

TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
UDARA MELEWATI MODEL WIDYA WAHANA V
PADA BAGIAN *UNDERBODY***

AUFAR NUGRAHA
NRP 2110 100 162

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ing. Ir. Herman Sasongko
NIP. 19601004 1986 011 001

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
UDARA MELEWATI MODEL WIDYA WAHANA V
PADA BAGIAN *UNDERBODY***

AUFAR NUGRAHA
NRP. 2110 100 162

Pembimbing:
Prof.Dr.Ing.Ir.Herman Sasongko
NIP. 19601004 1986 011 001

PROGRAM STUDI SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



FINAL PROJECT – TM141585

**3 DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS FLOW IN
WIDYA WAHANA V UNDERBODY**

AUFAR NUGRAHA
NRP. 2110 100 162

Faculty Advisor
Prof.Dr.Ing.Ir.Herman Sasongko
NIP. 19601004 1986 011 001

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN UDARA
MELEWATI MODEL WIDYA WAHANA V PADA
BAGIAN UNDERBODY**

TUGAS AKHIR

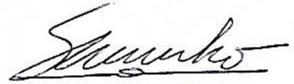
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AUFAR NUGRAHA
NRP. 2110 100 162

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ing. HERMAN SASONGKO
(NIP. 196010041986011001)



.....
(Pembimbing)

2. Prof. Dr. Ir. SUTARDI, M.Eng
(NIP. 196412281990031002)

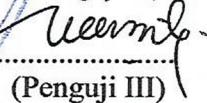


.....
(Penguji I)

3. Dr. WAWAN ARIES WIDODO, ST.MT
(NIP. 197104051997021001)

.....
(Penguji II)

4. Dr. Ir. HERU MIRMANTO
(NIP. 196202161995121001)



.....
(Penguji III)

**SURABAYA
NOVEMBER, 2016**

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN UDARA MELEWATI MODEL WIDYA WAHANA V PADA BAGIAN UNDERBODY

Nama Mahasiswa : Afar Nugraha
NRP : 2110 100 162
Jurusan : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing: Prof.Dr.Ing.Ir.Herman Sasongko

ABSTRAK

Widya wahana V merupakan mobil listrik bertenaga surya yang dibuat oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Seperti pada mobil listrik bertenaga surya lainnya, Widya Wahana V dilengkapi dengan sel surya yang dapat menghasilkan energi listrik untuk menjalankan Brush Less DC Motor. Namun mobil bertenaga surya saat ini masih jauh untuk dikatakan sempurna. Pada penelitian ini akan dikaji mengenai pengaruh faktor aerodynamic khususnya pada bagian underbody dari mobil untuk mengoptimasi keterbatasan energi yang dimiliki oleh mobil bertenaga surya.

Penelitian ini dilakukan dengan pengujian simulasi numerik 3D. Benda uji yang digunakan berupa model mobil Widya Wahana V. Dengan melakukan variasi ground clearance, bentuk tunnel, bentuk leading edge, dan lebar diffuser. Data pertama yang didapatkan berupa coefficient pressure pada setiap model uji. Data kedua yang didapatkan berupa coefficient drag dan coefficient lift pada setiap model uji. Selanjutnya observasi detail medan aliran dilakukan dengan menampilkan data velocity vector, pathlines, dan velocity magnitude, untuk memberi gambaran yang lebih lengkap mengenai fenomena-fenomena aerodynamic pada mobil. Simulasi numerik menggunakan software Fluent 15.0, kondisi komputasi domain di upstream $2L$, downstream $4L$, lebar $2L$, tinggi $2L$; model turbulensi $k-\epsilon$ realizable; dan convection term second-order upwind. Konfigurasi uji diberlakukan dengan $C/L = 0.027$ dan 0.045 , $Re = 4.74 \times 10^6$, boundary condition untuk outlet adalah

outflow dan untuk inlet adalah velocity inlet sebesar 16.67 m/s; densitas (ρ) = 1.1839 kg/m³; viskositas (μ) = 1.8714 x 10⁻⁵ kg/m.s.

Hasil penelitian ini didapatkan bahwa penambahan ruang laluan udara pada mobil Widya Wahana V type B dengan bentuk constant area tunnel terbukti memiliki nilai CD dan CL yang paling baik jika dibandingkan dengan konfigurasi uji lain. Dimana nilai CD yang didapatkan adalah 0.23 dan nilai CL yang didapatkan adalah -0.49.

Kata kunci : Widya Wahana V , tunnel, ground clearance

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN UDARA MELEWATI MODEL WIDYA WAHANA V PADA BAGIAN UNDERBODY

Nama Mahasiswa : Aufar Nugraha
NRP : 2110 100 162
Jurusan : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing: Prof.Dr.Ing.Ir.Herman Sasongko

ABSTRACT

Widya wahana V is an electric car with solar powered made by Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Like other electric car with solar powered, Widya Wahana V equipped with solar cell which can produced electric energy to start Brush Less DC Motor. But currently solar powered car still very far from perfect. In this research will examined about the influence of aerodynamic factor especially in underbody parts of car for optimization the limit of energy owned by a solar powered car.

This research do with numerical simulation 3D test. The specimen that used is the model of Widya Wahana V car. With doing variation ground clearance, tunnel shape, leading edge shape, and width of diffuser. The first data can obtained coefficient pressure in every specimen. The second data can obtained coefficient drag and coefficient lift in every specimen. Next observation detail of flow field do with displaying the data of velocity vector, pathlines, and velocity magnitude, for giving more perferet illustration about the phenomena of aerodynamic in car. this numerical simulation used Fluent 15.0 software, condition computation domain in upstream 2L, downstream 4L, width 2L, height 2L; model turbulence k- ϵ realizable; and convection term second-order upwind. Konfiguration test enacted with C/L = 0.027 and 0.045, Re = 4.74×10^6 , boundary condition for the outlet is outflow and for inlet is velocity inlet amount is 16.67 m/s; density (ρ) = 1.1839 kg/m³; viskosity (μ) = 1.8714×10^{-5} kg/m.s.

the result of this research can obtained that the addition of air passes room in the Widya Wahana V car, type B with constant area tunnel design, tunnel have been proved the best value of CD and CL, if compared with konfiguration of other test. with CD value that reasulted is 0.23 and the value of CL that resulted is -0.49.

Key words : Widya Wahana V , tunnel, ground clearance

KATA PENGANTAR

Assalammu'alaykum wr.wb.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, Tuhan semesta alam yang selalu memberi kasih sayang tiada tara kepada penulis hingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN UDARA MELEWATI MODEL WIDYA WAHANA V PADA BAGIAN UNDERBODY

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan

Ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis menghaturkan ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. **Kedua orang tua penulis**, atas kasih, ilmu, dan semangat yang telah beliau ajarkan kepada penulis.
2. **Prof.Dr.Ing.Ir.Herman Sasongko**, selaku dosen pembimbing yang selalu memberi bimbingan serta arahan bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. **Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, PhD**, selaku ketua jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
4. **Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD; Dr. Ir. Heru Mirmanto; Dr. Wawan Aries widodo, S.T, M.T**, selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang sangat membangun.
5. **Arif Wahjudi, S.T, M.T, PhD**, selaku dosen wali yang selalu memberi arahan selama masa studi penulis.
6. **Seluruh dosen dan tenaga pendidik Teknik Mesin FTI-ITS** yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas ilmu yang telah diajarkan kepada penulis.

7. **Faishal Ramadhana S.T**, selaku kakak kandung penulis yang selalu memberi perhatian dan semangat bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. **Radhi Prasetya**, selaku adik kandung penulis yang selalu memberi perhatian dan semangat bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. **Restiana Assyifah S.IP**, selaku pasangan penulis di akhir masa studi penulis, yang selalu memberikan perhatian, semangat, dan pandangan bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
10. **Angkatan M53 (Teknik Mesin FTI-ITS 2010)**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka yang telah dilewati bersama penulis.
11. **Himpunan Mahasiswa Mesin Periode 2012/2013**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka serta keberhasilan dan kegagalan yang telah dilewati bersama penulis.
12. **ITS Solar Car Racing Team 2013**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka serta keberhasilan dan kegagalan yang telah dilewati bersama penulis.
13. **ITS Solar Car Racing Team 2015**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka serta keberhasilan dan kegagalan yang telah dilewati bersama penulis.
14. **Punggawa Lowo Ireng**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka serta keberhasilan dan kegagalan yang telah dilewati bersama penulis.
15. **Punggawa Iqueteche**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka serta keberhasilan dan kegagalan yang telah dilewati bersama penulis.

16. **MBP Squad**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka serta keberhasilan dan kegagalan yang telah dilewati bersama penulis.
17. **Dewan Presidium ITS Periode 2012/2013**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka yang telah dilewati bersama penulis.
18. **Sarekat Merah Rakyat Mesin**, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka yang telah dilewati penulis.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat kelemahan dan membutuhkan penyempurnaan. Oleh sebab itu masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan demi melengkapi kekurangan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi almamater dan semua yang membutuhkannya.

Wassalammu'alaykum. wr.wb.

Surabaya, 8 November 2016

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xi
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II	7
2.1 Penelitian yang Terkait	7
2.1.1 Teori Mengenai Laluan Udara Melewati <i>Convergent Tunnel</i> dan <i>Divergent Tunnel</i> Douglas et al [1]	7
2.1.2 Penelitian Detail Karakteristik Aliran disekitar Kendaraan Fukuda et al [5]	8
2.1.3 Penelitian Pengujian dan Pengembangan Aerodinamika pada Mobil Tenaga Surya sunswift Ambrose et al [6]	12
2.1.4 Penelitian Analisa Numerik Laluan Udara yang Melintasi Mobil Sapuangin <i>Prototype</i> Prakoso [7]	13
2.1.5 Evaluasi Model Turbulen (RANS)	18
2.1.5 Perhitungan Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i>	20
BAB III	23
3.1 Model dan Konfigurasi Uji	23
3.2 Metode Numerik	27
3.2.1 <i>Pre-processing</i>	28
3.2.2 <i>Processing</i>	29
3.2.3 <i>Post-processing</i>	30
3.3.1 <i>Flowchart</i> Analisa Numerik	31
3.4 Alokasi Waktu Penelitian	33
BAB IV	35
4.1 Analisa Grid <i>Independency</i>	35

4.2 Analisa Karakteristik Aliran <i>Origin Model</i> (C/L = 0.027 dan 0.045).....	36
4.2.1 Analisa Medan Aliran Model Uji A (C/L = 0.027) .	36
4.2.2 Analisa Medan Aliran Model Uji A (C/L = 0.045) .	40
4.2.3 Analisa Gaya Aerodinamika <i>Origin Model</i> (C/L = 0.027 dan 0.045).....	43
4.2.3.1 Analisa <i>Drag Force</i> Model Uji A (C/L = 0.027 dan 0.045).	44
4.2.3.2 Analisa <i>Lift Force</i> Model Uji A (C/L = 0.027 dan 0.045)	45
4.3 Analisa Karakteristik Aliran <i>Origin Model</i> Dengan <i>Tunnel</i> (C/L = 0.027).....	47
4.3.1 Analisa Medan Aliran Model Uji B (<i>Convergent-Divergent Tunnel</i> Tipe 1; C/L = 0.027).....	47
4.3.2 Analisa Medan Aliran Model Uji C (<i>Convergent-Divergent Tunnel</i> Tipe 2; C/L 0.027).....	51
4.3.3 Analisa Medan Aliran Model Uji D (<i>Constant Area Tunnel</i> ; C/L = 0.027).....	55
4.3.4 Analisa Gaya Aerodinamika <i>Origin Model</i> Dengan <i>Tunnel</i> (C/L = 0.027).....	59
4.3.4.1 Analisa <i>Drag Force</i> Model Uji A, B, C, dan D (C/L = 0.027)	60
4.3.4.2 Analisa <i>Lift Force</i> Model Uji A, B, C, dan D (C/L = 0.027)	61
4.4 Analisa Karakteristik Aliran <i>Modified Model</i> Dengan <i>Tunnel</i> (C/L = 0.027).....	63
4.4.1 Analisa Medan Aliran Model Uji E (<i>Convergent-Divergent Tunnel</i> Tipe 1; C/L = 0.027).....	63
4.4.2 Analisa Medan Aliran Model Uji F (<i>Convergent-Divergent Tunnel</i> Tipe 2; C/L = 0.027).....	68
4.4.3 Analisa Medan Aliran Model Uji G (<i>Constant Area Tunnel</i> ; C/L = 0.027).....	72
4.4.4 Analisa Gaya Aerodinamika <i>Modified Model</i> Dengan <i>Tunnel</i> (C/L = 0.027).....	76

