

Studi Pemodelan Numerik Penempatan Shark Fin Vortex Generator dengan Susunan Sebaris Pada Dinding Kiri dan Kanan Bus Penumpang

Haposan Misaelman Sinaga¹, Wawan Aries Widodo²

Institut Teknologi Sepuluh November^{1,2}

haposanmisaelman13@gmail.com¹, wawanaries71@gmail.com²

ABSTRACT

This study analyzes the impact of installing Shark Fin Vortex Generators (SFVG) in a row arrangement on the left and right sides of a passenger bus on the vehicle's aerodynamic performance. A numerical modeling approach was used to visualize the airflow around the bus and measure key parameters such as drag coefficient (CD), lift coefficient (CL), and pressure coefficient (CP) distribution. Air velocity contour analysis shows that SFVG significantly optimizes airflow around the bus. The bus with SFVG achieved a higher airspeed of 50.23 km/h, while the bus without SFVG only reached 49.83 km/h, indicating a significant reduction in aerodynamic drag. Drag coefficient (CD) analysis shows that the bus with SFVG has a lower CD value of 0.63794782 compared to the bus without SFVG, which has an average value of around 0.70191103. Although the difference is small, it indicates that SFVG has the potential to reduce aerodynamic drag. A difference in lift coefficient (CL) values between the bus with SFVG (around 0.040190537) and the bus without SFVG (around 0.05368355) was also observed, suggesting that SFVG affects the lift force distribution on the bus. Pressure distribution analysis shows that SFVG alters the pressure distribution around the bus. Pressure contours on the bus with SFVG show concentrated pressure at the front of the bus with a peak pressure of about 213.22 Pa, whereas the bus without SFVG shows a higher peak pressure, reaching 465.17 Pa at the same location. This study also evaluates the potential of SFVG to reduce fuel consumption and the environmental impact of public transportation through reduced drag forces. The analysis results indicate that SFVG has the potential to improve energy efficiency and overall aerodynamic performance of the bus. Further research is needed to fully understand the impact of using SFVG in this context.

Keywords: Shark Fin Vortex Generator (SFVG), Aerodynamic Performance, Aerodynamic Drag Reduction, Energy Efficiency, Public Transportation

ABSTRAK

Studi ini menganalisis pengaruh pemasangan Shark Fin Vortex Generator (SFVG) dengan susunan sebaris pada dinding kiri dan kanan bus penumpang terhadap performa aerodinamis kendaraan. Penggunaan model pemodelan numerik digunakan untuk memvisualisasikan aliran udara di sekitar bus dan mengukur parameter-parameter kunci seperti koefisien drag (CD), koefisien lift (CL), serta distribusi koefisien tekanan (CP). Analisis kontur kecepatan udara menunjukkan bahwa SFVG secara signifikan mengoptimalkan aliran udara di sekitar bus. Bus dengan SFVG mencapai kecepatan udara yang tinggi 50.23 km/h, sementara bus tanpa SFVG hanya mencapai 49.83 km/h, mengindikasikan pengurangan hambatan aerodinamis yang signifikan. Hasil analisis koefisien drag (CD) menunjukkan bahwa bus dengan SFVG memiliki nilai CD yang lebih rendah, yaitu 0.63794782, dibandingkan dengan bus tanpa SFVG yang memiliki nilai rata-rata sekitar 0.70191103. Meskipun perbedaannya kecil, ini menunjukkan bahwa SFVG memiliki potensi untuk mengurangi gaya hambat aerodinamis. Perbedaan dalam nilai koefisien lift (CL) antara bus dengan SFVG

(sekitar 0.040190537) dan bus tanpa SFVG (sekitar 0.05368355) juga diamati, menunjukkan bahwa SFVG mempengaruhi distribusi gaya angkat pada bus. Analisis distribusi tekanan menunjukkan bahwa SFVG mengubah distribusi tekanan di sekitar bus. Kontur tekanan pada bus dengan SFVG menunjukkan tekanan terkonsentrasi di bagian depan bus dengan puncak tekanan sekitar 213.22 Pa, sementara bus tanpa SFVG menunjukkan puncak tekanan yang lebih tinggi, mencapai 465.17 Pa di bagian yang sama. Studi ini juga mengevaluasi potensi SFVG dalam mengurangi konsumsi bahan bakar dan dampak lingkungan dari transportasi umum melalui pengurangan gaya drag. Hasil analisis menunjukkan bahwa SFVG memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa aerodinamis bus secara keseluruhan. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami dampak penuh dari penggunaan SFVG dalam konteks ini.

Kata Kunci: Shark Fin Vortex Generator (SFVG), Performa Aerodinamis, Pengurangan Hambatan Aerodinamis, Efisiensi Energi, Transportasi Umum

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 (Kadarisman, Gunawan and Trisakti, 2015).

Tabel 1. Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Dirinci Menurut Jenisnya Tahun 2019-2024 (unit) (Statistik Transportasi Darat, 2021), (Kompas, 2024), (OTODRIVER.com, 2024)

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	112.771.136	115.023.039	120.042.298	125.305.332	127.976.339	134.181.607	4,44

Jumlah	133.61	136.13	141.99	148.26	153.61	160.47	19,67
/Total	7.012	7.451	2.573	1.817	4.180	7.743	

Meskipun perjalanan dengan bus sangat penting untuk memenuhi kebutuhan mobilitas masyarakat, peningkatan efisiensi bahan bakar masih menjadi tantangan yang signifikan. Menurut (Badan Pusat Statistik Republik Indonesia, 2021), (Kompas, 2024), (OTODRIVER.com, 2024) mobil bus memiliki pertumbuhan per tahun sebesar 3,86%. 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).

SFVG adalah alat aerodinamika pasif yang dapat dipasang di permukaan kendaraan untuk mengoptimalkan aliran udara di sekitar kendaraan dan mengurangi turbulensi. Penempatan SFVG dengan susunan sebaris 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 sebaris pada dinding bus penumpang menjadi relevan dan berpotensi memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan.

LANDASAN TEORI

Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian yang disebutkan dengan berbagai pendekatan dan menghasilkan hasil yang bervariasi. Referensi-referensi ini menjadi landasan bagi penulis dalam melaksanakan penelitian ini. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Widodo and Karohmah, 2016) dengan memasang *diffuser* di bagian belakang bus, penelitian ini dilakukan dengan 4 variasi sudut *diffuser*, yaitu pada 0°, 60°, 120°,

dan 180° . Untuk memudahkan analisis, model bus disederhanakan (tanpa roda dan kaca spion). 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 (Bayındırlı and Çelik, 2020) menggunakan empat model bus dengan sudut kemiringan windshield yang berbeda. Sudut kemiringan untuk model bus 1, 2, 3, dan 4 adalah berturut-turut 0° , 15° , 30° , dan 45° . Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS, kemudian simulasi dilakukan dengan metode Computational Fluid Dynamics (CFD).

Menurut (Bayındırlı and Çelik, 2020) dampak sudut kemiringan windshield mempengaruhi gaya *drag* pada bus; tiap kenaikan 1° menghasilkan pengurangan koefisien *drag* sekitar 0,4%. *Drag* aerodinamis juga berkontribusi terhadap sekitar 50% konsumsi bahan bakar pada bus saat beroperasi pada kecepatan tinggi.

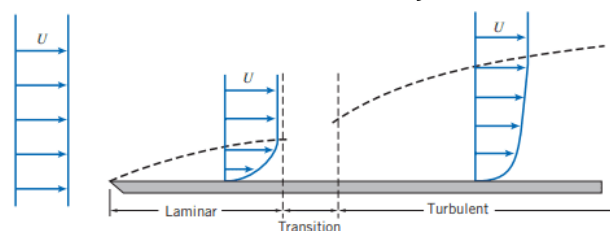
Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Garcia-Ribeiro *et al.*, 2023) penambahan perangkat aerodinamis seperti 2 Vortex Generator & Lateral Device pada kasus G7 mampu mengurangi *drag* pada model bus sebesar 8,63%.

Menurut (Guerrero, Castilla and Eid, 2022) peningkatan downforce dan pengurangan gaya *drag* dapat terjadi dengan penambahan Diffuser.

Konsep Boundary Layer

Teori tentang boundary layer pertama kali dikemukakan oleh Ludwig Prandtl pada tahun 1904. Dalam penelitiannya, Prandtl menunjukkan bahwa sebagian besar aliran viscous dapat dianalisis dengan membagi aliran menjadi dua wilayah, yaitu wilayah yang berdekatan dengan permukaan solid (plat batas) dan wilayah lain yang melingkupi aliran sisanya. Hanya di dalam lapisan tipis yang dekat dengan permukaan solid (boundary layer) efek viskositas sangat signifikan, sedangkan di luar dari boundary layer, efek viskositas dapat diabaikan dan fluida dapat dianggap sebagai aliran inviscid ('Pritchard Fluid Mechanics', 2011).

