

## **Simulasi Numerik Penempatan *Shark Fin Vorteeex Generator* dengan Susunan *Straggered* pada Dinding Kiri dan Kanan Bus Penumpang**

**Tiara Pradina Putri<sup>1</sup>, Wawan Aries Widodo<sup>2</sup>**

Institut Teknologi Sepuluh November<sup>1,2</sup>

tiarapradina06@gmail.com<sup>1</sup>, wawanaries71@gmail.com<sup>2</sup>

### **ABSTRACT**

*In this study, evaluating the effects of the use of vortex's shark fin generator (SFVG) on passenger buses' aerodynamics used numerical analysis. Studies show that buses with SFVGS show a slightly lower maximum rate (896.94 m/s) than buses with no SFVG (933.61 c.e. /s), indicating that SFVG does not have an effect on increased air speed. The coefficient analysis of drag (CD) shows a significant decline on buses with SFVG (CD averages about 0.6165738) compared to buses without SFVGS (CD around 0.72478044), signifying a reduction in drag style. Although SFVG increases the elevator coeffluent (cl) on a bus (cl approximately 0.018557634), this increase is small and affects the stability of vehicles. The pressure on the front of the bus with SFVG (204.13 pa) is slightly lower than a busload (209.16 pa), with a potential effect on the lift and stability of the entire bus. Studies highlight the need for further optimization to achieve the balance between the aerodynamic efficiency and the stability of vehicles, and the need for advanced research to understand the overall effect of the SFVG on the energy efficiency and aerodynamic performance of buses.*

**Keywords:** *Shark Fin Vortex Generator (SFVG), Passenger Bus Aerodynamics, Drag Coefficient (CD), Lift Coefficient (CL)*

### **ABSTRAK**

Dalam penelitian ini, mengevaluasi pengaruh penggunaan Shark Fin Vortex Generator (SFVG) pada aerodinamika bus penumpang menggunakan analisis numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bus dengan SFVG menunjukkan kecepatan maksimal yang sedikit lebih rendah (896.94 m/s) dibandingkan bus tanpa SFVG (933.61 m/s), menunjukkan bahwa SFVG tidak berpengaruh pada peningkatan kecepatan udara. Analisis koefisien drag (CD) menunjukkan penurunan yang signifikan pada bus dengan SFVG (CD rata-rata sekitar 0.6165738) dibandingkan bus tanpa SFVG (CD sekitar 0.72478044), menandakan pengurangan gaya hambat. Meskipun SFVG meningkatkan koefisien lift (CL) pada bus (CL sekitar 0.018557634), peningkatan ini kecil dan mempengaruhi stabilitas kendaraan. Tekanan pada bagian depan bus dengan SFVG (204.13 Pa) sedikit lebih rendah dibandingkan bus tanpa SFVG (209.16 Pa), dengan potensi efek pada gaya angkat dan stabilitas keseluruhan bus. Studi menyoroti perlunya optimalisasi lebih lanjut untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi aerodinamis dan stabilitas kendaraan, serta perlunya penelitian lanjutan untuk memahami dampak keseluruhan SFVG terhadap efisiensi energi dan kinerja aerodinamis bus.

**Kata Kunci:** *Shark Fin Vortex Generator (SFVG), Aerodinamika Bus Penumpang, Koefisien Drag (CD), Koefisien Lift (CL)*

**PENDAHULUAN**

Ilmu pengetahuan dan teknologi berkembang dengan sangat cepat, memperluas pemahaman kita tentang dunia dan memacu inovasi dalam pengembangan instrumen yang semakin berguna bagi masyarakat. Dalam hal ini, kesejahteraan sosial dan kemajuan ekonomi yang lebih besar sangat terbantu oleh infrastruktur transportasi. Khususnya di Indonesia, transportasi darat, termasuk transportasi bus, memiliki fungsi utama dalam meningkatkan kohesi sosial dan menstimulasi perekonomian Nasional. Kebutuhan akan sistem transportasi yang dapat diandalkan dan efektif semakin meningkat karena pertumbuhan populasi dan ekspansi ekonomi yang cepat. Hal ini mendorong munculnya ide-ide baru dan peningkatan kualitas layanan transportasi.