4.4.4.1 Analisa <i>Drag Force</i> Model Uji E,F, dan G Dengan <i>Tunnel C/L 0.027</i>	77
4.4.4.2 Analisa <i>Lift Force</i> Model Uji E, F, dan G Dengan <i>Tunnel C/L 0.027</i>	78
4.5 Diskusi	79
BAB V	85
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran.....	85
DAFTAR PUSTAKA	87
BIOGRAFI PENULIS	89

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Efek <i>Convergent Flow</i>	7
Gambar 2.2	Efek <i>Divergent Flow</i>	8
Gambar 2.3	(a) Distribusi vortisitas dibelakang model ahmed dengan CFD (atas, x- komponen ; bawah y-komponen); (b) Efek dari sudut inklinasi ujung belakang(θ) terhadap CD,CL,CLR,CRR	9
Gambar 2.4	Efek sudut inklanasi ujung belakang terhadap C-D,CL,CLR,CLF (a); Distribusi tekanan pada kontur belakang (b)	9
Gambar 2.5	Efek dari dek dan spoiler terhadap CD,CL,CLR,CLF (a) ; Distribusi tekanan pada kontur belakang (b).....	10
Gambar 2.6	Vektor kecepatan (kiri) dan distribusi vortisitas (kanan) tipe <i>fastback</i> belakang (a); Distribusi vortisitas tipe <i>notchback</i> belakang (kiri : original,kanan : bentuk baru).....	11
Gambar 2.7	Efek dari lebar spoiler bentuk baru terhadap CD,CL.....	11
Gambar 2.8	Airflow pada bodi mobil Sunswift eVe.....	12
Gambar 2.9	Vektor kecepatan ke arah x dengan ground clearance 50 mm.....	12
Gambar 2.10	Laluan udara pada bagian belakang mobil sunswift eve.....	13
Gambar 2.11	Pathline kecepatan dan kontur tekanan pada bodi sapuangan dengan pengaruh ground clearance	14
Gambar 2.12	Distribusi vector kecepatan pada bidang potong (a) $x=30\%$, (b) $x=40\%$ dan (c) $x=50\%$ pada pemodelan 3D tanpa ground clearance	15
Gambar 2.13	Grafik distribusi CP pada midspan tanpa dan dengan ground clearance untuk segmen (a) <i>lowerside</i> ; (b) <i>upperside</i>	17

Gambar 2.14	Perfomansi model turbulen : velocity profile 93%.....	18
Gambar 2.15	Performansi model turbulen pada sidebody : Velocity Profile 93% L.....	19
Gambar 2.16	Perbedaan Gaya Drag, Lift, Normal, dan Aksial.....	20
Gambar 2.17	Elemen Gaya Drag pada Airfoil.....	20
Gambar 2.18	Elemen Gaya lift pada Airfoil.....	21
Gambar 3.1	Model Uji pada Mobil Widya Wahana V Tampak Depan Bagian <i>Midspan</i> (i) ; Model Uji pada Mobil Widya Wahana V Tampak Kanan (ii) ; Model Uji pada Mobil Widya Wahana V Tampak Kiri (iii)	23
Gambar 3.2	Model uji A tampak bawah.....	26
Gambar 3.3	Model uji B dan E tampak bawah.....	26
Gambar 3.4	Model uji C dan F tampak bawah.....	26
Gambar 3.5	Model uji D dan G tampak bawah.....	26
Gambar 3.6	Mobil Widya Wahana V Tampak Depan.....	27
Gambar 3.7	Domain Pemodelan Simulasi 3D.....	28
Gambar 3.8	Meshing 3D Mobil Widya Wahana V.....	29
Gambar 3.9	Flowchart Metodologi Numeric.....	31
Gambar 4.1	Velocity contour dan streamline laluan udara disekitar bodi model uji A ($C/L=0.027$).....	37
Gambar 4.2	Grafik coefficient pressure model uji A ($C/L=0.027$).....	39
Gambar 4.3	Velocity contour dan streamline laluan udara disekitar bodi model uji A ($C/L=0.045$).....	40
Gambar 4.4	Grafik coefficient pressure model uji A ($C/L=0.045$).....	42
Gambar 4.5	Grafik Drag Coefficient model uji A ($C/L=0.027$ dan 0.045).....	44
Gambar 4.6	Grafik Lift Coefficient model uji A ($C/L=0.027$ dan 0.045).....	46

<i>Gambar 4.7</i>	<i>Velocity contours dan streamline</i> laluan udara disekitar bodi model uji B (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 1; $C/L = 0.027$).....	48
<i>Gambar 4.8</i>	<i>Velocity vector</i> di model uji B (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 1; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$	49
<i>Gambar 4.9</i>	Grafik <i>coefficient pressure</i> di model uji B (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 1; $C/L = 0.027$).....	50
<i>Gambar 4.10</i>	<i>Velocity contour dan streamline</i> laluan udara disekitar bodi model uji C (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 2; $C/L = 0.027$).....	52
<i>Gambar 4.11</i>	<i>Velocity vector</i> di model uji C (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 2; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$	53
<i>Gambar 4.12</i>	Grafik <i>coefficient pressure</i> di model uji C (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 2; $C/L = 0.027$).....	54
<i>Gambar 4.13</i>	<i>Velocity contour dan streamline</i> laluan udara disekitar bodi model uji D (<i>constant area tunnel</i> ; $C/L 0.027$).....	56
<i>Gambar 4.14</i>	<i>Velocity vector</i> di model uji D (<i>constant area tunnel</i> ; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$	57
<i>Gambar 4.15</i>	Grafik <i>coefficient pressure</i> di model uji D (<i>constant area tunnel</i> ; $C/L = 0.027$).....	58
<i>Gambar 4.16</i>	Grafik <i>Drag Coefficient</i> model uji A,B,C, dan D ($C/L = 0.027$).....	60
<i>Gambar 4.17</i>	Grafik <i>Lift Coefficient</i> model uji A, B, C, dan D ($C/L = 0.027$).....	62
<i>Gambar 4.18</i>	<i>Contour velocity dan streamline</i> laluan udara disekitar bodi model uji E (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 1; $C/L = 0.027$).....	64

<i>Gambar 4.19</i>	<i>Velocity vector</i> di model uji E (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 1; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$	65
<i>Gambar 4.20</i>	Grafik <i>coefficient pressure</i> di model uji E (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 1; $C/L = 0.027$).....	66
<i>Gambar 4.21</i>	<i>Contour velocity</i> dan <i>streamline</i> laluan udara disekitar bodi model uji F (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 2; $C/L = 0.027$).....	68
<i>Gambar 4.22</i>	<i>Velocity vector</i> di model uji F (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 2; $C/L = 0.027$)	70
<i>Gambar 4.23</i>	<i>coefficient pressure</i> di model uji F (<i>convergent-divergent tunnel</i> tipe 2; $C/L = 0.027$).....	71
<i>Gambar 4.24</i>	<i>Velocity contour</i> dan <i>streamline</i> laluan udara disekitar bodi model uji G (<i>constant area tunnel</i> ; $C/L = 0.027$).....	74
<i>Gambar 4.25</i>	<i>Velocity vector</i> di model uji G (<i>constant area tunnel</i> $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$	74
<i>Gambar 4.26</i>	Grafik <i>coefficient pressure</i> di model uji G (<i>constant area tunnel</i> $C/L 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$	75
<i>Gambar 4.27</i>	Grafik <i>Drag Coefficient</i> model uji E,F dan G ($C/L = 0.027$).....	77
<i>Gambar 4.28</i>	Grafik <i>Lift Coefficient</i> model uji E, F, dan G ($C/L = 0.027$).....	79
<i>Gambar 4.29</i>	Laluan udara melewati <i>convergent-divergent tunnel</i>	80
<i>Gambar 4.30</i>	(i) Grafik <i>coefficient pressure</i> model uji B ($C/L=0.027$) (ii) Grafik <i>coefficient pressure</i> model uji C ($C/L = 0.027$) (iii) Grafik <i>coefficient pressure</i> model uji D ($C/L = 0.027$).....	81

- Gambar 4.31* (i) Grafik coefficient pressure model uji E ($C/L = 0.027$)
(ii) Grafik coefficient pressure model uji F ($C/L = 0.027$)
(iii) Grafik coefficient pressure model uji G ($C/L = 0.027$).....83

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Keterangan model dan konfigurasi uji bentuk <i>tunnel</i>	25
Tabel 3.2	Keterangan model dan konfigurasi uji rasio celah terhadap panjang bodi	27
Tabel 3.3	Alokasi waktu penelitian.....	33
Tabel 4.1	Analisa grid <i>independency</i>	35

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Alat transportasi saat ini memiliki peran vital dalam kehidupan bermasyarakat. Jumlah penggunaannya pun mengalami peningkatan. Hal ini berbanding lurus terhadap konsumsi energi konvensional. Sehingga dirasa perlu untuk melakukan penghematan konsumsi bahan bakar sebagai tindak lanjut dari krisis energi, dan menuntut untuk mulai mengembangkan alternatif energi pada bidang transportasi. Penelitian maupun pengembangan produk dari kendaraan alternatif energi sudah banyak dilakukan.

Widya Wahana V merupakan mobil listrik bertenaga surya yang dibuat oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Seperti pada mobil listrik bertenaga surya lainnya, Widya Wahana V dilengkapi dengan sel surya yang dapat menghasilkan energi listrik untuk menjalankan Brush Less DC Motor. Namun mobil bertenaga surya saat ini masih jauh untuk dikatakan sempurna. Faktor pertama yaitu efisiensi sel surya yang masih rendah untuk menghasilkan energi listrik. Faktor kedua kapasitas storage system untuk dapat menjalankan mobil dengan jarak tempuh yang jauh. Dan faktor ketiga konsumsi energi dari Brush Less DC Motor cukup besar untuk dapat menggerakkan mobil. Sehingga pengembangan produk dari mobil bertenaga surya terus dilakukan. Selain itu penelitian untuk mengurangi rolling resistance beserta gaya drag pada mobil listrik bertenaga surya juga masih perlu terus dilakukan. Penelitian material composite sebagai bahan utama pada chassis dan bodi mobil listrik bertenaga surya menjadi salah satu cara untuk dapat mengurangi rolling resistance yang diakibatkan oleh berat mobil. Penelitian bentuk bodi mobil juga dilakukan untuk mengurangi gaya drag. Salah satu faktor yang mempengaruhi gaya drag adalah ground effect yang ditimbulkan mobil dengan permukaan jalan. Berdasarkan teori, ground effect dapat memberikan pengaruh 20% terhadap gaya drag.

Douglas et al [1] menjelaskan efek dari *convergent flow* dan *divergent flow* di sebuah pipa. Pada *convergent flow* didapat

adanya penurunan tekanan fluida dan percepatan laluan fluida yang dapat menjaga fluida tetap dekat dengan *wall*, sehingga aliran tetap stabil dan mengurangi terjadinya turbulensi. Pada penelitian ini pengaruh sudut konvergensi dan sudut divergensi sangat besar terkait dengan separasi lapis batas (*boundary layer*). Pada akhirnya hal itu akan menentukan kerugian tekanan dari aliran masuk dan aliran keluar. Pada *divergent flow* terjadi fenomena *boundary layer separation* yang dapat mengakibatkan *vorticies*. **Barnard [2]** mendapati bahwa faktor yang sangat mempengaruhi terjadinya gaya angkat pada *road vehicle* adalah jarak dengan jalan (*ground clearance*). Berdasarkan teori bahwa bagian bawah kendaraan akan membentuk efek venturi yang menghasilkan daerah bertekanan rendah, sehingga menciptakan gaya angkat negatif (*downforce*). **McBeath[3]** menjelaskan gaya angkat negatif akan meningkat seiring dengan berkurangnya *ground clearance*, pada jarak tertentu maka gaya angkat negatifnya akan berkurang. *Ground clearance* yang terlalu rendah akan membuat *viscous effect* menjadi dominan, menghalangi aliran yang ada di bagian bawah kendaraan. Penelitian mengenai pengaruh *ground clearance* terhadap gaya angkat pada kendaraan. Konsentrasi penelitian juga dilakukan pada bagian belakang kendaraan yang dilakukan oleh **Hucho et al[4]**. Semakin kecil sudut inklinasi ujung belakang (θ) maka semakin kecil koefisien dari gaya hambat belakang (CDR), gaya angkat depan (CLF) dan gaya angkat belakang (CLR). Dan semakin besar sudut *diffuser* bawah (γ) pada bodi belakang, maka semakin kecil koefisien gaya angkat belakang (CLR). Struktur aliran ketika melewati geometri bodi yang kompleks dirasa kurang 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. Hal ini akan mengakibatkan *blockage effect* dan kerugian pada daerah interaksi tersebut dikenal dengan *secondary loss*. Untuk itulah, kajian mengenai analisa aliran secara 3D ini sangat penting pada sebuah kendaraan. Fukuda et al [5] telah mengkaji konsep aliran 3D pada aerodinamika automobil dengan menggunakan teknik CFD dan uji eksperimen di terowongan angin. Penelitian ini untuk mengetahui hubungan antara sudut inklinasi ujung belakang (θ) terhadap gaya *drag* dan *lift* serta struktur *wake* ditunjukkan sebagai dasar bentuk ujung belakang kendaraan. Didapatkan bahwa spiral *vortex* pada sumbu -x bertambah, berkurang atau hilang disebabkan perubahan sudut inklinasi ujung belakang (θ) dan hasilnya menyebabkan perubahan pada CD, CL, terutama CLR.