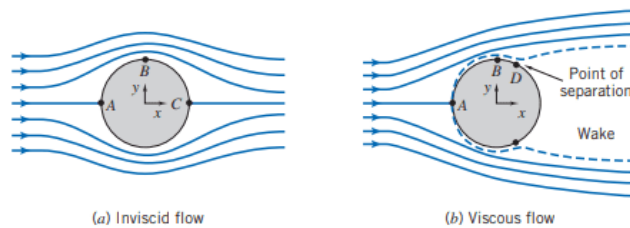
Gambar 1. Boundary Layer yang terjadi di atas Plat Datar ('Pritchard Fluid Mechanics', 2011)



Gambar di atas Menunjukkan adanya boundary layer yang terbentuk di atas Plat Datar. Pada sebagian besar situasi aliran dalam kehidupan nyata, boundary layer akan muncul di permukaan datar yang panjang. Ilustrasi sederhana pembentukan boundary layer dapat ditemukan dalam gambar 2.14. Boundary layer memiliki aliran laminar untuk jarak pendek dari leading edge, kemudian terjadi transisi dalam rentang tertentu di atas plat datar. Bagian transisi ini meliputi rentang dari akhir aliran laminar hingga awal dari boundary layer yang memiliki aliran turbulen. Beberapa faktor yang mempengaruhi transisi dari boundary layer meliputi gradien tekanan, kekasaran permukaan, perpindahan panas, gaya yang bertindak pada badan, dan gangguan pada aliran freestream ('Pritchard Fluid Mechanics', 2011).

Aliran Viscous dan Inviscid

Gambar 2. Visualisasi Aliran Incompressible yang Melewati Bola ('Pritchard Fluid Mechanics', 2011)

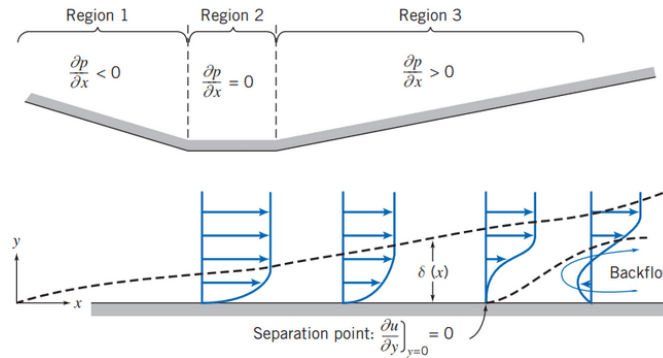


Gambar tersebut menampilkan visualisasi aliran incompressible yang melintasi bola, yang memperlihatkan perbedaan antara aliran viscous dan aliran inviscid. Pada aliran inviscid, streamline yang terbentuk menunjukkan simetri dari awal hingga akhir. Namun, pada aliran viscous, terdapat titik separasi yang mengakibatkan bentuknya tidak simetris dari awal hingga akhir.

Dalam aliran inviscid, diasumsikan bahwa tidak ada *drag* yang terjadi akibat gesekan, sehingga distribusi tekanan dari aliran yang melewati bola memiliki bentuk yang simetris dari awal hingga akhir. Konsep ini dijelaskan dalam paradoks d'Alembert, di mana dinyatakan bahwa bola tidak mengalami *drag*. Namun, konsep boundary layer kemudian memperbaiki asumsi tersebut. Menurut penjelasan (*Ludwig Prandtl's Boundary Layer*, 2005), hanya di dalam lapisan tipis yang berdekatan dengan permukaan solid (boundary layer) efek viskositas sangat penting, sementara di luar dari boundary layer, efek viskositas dapat diabaikan dan fluida dapat dianggap sebagai aliran inviscid. Oleh karena itu, pada Gambar 2.15 (b), terlihat bahwa pada titik D terjadi titik separasi akibat efek viskositas yang tidak diabaikan.

Wake dan Titik Separasi

Gambar 2. Ilustrasi Aliran Boundary-layer dengan pressure gradient ('Pritchard Fluid Mechanics', 2011)

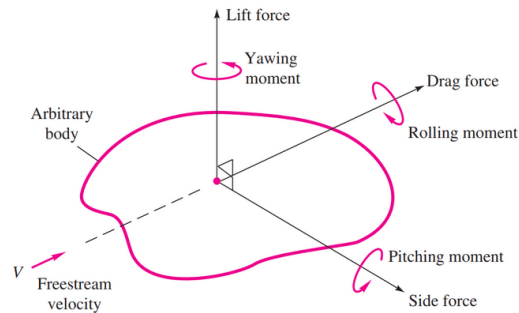


Konsep boundary layer yang dijelaskan pada sub-bab 2.2.2 memiliki implikasi berupa terbentuknya wake, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.15 (b), dimulai dari titik D (titik separasi) dan seterusnya. Titik D merupakan titik separasi di mana partikel fluida terlepas dari objek dan menyebabkan terbentuknya wake. Pada aliran inviscid, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.15 (a), partikel fluida bergerak sepanjang permukaan dari titik B ke titik C, dimana partikel tersebut bergerak dari daerah tekanan rendah menuju tekanan tinggi. *Favorable pressure gradient* merupakan kondisi dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran (i.e. $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$), disebut *favorable* karena gradien tekanan ini memiliki tendensi untuk mengatasi melambatnya partikel fluida akibat dari gesekan di dalam *boundary layer*. Gradien tekanan ini mengalami muncul saat aliran *freestream* dengan kecepatan U meningkat sepanjang sumbu- x , contohnya seperti aliran konvergen dalam *nozzle*. Sementara *adverse pressure gradient* merupakan gradien tekanan yang mengalami peningkatan tekanan searah dengan arah aliran (i.e. $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$), disebut *adverse* karena gradien tekanan ini dapat menyebabkan partikel fluida di dalam *boundary layer* melambat secara signifikan dibandingkan dengan melambatnya partikel fluida akibat gesekan yang terjadi di dalam *boundary layer*. Jika gradien tekanan adverse-nya sangat ekstrem, partikel fluida di dalam lapisan batas akan terhenti, menyebabkan partikel fluida di sepanjang permukaan badan mengalami pelepasan, karena harus memberikan ruang bagi partikel fluida lain yang berlawanan arah, yang menghasilkan pembentukan *wake* ('Pritchard Fluid Mechanics', 2011).

Fenomena Kendaraan Pada Aerodinamik

Berdasarkan (*Fluid Mechanics 7th Edition. New York: McGraw-Hill, 2009*) semua objek yang terkena aliran fluida akan mengalami gaya dan momen dari aliran tersebut. Gambar 2.17 menampilkan objek dengan bentuk dan orientasi seperti yang ditunjukkan dalam gambar tersebut, di mana aliran fluida yang melewati objek tersebut akan mencoba menentang gaya dan momen dari tiga sumbu koordinat.

Gambar 4. Ilustrasi Gaya dan Momen yang terjadi ketika suatu Body melewati (Fluid Mechanics 7th Edition. New York: McGraw-Hill., 2009)



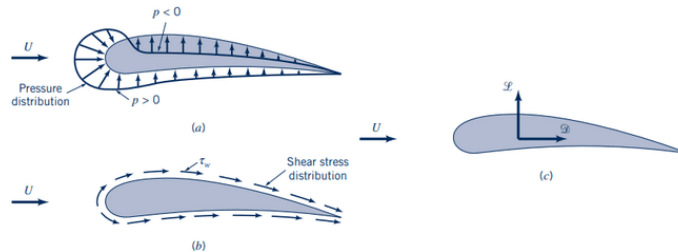
Gaya pertama yang bekerja pada suatu benda dalam sumbu freestream velocity (V) disebut sebagai *drag*, dan momen yang dihasilkan dalam sumbu ini disebut sebagai rolling moment. *Drag* adalah kerugian aliran yang harus diatasi agar benda dapat bergerak melawan arus. Gaya kedua disebut sebagai gaya angkat (lift force) yang bertindak tegak lurus terhadap sumbu freestream velocity (V), dan momen yang dihasilkan dalam sumbu ini disebut sebagai yawing moment. Ketika benda memiliki simetri terhadap sumbu *drag*-lift, seperti pesawat terbang, kapal, dan kendaraan, maka penyelesaian dapat disederhanakan menjadi dua dimensi: dua gaya, yaitu *drag* dan lift, dan satu momen, yaitu pitch.

Aerodynamic *drag* yang terjadi pada kendaraan merupakan salah satu bentuk hambatan yang dapat diatasi dengan menambahkan komponen untuk mengurangi gaya *drag*. Tenaga yang dibutuhkan untuk menggerakkan kendaraan harus dapat melawan resistensi rolling dan aerodynamic *drag* yang timbul pada kendaraan tersebut. Pada kecepatan sekitar ± 42 km/jam, aerodynamic *drag* menjadi salah satu hambatan utama terhadap gaya dorong netto yang dibutuhkan. Kontribusi dari gaya *drag* yang disebabkan oleh beberapa bagian kendaraan (seperti bagian depan, kaca depan, atap, bagian belakang, puncak kaca depan, atap bagian belakang, dan cowl) telah banyak disimulasikan dalam bentuk model atau ukuran penuh, sehingga aerodynamic *drag* dari kendaraan dapat diperkirakan (Okiishi and Rothmayer, 2013).

