil daerah *wake* (Ismail et al., 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *vortex generator* tipe *delta-shape* mampu menurunkan koefisien *drag* pada berbagai jenis kendaraan, meskipun

efektivitasnya dipengaruhi oleh jumlah, dimensi, posisi pemasangan, serta kondisi operasi kendaraan.

Sebagian besar penelitian terdahulu dilakukan pada kendaraan sedan, hatchback, SUV, maupun notchback, sedangkan kajian mengenai penerapan *vortex generator* pada kendaraan hemat energi tipe *urban concept* masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian mengenai pengaruh variasi jumlah *vortex generator* terhadap karakteristik aerodinamika kendaraan GARED IV belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan *vortex generator* tipe *delta-shape* dengan variasi jumlah 1, 3, dan 5 buah terhadap koefisien *drag* serta karakteristik aliran fluida meliputi (*pressure contour* dan *velocity contour*) kendaraan Garuda Revolution Diesel IV (GARED IV) menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

METODE

Jenis Penelitian

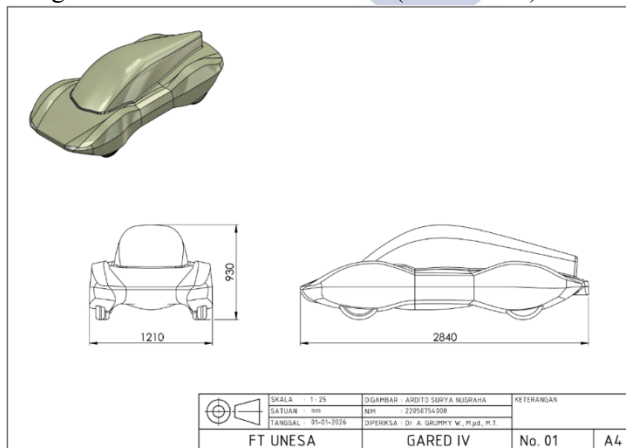
Penelitian ini merupakan simulasi aerodinamika pada kendaraan menggunakan metode numerik *Computational Fluids Dynamics* (CFD) dengan *software* ANSYS dengan *solver* ANSYS Fluent. Koefisien *drag* dan pola distribusi karakteristik aliran fluida (*pressure contour* dan *velocity contour*) pada kendaraan nantinya akan ditemukan dengan bantuan simulasi numerik ini.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian *vortex generator* GARED IV dilaksanakan di *workshop* Garnesa Racing Team Gedung A1 Universitas Negeri Surabaya Kampus Ketintang. Penelitian aerodinamika kendaraan hemat energi GARED IV dengan variasi jumlah VG ini dilaksanakan dalam rentang waktu 06 Februari 2026 sampai 24 Juni 2026.

Objek Penelitian

Objek pada penelitian ini berupa *body* kendaraan hemat energi Garuda Revolution Diesel IV (GARED IV).



Gambar 1. *Body* mobil hemat energi GARED IV

Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Dalam penelitian ini yang menjadi variabel bebas adalah model standar (tanpa VG) dan model yang menggunakan variasi jumlah VG = 1, 3, dan 5.

2. Variabel Terikat

Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah nilai koefisien *drag* pada *body* kendaraan dan pola distribusi karakteristik aliran fluida (*pressure contour* dan *velocity contour*)