Rekayasa *aerodynamic* pada mobil Widya Wahana V dilakukan untuk dapat mengoptimasi geometri *bodi*, sehingga mobil mampu mengatasi perjalanan sejauh 3000 Km. Rekayasa pertama yaitu mengenai *ground clearance* pada mobil Widya Wahana V. Pemilihan *Ground clearance* yang rendah bertujuan untuk mengurangi gaya *drag* yang dapat menghambat laju mobil. Namun untuk *Ground clearance* yang rendah juga dapat menimbulkan *downforce (negative lift)* yang besar pada mobil, dan mengakibatkan nilai *rolling resistance* bertambah. Sehingga dilakukan rekayasa kedua yaitu penambahan volume ruang untuk laluan udara berbentuk *tunnel*. Pemilihan bentuk *tunnel* ini diharapkan dapat menuntun laluan udara yang melewatinya sehingga tidak terjadi penambahan *drag* yang disebabkan timbulnya *separation vortex*.

1.2 Perumusan Masalah

Rekayasa *aerodynamic* dari mobil Widya Wahana V untuk dapat mengurangi gaya *drag* dan *rolling resistance* yang bisa mengakibatkan bertambahnya konsumsi energi pada mobil. Meningkatnya gaya *drag* dan *rolling resistance* pada bodi mobil ini disebabkan oleh *ground effect* yang ditimbulkan oleh mobil

dengan permukaan jalan. *Ground effect* yang timbul diakibatkan oleh *ground clearance* yang rendah, dapat menghasilkan efek venturi yang dapat menghasilkan permukaan bawah bertekanan rendah, sehingga menciptakan gaya angkat negatif (*downforce*). Semakin besar *downforce* dapat menambah *rolling resistance* pada mobil. Sehingga penambahan volume ruang untuk laluan udara perlu dilakukan dengan tujuan dapat mempertahankan *ground clearance* yang kecil namun dapat mengurangi *downforce* secara signifikan demi mereduksi *rolling resistance* pada mobil. Penambahan volume ruang untuk laluan udara dengan bentuk *tunnel* ini bertujuan untuk menuntun laluan udara yang melewatinya sehingga tidak terjadi penambahan *drag* yang disebabkan timbulnya *separation vortex*.

Berdasarkan fenomena aliraran di atas, penelitian ini mencoba menganalisa bagaimana fenomena laluan udara melewati bodi mobil Widya Wahana V di daerah *underbody*. Dikarenakan kompleksnya karakteristik aliran 3D yang terjadi pada domain yang diteliti, maka penelitian ini akan dilaksanakan secara simulasi numerik (*CFD*). Penelitian secara numerik ini ditujukan untuk mengobservasi secara global "*lift force*" maupun "*drag force*" melalui pengukuran *coefficient pressure* pada *upper surface* dan *lower surface* beserta observasi detail medan aliran 3D. Untuk memberi gambaran yang lebih lengkap dari fenomena-fenomena *aerodynamic* yang terjadi pada mobil Widya Wahana V.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan diadakannya penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui nilai *coefficient pressure* melalui perhitungan numerik pada *upper surface* dan *lower surface* di sepanjang *midpan body* Widya Wahana V.
2. Mengetahui karakteristik detail medan aliran yang terjadi pada *bodi* Widya Wahana V khususnya pada bagian *underbody* melalui simulasi numerik.

3. Mengobservasi *lift force* dan *drag force* akibat penambahan *tunnel* sepanjang *underbody* mobil Widya Wahana V.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Obyek yang diletiti adalah model mobil Widya Wahana V.
2. Evaluasi *lift* dan *drag* dilakukan secara 3D melalui perhitungan numerik.
3. Aliran *turbulent* $Re = 4.74 \times 10^6$, *incompressible*, *steady*, dan *uniform flow* dari sisi *inlet*.
4. Simulasi numerik tidak melibatkan pengaruh roda mobil.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan membawa manfaat yaitu :

1. Mengetahui fenomena laluan udara secara fisis dari analisa 3D disekitar bodi melalui visualisasi aliran dengan software ANSYS Fluent 15.0 pada bodi mobil Widya Wahana V di daerah *underbody*.
2. Mampu memberikan sumbangsih nyata pada optimasi bodi kendaraan yang nantinya bisa digunakan sebagai rujukan pengembangan mobil Widya Wahana.

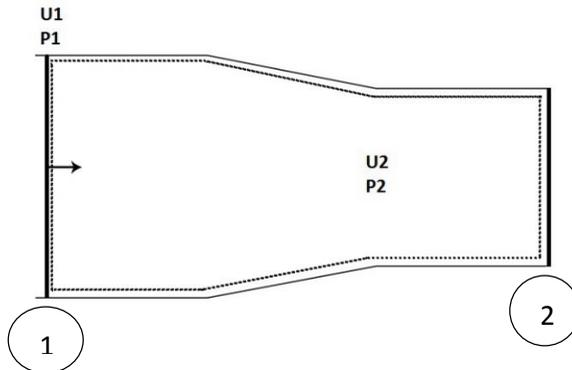
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian yang Terkait

2.1.1 Teori Mengenai Laluan Udara Melewati *Convergent Tunnel* dan *Divergent Tunnel* Douglas et al [1]

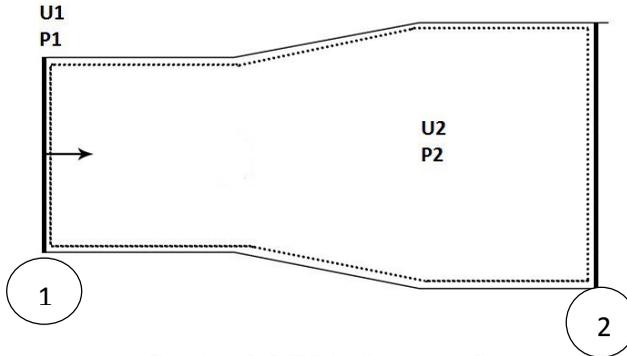
Teori yang diungkapkan oleh Douglas et al [1] adalah mengenai efek dari *convergent* dan *divergent flow*. Dimana pada *convergent flow* didapat adanya penurunan tekanan fluida dan percepatan laluan fluida yang dapat menjaga fluida untuk tidak terseparasi, sehingga aliran tetap stabil dan mengurangi terjadinya turbulensi. Hal ini dapat terjadi karena adanya konvergensi laluan sehingga tidak menimbulkan *adverse pressure* di buritan seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Efek convergent flow.

Pada penelitian ini pengaruh sudut konvergensi dan sudut divergensi sangat besar terkait dengan separasi lapis batas (*boundary layer*). Pada akhirnya hal itu akan menentukan kerugian tekanan dari aliran masuk dan aliran keluar. Pada penelitian ini juga menjelaskan mengenai *divergent flow*. Dimana pada *divergent flow* mengalami kenaikan tekanan yang searah dengan arah laluan udara dan kecepatan laluan udara mengalami perlambatan akibat perbedaan luas area sehingga menimbulkan aliran terseparasi yang mengakibatkan *vortex*. Hal ini dapat terjadi karena adanya

divergensi yang menimbulkan *adverse pressure* di buritan, seperti pada gambar 2.2.

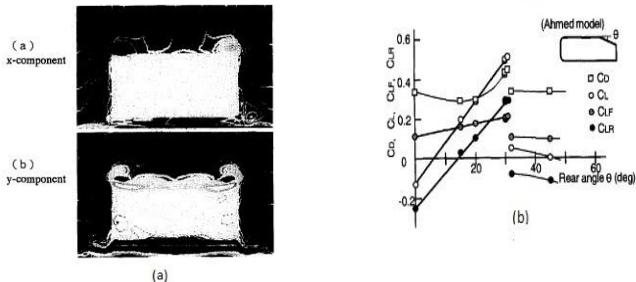


Gambar 2.2 Efek divergent flow.

2.1.2 Penelitian Detail Karakteristik Aliran disekitar Kendaraan Fukuda et al [5]

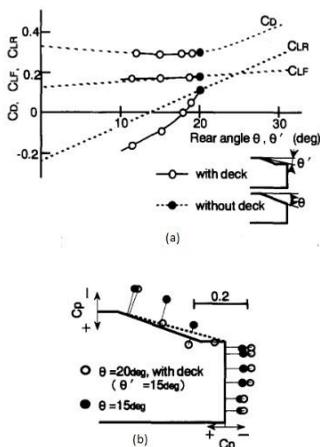
Penelitian ini menggunakan model ahmed dan model sedan dengan dimensi sebenarnya yang terkonsentrasi pada daerah ujung belakang kendaraan (*trailing edge*). Tujuan dari berbagai bentuk modifikasi ujung belakang yang dilakukan adalah untuk optimalisasi *bodi* terhadap detail karakteristik aliran yang melewati *bodi*. Sebagai contoh seperti distribusi tekanan dan medan kecepatan serta efek gaya aerodinamika yang dapat ditimbulkannya. Penelitian ini membandingkan bentuk *original* ujung belakang terhadap bentuk yang baru dengan metode *numerik* dan eksperimental pada *wind tunnel*.

Pada bentuk *original* (model ahmed) didapat bahwa struktur *wake* terdiri dari dua jenis *vortex* penyusun yang berbentuk cincin (*spiral vortex*) yang searah sumbu-x dan yang searah sumbu -y. Didapatkan bahwa *spiral vortex* pada sudut inklinasi ujung belakang (θ) dan hasilnya menyebabkan perubahan pada C_D, C_L , terutama C_{LR} . Fenomena fisis dan efek aerodinamikanya dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



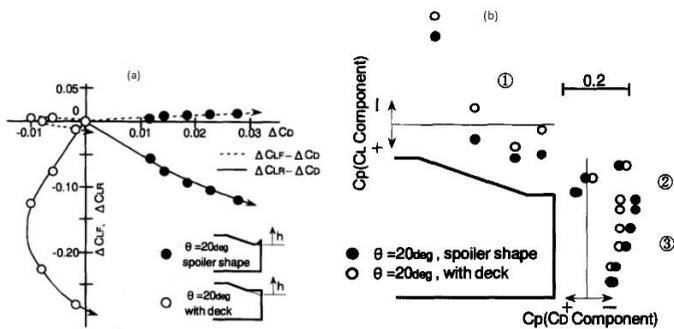
Gambar 2.3 (a) Distribusi vortisitas dibelakang model ahmed dengan CFD (atas, x-komponen ; bawah y-komponen) ; (b) Efek dari sudut inklinasi ujung belakang (θ) terhadap C_D, C_L, C_{LR}, C_{LF} .

Penambahan dek belakang pada model ahmed juga mempengaruhi karakteristik dan efek aerodinamika pada model terutama pengurangan C_{LR} yang signifikan akibat kenaikan tekanan statis pada kontur inklinasi dan dek. Deskripsi perbandingannya dapat dilihat melalui gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Efek sudut inklanasi ujung belakang terhadap C_D, C_L, C_{LR}, C_{LF} .(a) ; Distribusi tekanan pada kontur belakang (b).