**Tabel 1.** Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Dirinci Menurut Jenisnya Tahun 2019-2024 (unit)

Jenis Kendaraan	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Pertumbuhan per Tahun (%)
Mobil Penumpang	15.592.419	15.797.746	16.413.348	17.168.862	19.177.264	19.906.353	6,3
Mobil Bus	231.569	233.261	237.566	243.450	213.788	269.476	3,86
Mobil Barang	5.021.888	5.083.405	5.299.361	5.544.173	6.246.789	6.120.307	5,07
Sepeda Motor	112.771	115.023	120.046	125.300	127.976	134.181	4,44
Jumlah /Total	133.617.012	136.137.451	141.992.573	148.261.817	153.614.180	160.477.743	19,67

Sumber: (Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2021), (Kompas, 2024), (OTODRIVER.com, 2024)

Meskipun perjalanan dengan bus sangat penting untuk memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat, peningkatan efisiensi bahan bakar masih menjadi tantangan yang signifikan. Berdasarkan data yang diperoleh dari (Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2021) pertumbuhan jumlah bus mencapai 3,86% per tahun. Dapat dilihat dari tabel di atas, jumlah bus pada tahun 2024 mencapai 269,476 unit mobil bus. Peningkatan jumlah armada bus ini tentunya memerlukan perhatian lebih terhadap upaya peningkatan efisiensi bahan bakar. Inovasi teknologi, seperti penggunaan bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan dan pengembangan mesin dengan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien, menjadi kunci utama dalam menghadapi tantangan ini. Selain itu, kebijakan pemerintah yang mendukung

pengembangan transportasi berkelanjutan juga sangat diperlukan untuk memastikan bahwa pertumbuhan jumlah bus ini tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan.

Dengan demikian, mengingat masalah yang semakin rumit yang terkait dengan pengembangan teknologi aerodinamis atau modifikasi pada kendaraan umum, seperti bus penumpang, menjadi semakin penting. Penelitian dan pengembangan masih terus menyelidiki berbagai alternatif dan inovasi yang dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja aerodinamis pada bus penumpang, dalam upaya menciptakan transportasi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu solusi yang dianggap menjanjikan adalah dengan melakukan inovasi teknologi seperti *Shark Fin Vortex generator* (SFVG) (Arum, dkk., 2023).

SFVG adalah bagian aerodinamika pasif yang dapat dipasang di permukaan kendaraan untuk mengoptimalkan aliran udara di sekitar kendaraan dan mengurangi turbulensi. Penempatan SFVG dengan susunan *staggered* atau *zigzag* pada dinding kiri dan kanan bus penumpang menjadi topik penelitian yang menarik, karena dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja aerodinamika kendaraan. Dengan mempertimbangkan tantangan dan peluang dalam transportasi umum di Indonesia, serta kebutuhan akan inovasi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja bus penumpang, studi pemodelan numerik tentang penempatan SFVG dengan susunan *staggered* atau *zigzag* pada dinding bus penumpang menjadi relevan dan berpotensi memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan (Zulkefli, dll., 2019).

Studi numerik penambahan diffuser pada bus. Variasi sudut diffuser  $0^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $12^\circ$  dan  $18^\circ$  dipilih sebagai variabel penelitian. Persamaan RANS 3D-steady diselesaikan dengan kombinasi model turbulensi k-epsilon. Algoritma SIMPLE digunakan pada pressure velocity 2 coupling. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien drag dapat turun sekitar 2.3% dan downforce meningkat begitu besar, khususnya pada sudut diffuser  $12^\circ$  (Widodo, dkk., 2016).

## **TINJAUAN LITERATUR**

### **Dasar Teori SFVG**

Vortex Generator (VG) adalah komponen kecil berbentuk *fin* (sirip) ditempatkan di sayap dan permukaan stabilizer untuk memodifikasi aliran udara di sekitar permukaan yang mempengaruhi *boundary layer* (lapisan batas). Pemasangan VG dapat meningkatkan *performance*, terutama pada saat kecepatan rendah (Chai, dkk., 2018). VG berbeda dalam geometri, dimensi, dan integrasi pada permukaan penukar panas, menghasilkan dua kategori utama vortex yang dihasilkan: transversal dan longitudinal. Umumnya, vorteks longitudinal lebih efektif daripada vorteks transversal dalam meningkatkan transfer panas dengan peningkatan tekanan yang kecil saja. Parameter geometri VG, seperti sudut serang ( $\alpha$ ) dan rasio aspek ( $\Lambda$ ), dapat

mempunyai pengaruh signifikan terhadap panasnya kemampuan transfer, dan dengan demikian mendapat perhatian penelitian yang meningkat.

VG (Generator Vortex) umumnya digunakan pada permukaan fin yang diperluas untuk meningkatkan lebih lanjut laju transfer panas, yang meningkatkan transfer panas dengan berinteraksi dan mengganggu lapisan batas termal antara permukaan penukar panas dan fluida sekunder yang mengalir melintasi permukaan tersebut.