Drag dan Lift

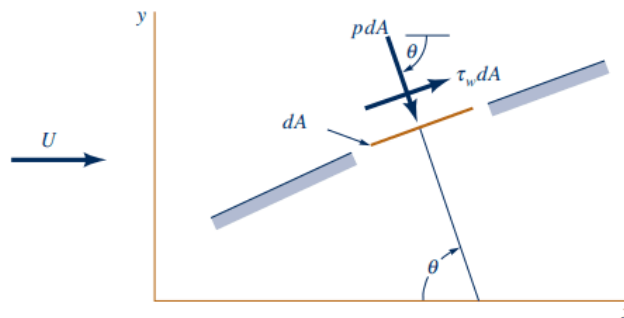
Ketika sebuah benda melintasi aliran fluida, akan terjadi interaksi antara permukaan benda dengan fluidanya, yang menghasilkan gaya pada antarmuka fluida-benda. Gaya ini dapat dijelaskan melalui tegangan, seperti tegangan geser pada dinding (wall shear stress) akibat efek viskositas, dan tegangan normal akibat tekanan (p). Distribusi dari tegangan geser dinding dan tegangan normal dapat diamati pada Gambar 2.18 (a) dan (b). Gaya total yang bekerja searah dengan kecepatan aliran awal (U) disebut sebagai *drag*, sedangkan gaya total yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu kecepatan awal (U) disebut sebagai lift (Okiishi and Rothmayer, 2013).

Gambar 5. Gaya yang bekerja pada objek dua dimensi yang melewati suatu aliran fluida (a) *pressure force*, (b) *viscous force*, (b) *resultan force* (*lift* dan *drag*) (Okiishi and Rothmayer, 2013)



Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan pada Gambar 2.18 (a) dan (b) dapat diperoleh dengan mengintegrasikan efek dari dua kuantitas terhadap permukaan *body* seperti Gambar 2.19 di bawah.

Gambar 6. Pressure Force dan Shear Force pada Elemen Kecil dari Permukaan (Okiishi and Rothmayer, 2013)



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

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

dan,

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

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

$$D = \int dF_x = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA$$

dan,

$$L = \int dF_y = - \int p \sin \theta \, dA + \int \tau_w \cos \theta \, dA$$

Untuk menyelesaikan integrasi di atas dan mendapatkan nilai *drag* dan *lift* dari suatu *body*, maka kita harus memiliki bentuk *body*-nya (i.e. θ dalam fungsi lokasi di sepanjang *body*) dan distribusi dari τ_w dan p sepanjang permukaan. Namun dalam praktiknya, distribusi tegangan geser dan tekanan di sepanjang permukaan sulit untuk didapatkan secara eksperimen maupun teoritis (Okiishi and Rothmayer, 2013).

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

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \tag{2.5}$$

dan,

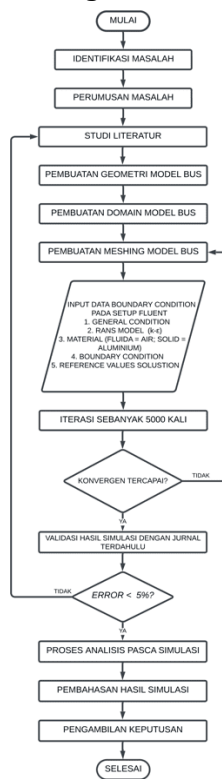
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \tag{2.6}$$

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) (Okiishi and Rothmayer, 2013).

METODE PENELITIAN

Pada bab metodologi akan dijelaskan mengenai *flowchart* dari penelitian yang dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

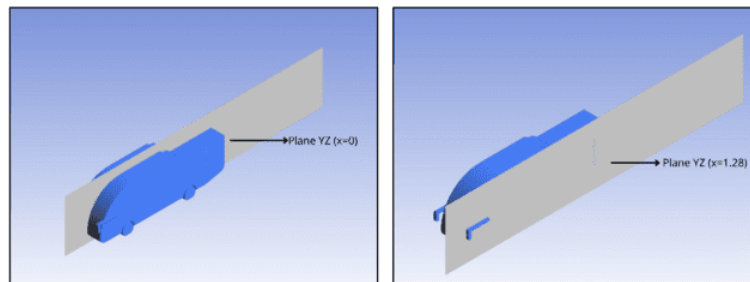
Gambar 7. Diagram Alir Penelitian



HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan dari simulasi yang telah dilakukan. Data yang didapatkan dari hasil simulasi dibagi menjadi 2 yaitu data kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif yang didapatkan antara lain Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, Visualisasi Aliran serta *Velocity Vector*, sementara data kuantitatif yang didapatkan antara lain nilai koefisien *drag* (C_D), koefisien *lift* (C_L), distribusi koefisien tekanan (C_P), penghematan bahan bakar.

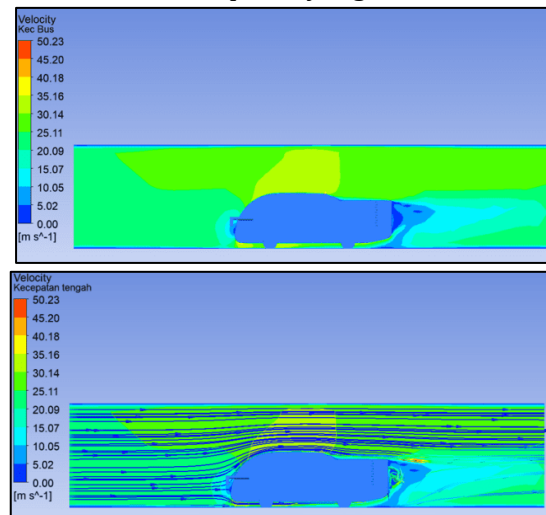
Gambar 8. Plane Pengambilan Kontur Kecepatan dan Kontur Tekanan



Analisis dan Pembahasan Data Simulasi pada Variasi *Vortex Generator* Sebaris

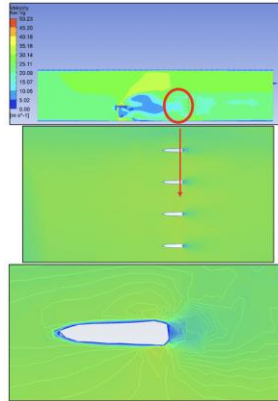
Analisis Kontur Kecepatan yang Melewati Bus

Gambar 9. Kontur Kecepatan yang Melewati Bus



Pada kontur kecepatan seperti Gambar 4.2, terlihat aliran *streamline* yang melewati bus dengan kecepatan maksimal berada pada 50 m/s yang berpusat di sekitar bagian depan atas bus. Setelah udara melewati bus, terlihat adanya aliran *streamline* yang berputar-putar di belakang bus, menandakan bahwa aliran udara mengalami turbulensi setelah berinteraksi dengan bus. Fenomena ini cukup umum terjadi di belakang kendaraan yang bergerak cepat seperti bus, dan dapat memengaruhi stabilitas aerodinamika serta efisiensi bahan bakar.

Gambar 10. Kontur Kecepatan yang Melewati *Vortex Generator*

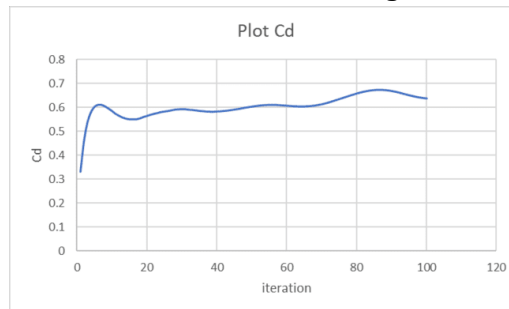


Pada kontur kecepatan seperti Gambar 4.3 menunjukkan bahwa di sekitar *vorteks generator*, terlihat bahwa kecepatan angin setelah melewati *vorteks generator* mengurangi kecepatannya menjadi 15 m/s . Hal ini menghasilkan efek pemecahan angin, yang membantu mengurangi *drag* yang dapat menghambat gerakan bus. Selain itu, *vorteks generator* juga berperan dalam meningkatkan stabilitas bus selama perjalanan.

Analisis Grafik dan Plot C_D

Untuk melihat pengaruh dari variasi *vortex generator* sebaris terhadap nilai C_D .

Gambar 11. Grafik C_D variasi *vortex generator* sebaris



Berdasarkan grafik C_D variasi *vortex generator* sebaris, dapat disimpulkan bahwa efektivitas *vortex generator* dalam menghasilkan aliran udara berputar meningkat seiring dengan peningkatan jumlah interaksi. Nilai C_D maksimum tercapai pada jumlah interaksi isi sesuai yang paling tinggi. Fluktuasi nilai C_D menunjukkan bahwa efektivitas *vortex generator* dapat bervariasi tergantung pada jumlah interaksi dan faktor lainnya.

Gambar 12. Nilai CD variasi vortex generator sebaris

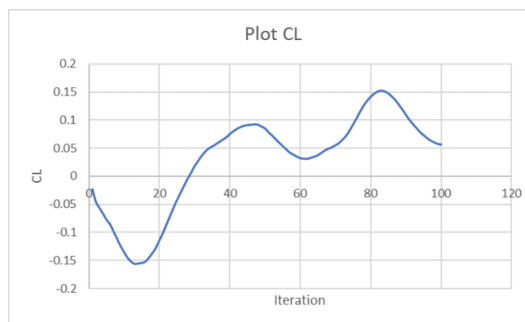
```
Done.  
Calculation complete.  
  
-----  
Cd  
-----  
report-def-0 0.63794982
```

Pada Simulasi bus dengan variasi *vorteks generator* sebaris, dihasilkan plot koefisien *drag* yang menunjukkan stabilitas yang cukup baik, seperti yang terlihat pada Gambar 4.5. Variasi *vorteks generator* yang disimulasikan menghasilkan koefisien *drag* yang stabil pada berbagai kecepatan dan kondisi aliran udara. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penambahan *vorteks generator* sebaris memberikan kontribusi yang positif terhadap kinerja aerodinamis bus. Rata-rata koefisien *drag* yang dihasilkan oleh bus dalam simulasi ini adalah sekitar 0.63794982, yang menunjukkan potensi untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan performa keseluruhan bus melalui optimasi desain aerodinamis.