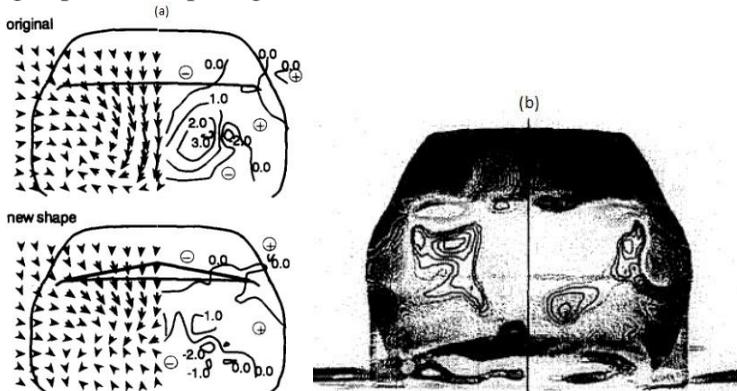
Penambahan spoiler di dek pada model ahmed mengakibatkan terjadinya pengurangan C_{LR} dan peningkatan C_D dan C_{LF} ketika ketinggian spoiler bertambah. Walaupun penambahan spoiler memperkecil resultan *downwash* dari *uperside* dan memperkecil resultan *spiral vortex* sehingga C_{LR} berkurang, namun juga akan memperbesar intensitas *vortex* cincin pada permukaan belakang, terutama *vortex* pada ujung atas dari permukaan belakang sehingga C_D dan C_{LF} meningkat. Hal ini dapat dideskripsikan oleh gambar 2.5 dibawah ini.



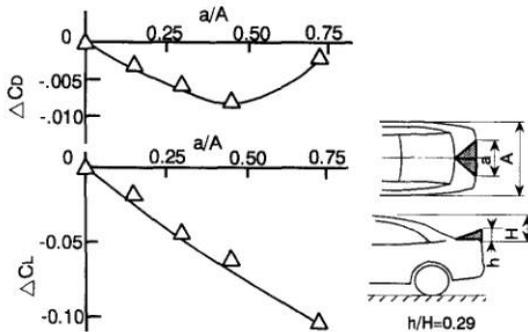
Gambar 2.5 Efek dari dek dan spoiler terhadap C_D, C_L, C_{LR}, C_{LF} (a) ; distribusi tekanan pada kontur belakang (b).

Dari percobaan dengan menggunakan model ahmed tadi, dapat diaplikasikan pada kendaraan sedan untuk menghubungkan variasi dari C_D, C_{LF}, C_{LR} pada dek belakang serta membandingkan bentuk spoiler konvensional dengan bentuk baru (*trigonal pyramid*). Dari gambar 2.7 dapat dilihat bahwa dengan penambahan bentuk baru spoiler (*trigonal pyramid*) akan menyebabkan pengurangan vortisitas pada daerah *wake* sehingga kecepatan pada *downwash* akan mengecil. Hal ini akan berimbas pada pengurangan C_D dan peningkatan C_L yang cukup signifikan. Besar kecilnya parameter optimalisasi dari efek aerodinamika seperti C_D dan C_L dapat

dikonfigurasiakan melalui dimensi dari bentuk spoiler itu sendiri yang dapat dilihat pada gambar 2.5.



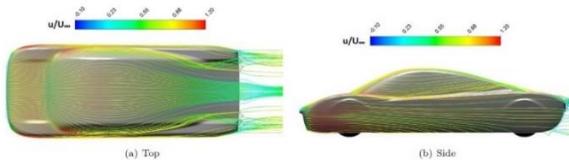
Gambar 2.6 Vektor kecepatan (kiri) dan distribusi vortisitas (kanan) tipe fastback belakang (a); Distribusi vortisitas tipe notchback belakang (kiri : original, kanan : bentuk baru).



Gambar 2.7 Efek dari lebar spoiler bentuk baru terhadap C_D, C_L (fastback car).

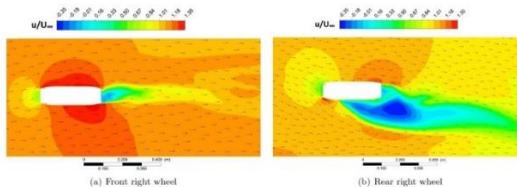
2.1.3 Penelitian Pengujian dan Pengembangan Aerodinamika pada Mobil Tenaga Surya sunswift Ambrose et al [6]

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi efek *aerodynamic* pada mobil tenaga surya Sunswift dengan menggunakan analisa *numerik*. Dimana pada penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan dan *viscous drag* terbentuk serta memberikan kontribusi total *aerodynamic drag* dari mobil. Hal ini menunjukkan bahwa sunswift memiliki bentuk gabungan antara *bluff bodi* dengan *streamlined bodi*. Bagian kap mobil memiliki kontribusi terbesar pada total drag pada saat tekanan tinggi akibat stagnasi di *leading edge*. Untuk gaya *lift* ditimbulkan akibat adanya percepatan laluan udara yang melalui *underside tunnel* dari kendaraan.

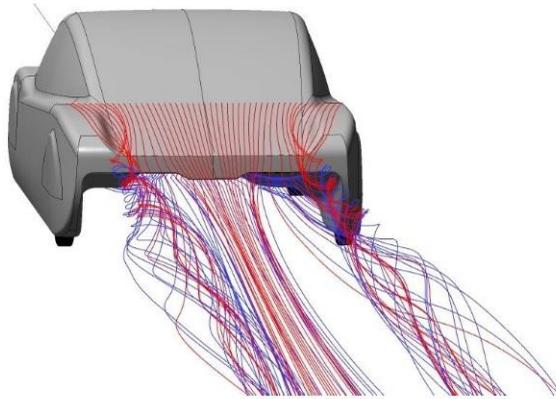


Gambar 2.8 airflow pada bodi mobil Sunswift eVe.

Streamline plots pada gambar 2.8 memberikan informasi mengenai kualitas dari laluan udara yang melewati permukaan mobil. Dapat terlihat bahwa hampir seluruh bagian depan dari mobil terkena laluan udara. Sedangkan pada bagian belakang laluan udara terpecah pada daerah ban belakang. Pada gambar 2.9 dapat dilihat bahwa pengaruh kuat *underbody* pada bagian ban depan dan belakang menghasilkan efek *yaw* yang tidak diharapkan. Sehingga dapat dilihat ban belakang menghasilkan *wake* yang besar yang nantinya dapat mengakibatkan *trailing vortex*



Gambar 2.9 Vektor kecepatan ke arah x dengan ground clearance 50 mm.

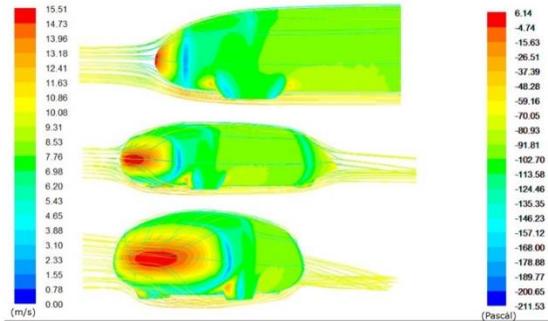


Gambar 2.10 Laluan udara pada bagian belakang mobil sunswift eVe.

Laluan udara yang dihasilkan oleh sunswift *eVe* didominasi oleh *wake*, pada daerah pertemuan antara laluan udara yang melewati bodi bagian atas dan bagian bawah. Di posisi belakang pada bagian atas kendaraan kehisap ke dalam kendaraan, sehingga menimbulkan *turbulent flow* seperti terlihat pada gambar 2.10.

2.1.4 Penelitian Analisa Numerik Laluan Udara yang Melintasi Mobil Sapuangin *Prototype* Prakoso [7]

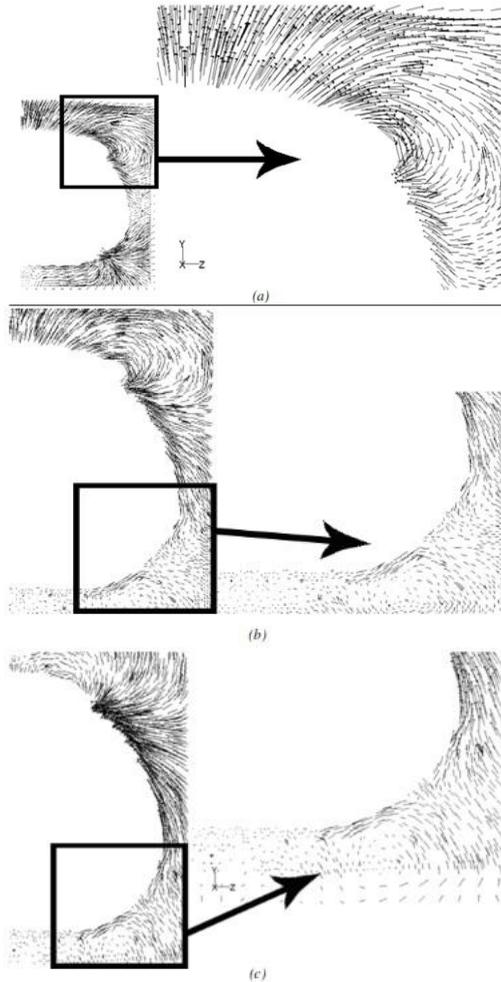
Penelitian ini menggunakan model sapuangin *type Prototype* yang dioperasikan pada $Re_L = 1.97 \times 10^6$ dengan metode *numerik* menggunakan model turbulen *k-ε realizable*. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui detail karakteristik aliran melintasi model sapuangin dengan pengaruh *Ground Clearance* terhadap panjang model sebesar $(C/L) 0.027$. Penelitian ini membuat segmentasi agar dapat dievaluasi bertahap yang terpisah jelas antara pengaruh efek yang ditimbulkan oleh *sidebody* dan efek yang ditimbulkan oleh *ground clearance*.



Gambar 2.11 Pathline kecepatan dan kontur tekanan pada bodi sapuangin dengan pengaruh ground clearance.

Melalui gambar 2.11 mengenai distribusi tekanan pada kontur *bodi* secara keseluruhan tampak bahwa terjadinya *multi* stagnasi yang ditandai dengan luasan *spektrum* warna merah yang besar berdifusi kesegala arah pada *leading edge*. Dari gambar juga terlihat bahwa tekanan rendah terletak pada permukaan atas *sidebody* pada *leading edge*. Hal ini menandakan aliran akan terdistribusi dominan ke arah ini pada saat mengenai *leading edge*. Kemudian akan mengalami akselerasi tajam menuju kearah *sidebody centre*. Pada daerah buritan, tekanan rendah ditunjukkan melalui *spektrum* warna kuning yang menegaskan bertemunya *adverse pressure gradient* baik inklinasi ujung belakang pada *upperside*, *diffuser* bawah belakang pada *lowerside*, dan *tail boat* pada *sidebody surface*

Penjelasan karakteristik aliran 3D pada daerah interaksi antar lapis batas *sidebody surface* dengan lapis batas disekitar *midspan*, dapat ditegaskan melalui visualisasi *vector* kecepatan dengan metode pemotongan searah *axis* sebagai berikut.

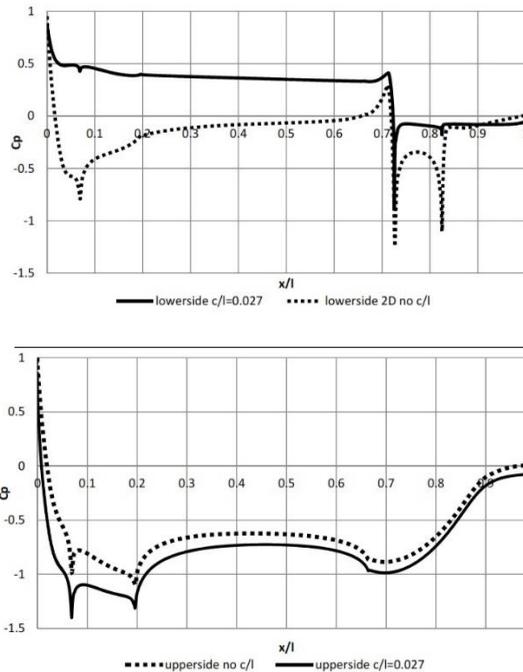


Gambar 2.12 Distribusi *vector* kecepatan pada bidang potong (a) $x=30\%$, (b) $x=40\%$ dan (c) $x=50\%$ pada pemodelan 3D tanpa *ground clearance*.

Dari gambar 2.12 tampak bahwa *vortex* separasi 3D terjadi pada pemotongan $x= 30\%$ sampai 50% . Intensitas vortisitas

terkuat terbentuk pada daerah interaksi antar lapis batas *sidebody surface* dengan lapis batas disekitar *midspan* yaitu pada zona lengkung bawah dan zona lengkung atas. Dari deskripsi terdistribusinya aliran pada pembahasan sebelumnya, daerah *sidebody centre* merupakan daerah dengan distribusi tekanan tertinggi dan akan semakin berkurang mendekati *midspan*. Oleh sebab itu efek *sidebody* benar-benar memberikan pengaruhnya terhadap separasi 3D berupa penyumbang kontraksi aliran. Kronologi terjadinya *vortex* separasi 3D bermula saat aliran telah melewati daerah bertekanan tinggi di *sidebody* setelah lokasi *minimum pressure* seragam searah bidang *y-z* dan memasuki permukaan *flat plate* di *sidebody centre*. Daerah itu bermula pada 30%L sampai 50%L. Akumulasi distribusi aliran setelah *leading edge* akan melewati sisi *upper side surface* dikarenakan hambatan aerodinamika terendah terjadi pada daerah itu. Sehingga antar lapis batas cenderung bertemu pada zona interaksi itu.