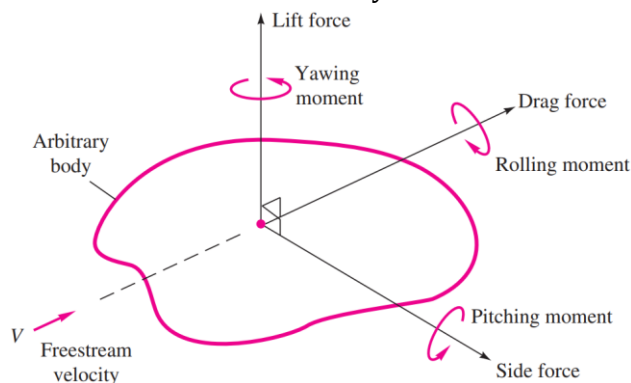
Dengan mempertimbangkan tantangan dan peluang dalam transportasi umum di Indonesia, serta kebutuhan akan inovasi untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja bus penumpang, studi pemodelan numerik tentang penempatan SFVG dengan susunan *staggered* pada dinding bus penumpang menjadi relevan dan berpotensi memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan. Penambahan perangkat aerodinamis seperti 2 Vortex Generator & Lateral Device pada kasus G7 mampu mengurangi drag pada model bus sebesar 8,63% (Romadhon, dkk., 2019)

Untuk memudahkan analisis, model bus disederhanakan. Simulasi numerik dilakukan pada kecepatan 25 m/s, dengan bilangan Reynolds sebesar  $5,57 \times 10^6$ , dan aliran diasumsikan sebagai aliran incompressible. Model RANS yang digunakan adalah 3D- Steady State RANS Equation dengan kombinasi RKE (Realizable  $k-\epsilon$ ) dan Algoritma SIMPLE untuk kopling tekanan- kecepatan. Simulasi dilakukan untuk memperoleh data kuantitatif berupa koefisien tekanan (CP), koefisien lift (CL), dan koefisien drag (CD), serta data kualitatif berupa jalur kecepatan (velocity pathline) dan vektor kecepatan (velocity vector). Menurut (Cao et al., 2021) menunjukkan bahwa dengan penambahan vortex generator, daerah separasi tiga dimensi yang terjadi di dekat endwall dapat dikurangi. Hal ini menghasilkan peningkatan koefisien lift (CL) pada airfoil.

### Fenomena Aerodinamik pada Kendaraan

Semua bentuk *body* yang melewati aliran fluida akan mengalami gaya dan momen dari aliran tersebut. Gambar 1 menunjukkan *body* dengan bentuk dan orientasi seperti pada di gambar, aliran yang melewati *body* tersebut akan berusaha untuk melawan gaya dan momen dari ketiga koordinat *axis* (Zein, dkk., 2024).

**Gambar 1.** Ilustrasi Gaya dan Momen



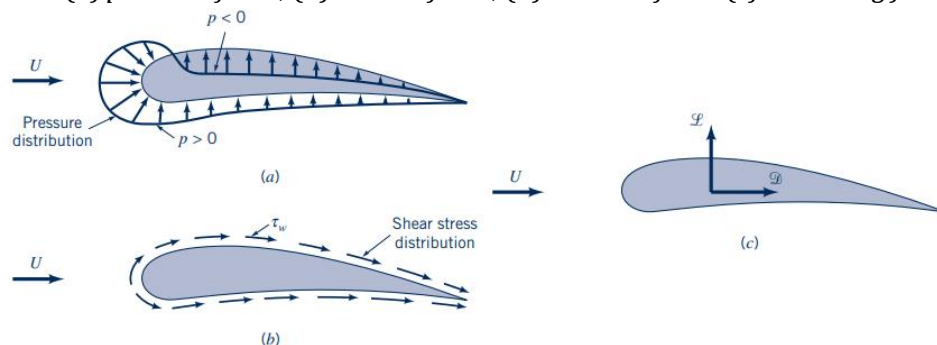
Gambar 1. Ilustrasi Gaya dan Momen yang terjadi ketika suatu Body melewati Aliran Uniform (White, 2009). Gaya pertama yang bekerja pada *body* di sumbu *freestream velocity* ( $V$ ) disebut sebagai *drag*, dan momen yang terjadi pada sumbu ini disebut *rolling moment*. *Drag* merupakan *flow loss* yang harus ditanggulangi agar *body* dapat bergerak melawan aliran. Gaya yang kedua disebut sebagai *lift force* yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu *freestream velocity* ( $V$ ), dan momen yang bekerja pada sumbu tersebut disebut sebagai *yawing moment*. Ketika *body* memiliki bentuk simetris terhadap sumbu *drag-lift* seperti pada pesawat terbang, kapal, dan kendaraan maka gambar di atas dapat disederhanakan menjadi penyelesaian dua dimensi: dua gaya, yaitu *drag* dan *lift*, serta satu momen, yaitu *pitch*.