Analisis Grafik dan Plot C_L

Untuk melihat pengaruh dari variasi *vortex generator* sebaris terhadap nilai C_L .

Gambar 13. Grafik CL variasi vortex generator sebaris



Gambar 14. Nilai CL variasi vortex generator sebaris

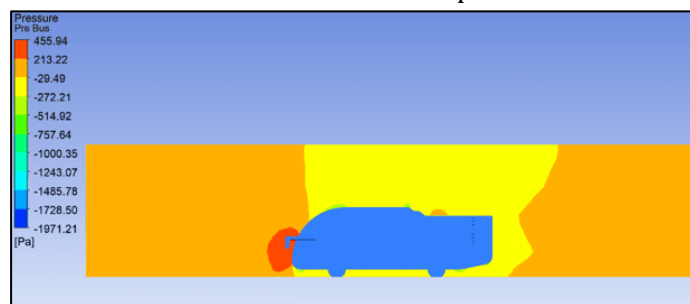
```
-----  
CL  
-----  
report-def-1 0.040190537
```

Berdasarkan plot koefisien lift yang dihasilkan dari simulasi bus dengan *vorteks generator* variasi sebaris, plot koefisien lift ini terjadi fluktuasi pada awalnya

yang kemudian menurun dan akhirnya menjadi stabil. Fenomena ini mencerminkan perubahan karakteristik aliran udara di sekitar bus seiring dengan variasi *vorteks generator*. Perubahan fluktuatif pada awal plot mungkin disebabkan oleh ketidakstabilan aliran udara di sekitar *vorteks generator* pada kecepatan rendah, sementara penurunan dan stabilisasi plot mengindikasikan bahwa aliran udara telah mengalami penyesuaian sehingga menghasilkan gaya angkat yang lebih stabil pada kecepatan atau sudut serang yang lebih tinggi. Plot koefisien lift ini memiliki rata-rata sebesar 0.076678594.

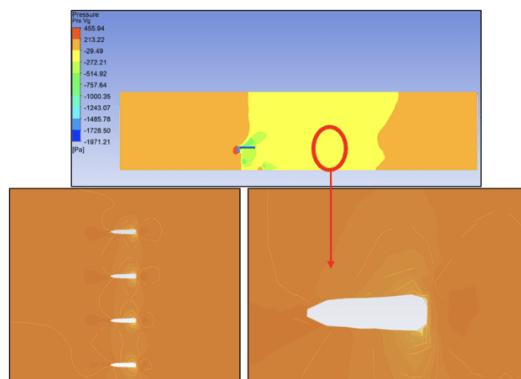
Analisis Kontur Tekanan

Gambar 15. Kontur Tekanan pada Bus



Pada Gambar 15 terlihat bahwa tekanan yang melewati bus berada pada bagian depan bus, dengan tekanan maksimum mencapai $213.22 Pa$. Setelah udara melewati bus, tekanan tersebut mengalami penurunan yang cukup signifikan, sehingga pada bagian atas dan bawah bus, tekanannya menurun menjadi sekitar $272.21 Pa$. Fenomena ini menunjukkan bahwa aliran udara di sekitar bus menghasilkan perbedaan tekanan yang signifikan antara bagian depan dan bagian atas serta bawah bus.

Gambar 16. Kontur Tekanan Pada Vorteks generator

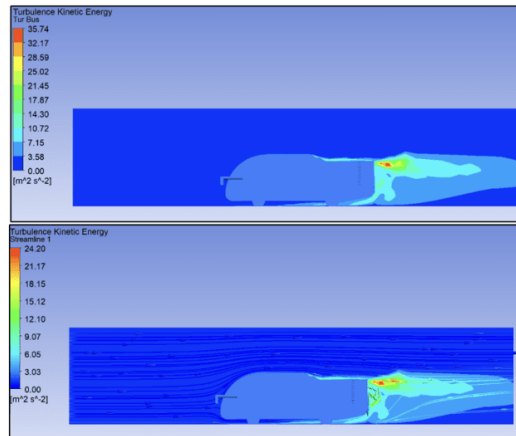


Pada Gambar 16 di sekitar *vorteks generator*, terlihat bahwa tekanan di bagian depan *vorteks generator* sekitar $91.03 Pa$. Setelah udara mengenai *vorteks generator*, tekanan tersebut mengalami penurunan secara bertahap di sepanjang sisi hingga

belakang *vorteks generator*. Penurunan tekanan ini kemungkinan akan memengaruhi hambatan yang akan diterima oleh bus.

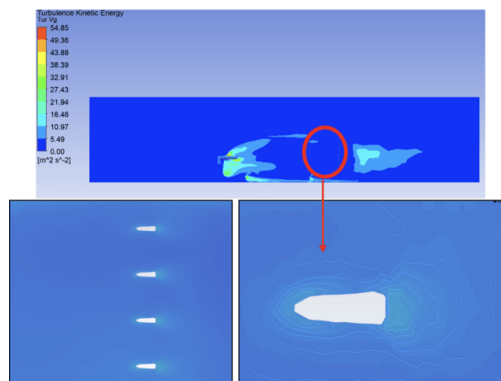
Analisis Kontur Turbulensi

Gambar 17. Kontur Turbulensi pada Bus



Pada kontur turbulensi yang terjadi berdasarkan Gambar 5.0, turbulensi yang dihasilkan pada bagian belakang bus cukup banyak sehingga menghasilkan aliran udara yang berputar pada bagian belakang bus. Turbulensi pada bus merujuk pada fenomena gangguan aliran udara di sekitar kendaraan tersebut, yang sering terjadi ketika bus bergerak dengan kecepatan tinggi. Turbulensi ini dapat memiliki beberapa penyebab, termasuk bentuk bodi bus yang tidak aerodinamis, interaksi antara bus dengan aliran udara di sekitarnya, dan efek dari faktor lingkungan seperti angin samping atau hambatan dari kendaraan lain di jalan.

Gambar 18. Kontur Turbulensi Pada *Vorteks generator*



Pada kontur turbulensi yang berinteraksi dengan *vorteks generator*, terlihat bahwa efek turbulensi secara signifikan berkurang setelah udara melewati *vorteks generator*. *Vorteks generator* dirancang untuk menciptakan aliran udara yang teratur

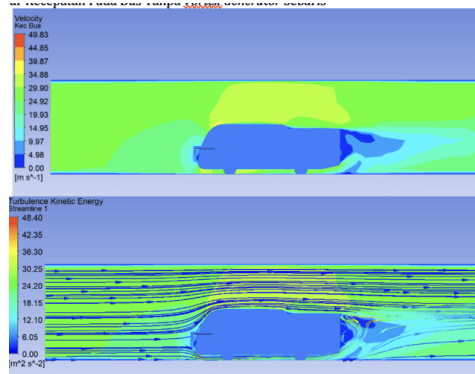
dan terkendali di sekitar bus dengan cara mengubah arus udara yang masuk ke belakang bus. Sebagai hasilnya, terjadi pengurangan turbulensi yang terlihat pada aliran udara di sekitar *vorteks generator*.

Dengan adanya *vorteks generator*, aliran udara yang sebelumnya cenderung tidak teratur dan menghasilkan turbulensi menjadi lebih terkendali dan teratur. Hal ini mengurangi fluktuasi yang tidak diinginkan dalam aliran udara di sekitar bus, sehingga meningkatkan stabilitas kendaraan dan mengurangi resistensi aerodinamis yang dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar.

Analisis dan Pembahasan Data Simulasi pada Bus Tanpa *Vortex Generator* Sebaris

Analisis Kontur Kecepatan Pada Bus Tanpa *Vortex Generator* Sebaris

Gambar 19. Kontur Kecepatan Pada Bus Tanpa *Vortex Generator*

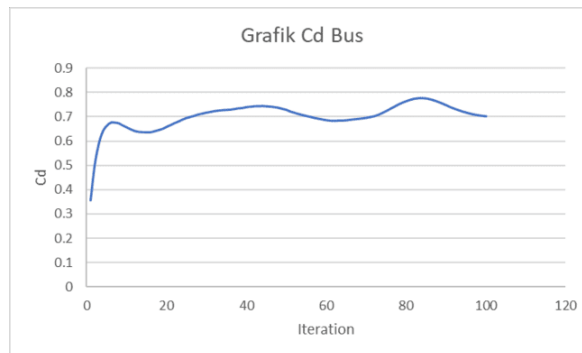


Gambar 19 memperlihatkan kontur kecepatan pada model bus dengan aliran masuk melalui *inlet* pada kecepatan konstan 19,3 m/s. Ketika aliran ini melewati *body* bus, terjadi peningkatan kecepatan, terutama di bagian atas kaca depan (*windshield*) dan bawah bus. Selanjutnya, aliran mengalir di sekitar bus, mengalami separasi, dan membentuk area *wake* di belakang bus. Dari Gambar 4.11, terlihat bahwa area *wake* di belakang bus cukup besar, yang menunjukkan bahwa gaya hambat pada model bus juga lebih besar.