Pada mekanisme terjadinya fenomena *vortex* separasi 3D, lapis batas dari aliran bagian bawah *bodi* teragitasi untuk menuju ke zona lengkung bawah (*lowerside sidebody surface*) menuju tekanan lebih rendah kearah atas (*sidebody centre*). Pada daerah ini, lapis batas dekat kontur akan mendapat *adverse pressure gradient* akibat kelengkungan zona ini. Bertemunya lapis batas dari *sidebody centre* lebih memperkuat intensitas vortisitas pada daerah interaksi lapis batas ini, sehingga lapis batas ini kemudian terpilih (*skewed boundary layer*) dan berubah menjadi aliran sekunder yang menyebabkan terjadinya separasi *vortex* searah *axis* (separasi *vortex* 3D). Intensitas vortisitas pada daerah interaksi ini akan berkurang seiring dengan penambahan lintasan searah *axis* akibat bertemunya *adverse pressure gradient* diburitan. Tampak bahwa intensitas vortisitas pada bidang potong $x=30\%L$ adalah yang terbesar dan akan semakin mengecil pada $x=50\%L$.



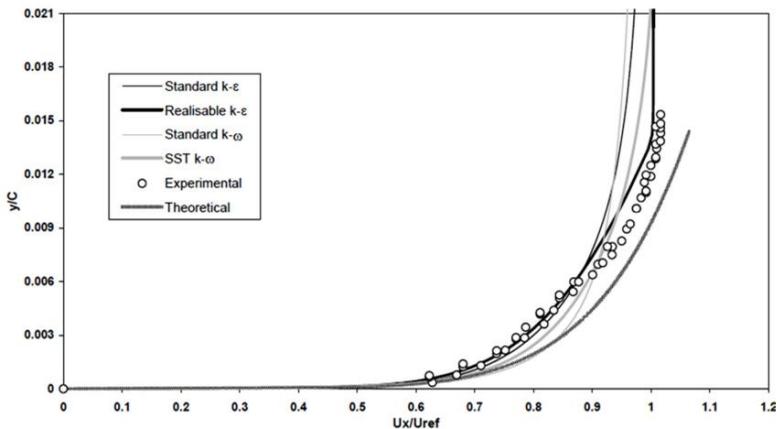
Gambar 2.13 Grafik distribusi C_p pada *midspan* tanpa dan dengan *ground clearance* untuk segmen (a) *lowside*; (b) *upperside*.

Gambar 2.13 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan pada *midspan* dengan *ground clearance* $c/l = 0.027$ dan membandingkannya dengan permodelan tanpa *ground clearance* dari analisa aliran 2D. Dapat dilihat bahwa *slope* penurunan tekanan pada *upperside* dengan *ground clearance* lebih sempit dibandingkan kontur *lowside* maupun *upperside* tanpa *ground clearance*. *Slope* penurunan yang sempit ini dikaenakan defleksi aliran lebih kuat kearah *upperside* yang diikuti dengan akselerasi yang tajam. Hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang kuat pada daerah interaksi antara *ground* dengan *lowside* di celah yang dideskripsikan oleh visualisasi efek penyumbatan (*blockage effect*) berupa *bubble separation* di *upstream* dekat

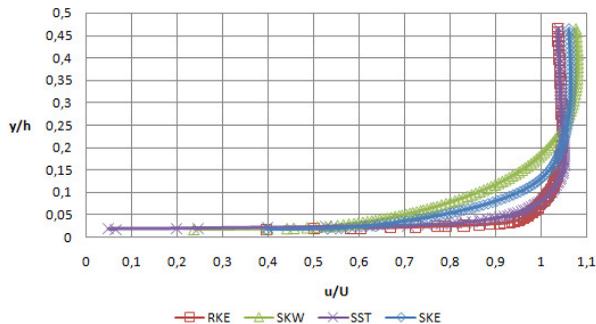
ground. Aliran cenderung terdefleksi dengan sangat kuat menuju *upper side* yang seakan-akan menerima sudut serang positif. Defleksi aliran pada kontur *lower side* terjadi 0.12% lebih dahulu daripada *upper side* dengan intensitas defleksi *upper side* sebesar 330% dibanding *lower side*. Perbedaan yang mencolok terlihat dari grafik perbandingan *lower side* tiap permodela, bahwa dengan pengaruh *clearance* eksistensi *blockage* akan kuat dengan terbentuknya tekanan yang lebih tinggi di kontur *lower side* akibat pada bagian ini memiliki hambatan aerodinamika terbesar.

2.1.5 Evaluasi Model Turbulen (RANS)

Hasil dari performansi tiap model turbulen ditunjukkan dengan analisa perbandingan antara hasil yang didapat dari eksperimen dengan pendekatan antar tiap model turbulen dari metode numerik. Menurut **Mulvany et al [9]**, Performansi tersebut ditunjukkan dengan pendekatan distribusi koefisien tekanan, koefisien drag dan lift, *pressure surface boundary layer* ($x/c=93\%$), separasi *boundary layer* di buritan ($x/c=100\%$) dan *wake* yang cukup jauh ($x/c=150\%$). Semua data disajikan berdasarkan analisa bilangan tak berdimensi baik dari lokasi koordinat berbasis panjang *chord* (x/c atau y/c) maupun kecepatan lokal berbasis kecepatan *freestream* (u/U).



Gambar 2.14 Performansi model turbulen : velocity profile 93%



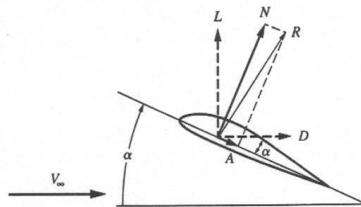
Gambar 2.15 Performansi model turbulen pada *sidebody* :
Velocity Profile 93% L

Penelitian mengenai karakteristik aliran 2D telah dilakukan oleh **Mulvany et al [9]** menggunakan model uji profil NACA-16 melalui teknik eksperimental di terowongan angin dengan variasi bilangan Reynolds sebesar 8.284×10^4 dan 1.657×10^5 dan dikomparasikan dengan pendekatan numerik menggunakan model turbulensi SKE, RKE, SST dan SKW. Dari gambar 2.14 dapat disimpulkan bahwa model turbulen RKE lebih cocok untuk mensimulasikan aliran *external incompressible* pada *streamlined* profil. Dengan tingkat kecocokan yang cukup tinggi antara hasil *velocity profile* yang didapat pada jarak 93% C antara eksperimental maupun numerik (RKE diikuti SST), membuat RKE terpilih sebagai model turbulen yang paling sesuai dengan konfigurasi uji yang diberlakukan. Merujuk pada penelitian **Mulvany et al [9]** lantas penelitian ini diberlakukan serupa melalui pengambilan data pada pemodelan 2D di *sidebody* pada jarak 93% L. Melalui gambar 2.15 dapat dilihat korelasi yang sangat dekat antara *velocity profile* RKE dan SST yang hampir sama dengan penelitian **Mulvany et al [9]**. Dikarenakan pada penelitian ini tidak dilakukan uji perbandingan antara eksperimen dan numerik serta konfigurasi uji yang relatif sama (*external-incompressible* pada *streamlined* profil) dengan penelitian **Mulvany et al [9]**, maka pada penelitian ini merujuk sepenuhnya pada penelitian yang dilakukan oleh **Mulvany et al [9]**. Dikarenakan mereka menggunakan model turbulen RKE maka pada penelitian ini pun

menggunakan model turbulen RKE untuk memprediksi karakteristik aliran yang melintasi *bodi* Widya Wahana V.

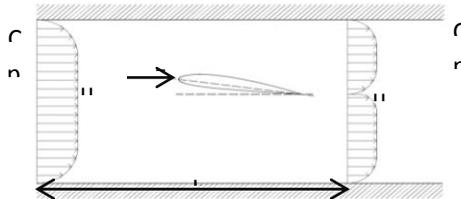
2.1.5 Perhitungan Koefisien Drag dan Lift

Pada penampang 2D *airfoil* yang dikenai *angle of attack*, gaya-gaya yang bekerja antara lain gaya *drag*, *lift*, normal, dan aksial. Gambar 2.19 menunjukkan perbedaan antara gaya *drag*, *lift*, normal, dan aksial. Gaya normal dan aksial diproyeksikan terhadap geometri *airfoil*. Gaya *drag* merupakan gaya yang searah dengan arah aliran. Gaya *drag* dikontribusikan oleh *pressure drag* dan *skin friction drag*. Pada kasus *bluff bodi*, *pressure drag* lebih dominan dibandingkan dengan *skin friction drag*. Namun pada permukaan yang *streamline*, *skin friction drag* lebih memberikan kontribusi dibandingkan dengan *pressure drag*.



Gambar 2.16 Perbedaan Gaya Drag, Lift, Normal, dan Aksial [15]

Gaya *drag* dapat dicari melalui persamaan momentum. Adapun persamaan momentum umum dapat ditunjukkan pada persamaan 2.1. Karena pada kasus ini diasumsikan *steady flow* dan tidak ada gaya pada *bodi*, maka persamaan 2.1 dapat diubah menjadi persamaan 2.2. Selanjutnya persamaan 2.2 disederhanakan menjadi persamaan 2.3 dan 2.4.



Gambar 2.17 Elemen Gaya Drag pada Airfoil

$$F_{Sx} + F_{Bx} = \int_{CS} \rho v \, dA + \frac{\partial}{\partial t} \int \rho v \, dV \dots 2.1$$

$$F_{Sx} = \int_{CS} \rho v \, dA \dots\dots\dots 2.2$$

$$(p_1 - p_2)A - F = \int_0^h \rho u u_2 \, dA - \int_0^h \rho u u_1 \, dA \dots 2.3$$

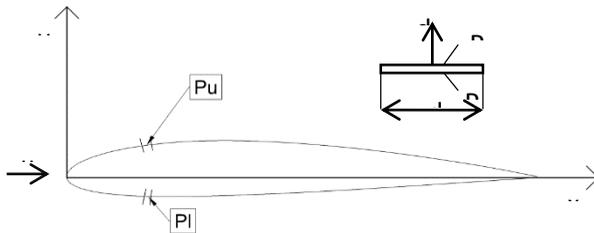
$$F = (p_1 - p_2)A + \int_0^h \rho u u_1 \, dA - \int_0^h \rho u u_2 \, dA \dots 2.4$$

Pada umumnya gaya drag ditulis tidak berdimensi dalam koefisien drag (C_D). Koefisien drag dapat dicari menggunakan persamaan 2.5. Pada penelitian ini, nilai koefisien drag didapat dari integrasi data simulasi numerik.

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 A} \dots\dots\dots 2.5$$

$$C_D = \frac{(p_1 - p_2)A + \int_0^h \rho u u_1 \, dA - \int_0^h \rho u u_2 \, dA}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 A} \dots 2.6$$

Gaya lift merupakan gaya yang tegak lurus terhadap arah aliran. Besarnya gaya lift dapat diekspresikan dalam persamaan berikut.