*Aerodynamic Drag* yang bekerja pada kendaraan merupakan salah satu contoh bentuk penanggulangan dengan menambahkan komponen untuk mengurangi gaya drag. Tenaga yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan harus dapat melawan *rolling resistance* dan *aerodynamic drag* yang terjadi pada kendaraan tersebut. Untuk kecepatan  $\pm 42$  km/jam, *aerodynamic drag* menjadi salah satu penghambat utama dari *net propulsive force* yang dibutuhkan. Kontribusi dari gaya drag akibat beberapa bagian-bagian dari kendaraan (i.e., *front end*, *windshield*, atap kendaraan, *rear end*, *windshield peak*, atap kendaraan belakang, dan *cowl*) juga sudah banyak disimulasikan dalam bentuk model maupun dalam bentuk *full size*, sehingga *aerodynamic drag* dari suatu kendaraan dapat diperkirakan (Garcio, dkk., 2023).

### Drag dan Lift

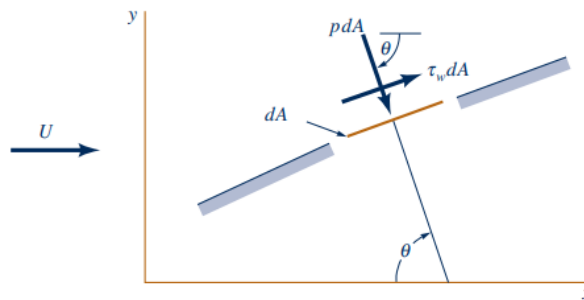
Ketika sebuah *body* melewati suatu aliran fluida, maka akan terjadi interaksi antara permukaan *body* dengan fluidanya, interaksi ini merupakan gaya pada *fluid-body interface*. Gaya ini dapat dijelaskan dalam bentuk *stresses* yaitu tegangan geser dinding (*wall shear stress*) pada suatu *body* akibat efek viskositas, dan tegangan normal akibat tekanan ( $p$ ). Distribusi dari tegangan geser dinding dan tegangan normal dapat dilihat di Gambar 2.5(a) dan (b). Resultan gaya yang bekerja searah dengan *upstream velocity* ( $U$ ) disebut sebagai *drag*, sementara resultan gaya yang bekerja ke arah normal terhadap sumbu *upstream velocity* ( $U$ ) disebut sebagai *lift* (Garcio, dkk., 2023).

**Gambar 2.** Gaya yang bekerja pada objek dua dimensi yang melewati suatu aliran fluida (a) *pressure force*, (b) *viscous force*, (b) *resultant force* (*lift* dan *drag*)



Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan pada Gambar 2.5 (a) dan (b) dapat diperoleh dengan mengintegrasikan efek dari dua kuantitas terhadap permukaan *body* seperti Gambar 2.6 di bawah.

**Gambar 3.** Pressure Force dan Shear Force pada Elemen Kecil dari Permukaan Suatu Body



Gaya fluida yang bekerja yang bekerja ke arah x dan y pada elemen area kecil  $dA$  adalah sebagai berikut

$$dF_x = (p \, dA) \cos \theta + (\tau_w \, dA) \sin \theta \quad (2.4)$$

dan,

$$dF_y = -(p \, dA) \sin \theta + (\tau_w \, dA) \cos \theta \quad (2.5)$$

Sehingga untuk mendapatkan resultan gaya komponen sumbu x dan y adalah sebagai berikut

$$\mathcal{D} = \int dF_x = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (2.6)$$

dan,

$$\mathcal{L} = \int dF_y = - \int p \sin \theta \, dA + \int \tau_w \cos \theta \, dA \quad (2.7)$$

Untuk menyelesaikan integrasi di atas dan mendapatkan nilai *drag* dan *lift* dari suatu *body*, maka kita harus memiliki bentuk *body*-nya (i.e.  $\theta$  dalam fungsi lokasi di sepanjang *body*) dan distribusi dari  $\tau_w$  dan  $p$  sepanjang permukaan. Namun dalam praktiknya, distribusi tegangan geser dan tekanan di sepanjang permukaan sulit untuk didapatkan secara eksperimen maupun teoritis.