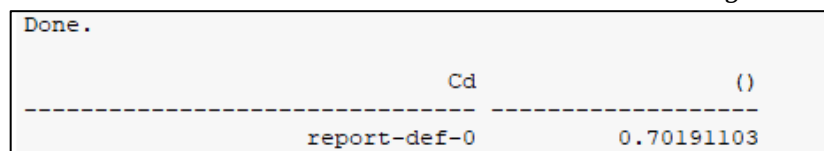
Kontur kecepatan juga mengungkapkan bahwa kecepatan udara tertinggi saat mengalir melewati bus adalah sekitar bagian atas bus, dengan kecepatan mencapai 42,35 m/s.

Grafik Hasil Simulasi Koefisien Drag (C_D)

Gambar 20. Grafik CD



Gambar 21. Nilai Rata-Rata Koefisien Drag



Dari Gambar 21, terlihat bahwa nilai grafik yang terbentuk dari nilai C_D (koefisien drag) pada model bus tanpa *vorteks generator* memiliki nilai yang stabil. Simulasi yang ditampilkan dalam Gambar 21 menunjukkan plot koefisien drag yang mempertahankan stabilitas yang cukup baik tanpa adanya variasi dari *vorteks generator staggered*. Bus yang tidak dilengkapi dengan *vorteks generator* ini menghasilkan koefisien drag yang konsisten pada berbagai kecepatan dan kondisi aliran udara.

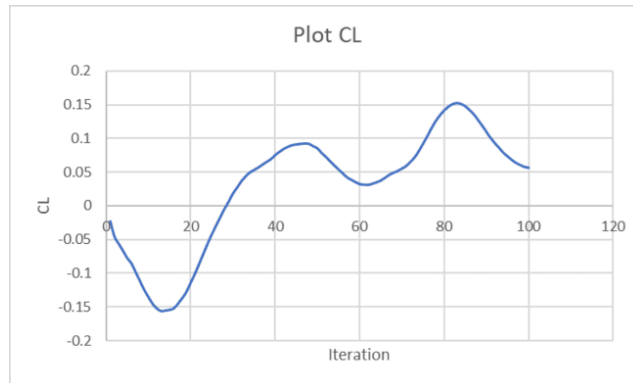
Grafik dalam Gambar 21 memperlihatkan bahwa model bus ini menjaga koefisien drag pada tingkat yang stabil, yang mengindikasikan bahwa tanpa penambahan *vorteks generator*, bus mampu mempertahankan performa aerodinamis yang konsisten. Rata-rata koefisien drag yang dihasilkan oleh model bus dalam simulasi ini adalah sekitar 1.2062274. Nilai ini menunjukkan bahwa bus menghadapi hambatan aerodinamis yang cukup besar.

Hambatan yang besar ini berimplikasi pada peningkatan konsumsi bahan bakar dan efisiensi yang lebih rendah dalam penggunaan energi. Oleh karena itu, meskipun koefisien drag stabil, nilai yang tinggi ini menunjukkan bahwa masih ada ruang untuk peningkatan performa aerodinamis, misalnya dengan penggunaan *vorteks generator* sebaris yang dapat mengurangi hambatan dan meningkatkan efisiensi keseluruhan dari bus tersebut.

Dengan mempertimbangkan hasil simulasi ini, penting untuk mengevaluasi dan mengembangkan desain aerodinamis yang lebih efisien untuk mengurangi koefisien drag, yang pada gilirannya akan mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kinerja bus secara keseluruhan.

Grafik Hasil Simulasi Koefisien Lift (C_L)

Gambar 22. Grafik CL



Gambar 23. Nilai Rata-Rata Koefisien Lift

C1	()
report-def-1	0.056931064

Dari Gambar 23 pada grafik koefisien angkat yang dihasilkan dari simulasi bus tanpa variasi *vorteks generator*, 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.

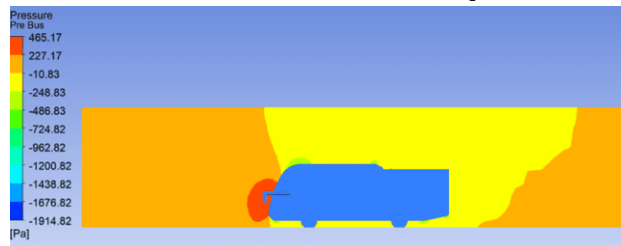
Fluktuasi awal di koefisien angkat juga bisa disebabkan oleh transisi aliran dari laminar ke turbulen di sekitar permukaan bus. Seiring waktu, aliran turbulen menjadi lebih terorganisir, yang mengurangi fluktuasi dalam gaya angkat yang dihasilkan.

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 23 adalah sekitar 0.05368355.

Nilai rata-rata ini memberikan gambaran tentang gaya angkat yang dialami oleh bus dalam kondisi operasi yang stabil. Koefisien angkat yang relatif tinggi menunjukkan bahwa ada gaya angkat yang signifikan bekerja pada bus, yang bisa mempengaruhi stabilitas dan kenyamanan kendaraan. Penting untuk mempertimbangkan nilai koefisien angkat ini dalam desain aerodinamis bus untuk memastikan bahwa bus tetap stabil dan aman selama pengoperasiannya.

Analisis Kontur Tekanan Bus Tanpa *Vortex Generator*

Gambar 24. Kontur Tekanan Pada Bus Tanpa *Vortex Generator*



Pada Gambar 24, terlihat kontur tekanan yang menggambarkan aliran udara melewati bus. Dapat diamati bahwa tekanan yang melintasi bagian depan bus sangat terkonsentrasi, dengan tekanan puncak mencapai 465.17 Pa. Namun, setelah udara melewati bus, terjadi penurunan tekanan yang cukup drastis, menurunkan tekanan di bagian atas dan bawah bus menjadi sekitar 10.83 Pa. Fenomena ini menunjukkan adanya perbedaan tekanan yang signifikan antara bagian depan dan bagian atas serta bawah bus akibat aliran udara di sekitarnya.

Pada Gambar 24, terlihat kontur tekanan yang menggambarkan aliran udara melewati bus. Kontur tekanan ini memberikan informasi tentang distribusi tekanan di berbagai bagian bus saat udara mengalir di sekitarnya. Dapat diamati bahwa tekanan yang melintasi bagian depan bus sangat terkonsentrasi, dengan tekanan puncak mencapai 465.17 Pa. Tekanan tinggi di bagian depan bus ini dihasilkan dari stagnasi aliran udara saat bertemu dengan permukaan vertikal yang besar, menciptakan daerah dengan tekanan yang sangat tinggi.

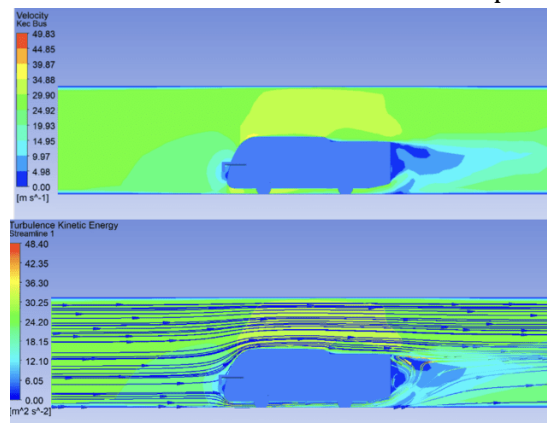
Setelah udara melewati bagian depan bus, terjadi penurunan tekanan yang cukup drastis di bagian atas dan bawah bus. Penurunan tekanan ini adalah hasil dari percepatan aliran udara yang bergerak di sekitar kontur bus, yang menyebabkan tekanan di bagian atas dan bawah bus menjadi sekitar 10.83 Pa. Percepatan aliran ini sesuai dengan prinsip *Bernoulli*, di mana peningkatan kecepatan aliran udara mengakibatkan penurunan tekanan.

Fenomena perbedaan tekanan yang signifikan antara bagian depan dan bagian atas serta bawah bus menunjukkan adanya gradien tekanan yang tajam. Gradien tekanan ini merupakan faktor utama dalam pembentukan gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*) pada bus. Tekanan tinggi di bagian depan bus menciptakan gaya hambat yang menahan laju bus, sementara penurunan tekanan di bagian atas dan bawah bus dapat mempengaruhi gaya angkat, yang pada gilirannya mempengaruhi stabilitas dan pengendalian kendaraan.

Selain itu, kontur tekanan ini juga memperlihatkan bagaimana aliran udara terpisah dan menyatu kembali di belakang bus, menciptakan daerah tekanan rendah atau area *wake*. Area *wake* ini berkontribusi terhadap *drag* tambahan karena menciptakan turbulensi dan vorteks di belakang bus. Semakin besar area *wake*, semakin besar gaya hambat yang dialami oleh bus, yang dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar dan mengurangi efisiensi aerodinamis kendaraan.

