

Studi Numerik Karakteristik Aliran Bagian *Rear-End* Bus Penumpang dengan Variasi Sudut *Diffuser*

Mutiara Nuril Karomah dan Wawan Aries Widodo

Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: wawanaries@me.its.ac.id

Abstrak—Penambahan *diffuser* pada bagian rear end bus penumpang adalah salah satu cara untuk mengurangi gaya aerodinamik yang terbentuk. Parameter *diffuser*, seperti sudut *diffuser* akan sangat berpengaruh terhadap aliran di bawah bodi dan *wake* yang terjadi. Pada sudut 0 derajat, intensitas vortisitas pada daerah rear end sangat besar, dikarenakan aliran seolah tiba-tiba terlepas dari sempitnya gap antara jalan dengan bus. Sedangkan, dengan penambahan *diffuser* aliran cenderung akan melewati bagian bawah sesuai dengan kontur bodi yang dapat mengurangi tekanan pada daerah tersebut. *Diffuser* merupakan suatu bentuk saluran tertutup yang mengalami pembesaran luas penampang melintang searah dengan lintasan aliran utama. Bodi 3-dimensi yang diteliti mempunyai variasi sudut *diffuser* sebesar 0°, 6°, 12°, dan 18°. Pemodelan numerik ini menggunakan software FLUENT 6.3.26 yang digunakan untuk memvisualisasikan karakteristik aliran yang ditunjukkan dengan data kuantitatif berupa *pressure coefficient* (C_p), *drag coefficient* (C_d), dan *lift coefficient* (C_l). Sedangkan data kualitatif yang diperoleh berupa *velocity pathline*, kontur tekanan, dan vektor kecepatan. Pemodelan ini dibangun dengan menggunakan 3D-unsteady dan model turbulensi *k-realizable* untuk *Reynold number* sebesar $18,4 \times 10^6$ berdasarkan kecepatan alir masuk dan panjang model. Hasil yang diperoleh menunjukkan dengan kenaikan sudut *diffuser* diperoleh penurunan C_l yang cukup signifikan. Sedangkan pada C_d mengalami penurunan yang sama namun pada sudut 18°, nilai C_d justru mengalami kenaikan.

Kata Kunci—bus, *diffuser*, pemodelan 3D, rear end, *wake*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan zaman dan teknologi menuntut manusia untuk selalu dinamis. Penggunaan transportasi menjadi solusi kongkrit untuk mendukung peningkatan mobilitas manusia. Sampai saat ini, penggunaan alat transportasi umum khususnya bus, masih menjadi alternatif kendaraan yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Dan hal ini diiringi pula dengan isu global mengenai krisis energi berbahan bakar fosil yang melanda dunia. Pertumbuhan akan transportasi mengakibatkan pula peningkatan kebutuhan akan energi. Dalam BP *Statistical Review of World Energy* dilaporkan bahwa pengonsumsi minyak terbesar dengan 40,1% dari total adalah dari sektor transportasi [1]. Telah diketahui bahwa dengan pengurangan gaya drag sebesar 10% dapat mengurangi 5% dari konsumsi bahan bakar suatu bus pada kecepatan tertentu [2]. Dengan begitu, pemerintah dan masyarakat dapat menghemat dana sekitar 11,7 triliun per tahun hanya dengan pengurangan 5% dari total konsumsi energi bahan bakar.

Aerodinamika suatu kendaraan menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kenaikan konsumsi bahan bakar dan polusi terhadap lingkungan. Oleh karena itu, banyak sekali penelitian yang telah dilakukan terhadap alat transportasi khususnya transportasi darat baik studi numerik maupun eksperimen. Salah satunya adalah *Ahmed body*, penyederhanaan dari bentuk kendaraan yang dilakukan oleh Ahmed dkk [3]. Medan aliran di daerah *wake* ditunjukkan dengan vorteks berbentuk tapal kuda. Struktur aliran dari bus dengan bentuk rectangular juga diteliti secara eksperimen oleh Gurlek dkk [4] menggunakan PIV model. *Attach flow* secara jelas terlihat pada bagian atas sisi depan bodi yang berbentuk radius. Pada daerah *wake* sisi downstream terbentuk *reverse flow*, panjangnya mencapai 0,92 kali dari ketinggian model.