Tanpa informasi detail tentang distribusi tegangan geser dan tekanan dari suatu *body* persamaan (2.6) dan (2.7) tidak dapat digunakan. Terdapat alternatif yang banyak digunakan yaitu dengan mendapatkan nilai koefisien dari *drag* dan *lift* untuk mendapatkan nilai dari *drag* dan *lift*nya menggunakan analisis yang sudah disimplifikasi, studi numerik, atau studi eksperimen. Koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) didefinisikan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{\mathcal{D}}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (2.5)$$

dan,

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \tag{2.6}$$

Di mana  $A$  adalah luas karakteristik dari suatu objek, biasanya luas area frontal yang merupakan luas proyeksi area depan ketika dilihat dari arah masuk *upstream velocity* ( $U$ ).

### Bus Staggered

Bus *staggered* dibuat untuk menguji apakah penggunaan *vortex generator* pada dinding kiri dan kanan bus penumpang dapat menghasilkan pola aliran udara yang lebih terorganisir dan stabil daripada kondisi tanpa *vortex generator*. Visualisasi aliran udara akan digunakan untuk menunjukkan peningkatan arus udara yang mengikuti kontur bus secara lebih efisien dengan *vortex generator*. *Vortex generators* menghasilkan vorteks longitudinal yang memutar aliran utama dan meningkatkan pencampuran di daerah hilir. Selain itu, *vortex generator* menentukan pola aliran sekunder. Dengan demikian, peningkatan transfer panas terkait dengan aliran sekunder dengan penalti penurunan tekanan yang relatif rendah (Gorji-Bandpy, dkk., 2008).

## METODE PENELITIAN

### Diagram Alur Penelitian

Gambar 4. Diagram Alir Penelitian



Penulis melakukan studi literatur dengan tujuan untuk melakukan perkembangan terbaru dalam desain aerodinamis kendaraan, termasuk penggunaan teknologi baru seperti aktuator, kontrol aktif aliran udara, atau desain aerodinamis serta untuk mendapatkan informasi terkait fenomena aerodinamika yang terjadi ketika suatu aliran melewati *body* kendaraan, metode yang digunakan untuk mengurangi gaya drag, termasuk penggunaan spoiler, deflector, diffuser, dan profil aerodinamik lainnya. Ini mencakup analisis tentang bagaimana perangkat-perangkat ini memanipulasi aliran udara untuk mengurangi tekanan drag di belakang kendaraan, dan serta mendapatkan informasi tentang koefisien drag (Cd) dan lift (Cl) dari berbagai jenis kendaraan dan konfigurasi aerodinamis. Ini membantu dalam mengevaluasi efektivitas desain aerodinamis dalam mengurangi gaya drag dan meningkatkan stabilitas kendaraan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Kontur Kecepatan Bus Dengan Vorteks Generator Staggered**

Kontur kecepatan pada model bus dan pada *vorteks generator*, aliran masuk melalui *inlet* dengan kecepatan konstan, dalam gambar 4.2 dan 4.3 variasi kecepatannya yaitu 12.92 m/s atau 60,12 km/jam, lalu melewati *body* dari bus, terlihat peningkatan kecepatan ketika aliran melewati *body* dari bus, pada bagian *windshield* atas dan bagian bawah bus. Aliran lalu melewati sekitar bus dan mengalami separasi aliran lalu membentuk area *wake* di bagian belakang bus, dapat dilihat pada gambar 4.2 pada model bus area *wake* yang terjadi di belakang bus lebih besar. Area *wake* yang besar ini mengindikasikan bahwa gaya hambat yang diterima oleh model bus lebih besar. Pada kontur kecepatan di sekitar *vorteks generator* kecepatan udara setelah melewati *vorteks generator* menurun menjadi 13 m/s. Ini menciptakan efek dispersi udara, yang membantu mengurangi gesekan udara yang dapat menghambat gerakan bus. *Vorteks generator* juga berfungsi untuk meningkatkan stabilitas bus selama perjalanan.