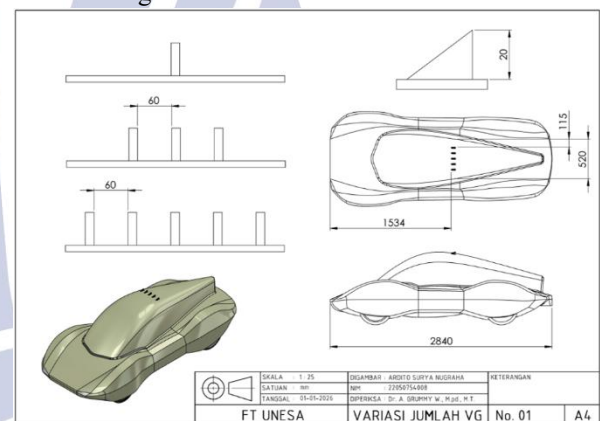
3. Variabel Kontrol

- Fluida yang mengalir adalah udara (densitas konstan)
- Aliran *Steady-state*
- Body* kendaraan yang digunakan adalah *body* GARED IV
- Variasi bilangan Reynolds yang digunakan adalah 11,11 m/s ($Re = 2,16 \times 10^6$), 13,89 m/s ($Re = 2,7 \times 10^6$), 16,67 m/s ($Re = 3,24 \times 10^6$).
- Tidak menggunakan aksesoris kaca spion dan *wiper*
- Model uji dialiri sejajar dengan arah fluida (longitudinal terhadap *body*)
- Jarak pemasangan *vortex generator* dari ujung depan kendaraan sebesar 1534 mm.

Teknik Pengumpulan Data

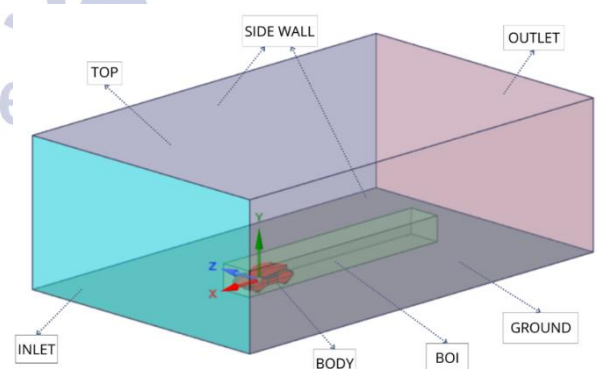
Tahap *Pre-Processing*

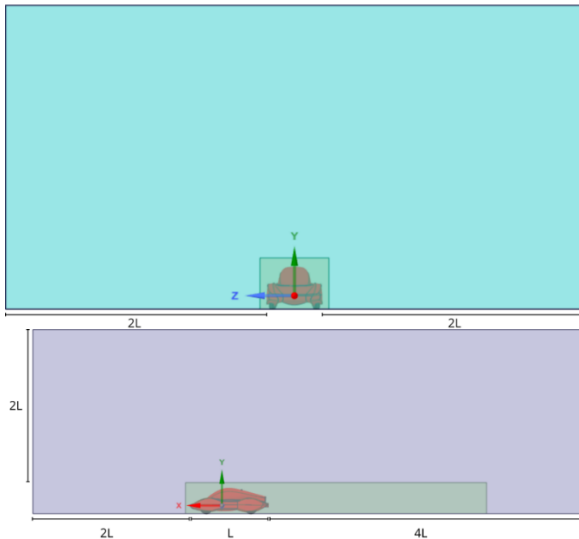
1. Pembuatan geometri



Gambar 2. Pembuatan geometri *body* GARED IV model standar (tanpa VG) dan model VG = 1, 3, dan 5. Pembuatan geometri dilakukan pada *software* SolidWorks 2022.

2. Penentuan *domain*

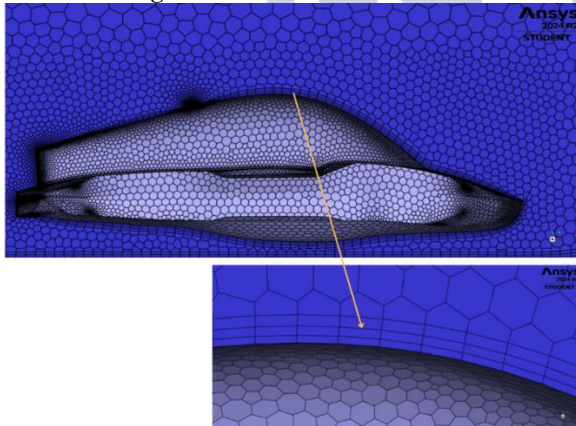




Gambar 3. Dimensi domain *Body* GARED IV

Pembuatan domain CFD merupakan tahap penentuan wilayah aliran fluida untuk perhitungan numerik.