Medan aliran di sepanjang kendaraan juga dilakukan secara numerik menggunakan CFD dengan pemodelan turbulensi. Krajnovic dan Davidson [5] menganalisa aliran pada sebuah pemodelan bus menggunakan *large-eddy simulation* (LES). Hasil yang mereka dapat diverifikasi dengan hasil eksperimen penelitian sebelumnya. Didapat pada $Re = 2.1 \times 10^5$ (berdasarkan tinggi model dan kecepatan masuk aliran), aliran yang dihasilkan beserta gaya aerodinamiknya relevan pada *Reynold Number* yang tinggi.

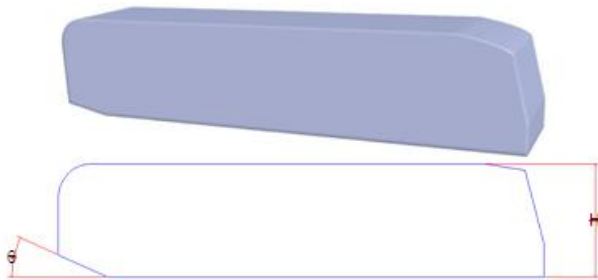
Beberapa kajian telah dilakukan yang berkonsentrasi pada bagian bawah kendaraan, yaitu dengan penambahan *diffuser*. *Diffuser* merupakan suatu bentuk saluran tertutup yang mengalami pembesaran luas penampang melintang searah dengan lintasan aliran utama. Xingjun dkk [6] telah mengkaji konsep aliran 3D pada aerodinamika suatu mobil sedan dengan menggunakan teknik CFD dan uji eksperimen di terowongan angin. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara variasi sudut *diffuser* ujung belakang () terhadap gaya *drag* dan *lift* serta kontur tekanan yang dihasilkan pada bagian rear-end. Didapatkan bahwa koefisien lift (C_L) berkurang seiring dengan penambahan sudut difuser ujung belakang (). Sedang koefisien dragnya mengalami penurunan sampai sudut 6° kemudian meningkat kembali pada sudut 9,8° dan 10°. Konsentrasi penelitian dengan hal yang sama juga dilakukan oleh Hucho dkk [7]. Semakin kecil sudut *inklinasi* ujung belakang () maka semakin kecil koefisien dari gaya hambat belakang (C_{D_R}), gaya angkat depan (C_{L_F}) dan gaya angkat belakang (C_{L_R}). Dan semakin besar sudut *diffuser* bawah () pada bodi belakang, maka semakin kecil koefisien gaya angkat belakang (C_{L_R}).

Struktur aliran ketika melewati geometri bodi yang kompleks belum cukup bila karakteristiknya dideskripsikan hanya menggunakan analisa 2D. Pada bodi kendaraan, analisa aliran 3D dirasa perlu digunakan saat aliran tersebut menerima banyak gangguan. Gangguan tersebut biasa terjadi pada aliran yang melewati dua benda yang saling berdekatan yaitu pada gap antara bodi bawah dengan jalan. Interaksi antar lapis batas tersebut membuat terjadinya *vortisitas sekunder* yang akan memunculkan aliran sekunder. Fenomena ini terjadi ketika terjadi interferensi antara *boundary layer* bodi kendaraan dengan *boundary layer* jalan. Untuk itulah, kajian mengenai analisa aliran secara 3D ini sangat penting pada sebuah kendaraan.

Berdasarkan dari beberapa penelitian dan fenomena diatas, perancangan modifikasi bus merupakan suatu langkah strategis untuk meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar. Penambahan *diffuser* dilakukan untuk mengetahui interaksi aliran yang terjadi pada kendaraan tersebut.