Analisis Kontur Turbulensi Pada Bus Tanpa *Vortex Generator*

Gambar 25.Kontur Turbulensi Pada Bus Tanpa *Vortex Generator*



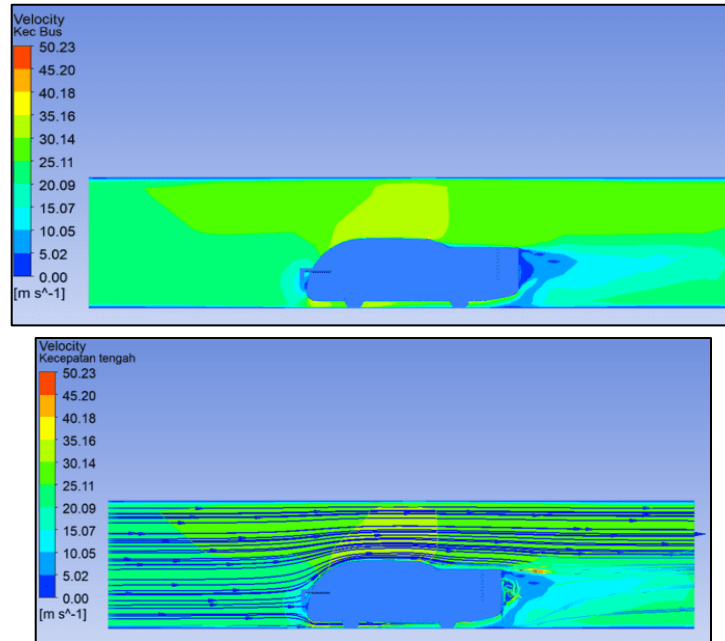
Pada ilustrasi kontur turbulensi yang berinteraksi dengan bus, terlihat bahwa efek turbulensi pada bagian belakang bus sangat signifikan, yang dapat dilihat pada Gambar 4.18. Kontur turbulensi ini memberikan gambaran visual tentang tingkat kekacauan aliran udara saat melewati dan meninggalkan permukaan bus.

Turbulensi adalah fenomena aliran udara yang tidak teratur, di mana aliran udara mengalir dengan kecepatan dan arah yang berubah-ubah secara acak. Pada Gambar 4.18, kontur turbulensi menunjukkan area dengan intensitas turbulensi yang tinggi, terutama di bagian belakang bus. Hal ini disebabkan oleh pemisahan aliran udara ketika melewati *body* bus dan mengalami ketidakstabilan setelah meninggalkan permukaan bus.

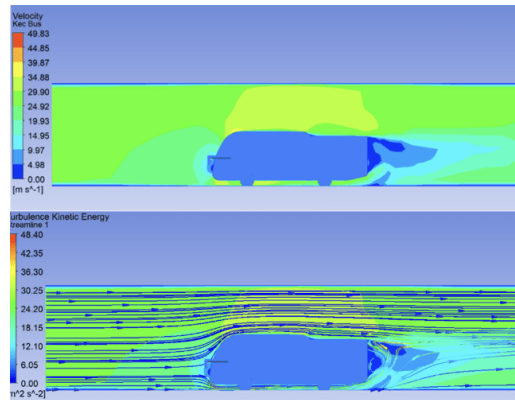
Bagian belakang bus menjadi area yang sangat rentan terhadap pembentukan turbulensi karena bentuk geometris bus yang menyebabkan aliran udara tidak dapat mengikuti permukaan kendaraan dengan mulus. Ketika aliran udara mencapai ujung belakang bus, ia terpisah dari permukaan dan menciptakan vorteks dan pusaran udara. Area ini dikenal sebagai area *wake*, di mana tekanan udara rendah dan aliran udara sangat tidak teratur.

Analisis Perbandingan Simulasi Bus Dengan *Vortex Generator* Sebaris dan Bus Tanpa *Vortex Generator* Perbandingan Kontur Kecepatan

Gambar 26. Kontur Kecepatan Bus Dengan *Vorteks generator* Sebaris



Gambar 27. Kontur Kecepatan Tanpa *Vorteks generator*



Dalam perbandingan ini, kontur kecepatan dan visualisasi aliran udara di sekitar bus dengan dan tanpa *vorteks generator* sebaris dianalisis secara rinci. Tujuan analisis ini adalah untuk memahami dampak *vorteks generator* sebaris terhadap performa aerodinamis bus. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa penggunaan *vorteks generator* sebaris secara signifikan mengoptimalkan aliran udara di sekitar bus.

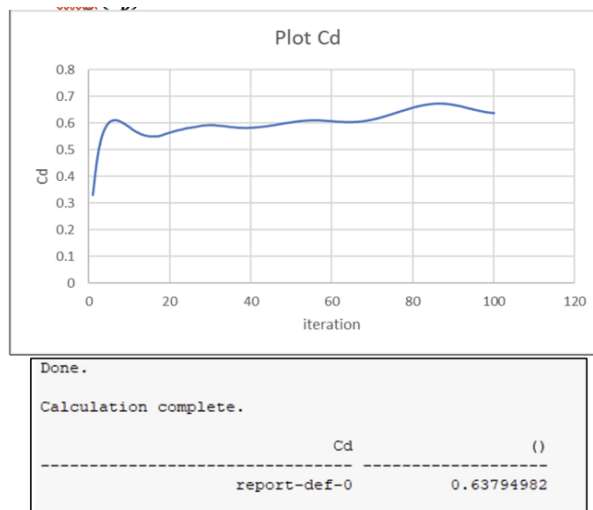
Pada bus yang dilengkapi dengan *vorteks generator* sebaris, aliran udara menjadi lebih teratur dan laminar, mengurangi tingkat turbulensi di sekitar bodi bus. *Vorteks generator* menciptakan vorteks kecil yang menstabilkan aliran udara dan membantu menjaga aliran tetap melekat pada permukaan bus lebih lama, mengurangi area *wake* di bagian belakang bus. Hal ini berkontribusi pada penurunan *drag* aerodinamis, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi bahan bakar dan performa aerodinamis bus secara keseluruhan.

Visualisasi kontur kecepatan menunjukkan bahwa kecepatan udara tertinggi yang melewati bus dengan *vorteks generator* sebaris mencapai 50.23 m/s, lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan tertinggi 49.83 m/s pada bus tanpa *vorteks generator*. Peningkatan kecepatan udara ini menunjukkan bahwa *vorteks generator* sebaris membantu mempercepat aliran udara di sekitar bus, mengindikasikan pengurangan hambatan aerodinamis.

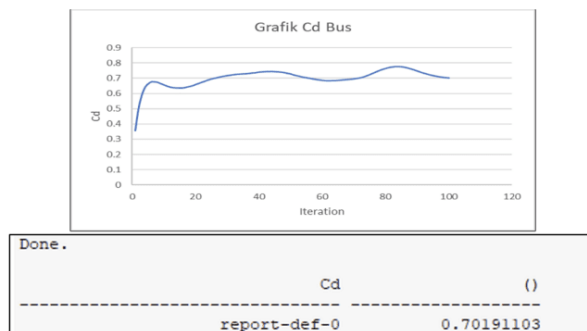
Secara keseluruhan, penggunaan *vorteks generator* sebaris memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja aerodinamis bus. Dengan kecepatan udara tertinggi 39.29 m/s di sekitar bus yang dilengkapi *vorteks generator* sebaris, dibandingkan dengan 36.92 m/s pada bus tanpa *vorteks generator*, jelas bahwa *vorteks generator* sebaris memberikan keuntungan signifikan dalam pengelolaan aliran udara dan pengurangan hambatan. Ini membuatnya menjadi solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja keseluruhan bus dalam aplikasi nyata.

Perbandingan Koefisien Drag (C_D)

Gambar 28. Koefisien Drag Bus *Vorteks generator* Sebaris



Gambar 29. Koefisien Drag Bus Tanpa *Vorteks generator*



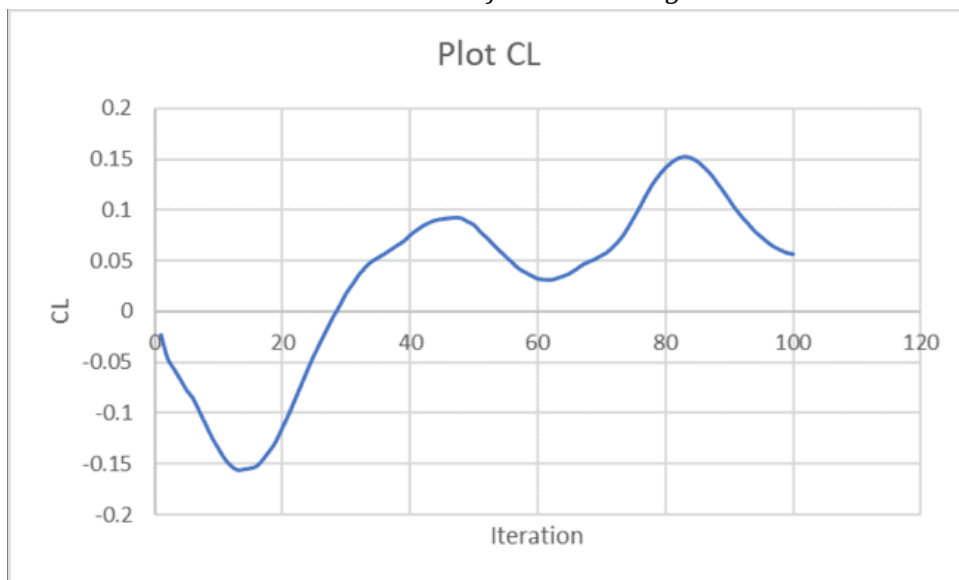
Analisis koefisien *drag* (C_D) menunjukkan bahwa perbandingan antara bus yang dilengkapi dengan perangkat *vortex generator* (SFVG) dan bus tanpa perangkat tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Dalam penelitian ini, bus tanpa SFVG mencatat nilai koefisien *drag* (C_D) yang lebih tinggi, yaitu sebesar 0.70191103. Sementara itu, bus yang dilengkapi dengan SFVG memiliki nilai C_D rata-rata sekitar 0.63794782.