3. Proses *meshing*



Gambar 4. *Meshing* body GARED IV

Meshing dalam CFD merupakan proses diskretisasi domain aliran fluida agar persamaan aliran kontinu dapat diselesaikan secara numerik. Pada penelitian ini, proses *meshing* dilakukan menggunakan tipe *mesh polyhedral* yang dipilih karena efisien dan mampu merepresentasikan geometri kompleks dengan baik.

4. Penentuan *solver* dan *boundary condition*

Solver yang digunakan adalah *pressure based* dengan model turbulen *k-omega standart* dengan kondisi aliran *steady-state*. Sedangkan untuk *inlet* berupa *velocity inlet* pada 3 kecepatan (11,11 m/s; 13,89 m/s; dan 16,67 m/s), dan *outlet* menggunakan *pressure-outlet*.

Tahap *Processing*

Setelah selesai melakukan *input*, simulasi dijalankan dengan 500 iterasi dan dipastikan mencapai konvergen.

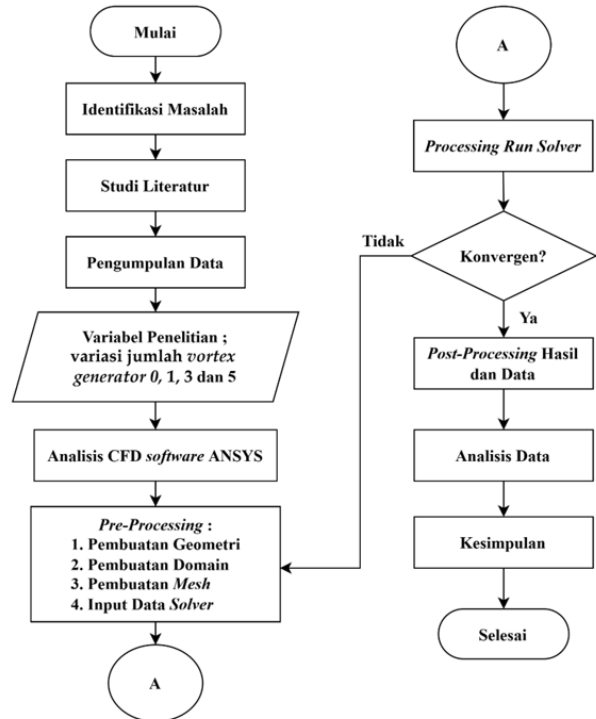
Tahap *Post-Processing*

Tahap *post-processing* dilakukan untuk mengolah dan menganalisis hasil simulasi yang telah mencapai kondisi konvergen dengan nilai *residual* sebesar 10^{-4} .

Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai koefisien *drag* (C_d) serta pola distribusi karakteristik aliran fluida pada *body* kendaraan yang ditinjau melalui *pressure contour* dan *velocity contour*. Nilai-nilai parameter kemudian disajikan dalam bentuk kontur dan grafik.