II. METODE PENELITIAN

Kajian numerik dengan *software Fluent 6.3.26* digunakan untuk menghasilkan visualisasi dan pengukuran yang detail mengenai karakteristik aliran melintasi bodi bus. Sedang geometri bus yang digunakan adalah mengacu pada geometri City Trolleybus SOR TNB 12, seperti yang tertera di bawah ini:

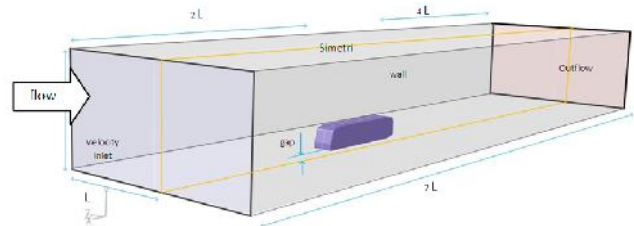


Gambar 1. Geometri Bus

Tabel 1. Dimensi bodi passenger bus

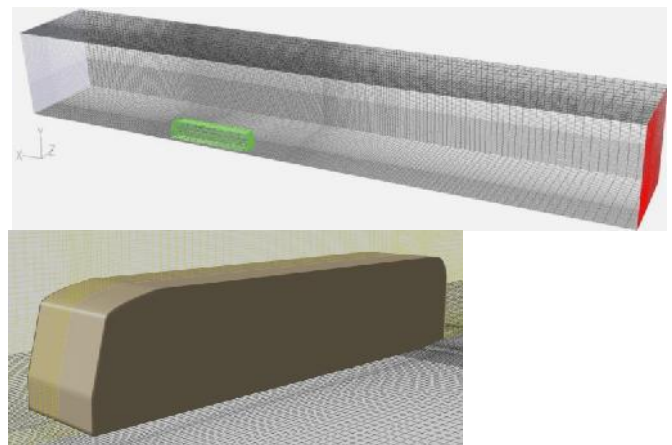
Bodi Bus	
Parameter	Dimensi (mm)
<i>L</i>	12180
<i>W</i>	2550
<i>H</i>	3400
<i>α</i>	0°, 6°, 12°, 18°
<i>C</i>	330

Sedangkan domain yang digunakan pada pemodelan ini menggunakan referensi dari Nicholas dkk [8] dengan ukuran *upstream* 2*L*, *downstream* 4*L*, lebar dan tinggi domain masing-masing sebesar *L* dan 2*L*, yaitu:



Gambar 2. Domain dari pemodelan 3D yang digunakan

Dengan kondisi batas *inlet* adalah *velocity inlet*, *outlet* adalah *outflow*, dinding *wind tunnel* dan bus dikondisikan sebagai *wall*, dan pada bagian *midspan* menggunakan *symmetry plane*.



Gambar 3. Bentuk meshing pemodelan 3D

Meshing yang digunakan adalah *hexahedral map* yang dinilai lebih akurat untuk memvisualisasikan aliran yang terbentuk. Empat buah *mesh* dengan jumlah *faces* yang berbeda, dari rapat sampai yang renggang divariasikan untuk mendapatkan grid independensi.

Model turbulensi yang digunakan adalah *k-epsilon realizable* dengan metode diskritisasi *second order upwind*. Sedangkan kecepatan alir masuk udara sebesar 25 m/s.

III. HASIL DAN DISKUSI

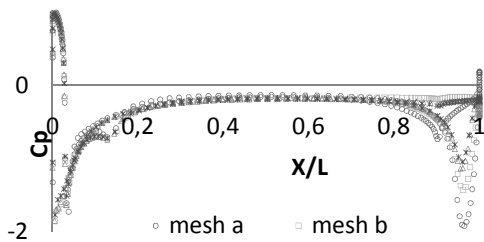
Pada bab ini dijelaskan hasil dan analisa dari pemodelan yang telah digunakan. Baik berupa data kuantitatif maupun kualitatif.