Gambar 2.18 Elemen Gaya lift pada Airfoil

$$dL = (p_L - p_U) dx(1) \dots\dots\dots 2.7$$

$$L = \int_0^c (p_L - p_U) dx(1) \dots\dots 2.8$$

Secara umum gaya lift dapat diekspresikan sebagai bilangan tidak berdimensi sebagai koefisien lift.

$$C_L = \frac{L}{\rho_\infty u_\infty^2 A} \dots\dots\dots 2.9$$

$$C_L = \frac{\int_0^c (p_L - p_U) dx}{\rho_\infty u_\infty^2 A} \dots\dots\dots 2.10$$

$$C_L = \frac{1}{c} \int_0^c (C_{p_l} - C_{p_u}) dx \dots\dots 2.11$$

Pada *airfoil* tanpa *angle of attack*, besarnya gaya *lift* sama dengan gaya normal *airfoil* ($L = N$). Sehingga koefisien *lift* sama besarnya dengan koefisien normal ($C_L = C_N$). Ketika *airfoil* dikenai *angle of attack* ($\alpha > 0$), maka besarnya koefisien *lift* dapat dirumuskan melalui persamaan berikut.

$$C_N = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \dots\dots 2.12$$

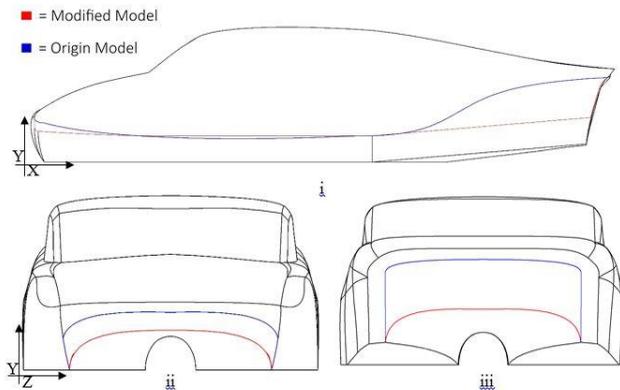
$$C_L = \frac{C_N - C_D \sin \alpha}{\cos \alpha} \dots\dots\dots 2.13$$

BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian ini mencoba untuk menganalisa bagaimana fenomena *aerodynamic* yang terjadi ketika laluan udara melewati bodi mobil Widya Wahana V di daerah *underbody*. Dikarenakan kompleksnya karakteristik aliran 3D yang terjadi pada domain yang diteliti, maka penelitian ini akan dilaksanakan secara simulasi numerik (*CFD*).

3.1 Model dan Konfigurasi Uji

Penelitian ini dilakukan menggunakan geometri mobil Widya Wahana V dengan dua model uji. Dapat dilihat pada gambar 3.1 dimana *origin model* ditunjukkan dengan garis biru dan untuk *modified model* ditunjukkan dengan garis merah.



Gambar 3.1

Model uji pada mobil Widya Wahana V tampak depan bagian *midspan* (i)

Model uji pada mobil Widya Wahana V tampak kanan (ii)

Model uji pada mobil Widya Wahana V tampak kiri (iii)

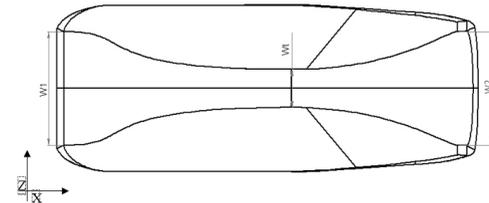
Kedua model uji di atas selanjutnya akan dianalisa dengan 4 bentuk konfigurasi uji pada bagian *underbody*. Untuk konfigurasi uji pertama tanpa *tunnel* seperti pada gambar 3.2. Konfigurasi uji kedua menggunakan *convergent-divergent tunnel* dengan konfigurasi $W_1 = W_2 = 1196.07$ mm dan $W_t = 300$ mm seperti pada gambar 3.3. Konfigurasi uji ketiga menggunakan *convergent-divergent tunnel* dengan konfigurasi $W_1 = W_2 = 1196.07$ mm dan $W_t = 40$ mm seperti pada gambar 3.4. Konfigurasi uji keempat menggunakan *constant area tunnel* ($W_1 = W_2 = W_t = 1196.07$ mm) seperti pada gambar 3.5.

Model Uji	Keterangan Konfigurasi	W₁	W_t	W₂
A	<i>Origin model tanpa Tunnel</i>	-	-	-
B	<i>Origin model Convergent-Divergent Tunnel (1)</i>	1196.07 mm	400 mm	1196.07 mm
C	<i>Origin model Convergent-Divergent Tunnel (2)</i>	1196.07 mm	300 mm	1196.07 mm
D	<i>Origin model Constant Area Tunnel</i>	1196.07 mm	1196.07 mm	1196.07 mm
E	<i>Modified model Convergent-Divergent Tunnel (1)</i>	1196.07 mm	400 mm	1196.07 mm
F	<i>Modified model Convergent-Divergent Tunnel (2)</i>	1196.07 mm	300 mm	1196.07 mm
G	<i>Modified model Constant Area Tunnel</i>	1196.07 mm	1196.07 mm	1196.07 mm

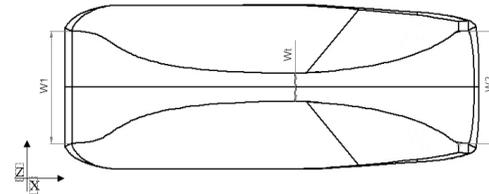
Tabel 3.1 Keterangan model dan konfigurasi uji bentuk *tunnel*



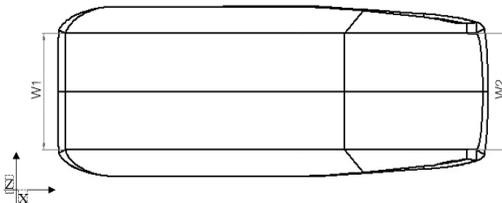
Gambar 3.2 Model uji A tampak bawah.



Gambar 3.3 Model uji B dan E tampak bawah.



Gambar 3.4 Model uji C dan F tampak bawah.

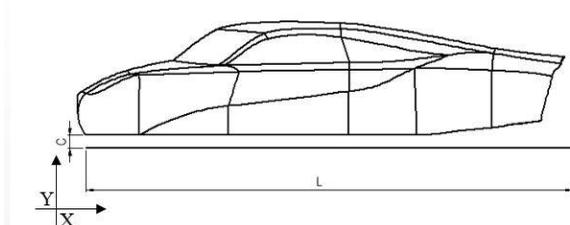


Gambar 3.5 Model uji D dan G tampak bawah.

Beberapa parameter yang menunjang penelitian kali ini ditetapkan pada kondisi ideal pengoperasian mobil Widya Wahana V. Konfigurasi pengujian kali ini ditetapkan dengan rasio celah terhadap panjang bodi (C/L) 0.027 tanpa *tunnel*; (C/L) 0.027 dengan *tunnel*; (C/L) 0.045 tanpa *tunnel* seperti pada tabel 3.2 dan gambar 3.6.

Tabel 3.2 Keterangan model dan konfigurasi uji rasio celah terhadap panjang bodi

Model Uji	C/L
A	0.045 dan 0.027
B	0.027
C	0.027
D	0.027
E	0.027
F	0.027
G	0.027



Gambar 3.6 Mobil Widya Wahana V tampak depan

3.2 Metode Numerik

Penelitian ini dilakukan secara numerik ditujukan untuk mengobservasi detail medan aliran 3D guna memberi gambaran yang lebih lengkap dari karakteristik medan aliran 3D.

3.2.1 Pre-processing

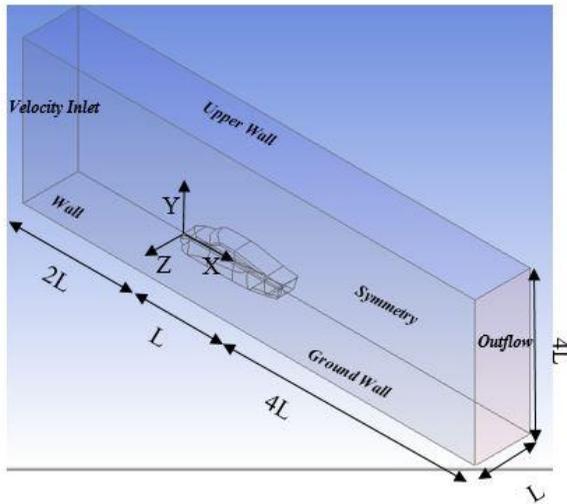
Langkah – langkah yang dilakukan pada tahap *pre-processing* adalah : Pembuatan model uji, pembuatan meshing pada domain, penentuan kondisi batas, dan penentuan parameter model.

A. Model Uji

Model uji berupa mobil Widya Wahana V dengan variasi bentuk *underbody* dan *ground clearance*. Model uji digambar menggunakan *software* Solidwork dengan model dan konfigurasi uji pada tabel 3.1 dan table 3.2.

B. Domain Simulasi

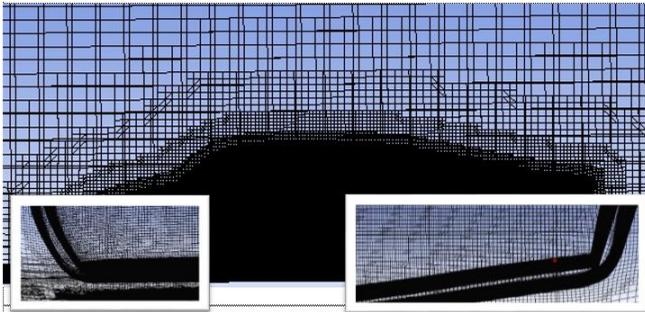
Domain simulasi yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada gambar 3.11



Gambar 3.7 Domain pemodelan simulasi 3D

C. Meshing

Membuat mesh merupakan pembagian domain uji menjadi elemen – elemen kecil sehingga kondisi batas dan parameter yang diperlukan dapat diterapkan kedalam elemen – elemen kecil tersebut. Bentuk mesh yang digunakan adalah *hex:map* pada bagian daerah uji model.



Gambar 3.8 Meshing 3D mobil Widya Wahana V.

3.2.2 Processing

Hasil meshing dari domain simulasi dimasukkan ke *software* Fluent 15.0 untuk dilakukan *processing*. Langkah-langkah dalam *processing* adalah sebagai berikut :

A. Models

Merupakan pemodelan dari aliran (estimasi karakteristik aliran), penentuan model turbulen yang digunakan, penentuan besarnya konstanta yang digunakan, serta penentuan *solver* apa yang akan digunakan. Pemodelan yang digunakan adalah model turbulen *k-ε realizable* (RKE). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang akurat pada kontur baik tekanan maupun kecepatan. Selain itu *k-ε realizable* (RKE) cocok digunakan untuk memodelkan aliran yang mengalami efek *swirling*.

B. Materials

Materials merupakan pemilihan jenis material yang akan digunakan dan memasukkan data – data *properties material*. Permodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan (ρ) = 1,1839 kg/m³, viskositas (μ) = 1,8714 x 10⁻⁵ N.s/m².

C. Operating Condition

Operating condition merupakan estimasi kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan tekanan pada

daerah operasi. Pada penelitian kali ini tekanan pada daerah operasi digunakan 101325 Pa.

D. Boundary Condition

Boundary condition merupakan penentuan parameter serta batasan pada aliran. Pada tahap ini ditentukan besarnya beban kecepatan, tekanan serta kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* dan *wall*.

E. Solution

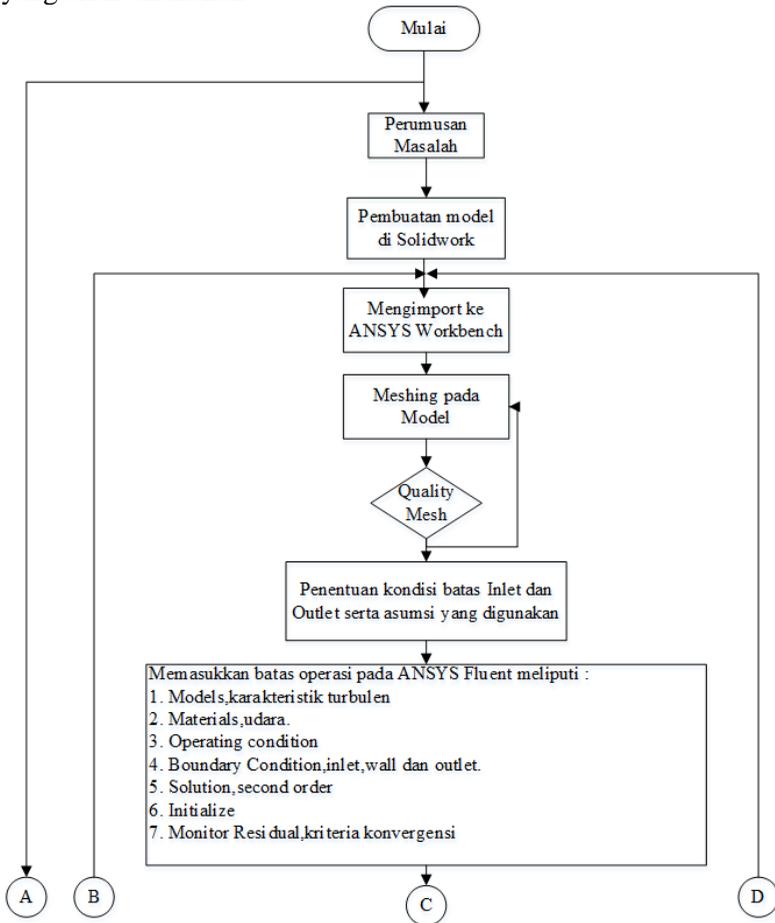
Penelitian ini akan menggunakan deskritisasi *second order* untuk *pressure*, *second order upwind* untuk momentum, *turbulence kinetic energi* dan *turbulence dissipation rate*. Besarnya *convergence criterion* yang diinginkan adalah sebesar 10^{-4} .