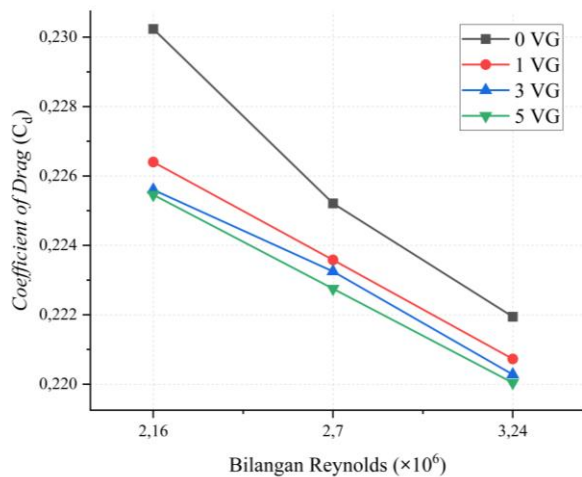
Diagram Alir Penelitian



Gambar 5. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

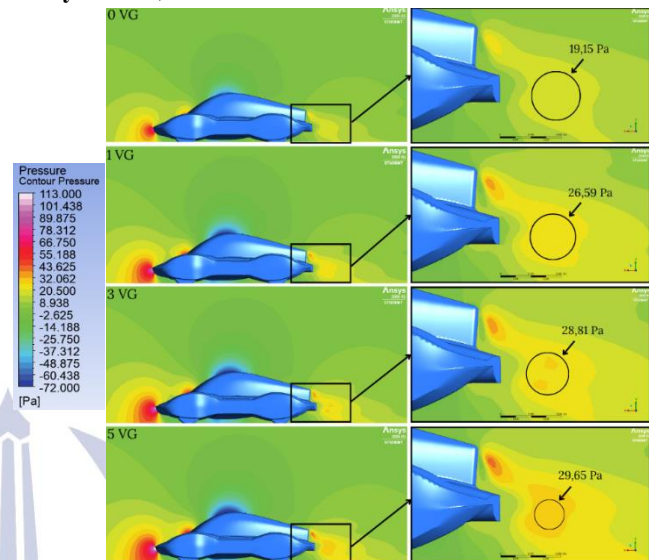
Perbandingan Hasil Analisis Nilai Koefisien Drag



Gambar 6. Grafik perbandingan koefisien drag (C_d) terhadap bilangan Reynolds pada *body* GARED IV model standar (tanpa VG) dan model VG = 1, 3, dan 5

Berdasarkan grafik, nilai koefisien drag (C_d) menurun seiring meningkatnya bilangan Reynolds pada seluruh variasi jumlah VG. Pada setiap bilangan Reynolds, penambahan VG juga menghasilkan nilai (C_d) yang lebih rendah dibandingkan model tanpa VG, dengan penurunan terbesar terjadi saat penambahan 1 VG, sedangkan penambahan dari 1 menjadi 3 dan 5 VG masih menurunkan (C_d) namun dengan kecenderungan yang semakin kecil. Penurunan ini terjadi karena semakin banyak VG menghasilkan lebih banyak *vortex* yang menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, sehingga mampu menunda *flow separation*, memperkecil *wake region*, dan mengurangi *pressure drag*. Sementara itu, peningkatan bilangan Reynolds meningkatkan energi kinetik fluida sehingga *boundary layer* lebih mampu mengatasi *adverse pressure gradient* dan menghasilkan nilai (C_d) yang lebih rendah. Hasil ini sejalan dengan Paul et al. (2020). Variasi VG = 5 pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$ menghasilkan performa terbaik dengan nilai koefisien drag terendah sebesar 0,22.

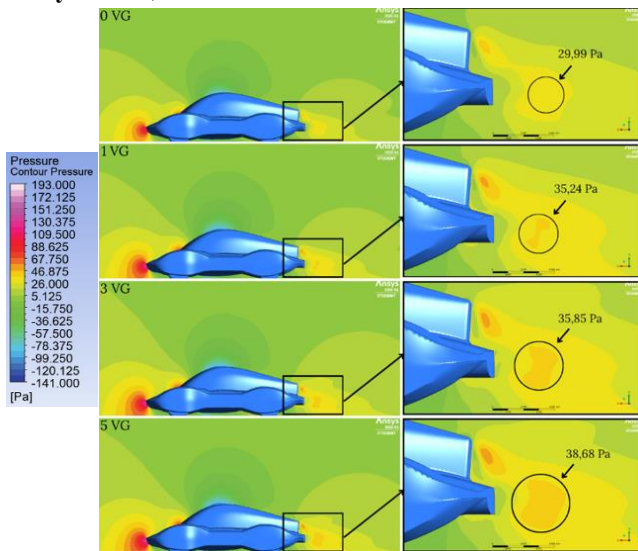
Perbandingan *pressure contour* pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$



Gambar 7. Kontur tekanan pengaruh perbandingan jumlah *vortex generator* *body* GARED IV pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$

Pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$, seluruh model menunjukkan zona tekanan tinggi (*stagnation point*) di bagian depan kendaraan, dengan luas zona yang cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah *vortex generator* (VG) akibat bertambahnya luas frontal efektif. Perbedaan utama terlihat pada daerah *wake*, di mana tekanan meningkat dari 19,15 Pa pada model tanpa VG menjadi 26,59 Pa (VG = 1), 28,81 Pa (VG = 3), dan 29,65 Pa (VG = 5). Peningkatan tekanan *wake* ini menunjukkan bahwa VG mampu membangkitkan *vortex* yang menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, sehingga aliran lebih mampu mengatasi *adverse pressure gradient*, menunda *flow separation*, dan mengurangi selisih tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan yang berakibat pada penurunan *pressure drag*. Hasil ini sejalan dengan penelitian Paul et al. (2020) yang melaporkan bahwa penggunaan VG meningkatkan tekanan statik pada daerah belakang kendaraan dibandingkan model tanpa VG.

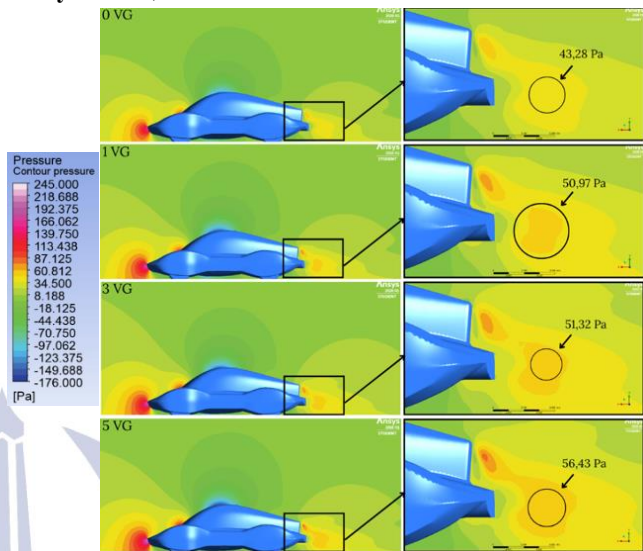
Perbandingan *pressure contour* pada bilangan Reynolds $2,7 \times 10^6$



Gambar 8. Kontur tekanan pengaruh perbandingan jumlah *vortex generator body* GARED IV pada bilangan Reynolds $2,7 \times 10^6$

Pada bilangan Reynolds $2,7 \times 10^6$, seluruh model menunjukkan zona tekanan tinggi (*stagnation point*) di bagian depan kendaraan, dengan luas zona yang cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah *vortex generator* (VG) akibat bertambahnya luas frontal efektif. Perbedaan utama terlihat pada daerah *wake*, di mana tekanan meningkat dari 29,99 Pa pada model tanpa VG menjadi 35,24 Pa (VG = 1), 35,85 Pa (VG = 3), dan 38,68 Pa (VG = 5). Peningkatan tekanan *wake* ini menunjukkan bahwa VG mampu membangkitkan *vortex* yang menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, sehingga aliran lebih mampu mengatasi *adverse pressure gradient*, menunda *flow separation*, dan mengurangi selisih tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan yang berakibat pada penurunan *pressure drag*. Hasil ini sejalan dengan penelitian Paul et al. (2020) yang melaporkan bahwa penggunaan VG meningkatkan tekanan statik pada daerah belakang kendaraan dibandingkan model tanpa VG.

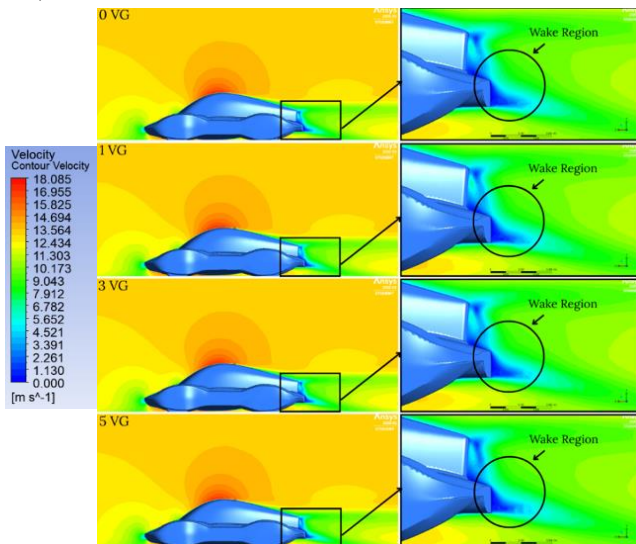
Perbandingan *pressure contour* pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$