1. Analisa Grid Independensi

Dalam studi numerik ini diperlukan keakuratan data baik pada langkah *post processing* maupun *pre processing*nya. Untuk itu diperlukan langkah grid independensi untuk menentukan tingkat serta struktur grid terbaik agar hasil pemodelan mendekati sebenarnya.

Tabel 2. Analisa Grid independensi

Mesh	Faces	<i>C_p</i>	Error
A	3546857	-0.73402	
B	2745704	-0.18801	74.39%
C	2371189	-0.25911	37.82%
D	1495032	-0.28088	8.40%

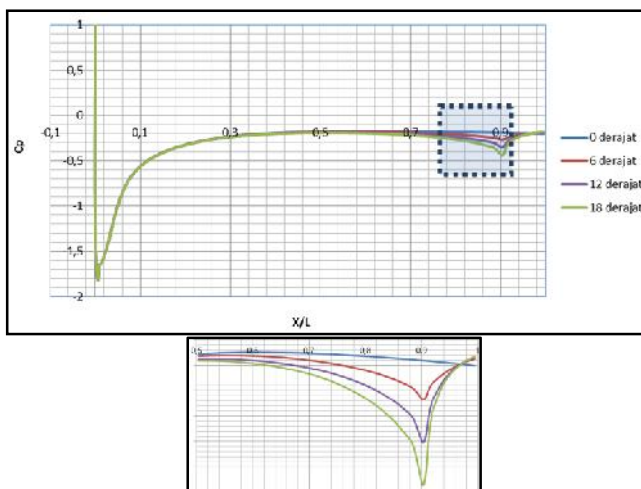


Gambar 4. Grafik analisa grid independensi

Tabel 2 menunjukkan variasi jumlah *meshing* pada model uji dengan pemodelan 3D. Meshing D merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *faces* 1495032, sedangkan *meshing* A adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *faces* 3546857. Gambar 4 di atas adalah grafik $C_p = f(x/l)$, hasil dari solusi numerik dengan perlakuan aliran yang sama. Dapat dilihat bahwa pada *mesh* C dan D dengan variasi *meshing* yang berbeda, ternyata menghasilkan grafik C_p yang hampir sama. Begitu juga dari data error yang dihasilkan, bahwa error D yang dihasilkan menunjukkan nilai yang terkecil. Jadi dapat disimpulkan variasi *meshing* C dan D, dengan *mesh* yang berbeda tersebut ternyata memiliki tingkat *grid independence* yang dilakukan oleh solusi secara numerik. Yaitu, akurasi harga yang sudah tidak tergantung lagi dengan kerapatan mesh. Selanjutnya akan digunakan variasi *meshing* B untuk melakukan solusi numerik pada pemodelan *fluent*. Karena dengan jumlah *face* yang lebih sedikit dari *meshing* D sudah dapat menghasilkan nilai C_p yang relatif sama dengan penambahan jumlah *face* yang lebih rapat.

2. Perbandingan aliran 3 dimensi bodi tanpa *diffuser* dan dengan variasi *diffuser*

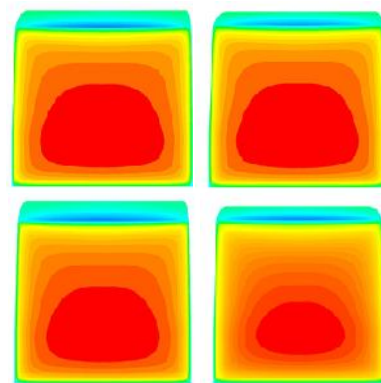
Karakteristik aliran yang melintasi masing-masing bodi dapat dibandingkan melalui analisa grafik C_p pada bodi. Dengan profil bus yang tidak berubah memungkinkan adanya kemiripan data C_p yang dihasilkan dari bagian *upperside*, sehingga pada bagian ini hanya dibahas perbandingan C_p pada bagian *lowside*. Berikut ini adalah grafik C_p untuk *lowside* segmen *midspan* pada masing-masing variasi.