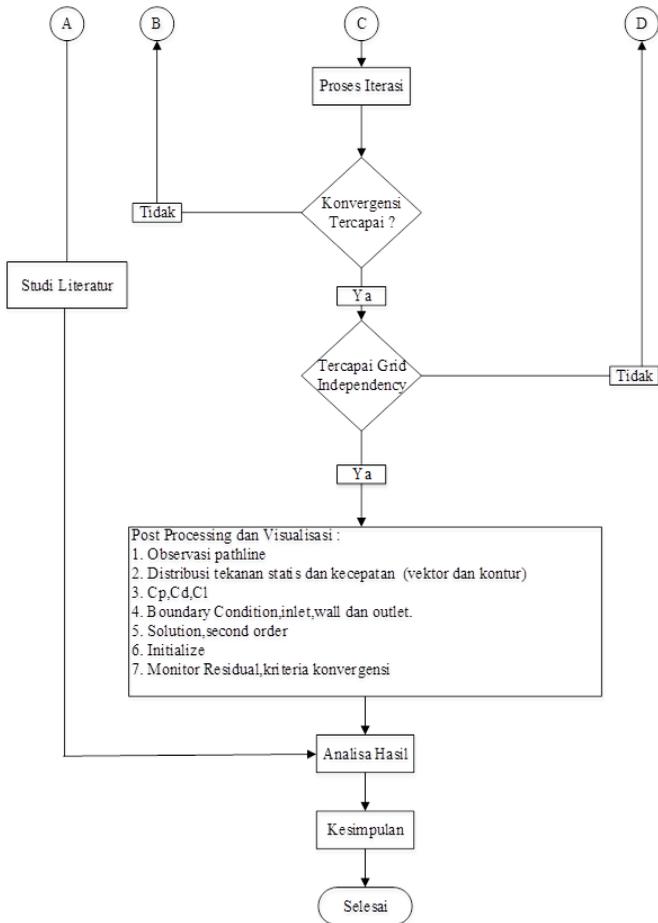
3.2.3 Post-processing

Setelah berhasil melakukan *running* langkah selanjutnya adalah tahap *Post-processing*. *Post-processing* merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa *coefficient drag*, *coefficient lift* dan *coefficient pressure*. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *velocity vector*, *velocity magnitude*, *streamline*, *pathlines* dari mobil Widya Wahana V.

3.3.1 Flowchart Analisa Numerik

Pada gambar 3.13 merupakan *flowchart* dari urutan proses pengambilan data menggunakan metode numerik pada penelitian yang akan dilakukan.





Gambar 3.9 *Flowchart* metodologi numerik

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada tugas akhir ini analisa aliran fluida dilakukan pada bagian *midspan* dan buritan dari kendaraan. Analisa aliran pada variasi model uji mobil Widya Wahana V dilakukan secara 3 dimensi dengan uji numerik menggunakan *software FLUENT*. Untuk mendapatkan *velocity contours*, grafik koefisien tekanan (C_p), koefisien *drag* (C_D), koefisien *lift* (C_L) dan *velocity vectors*, sehingga dapat dilakukan analisa distribusi tekanan, analisa distribusi kecepatan dan analisa gaya *drag*. Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi konfigurasi uji bodi dapat dilihat dari hasil *post-processing* kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang didukung dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran yang meliputi tampilan *pathlines*, *velocity contours*, dan *velocity vectors*.

4.1 Analisa Grid *Independency*

Analisa aliran fluida dengan menggunakan metode numerik diperlukan keakuratan data baik pada langkah *post-processing* maupun *pre-processing*. Hal ini dibutuhkan untuk memperoleh data yang valid pada pengaplikasian nyata. Sehingga diperlukan langkah *grid independency* untuk menentukan tingkat serta struktur grid terbaik dan terefisien sehingga hasil pemodelan mendekati sebenarnya.

Tabel 4.1 Analisa *grid independency*

Nama mesh	JUMLAH MESH	CD	Error
A	363000	0.3412	2.55%
B	625000	0.3157	7.25%
C	1785000	0.2432	0.11%
D	2130000	0.2421	0.11%
E	2765000	0.2418	-

Tabel 4.1 menunjukkan variasi *meshing* model uji pada permodelan 3D model uji A. Meshing A merupakan meshing yang paling renggang dengan jumlah mesh 363000, sedangkan meshing D adalah meshing yang paling rapat dengan jumlah *faces* 2765000. Dari tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada *mesh* C, D, dan E dengan variasi meshing yang berbeda dapat menghasilkan nilai koefisien *drag* yang sama. Sehingga pada variasi *meshing* C, D, dan E dapat diambil kesimpulan bahwa dengan *mesh* yang berbeda tersebut memiliki *grid independency* pada pengambilan data secara numerik. Dari kesimpulan diatas kita dapat gunakan variasi jumlah mesh pada *meshing* C untuk pemodelan numerik *FLUENT*.

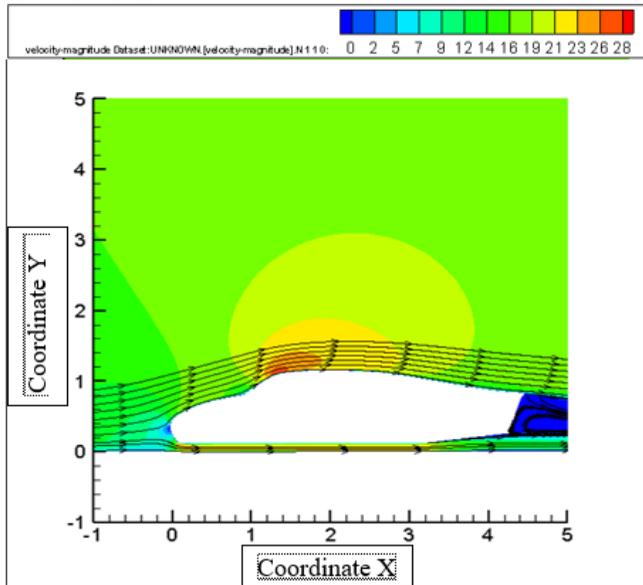
4.2 Analisa Karakteristik Aliran *Origin Model* ($C/L = 0.027$ dan 0.045)

Pemodelan Widya Wahana V pada model uji A, mencoba menggabungkan pengaruh *ground cleareance* rendah dengan *ground clearance* tinggi. Dimana *ground clearance* rendah pada mobil dapat menghasilkan nilai *coefficient drag* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *ground clearance* tinggi. Sedangkan *ground clearance* tinggi dapat menghasilkan nilai *coefficient lift* yang lebih besar jika dibandingkan dengan *ground clearance* rendah. Hal ini dikarenakan faktor yang sangat mempengaruhi terjadinya gaya angkat pada *road vehicle* adalah jarak dengan jalan (*ground clearance*). Berdasarkan teori bahwa bagian bawah kendaraan akan membentuk efek venturi yang menghasilkan daerah bertekanan rendah, yang menciptakan gaya angkat negatif (*downforce*). Sehingga dilakukan analisa karakteristik laluan udara pada pemodelan Widya Wahana V tanpa *tunnel* dengan variasi *ground clearance* tinggi dan *ground clearance* rendah. Hasil analisa ini akan menunjang model uji dengan variasi desain *tunnel* pada bodi Widya Wahana V.

4.2.1 Analisa Medan Aliran Model Uji A ($C/L = 0.027$)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi model uji A, dapat dilihat dari hasil *post-*

processing kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang ditunjang dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *velocity contour* disekitar bodi model uji A untuk $C/L = 0.027$, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.



Gambar 4.1 *Velocity contour* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji A ($C/L = 0.027$)

Gambar 4.1 menunjukkan *velocity contour* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.1 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah *leading edge* bodi bagian depan.

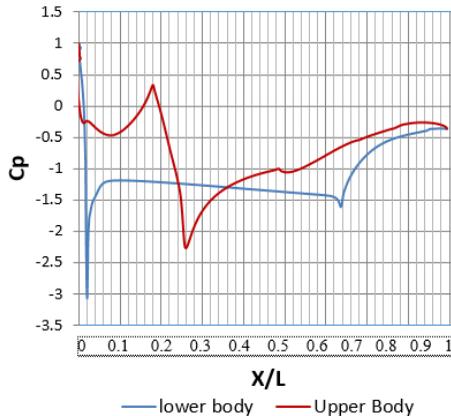
Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper*

body) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji A. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi model uji A, sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada kontur bodi menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji A sangat bervariasi.

Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji A akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi model uji A akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dengan bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.1 ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upperside*, hal ini dapat disebabkan karena dua faktor. Faktor pertama ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body*. Faktor kedua *ground clearance* pada model uji A memperkecil *cross sectional area*. Penyempitan *cross sectional area* juga terjadi setelah aliran udara melewati daerah *leading edge*, hal ini ditunjukkan dengan spektrum warna merah yang mendominasi sepanjang *lower body*.

Pada *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat dua sebab. Pertama karena adanya *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke arah Y, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.1 dimana sebelumnya spektrum warna merah mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna biru pada daerah *diffuser*. Kedua adalah perubahan kontur bodi model uji A yang ekstrim pada *trailing edge*, mengakibatkan aliran udara tidak mampu mengikuti bentuk sehingga terlepas dan membentuk *vortex*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik laluan udara yang melintasi bodi Widya Wahana V, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang *coefficient pressure* (C_p) pada daerah *midspan* mobil. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2 Grafik *coefficient pressure* model uji A ($C/L = 0.027$)

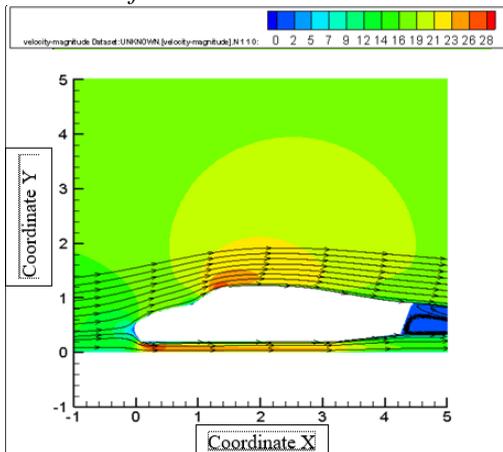
Gambar 4.2 menunjukkan grafik *coefficient pressure* tekanan aliran pada model uji A sepanjang *midspan*. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Hambatan aerodinamika pada daerah *leading edge*, yang pertama adalah ketidaksimetrisan kontur permukaan *upper body* dan kontur permukaan *lower body*. Hambatan aerodinamika yang kedua adanya efek *ground clearance* sehingga terjadinya penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena penurunan tekanan yang tajam sebelumnya dilihat secara kualitatif pada gambar 4.1, tampak terjadi pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0186$) yang ditandai dengan terjadinya penurunan nilai C_p pada grafik. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L =$

0.1756) hingga ($X/L = 0.325$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan spektrum warna menjadi merah yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan aliran udara. Bagian *lower body* didominasi dengan *trendline* grafik yang cenderung lurus setelah fenomena percepatan aliran udara di *leading edge*, hal ini diakibatkan karena kontur bodi yang tidak banyak berubah. Namun ketika aliran udara melewati bagian *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan yang diawali dengan adanya penurunan nilai C_p pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.738$). Efek *ground clearance* rendah yang diikuti dengan *diffuser* pada *lower body* serta perubahan kontur secara ekstrim pada *trailing edge* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya daerah bertekanan rendah pada daerah belakang kendaraan yang disebut *wake*.

4.2.2 Analisa Medan Aliran Model Uji A ($C/L = 0.045$)

Evaluasi dari pemodelan 3D laluan udara disekitar bodi model uji A untuk $C/L = 0.045$, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.