Gambar 9. Kontur tekanan pengaruh perbandingan jumlah *vortex generator body* GARED IV pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$

Pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$, seluruh model menunjukkan zona tekanan tinggi (*stagnation point*) di bagian depan kendaraan, dengan luas zona yang cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah *vortex generator* (VG) akibat bertambahnya luas frontal efektif. Perbedaan utama terlihat pada daerah *wake*, di mana tekanan meningkat dari 43,28 Pa pada model tanpa VG menjadi 50,91 Pa (VG = 1), 51,32 Pa (VG = 3), dan 56,43 Pa (VG = 5). Peningkatan tekanan *wake* ini menunjukkan bahwa VG mampu membangkitkan *vortex* yang menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, sehingga aliran lebih mampu mengatasi *adverse pressure gradient*, menunda *flow separation*, dan mengurangi selisih tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan yang berakibat pada penurunan *pressure drag*. Hasil ini sejalan dengan penelitian Paul et al. (2020) yang melaporkan bahwa penggunaan VG meningkatkan tekanan statik pada daerah belakang kendaraan dibandingkan model tanpa VG.

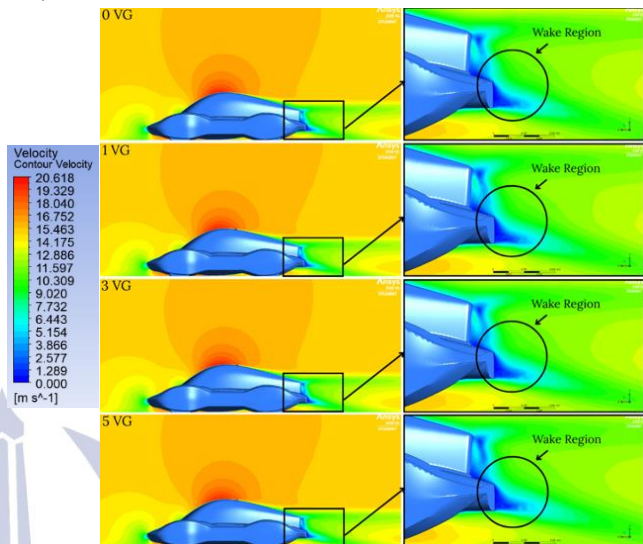
Perbandingan *velocity contour* pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$



Gambar 10. Kontur kecepatan pengaruh perbandingan jumlah *vortex generator body* GARED IV pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$

Pada bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$, seluruh variasi menunjukkan distribusi kecepatan yang relatif seragam pada bagian depan kendaraan karena kondisi *inlet* yang identik. Perbedaan utama terlihat pada daerah *wake* di belakang kendaraan yang ditandai oleh kontur berkecepatan rendah (warna biru). Model tanpa VG menghasilkan *wake region* terbesar, sedangkan penambahan VG menyebabkan ukuran *wake region* semakin mengecil secara bertahap dari VG = 1, VG = 3, hingga VG = 5. Kondisi ini menunjukkan bahwa *vortex* yang dihasilkan VG mampu menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, meningkatkan momentum aliran di dekat permukaan bodi, menunda *flow separation*, dan mempersempit daerah *wake*. Akibatnya, selisih tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan berkurang sehingga *pressure drag* menurun. Variasi VG = 5 menghasilkan *wake region* paling kecil, yang mengindikasikan performa aerodinamika terbaik dibandingkan variasi lainnya. Hasil ini sejalan dengan penelitian Chidambaram et al. (2023) yang melaporkan bahwa penggunaan VG mampu memperkecil zona kecepatan rendah di belakang kendaraan dan mengurangi hambatan aerodinamis secara keseluruhan.