Gambar 5. Grafik distribusi C_p di *upperside* midspan bodi standar dan modifikasi (3D-flow)

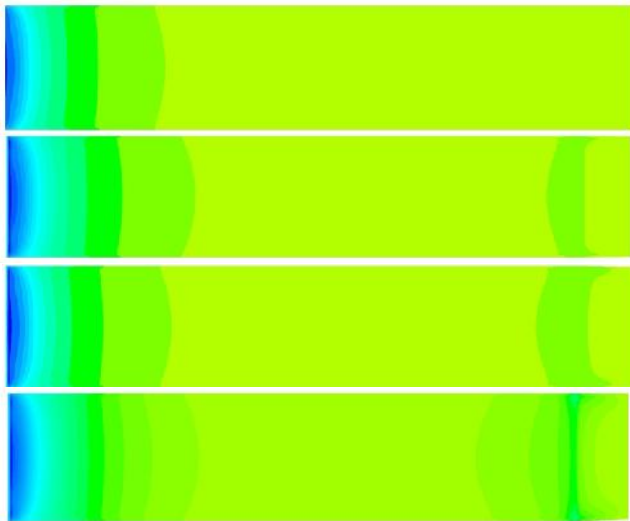
Dari grafik di atas menunjukkan bahwa bentuk *lowside* bodi yang sama pada masing-masing variasi tidak memberikan perubahan pada nilai C_p . Keempat grafik di atas terlihat identik pada masing-masing posisi. Karena pada bagian tersebut bodi tidak mengalami modifikasi geometri. Perbedaan terjadi saat aliran mulai melewati daerah *diffuser* pada daerah $x/l = 0.902$. Bentuk *diffuser* membuat aliran cenderung melewati bagian bawah sesuai dengan kontur bodi dan secara bersamaan aliran akan mengalami kenaikan tekanan lebih cepat dari bodi yang tanpa *diffuser*.

Untuk mempertegas adanya perbedaan tekanan antara bodi standar dan bodi modifikasi di bagian *leading edge* dan *rear end* diperlukan visualisasi tampilan kontur tekanan pada bagian tersebut. Berikut ini adalah tampilan kontur tekanan pada *leading edge* dan *rear end* pada masing-masing bodi.



Gambar 6. Perbandingan kontur tekanan pada *leading edge* dengan variasi sudut 0°, 6°, 12°, dan 18° (dari kiri ke kanan)

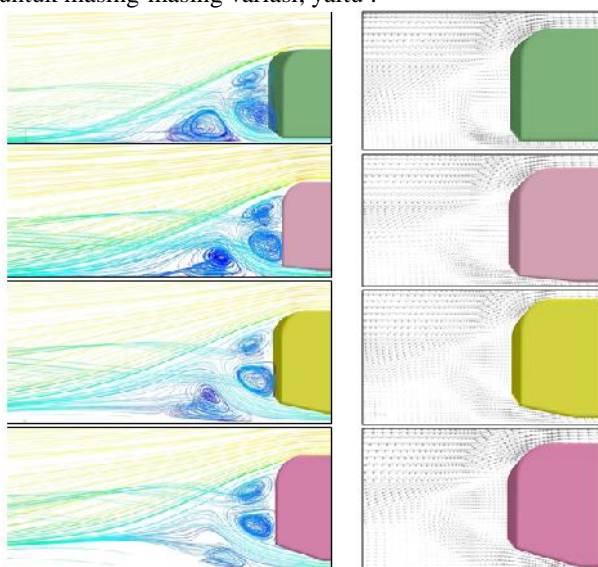
Dari gambar 6 dapat dijelaskan bahwa luasan berwarna merah merupakan daerah yang bertekanan tinggi karena terjadi adanya *multi stagnation* di daerah tersebut. Dari gambar tersebut terlihat luasan berwarna merah pada masing-masing bodi tidak jauh berbeda karena memang bentuk modifikasi tidak dilakukan di daerah tersebut. Modifikasi hanya dilakukan pada daerah *diffuser* saja. Namun, seperti kita lihat di atas bahwa area tekanan tinggi pada masing-masing variasi di daerah *leading edge* memperlihatkan adanya distribusi tekanan yang berbeda pada masing-masing bodi. Dengan semakin besarnya sudut *diffuser*, area bertekanan tinggi pada *leading edge* semakin berkurang. Hal itu menunjukkan bahwa aliran lebih mudah dan lebih cepat bergerak menuju bagian belakang bodi karena adanya *diffuser* membuat peluang aliran mengalir di bagian rear-end lebih mudah karena adanya perluasan area disana. Dari analisa pada kontur tekanan pada *leading edge* di atas, dapat dikatakan bahwa semakin besar sudut bukaan *diffuser*, semakin besar pula area bertekanan tinggi pada *leading edge*.