Perbedaan kecil dalam nilai C_D ini menandakan bahwa pemasangan SFVG memiliki dampak yang positif dalam mengurangi gaya hambat (*drag*) yang diterima oleh bus, meskipun perbedaannya tidak besar. Artinya, SFVG mampu mengoptimalkan aliran udara di sekitar bus, sehingga mengurangi turbulensi dan hambatan udara yang terjadi. Meski demikian, perbedaan yang kecil ini juga menunjukkan bahwa ada faktor-faktor lain yang mungkin mempengaruhi hasil ini dan perlu dianalisis lebih lanjut.

Secara keseluruhan, hasil analisis ini memberikan wawasan penting bahwa SFVG dapat berperan dalam mengurangi gaya hambat pada bus, meskipun efektivitasnya mungkin bervariasi tergantung pada kondisi spesifik dan desain kendaraan. Dengan demikian, penggunaan SFVG dapat dianggap sebagai salah satu solusi potensial untuk meningkatkan efisiensi aerodinamika bus, meski diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan desain dan penerapannya agar dampak positifnya lebih terasa.

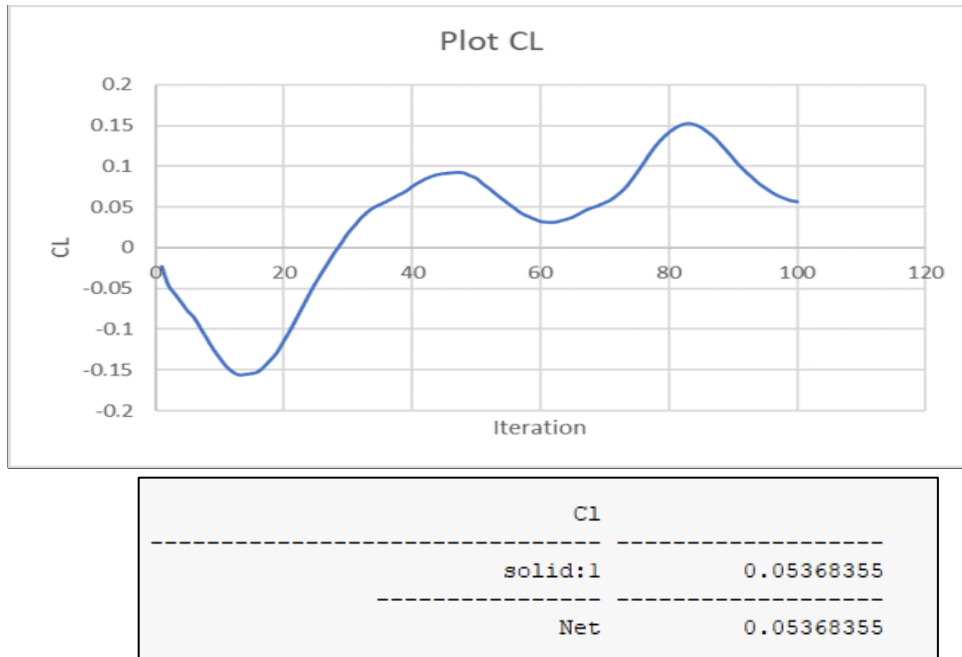
Perbandingan Koefisien Lift (C_L)

Gambar 30. Koefisien Lift Bus Vorteks generator Sebaris



CL	()
report-def-1	0.040190537

Gambar 31. Koefisien Lift Bus Tanpa Vorteks generator



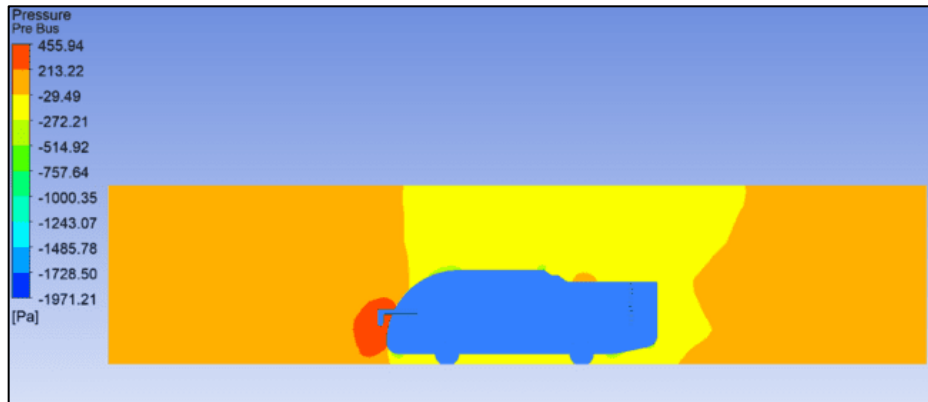
Nilai koefisien lift (C_L) yang dihasilkan oleh bus yang dilengkapi dengan perangkat *vortex generator* (SFVG) adalah sekitar 0.040190537. Ini berarti bahwa bus dengan SFVG menghasilkan gaya angkat yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan bus tanpa perangkat tersebut. Sebaliknya, bus tanpa SFVG memiliki nilai koefisien lift sekitar 0.05368355.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa pemasangan SFVG pada bus meningkatkan nilai koefisien lift. Meskipun peningkatan gaya angkat ini tidak terlalu besar, penting untuk dicatat bahwa pada kendaraan darat seperti bus, peningkatan gaya angkat bisa mempengaruhi stabilitas kendaraan. Gaya angkat yang lebih besar dapat mengurangi tekanan roda pada permukaan jalan, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi traksi dan stabilitas, terutama pada kecepatan tinggi atau dalam kondisi angin kencang.

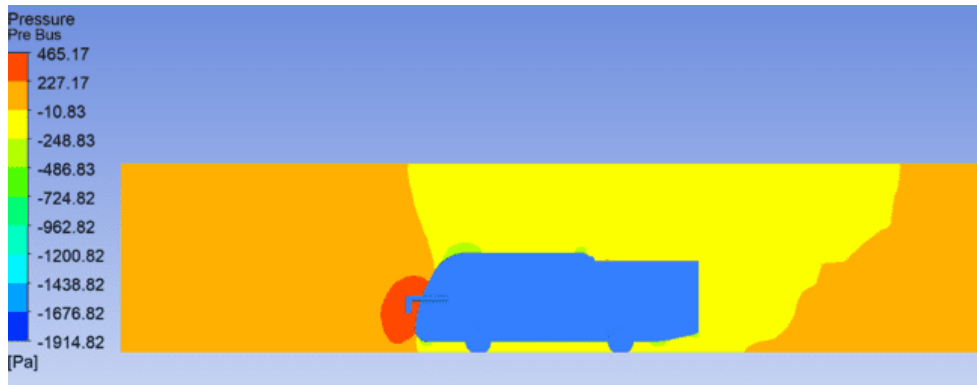
Oleh karena itu, meskipun SFVG dapat memberikan keuntungan dalam hal aerodinamika dengan mengurangi gaya hambat, peningkatan kecil dalam koefisien lift harus dipertimbangkan dengan hati-hati. Desain dan implementasi SFVG harus dioptimalkan untuk memastikan bahwa peningkatan lift tidak mengorbankan stabilitas dan keamanan kendaraan. Lebih lanjut, perlu dilakukan analisis dan pengujian tambahan untuk mengevaluasi dampak keseluruhan dari SFVG pada kinerja aerodinamika dan stabilitas bus dalam berbagai kondisi operasi.

Perbandingan Kontur Tekanan

Gambar 32. Kontur Tekanan Pada Bus *Vorteks generator* Sebaris



Gambar 33. Kontur Tekanan Pada Bus Tanpa *Vorteks generator* Sebaris



Perbandingan antara Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 menunjukkan perbedaan signifikan dalam distribusi tekanan dan aliran udara di sekitar bus, terutama terkait penggunaan *vorteks generator*.

Pada Gambar 4.26, kontur tekanan menunjukkan aliran udara melewati bus dengan tekanan sangat terkonsentrasi di bagian depan, mencapai puncak 465.17 Pa. Setelah udara melewati bagian depan, tekanan turun drastis di bagian atas dan bawah bus menjadi sekitar 10.83 Pa. Hal ini menunjukkan perbedaan tekanan yang signifikan antara bagian depan dan bagian atas serta bawah bus akibat aliran udara di sekitarnya.