Pada kontur kecepatan pada model bus dan pada *vorteks generator*, aliran masuk melalui *inlet* dengan kecepatan konstan, dalam gambar diatas merupakan variasi kecepatannya yaitu 90 km/h, lalu melewati *body* dari bus, terlihat peningkatan kecepatan ketika aliran melewati *body* dari bus, pada bagian *windshield* atas dan bagian bawah bus, dengan kecepatan tertinggi pada 64.37 m/s. Aliran lalu melewati sekitar bus dan mengalami separasi aliran lalu membentuk area *wake* di bagian belakang bus, dapat dilihat pada gambar 4.6 pada model bus area *wake* yang terjadi di belakang bus lebih besar. Area *wake* yang besar ini mengindikasikan bahwa gaya hambat yang diterima oleh model bus lebih besar. Pada kontur kecepatan di sekitar *vorteks generator* yang dapat dilihat pada gambar 4.7, terlihat bahwa kecepatan udara setelah melewati *vorteks generator* menurun menjadi 12.87 m/s. Ini menciptakan efek dispersi udara, yang membantu mengurangi gesekan udara yang dapat menghambat gerakan bus. *Vorteks generator* juga berfungsi untuk meningkatkan stabilitas bus selama perjalanan.

### Kontur Tekanan Bus Tanpa Vorteks Generator

Pada grafik koefisien angkat yang dihasilkan dari simulasi bus tanpa variasi *vorteks generator staggered*, terlihat adanya fluktuasi awal yang kemudian mereda dan akhirnya menjadi stabil. Grafik ini menunjukkan bagaimana koefisien angkat ( $C_L$ ) berubah seiring waktu dalam simulasi. Pada awalnya, terdapat fluktuasi signifikan dalam nilai koefisien angkat. Fluktuasi awal ini kemungkinan disebabkan oleh ketidakstabilan aliran udara di sekitar bus ketika vorteks generator tidak diterapkan, terutama pada kecepatan rendah. Ketidakstabilan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk interaksi aliran udara dengan bentuk geometris bus dan perubahan dalam pola aliran yang belum mencapai keseimbangan.

Setelah periode awal yang tidak stabil, grafik menunjukkan penurunan fluktuasi dan akhirnya mencapai keadaan stabil. Stabilisasi ini mencerminkan adaptasi aliran udara di sekitar bus, di mana pola aliran mulai menyesuaikan diri dengan bentuk bus dan mengurangi turbulensi yang awalnya ada. Stabilitas ini menunjukkan bahwa gaya angkat yang dihasilkan menjadi lebih konsisten, yang berarti bus dapat mempertahankan kestabilan aerodinamisnya pada kecepatan yang lebih tinggi. Fluktuasi awal di koefisien angkat juga bisa disebabkan oleh transisi aliran dari laminar ke turbulen di sekitar permukaan bus. Seiring waktu, aliran turbulen menjadi lebih terorganisir, yang mengurangi fluktuasi dalam gaya angkat yang dihasilkan.

Pada tahap stabil, koefisien angkat mencapai nilai rata-rata yang lebih konsisten, mencerminkan bahwa aliran udara telah mencapai kondisi tunak (*steady state*). Nilai rata-rata koefisien angkat pada grafik ini, yang juga dapat dilihat pada Gambar 4. adalah sekitar 0.071964458.

### Perbandingan Tekanan Bus *Vorteks Generator Staggered* dan Bus Tanpa *Vorteks Generator*

**Tabel 2.** Tabel Perbandingan Tekanan Bus *Vorteks Generator Staggered* dan Bus Tanpa *Vorteks Generator*

Model	Variasi kecepatan (km/h)	Tekanan Maksimal (Pa)
Bus <i>Vorteks Generator Staggered</i>	60,12	204.13
	90	48.37
	120	886.94
Bus Tanpa <i>Vorteks Generator</i>	60,12	209.16
	90	465.17
	120	824.67

Dari tabel 2 diperoleh perbandingan tekanan pada kecepatan rendah, bus dengan *vortex generator staggered* memiliki tekanan maksimal yang sedikit lebih rendah yaitu 204.13 Pa dibandingkan bus tanpa vortex generator sekitar 209.16 Pa. Perbedaan ini menunjukkan bahwa vortex generator dapat menyebabkan sedikit

peningkatan tekanan pada kecepatan rendah. Perbandingan Tekanan pada Kecepatan Menengah (90 km/h), bus dengan *vortex generator staggered* mencapai tekanan maksimal 48.37 Pa, sedikit lebih rendah daripada bus tanpa *vortex generator* yang mencapai 465.17 Pa. Ini menunjukkan bahwa bus tanpa *vortex generator* memiliki pengaruh yang lebih signifikan dalam meningkatkan tekanan maksimal pada kecepatan menengah. Perbandingan Tekanan pada Kecepatan Tinggi (120 km/h), tekanan maksimal yang dicapai oleh bus dengan *vortex generator staggered* adalah 886.94 Pa, lebih tinggi daripada bus tanpa *vortex generator* yang mencapai 824.67 Pa. Ini menunjukkan bahwa pada kecepatan tinggi, perbedaan tekanan maksimal antara kedua model bus menjadi sangat kecil, menunjukkan bahwa *vortex generator* tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada tekanan maksimal pada kecepatan ini.