Gambar 7. Perbandingan kontur tekanan pada upserside dengan variasi sudut 0°, 6°, 12°, dan 18° (dari atas ke bawah)

Sedangkan pada daerah rear end terlihat pula distribusi tekanan yang berbeda, di mana bentuk rear end pada sudut 0 derajat memberikan distribusi tekanan yang uniform. Sedang saat bodi sudah mengalami perubahan sudut *diffuser*, mulai terjadi perbedaan tekanan pada bagian *diffuser*nya. Terlihat bahwa pada sudut 18 derajat menunjukkan luasan tekanan yang paling rendah diantara sudut lainnya. Dan bisa dikatakan bahwa dengan bertambahnya sudut *diffuser* maka luasan tekanan di bagian upserside lebih rendah dikarenakan aliran yang melewati *diffuser* seolah-olah terlepas ke ruang yang lebih lebar dibanding saat melewati celah sempit pada ground Clearance.

Untuk meninjau daerah *wake* yang dihasilkan pada masing-masing variasi, memang perlu visualisasi yang lebih dalam, agar terlihat perbedaan karakteristik aliran yang terjadi. Oleh karena itu, pada gambar berikut ini dijelaskan fenomena *velocity pathline* dan *velocity contour* pada daerah midspan untuk masing-masing variasi, yaitu :



Gambar 8. Perbandingan fenomena daerah midspan dengan variasi sudut 0°, 6°, 12°, dan 18° (dari kiri ke kanan) a) *velocity pathline* b) *velocity contour*

Wake adalah daerah bertekanan rendah karena adanya defisit momentum akibat separasi. Dan umumnya *wake* dapat ditemui di daerah belakang dari bodi. Pada perbandingan tampilan di atas, dapat ditunjukkan adanya perbedaan yang mencolok pada daerah *wake*. Yaitu intensitas turbulensi yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya sudut *diffuser*. Hal ini terlihat dari jumlah spiral vorteks yang ditandai dengan warna biru tua yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya sudut *diffuser*. Juga adanya perbedaan aliran yang terdefleksi ke atas seiring dengan bertambahnya sudut *diffuser*. Hal itu terjadi karena aliran yang mengalir di bawah bodi ketika melewati *diffuser* akan menyebar sebanding dengan luasan yang dilawatinya.