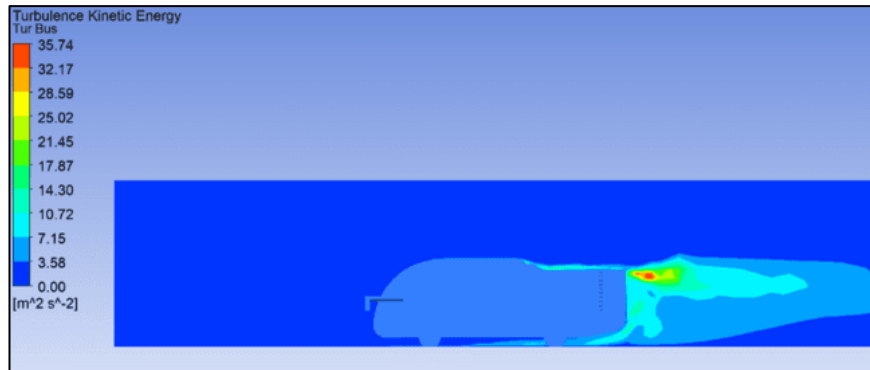
Sebaliknya, pada Gambar 4.25, kontur tekanan juga menggambarkan aliran udara melewati bus. Tekanan di bagian depan bus pada gambar ini sangat terkonsentrasi, dengan puncak mencapai 213.22 Pa. Namun, setelah udara melewati bus, tekanan turun drastis menjadi sekitar 272.21 Pa di bagian atas dan bawah bus. Ini menunjukkan perbedaan tekanan signifikan antara bagian depan dan bagian atas serta bawah bus, juga disebabkan oleh aliran udara di sekitarnya.

Dari perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *vorteks generator* pada Gambar 4.26 menghasilkan distribusi tekanan yang berbeda dibandingkan dengan bus tanpa *vorteks generator* pada Gambar 4.25. *Vorteks*

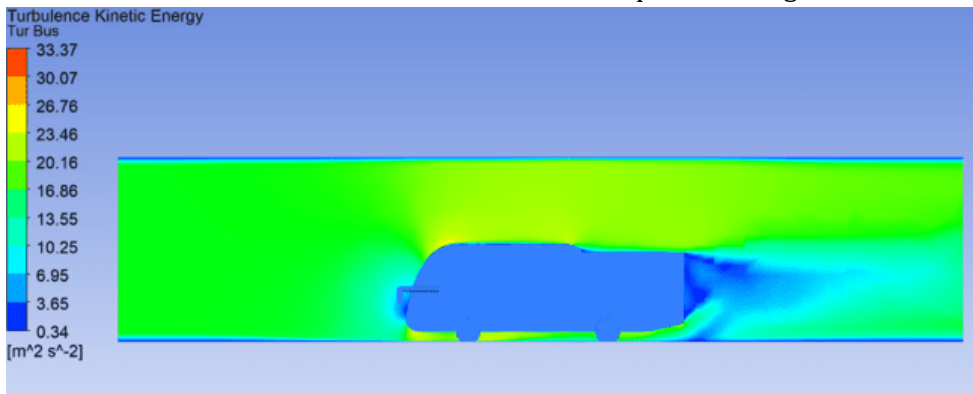
generator menyebabkan penurunan tekanan yang lebih bertahap di sepanjang sisi bus dan mempengaruhi aliran udara di sekitarnya. Ini dapat berdampak signifikan pada jumlah hambatan yang dialami oleh bus, dengan potensi untuk mengoptimalkan kinerja aerodinamis dan efisiensi energi secara keseluruhan.

Perbandingan Kontur Turbulensi

Gambar 34. Kontur Turbulensi Pada Bus *Vorteks generator* Sebaris



Gambar 35. Kontur Turbulensi Pada Bus Tanpa *Vorteks generator* Sebaris



Pada kontur turbulensi antara bus dengan *vorteks generator* sebaris dan tanpa *vorteks generator*, terlihat bahwa tidak ada perbedaan signifikan ketika udara melewati bus dan menghasilkan turbulensi di bagian belakangnya. Analisis visual menunjukkan bahwa pola turbulensi yang terbentuk di belakang kedua jenis bus tersebut cenderung serupa, tanpa perbedaan mencolok dalam pola atau intensitas turbulensi.

Namun, hal ini tidak mengurangi pentingnya mempertimbangkan potensi perbedaan yang mungkin timbul akibat penggunaan *vorteks generator* sebaris terhadap turbulensi secara keseluruhan. Meskipun analisis ini tidak menunjukkan perbedaan signifikan, ada kemungkinan bahwa *vorteks generator* dapat memberikan dampak lebih besar pada kondisi aliran udara yang lebih spesifik atau dalam situasi pengujian yang berbeda.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi pemodelan numerik penempatan *vorteks generator* dengan susunan sebaris pada dinding kiri dan kanan bus penumpang dan bus tanpa *vorteks generator*:

Tabel 2. hasil simulasi pemodelan numerik penempatan *vorteks generator* dengan susunan sebaris pada dinding kiri dan kanan bus penumpang dan bus tanpa *vorteks generator*

MODEL BUS	Kecepatan (km/h)	C_D	C_L	Tekanan (Pa)
Bus Vorteks Generator Sebaris	50.23	0.63794782	0.040190537	213.22
Bus Tanpa Vorteks Generator	49.83	0.70191103	0.05368355	465.17

1. Kecepatan pada bus

Analisis kontur kecepatan udara di sekitar bus dengan dan tanpa *vorteks generator* sebaris menunjukkan bahwa penggunaan *vorteks generator* sebaris secara signifikan mengoptimalkan aliran udara di sekitar bus. Visualisasi kontur kecepatan menunjukkan kecepatan udara lebih tinggi 50.23 km/h pada bus dengan *vorteks generator* sebaris, dibandingkan dengan 49.83 km/h pada bus tanpa *vorteks generator*, mengindikasikan pengurangan hambatan aerodinamis.

2. Koefisien Drag (C_D)

Analisis koefisien *drag* (C_D) menunjukkan bahwa perbedaan antara bus dengan *vortex generator* sebaris dan bus tanpa *vortex generator* tidak jauh berbeda. Bus dengan *vortex generator* sebaris memiliki nilai (C_D) yang lebih rendah, yaitu 0.63794782, dibandingkan dengan bus tanpa *vortex generator* yang memiliki nilai rata-rata sekitar 0.70191103. Meskipun perbedaannya kecil, ini menunjukkan bahwa *vortex generator* sebaris memiliki potensi untuk mengurangi gaya hambat yang diterima oleh bus.

3. Koefisien Lift (C_L)

Analisis koefisien *lift* (C_L) menunjukkan perbedaan kecil antara bus dengan *vortex generator* sebaris dan bus tanpa *vortex generator*. Nilai koefisien *lift* pada bus dengan *vortex generator* sebaris sekitar 0.040190537, sedangkan pada bus tanpa *vortex generator* sekitar 0.05368355.

4. Tekanan pada bus

Perbandingan tekanan menunjukkan perbedaan dalam distribusi tekanan dan aliran udara di sekitar bus, terutama terkait penggunaan *vorteks generator*. Kontur tekanan pada bus dengan *vorteks generator* sebaris menunjukkan aliran udara dengan tekanan sangat terkonsentrasi di bagian depan bus, mencapai puncak 213.22 Pa. Sebaliknya, pada bus tanpa *vorteks generator*, kontur tekanan juga menunjukkan aliran udara dengan tekanan puncak 465.17 Pa di bagian depan bus.

Secara keseluruhan, penggunaan *vortex generator* sebaris pada bus menunjukkan potensi dalam mengoptimalkan aliran udara dan mengurangi hambatan aerodinamis, meskipun dampaknya pada koefisien *drag* dan *lift* relatif kecil. Perbedaan dalam distribusi tekanan juga mengindikasikan perubahan dalam aliran udara di sekitar bus.

DAFTAR PUSTAKA

- Bayındırlı, C. and Çelik, M. (2020) *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* The determination of effect of windshield inclination angle on drag coefficient of a bus model by CFD method. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaet>.
- Fluid Mechanics 7th Edition*. New York: McGraw-Hill. (2009).
- 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>.
- Guerrero, A., Castilla, R. and Eid, G. (2022) 'A Numerical Aerodynamic Analysis on the Effect of Rear Underbody Diffusers on Road Cars', *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(8). Available at: <https://doi.org/10.3390/app12083763>.
- Kadarisman, M., Gunawan, A. and Trisakti, S. (2015) 'Implementasi Kebijakan Sistem Transportasi Darat dan Dampaknya terhadap Kesejahteraan Sosial di Jakarta Policy Implementatation Of Land Transportation System and Its Impact Towards Social Welfare In Jakarta', *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik (JMTransLog)*, 02(01).
- Kompas. (2024, Mei). *Jumlah Kendaraan di Indonesia 147 Juta Unit, 87 Persen Motor*. Diambil kembali dari Kompas: <https://otomotif.kompas.com/read/2023/02/10/070200315/jumlah-kendaraan-di-indonesia-147-juta-unit-87-persen-motor>
- Ludwig Prandtl's Boundary Layer* (2005). Available at: <http://www.physicstoday.org>.
- Okiishi, M. and Rothmayer, H. (2013) *Fundamentals of Fluid Mechanics 7th Edition*.
- OTODRIVER.com. (2024, Mei). *Inilah Jumlah Kendaraan Di Indonesia Dua Bulan Pertama 2024*. Diambil kembali dari OTODRIVER.com: <https://otodriver.com/berita/2024/inilah-jumlah-kendaraan-di-indonesia-dua-bulan-pertama-2024-iniddjba024>
- Pritchard Fluid Mechanics. *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics 8th Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.(2011).
- Statistik Transportasi Darat (2021).
- 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>.