*Vortex generator staggered* sedikit meningkatkan tekanan maksimal pada kecepatan rendah dan menengah. Peningkatan tekanan ini bisa mengindikasikan bahwa *vortex generator* membantu mengatur aliran udara lebih baik, mengurangi turbulensi, dan mengarahkan aliran udara lebih efektif. Pada kecepatan tinggi, perbedaan tekanan antara kedua model bus hampir tidak ada, menunjukkan bahwa pada kecepatan ini, efek *vortex generator staggered* pada tekanan maksimal tidak signifikan. Hal ini mungkin disebabkan oleh dominasi efek aerodinamis lain pada kecepatan tinggi yang mengurangi pengaruh *vortex generator*.

Dari tabel tersebut menunjukkan bahwa *vortex generator staggered* lebih efektif pada kecepatan rendah hingga menengah dalam hal memodifikasi tekanan maksimal di sekitar bus. Untuk kecepatan tinggi, desain *vortex generator* mungkin perlu dioptimalkan lebih lanjut untuk memberikan manfaat aerodinamis yang lebih nyata.

## KESIMPULAN

Kesimpulan dari analisis dengan kondisi batas yang telah ditetapkan menyajikan gambaran yang komprehensif tentang berbagai aspek yang memengaruhi aerodinamika bus dengan *vorteks generator variasi staggered* dan bus tanpa *vorteks generator*.

Untuk nilai efisiensi bahan bakar bus, dapat kita lihat pada tabel di atas ini dengan asumsi bus berjalan selama 8 jam/hari.

**Tabel 3.** Perbandingan Antara Bus SFVG dengan Bus Tanpa SFVG

MODEL BUS	Kecepatan (m/s)	$C_D$	$C_L$	Tekanan (Pa)
Bus SFVG	32.57	0.6165738	0.018557634	204.13
Bus Tanpa SFVG	33.61	0.72478044	0.071964458	209.16

### 1. Kecepatan pada bus

Bus dengan SFVG menunjukkan nilai kecepatan maksimal yang lebih rendah yaitu 32.57 m/s dibandingkan dengan bus tanpa SFVG yaitu 33.61 m/s. Hal ini menandakan

bahwa penggunaan SFVG tidak memiliki pengaruh pada peningkatan kecepatan udara.

## 2. Koefisien *Drag* ( $C_D$ )

Analisis koefisien *drag* ( $C_D$ ) menunjukkan bahwa perbandingan antara bus dengan perangkat *vortex generator* (SFVG) dan bus tanpa perangkat tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Bus tanpa SFVG mencatat nilai  $C_D$  sebesar 0.72478044, sedangkan bus dengan SFVG memiliki nilai rata-rata sekitar 0.6165738. Meskipun perbedaannya kecil, ini menandakan bahwa SFVG sedikit mengurangi gaya hambat (*drag*) yang diterima oleh bus dengan mengoptimalkan aliran udara dan mengurangi turbulensi.

## 3. Koefisien *Lift* ( $C_L$ )

Nilai koefisien *lift* ( $C_L$ ) bus dengan perangkat *vortex generator* (SFVG) adalah sekitar 0.018557634, lebih tinggi dibandingkan bus tanpa SFVG yang memiliki nilai  $C_L$  sekitar 0.071964458. Ini menunjukkan bahwa SFVG meningkatkan gaya angkat. Meskipun peningkatannya kecil, gaya angkat yang lebih besar dapat mempengaruhi stabilitas kendaraan, mengurangi tekanan roda pada jalan dan mengurangi traksi, terutama pada kecepatan tinggi atau kondisi angin kencang. Analisis dan pengujian tambahan diperlukan untuk mengevaluasi dampak keseluruhan SFVG pada kinerja aerodinamika dan stabilitas bus.