3. Perhitungan gaya aerodinamika

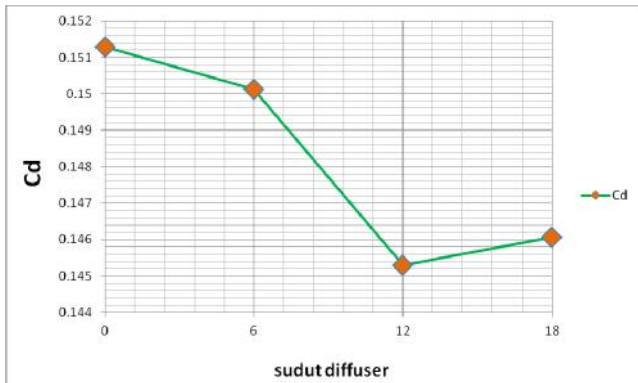
Analisa mengenai data kuantitatif berupa gaya-gaya aerodinamika diperlukan untuk penunjang sekaligus menyimpulkan dari beberapa fenomena yang disajikan pada data kualitatif di atas. Berikut ini akan dijelaskan mengenai perhitungan gaya-gaya aerodinamika seperti *drag* dan *lift* yang terjadi pada bodi.

i. Perhitungan Gaya Drag

Perhitungan gaya *drag* pada bodi bus pada pemodelan 3D didasarkan pada *Cd history* yang dihasilkan dari solusi numerik *software Fluent 6.3.26*. Yang kemudian di rata-rata dan menghasilkan suatu nilai berupa *Cd*.

Dari pemodelan *Cp* ke arah midspan di atas pada masing-masing bodi didapatkan grafik yang hampir sama satu sama lain. Sekiranya dengan grafik *Cp* yang dihasilkan di daerah midspan dapat menjadi acuan gaya-gaya yang terjadi. Efek *sidebody* sangat memberikan kontribusi dalam hal distribusi tekanan sepanjang *midspan*. Distribusi aliran di mulai dari *leading edge* kemudian sebagian aliran terdefleksi sangat kuat ke *sidebody* akibat bentuk *leadng edge* yang memiliki radius. Hal inilah yang membuat tekanan pada *leading edge* sangat tinggi. Adanya pengaruh gaya gesek dan perubahan bentuk geometri sepanjang kontur bodi turut menyumbang terbentuknya daerah *wake* di *downstream*. *Wake* yang terbentuk di *downstream* merupakan akumulasi dari *adverse pressure gradient* yang terbentuk dari inklinasi ujung belakang dan bagian bawah belakang kendaraan serta efek *sidebody*. Adanya gaya *drag* dari pemodelan 3D lebih disebabkan karena terbentuknya komponen vortisitas tidak hanya kearah *x* dan *y*, namun juga kearah *z* akibat kontraksi aliran dari efek *sidebody*.

Pada prinsipnya gaya *drag* yang dihasilkan oleh bodi dipengaruhi oleh akumulasi *pressure drag* dan *friction drag*. *Pressure drag* sebagai akibat dari tekanan yang dihasilkan oleh aliran ketika melewati bodi. Dan *friction drag* karena adanya pengaruh gesekan bodi dengan udara. Dari perhitungan *drag* yang digunakan pada penelitian ini, sesungguhnya adalah akumulasi dari *pressure drag* dan *friction drag* yang menghambat bodi secara 3D. Oleh karena itu fenomena *Cp* midspan pada pembahasan sebelumnya belum bisa memberikan pengaruh yang jelas terhadap karakteristik dari *Cd* yang dihasilkan.

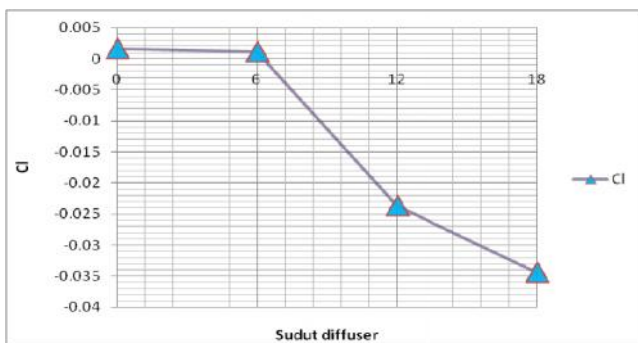


Gambar 9. Grafik Cd pada masing-masing variasi sudut

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya sudut *diffuser* yang diberikan maka semakin berkurang nilai koefisien *drag* yang dihasilkan. Hal ini membuktikan bahwa dengan modifikasi yang sudah dilakukan di daerah *rear end* mampu mengurangi gaya hambat aerodinamik berupa *drag*. Namun pada sudut 18 derajat terjadi kenaikan *Cd*, hal itu terjadi karena perbedaan tekanan yang dihasilkan di upstream dan downstream sangat besar.