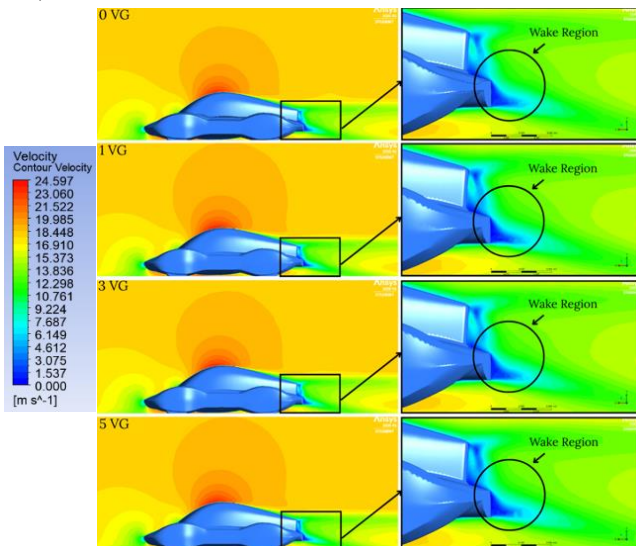
Perbandingan *velocity contour* pada bilangan Reynolds $2,7 \times 10^6$



Gambar 11. Kontur kecepatan pengaruh perbandingan jumlah *vortex generator body* GARED IV pada bilangan Reynolds $2,7 \times 10^6$

Pada bilangan Reynolds $2,7 \times 10^6$, seluruh variasi menunjukkan distribusi kecepatan yang relatif seragam pada bagian depan kendaraan karena kondisi *inlet* yang identik. Perbedaan utama terlihat pada daerah *wake* di belakang kendaraan yang ditandai oleh kontur berkecepatan rendah (warna biru). Model tanpa VG menghasilkan *wake region* terbesar, sedangkan penambahan VG menyebabkan ukuran *wake region* semakin mengecil secara bertahap dari VG = 1, VG = 3, hingga VG = 5. Kondisi ini menunjukkan bahwa *vortex* yang dihasilkan VG mampu menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, meningkatkan momentum aliran di dekat permukaan bodi, menunda *flow separation*, dan mempersempit daerah *wake*. Akibatnya, selisih tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan berkurang sehingga *pressure drag* menurun. Variasi VG = 5 menghasilkan *wake region* paling kecil, yang mengindikasikan performa aerodinamika terbaik dibandingkan variasi lainnya. Hasil ini sejalan dengan penelitian Chidambaram et al. (2023) yang melaporkan bahwa penggunaan VG mampu memperkecil zona kecepatan rendah di belakang kendaraan dan mengurangi hambatan aerodinamis secara keseluruhan.

Perbandingan *velocity contour* pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$



Gambar 12. Kontur kecepatan pengaruh perbandingan jumlah *vortex generator body* GARED IV pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$

Pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$, seluruh variasi menunjukkan distribusi kecepatan yang relatif seragam pada bagian depan kendaraan karena kondisi *inlet* yang identik. Perbedaan utama terlihat pada daerah *wake* di belakang kendaraan yang ditandai oleh kontur berkecepatan rendah (warna biru). Model tanpa VG menghasilkan *wake region* terbesar, sedangkan penambahan VG menyebabkan ukuran *wake region* semakin mengecil secara bertahap dari VG = 1, VG = 3, hingga VG = 5. Kondisi ini menunjukkan bahwa *vortex* yang dihasilkan VG mampu menginjeksikan energi ke dalam *boundary layer*, meningkatkan momentum aliran di dekat permukaan bodi, menunda *flow separation*, dan mempersempit daerah *wake*. Akibatnya, selisih tekanan antara bagian depan dan belakang kendaraan berkurang sehingga *pressure drag* menurun. Variasi VG = 5 menghasilkan *wake region* paling kecil, yang mengindikasikan performa aerodinamika terbaik dibandingkan variasi lainnya. Hasil ini sejalan dengan penelitian Chidambaram et al. (2023) yang melaporkan bahwa penggunaan VG mampu memperkecil zona kecepatan rendah di belakang kendaraan dan mengurangi hambatan aerodinamis secara keseluruhan.