## 4. Tekanan Pada Bus

Meskipun bus dengan SFVG memiliki kecepatan yang lebih rendah (32.57 m/s) daripada bus tanpa SFVG (33.61 m/s), tekanan yang dihasilkan pada bagian depan bus dengan SFVG (204.13 Pa) sedikit lebih rendah dibandingkan dengan bus tanpa SFVG (209.16 Pa). Namun, perlu dicatat bahwa penurunan tekanan di bagian atas dan bawah bus juga perlu dipertimbangkan, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi gaya angkat dan stabilitas keseluruhan bus. Dengan demikian, kesimpulan utama dari analisis ini adalah penggunaan SFVG menunjukkan potensi untuk meningkatkan kecepatan dan sedikit mengurangi *drag*, namun juga meningkatkan lift yang dapat mempengaruhi stabilitas. Optimalisasi desain dan analisis lebih lanjut diperlukan untuk memastikan keseimbangan antara efisiensi aerodinamis dan stabilitas kendaraan. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dampak penuh dari penggunaan SFVG dalam meningkatkan efisiensi energi dan kinerja aerodinamis bus secara keseluruhan.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Arum, Wahyuni Fajar, and Enggal Fahmi Dzikirillah. "ANALISIS PENGARUH VORTEX GENERATOR TERHADAP ALIRAN UDARA." *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine* 9.1 (2023): 55-64.
- Badan Pusat Statistik Republik Indonesia. "Statistik Transportasi Darat". 2021
- Bayindirli, Cihan, and Mehmet Çelik. "The determination of effect of windshield inclination angle on drag coefficient of a bus model by CFD method." *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* 9.3 (2020): 122-129.
- Bayindirli, Cihan, and Mehmet Çelik. "The determination of effect of windshield inclination angle on drag coefficient of a bus model by CFD method." *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* 9.3 (2020): 122-129.
- Carter, James E., and Stephen F. Wornom. "Solutions for incompressible separated boundary layers including viscous-inviscid interaction." *Aerodynamic analysis requiring advanced computers* (1975): 125.
- Chai, Lei, and Savvas A. Tassou. "A review of airside heat transfer augmentation with vortex generators on heat transfer surface." *Energies* 11.10 (2018): 2737.
- Garcia-Ribeiro, D. et al. (2023) 'Drag reduction of a commercial bus with add-on aerodynamic devices', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(7), pp. 1623–1636. Available at: <https://doi.org/10.1177/09544070221098209>
- Garcia-Ribeiro, D. et al. (2023) 'Drag reduction of a commercial bus with add-on aerodynamic devices', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(7), pp. 1623–1636. Available at: <https://doi.org/10.1177/09544070221098209>.
- Gorji-Bandpy, M., S. Soleimani, and F. Hossein-Nejad. "Pressure and Heat transfer in staggered arrangement circular tubes with Airfoil Vortex Generator." *International Energy Journal* 9.3 (2008).
- Hariram, Adithya, et al. "A study in options to improve aerodynamic profile of heavy-duty vehicles in Europe." *Sustainability* 11.19 (2019): 5519.
- Lee, Minhyung, et al. "Improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution." *Advances in Civil Engineering* 2020.1 (2020): 8827936.
- Prihadnyana, Yudi, Gede Widayana, and Kadek Rihendra Dantes. "Analisis aerodinamika pada permukaan bodi kendaraan mobil listrik gaski (ganesha sakti) dengan perangkat lunak ansys 14.5." *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha* 5.2 (2017).
- Pritchard Fluid Mechanics. Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics 8th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.(2011).*
- Romadhon, Awal, and Dana Herdiana. "Analisis Cfd Karakteristik Aerodinamika Pada Sayap Pesawat Lsu-05 Dengan Penambahan Vortex Generator (*Analysis*

*of Cfd Aerodynamic Characteristics At the Wing of Aircraft Lsu-05 With the Addition of Vortex Generator).*" Jurnal Teknologi Dirgantara 15.1 (2017): 45-58.

Widodo, W.A. and Karohmah, M.N. (2016) '*CFD Based Investigations into Optimization of Diffuser Angle on Rear Bus Body*', *Applied Mechanics and Materials*, 836, pp. 127-131. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.836.127>.

Zein, Muhammad Fadhil. *Studi Numerik Karakteristik Aerodinamik untuk Mereduksi Gaya Hambat pada Model Kendaraan Bus Penumpang*. Diss. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2024.

Zein, Muhammad Fadhil. *Studi Numerik Karakteristik Aerodinamik untuk Mereduksi Gaya Hambat pada Model Kendaraan Bus Penumpang*. Diss. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2024.

Zulkefli, N. F., et al. "Lift Enhancement of NACA4415 Airfoil using Biomimetic Shark Skin Vortex Generator." *IJRTE*, ISSN: 2277 3878.