ii. Perhitungan Gaya Lift

Perhitungan gaya *lift* pada bodi bus pada pemodelan 3D didasarkan pada *Cd history* yang dihasilkan dari solusi numerik *software Fluent 6.3.26*. Yang kemudian di rata-rata dan menghasilkan suatu nilai berupa *Cl*.



Gambar 10. Grafik Cl pada masing-masing variasi sudut

Dari pemodelan 3D pada bodi bus didapatkan karakteristik distribusi tekanan pada daerah *midspan* yang sekiranya bisa menjadi acuan terjadinya gaya-gaya. Semakin besar sudut yang diberikan maka grafik *Cl* yang dihasilkan menghasilkan gradient yang turun. Dan dari grafik di atas terlihat bahwa dengan modifikasi sudut yang dilakukan mampu merubah gaya hambat aerodinamik semakin turun.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari simulasi pemodelan 3-D bus penumpang dengan variasi sudut *diffuser*, adalah :

1. Grafik *Cp* pada keempat variasi menunjukkan hasil yang hampir sama, hanya pada bagian *diffuser* menunjukkan hasil yang berbeda. Semakin besar sudut *diffuser* yang diberikan, menghasilkan penurunan *Cp* yang semakin besar, hal itu menunjukkan adanya perlambatan aliran karena perubahan luas penampang yang semakin besar.

2. *Multi stagnation point* yang berada di bagian *leading edge* memberikan tekanan yang paling besar ketika sudut *diffuser* 0 derajat dan dengan semakin bertambah sudutnya semakin kecil area luasan yang terjadi. Sedang pada daerah *wake* dengan bertambahnya sudut *diffuser* *wake* yang terjadi semakin kecil.
3. Gaya *drag* berkurang seiring dengan bertambahnya sudut *diffuser*. Sedangkan gaya *lift* mengalami penurunan dengan bertambahnya sudut *diffuser*, namun pada pada sudut 18 derajat *Cl* justru mengalami kenaikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis M.N.K. mengucapkan terima kasih kepada Bapak Wawan Aries Widodo, selaku dosen pembimbing penulis. Dan kepada orangtua serta kakak-kakak penulis yang telah mendukung semua kegiatan penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dharmadi Budi. *BPS Kementerian Perindustrian*. Jakarta, Indonesia, (2010).
- [2] Hucho W.H., *Aerodynamics of Road VehiCles*, SAE International Press, (1998).
- [3] Ahmed S.R., G. Ramm, G. Faltin, *Some salient features of the time averaged ground vehiCle wake*, SAE Paper 840300, (1984).
- [4] C. Gurlek, B. Sahin, C. Ozalp, H. Akilli, *Flow structures around a three dimensional rectangular body with ground effect*, Wind Struct. Int. J. 11 (5) (2008) 345–359.
- [5] Krajnovic, `S., L. Davidson, *Numerical study of the flow around a bus-shaped body*, ASME J. Fluids Eng. 125 (2003) 500–509.
- [6] Xingjun HU, dkk. *Influence of different diffuser angle on Sedan’s aerodynamic characteristics*. International Conference on Physics Science and Technology, (2011).
- [7] Hucho, W.H., Janssen, L.J., and Emmelmann, H.J. *The optimization of body details a method for reducing the aerodynamic drag of road vehiCle*, SAE Journal, 760185. Germany, (1975).
- [8] Nicholas J, Mulvany, Chen, Li, Tu, Jiyuan, and Anderson, Brendon.. *Steady State Evaluation of ‘Two-Equation’ RANS Turbulence Models Simulation for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow*. DSTO Platform Division, Australia, (2004).