Simpulan

1. Berdasarkan hasil simulasi, penambahan jumlah VG cenderung menurunkan nilai koefisien *drag* dibandingkan model standar (tanpa VG). Pada 3 variasi bilangan Reynolds ($2,16 \times 10^6$; $2,7 \times 10^6$; dan $3,24 \times 10^6$), model dengan VG = 5 konsisten menghasilkan koefisien *drag* terendah di antara semua

variasi jumlah VG, dengan nilai terbaik sebesar 0,22 pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$.

2. Hasil analisis perbandingan pola distribusi karakteristik aliran fluida (*pressure contour* dan *velocity contour*) pada model uji kendaraan GARED IV antara model standar dengan model yang menggunakan variasi jumlah VG = 1, 3, dan 5 dengan bilangan Reynolds $2,16 \times 10^6$; $2,7 \times 10^6$; $3,24 \times 10^6$ berdasarkan hasil simulasi CFD pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Berdasarkan hasil simulasi, penambahan jumlah VG cenderung meningkatkan tekanan statis di zona *wake* belakang kendaraan dibandingkan model standar. Pada 3 variasi bilangan Reynolds ($2,16 \times 10^6$; $2,7 \times 10^6$; dan $3,24 \times 10^6$), model dengan VG = 5 konsisten menghasilkan tekanan *wake* tertinggi di antara semua variasi, dengan nilai terbaik sebesar 56,43 Pa pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$.
- b. Berdasarkan hasil simulasi, penambahan jumlah VG cenderung memperkecil ukuran *wake region* (zona kecepatan rendah di belakang kendaraan) secara progresif dibandingkan model standar. Pada 3 variasi bilangan Reynolds ($2,16 \times 10^6$; $2,7 \times 10^6$; dan $3,24 \times 10^6$), model dengan VG = 5 konsisten menghasilkan *wake region* terkecil di antara semua variasi, dengan ukuran *wake region* paling sempit diperoleh pada bilangan Reynolds $3,24 \times 10^6$.

Saran

1. Berdasarkan tren penurunan koefisien *drag* (C_d) yang masih berlanjut hingga lima buah *vortex generator*, penelitian selanjutnya disarankan mengkaji variasi jumlah yang lebih banyak untuk memperoleh konfigurasi optimal.
2. Untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi, penelitian selanjutnya disarankan menerapkan kriteria konvergensi residual yang lebih ketat daripada 10^{-4} , yaitu hingga mencapai 10^{-6} , guna mengurangi pengaruh kesalahan iterasi terhadap hasil simulasi.
3. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan lisensi penuh ANSYS agar tidak terkendala batas jumlah elemen *mesh*, sehingga kualitas *mesh* pada seluruh VG menghasilkan visualisasi aliran yang lebih seragam, konsisten, dan representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Saadi, A., Al-Farhany, K., Faisal, A. E., Alomari, M. A., Jamshed, W., Eid, M. R., Tag El Din, E. S. M., & Amjad, A. (2022). Improvement of the aerodynamic behaviour of the passenger car by using a combine of ditch and base bleed. *Scientific Reports*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23183-z>
- Chidambaram, R. K., Kanna, R., Gopal, P., & Arumugam, S. K. (2023). Experimental and numerical analysis of vortex generators designed for utility vehicles. *Archives of Thermodynamics*, 44(3), 217–240. <https://doi.org/10.24425/ather.2023.147545>
- Ismail, M. P., Ishak, I. A., Samiran, N. A., Mohammad, A. F., Salleh, Z. M., & Darlis, N. (2022). CFD Analysis on the Effect of Vortex Generator on Sedan Car using ANSYS Software. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(1), 73–83. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.01.008>
- Paul, D. R., Al-Faruk, A., & Karua, P. (2020). A Numerical Study on the Drag Reduction of Sedan Car using Vortex Generator. *March 2022*. <https://www.researchgate.net/publication/352226270>
- Sari, E. G., & Sofwan, M. (2021). Carbon Dioxide (CO₂) Emissions Due to Motor Vehicle Movements in Pekanbaru City, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 6(4), 234–242. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2021.6.4.7692>