Gambar 4.3 *Velocity contours* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji A ($C/L = 0.045$)

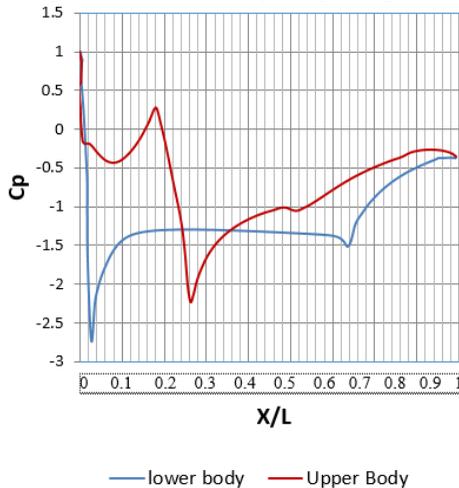
Gambar 4.3 menunjukkan *velocity contours* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.3 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah *leading edge* bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji A. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi model uji A sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada kontur bodi model uji A menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji sangat bervariasi.

Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji A akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi model uji akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi model uji A. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dengan bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.3 ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upperside*, hal ini dapat disebabkan karena dua faktor. Faktor pertama ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body*. Faktor kedua *ground clearance* pada mobil memperkecil *cross sectional area*. Penyempitan *cross sectional area* juga terjadi setelah aliran udara melewati daerah *leading edge*, hal ini ditunjukkan dengan spektrum warna merah yang mendominasi sepanjang *lower body*.

Pada *trailing edge* mobil, terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat dua sebab. Pertama karena adanya *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke arah Y, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.3 dimana sebelumnya spektrum warna merah mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna biru pada daerah *diffuser*. Kedua adalah perubahan kontur bodi model uji A yang ekstrim pada *trailing edge*, mengakibatkan aliran udara tidak mampu mengikuti bentuk sehingga terlepas dan membentuk *vortex*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik aliran udara yang melintasi bodi Widya Wahana V, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Grafik *coefficient pressure* model uji A ($C/L = 0.045$)

Gambar 4.4 menunjukkan grafik *coefficient pressure* tekanan aliran model uji A sepanjang *midspan*. Dapat dilihat bahwa slope

penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Hambatan aerodinamika pada daerah *leading edge*, yang pertama adalah ketidaksimetrisan kontur permukaan *upper body* dan kontur permukaan *lower body*. Hambatan aerodinamika yang kedua adanya efek *ground clearance* sehingga terjadinya penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena penurunan tekanan yang tajam sebelumnya dilihat secara kualitatif pada gambar 4.3, tampak terjadi pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0186$) yang ditandai dengan terjadinya penurunan nilai C_p pada grafik. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L = 0.1756$) hingga ($X/L = 0.325$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan spektrum warna menjadi merah yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan *trendline* grafik yang cenderung lurus setelah fenomena percepatan aliran udara di *leading edge*, hal ini diakibatkan karena kontur bodi yang tidak banyak berubah. Namun ketika aliran udara melewati bagian *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan yang diawali dengan adanya penurunan nilai C_p pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.738$). Efek *ground clearance* rendah yang diikuti dengan *diffuser* pada *lower body* serta perubahan kontur secara ekstrim pada *trailing edge* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya daerah bertekanan rendah pada daerah belakang kendaraan yang disebut *wake*.

4.2.3 Analisa Gaya Aerodinamika *Origin Model* ($C/L = 0.027$ dan 0.045)

Analisa mengenai data kuantitatif diperlukan untuk menunjang dan sekaligus menyimpulkan argumentasi mengenai fenomena yang terobservasi pada data kualitatif. Konsep perhitungan gaya-gaya aerodinamika pada model uji seperti gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*), akan dibahas lebih lanjut baik melalui pemodelan 3D.

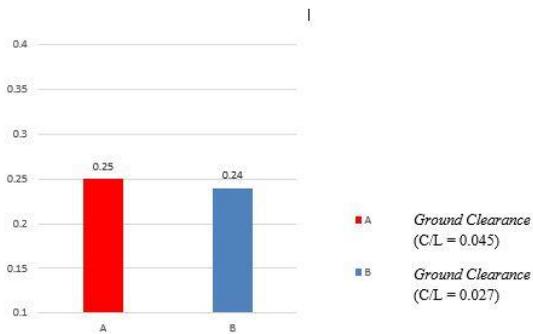
4.2.3.1 Analisa *Drag Force* Model Uji A ($C/L = 0.027$ dan 0.045)

Terminologi perhitungan gaya *drag* pada model uji A, dapat ditunjukkan melalui hasil analisa numerik. Gaya *drag* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *drag*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$CD = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

dimana :

- F_D = Gaya *drag* (kg.m/s^2)
- V = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- A_f = Luas frontal model uji (m^2)
- ρ = Densitas (kg/ m^3)



Gambar 4.5 Grafik *Drag Coefficient* model uji A ($C/L = 0.027$ dan 0.045)

Gambar 4.5 menunjukkan grafik perbandingan *drag coefficient* pada model uji A dengan variasi *ground clearance* tinggi ($C/L = 0.045$) dan *ground clearance* rendah ($C/L = 0.027$). Dari grafik di atas dapat kita lihat, bahwa model uji A dengan variasi *ground clearance* rendah memiliki nilai *drag coefficient* yang lebih baik jika dibandingkan dengan *ground clearance* tinggi. Dengan menggunakan desain model uji yang sama, namun variasi *ground clearance* rendah memiliki perbedaan pada luas frontal yang lebih kecil. Dengan memperkecil luas frontal yang dilalui udara dapat memberikan kontribusi dalam mengurangi *drag force* yang diakibatkan *frontal pressure*. Analisa diatas terbukti benar dengan dibuktikan melalui hasil analisa numerik yang menunjukkan bahwa untuk variasi *ground clearance* rendah memiliki nilai $cd = 0.24$ sedangkan untuk variasi *ground clearance* tinggi memiliki nilai $cd = 0.25$.

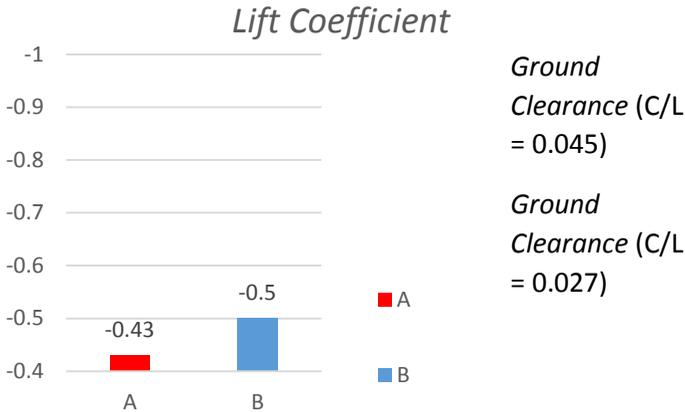
4.2.3.2 Analisa *Lift Force* Model Uji A ($C/L = 0.027$ dan 0.045)

Terminologi perhitungan gaya *lift* pada model uji A dapat ditunjukkan melalui hasil analisa numerik. Gaya *lift* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *lift*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$CL = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

dimana :

- F_L = Gaya *drag* ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)
- V = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- A_f = Luas frontal model uji (m^2)
- ρ = Densitas (kg/m^3)



Gambar 4.6 Grafik *Lift Coefficient* model uji A (C/L = 0.027 dan 0.045)

Gambar 4.6 menunjukkan grafik perbandingan *lift coefficient* pada model uji A dengan variasi *ground clearance* tinggi (C/L = 0.045) dan *ground clearance* rendah (C/L = 0.027). Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa model uji A dengan variasi *ground clearance* tinggi memiliki nilai *lift coefficient* yang lebih baik jika dibandingkan dengan *ground clearance* rendah. Dengan menggunakan desain mobil yang sama namun variasi *ground clearance* tinggi memberikan ruang laluan udara yang lebih. Dengan memberikan ruang laluan udara yang lebih dapat memberikan kontribusi dalam menambah *lift force* yang diakibatkan berkurangnya percepatan aliran udara yang melewati bagian *lowerside body*. Analisa diatas terbukti benar dengan dibuktikan melalui hasil analisa numerik yang menunjukkan bahwa untuk variasi *ground clearance* rendah memiliki nilai $cl = -0.5$ sedangkan untuk variasi *ground clearance* tinggi memiliki nilai $cl = -0.43$.

Dari hasil analisa *drag force* dan juga *lift force* dapat diambil kesimpulan untuk tetap mempertahankan *ground clearance* yang

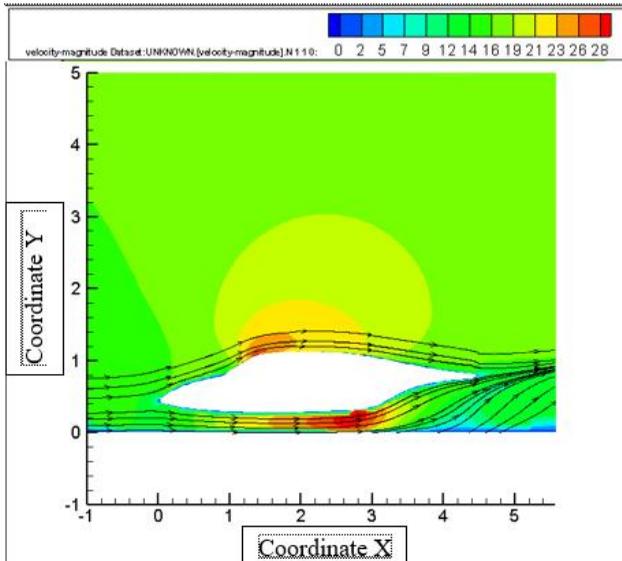
rendah pada mobil Widya Wahana V untuk mengurangi *drag force* yang terjadi namun juga menambahkan ruang laluan udara dengan memberikan *tunnel* pada *lowerside body* untuk menambah *lift force*. Sehingga desain mobil Widya Wahana V tidak hanya mampu untuk menghasilkan *coefficient drag* yang rendah namun juga mampu mengurangi *rolling resistance* pada kendaraan dengan *lift force*.

4.3 Analisa Karakteristik Aliran *Origin Model* Dengan *Tunnel* (C/L = 0.027)

Setelah diambil kesimpulan pada sub-bab sebelumnya bahwa pemodelan Widya Wahana V akan menggabungkan pengaruh *ground clearance* rendah dengan *ground clearance* tinggi. Dimana *ground clearance* rendah pada mobil dapat menghasilkan nilai *coefficient drag* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *ground clearance* tinggi. Sedangkan *ground clearance* tinggi dapat menghasilkan nilai *coefficient lift* yang lebih besar jika dibandingkan dengan *ground clearance* rendah. Sehingga dilakukan analisa karakteristik laluan udara pada pemodelan Widya Wahana V yang ditambahkan *tunnel* pada *lowerside body* dengan beberapa variasi desain *tunnel*. Hasil analisa ini akan menunjang pemilahan variasi desain *tunnel* pada bodi Widya Wahana V.

4.3.1 Analisa Medan Aliran Model Uji B (*Convergent-Divergent Tunnel Tipe 1*; C/L = 0.027)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi dapat dilihat dari hasil *post-processing* kuantitatif berupa grafik distribusi Cp yang ditunjang dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *contour* kecepatan disekitar bodi model uji B, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.



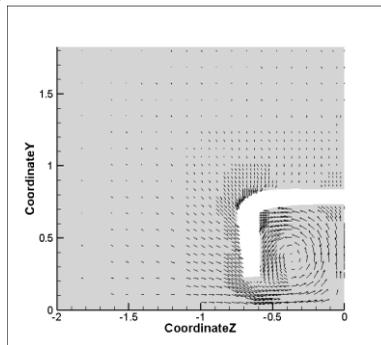
Gambar 4.7 *Velocity contours* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji B (*convergent-divergent tunnel* tipe 1; $C/L = 0.027$)

Gambar 4.7 menunjukkan *velocity contours* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.7 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah *leading edge* bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji B. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi model uji B, sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan

yang terjadi pada kontur bodi, menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji sangat bervariasi.

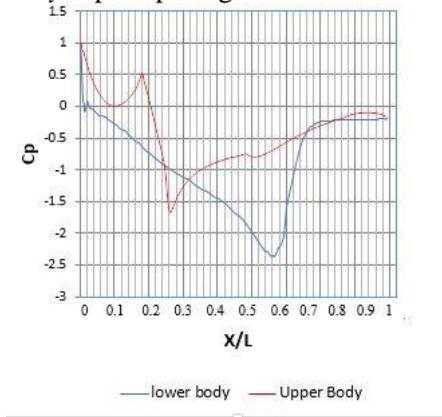
Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi model uji B. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dari bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.7 juga ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upper side*, hal ini disebabkan ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body* dimana kelengkungan kontur *upper body* yang lebih dibandingkan *lower body*, sehingga aliran udara lebih mudah untuk melalui bagian *lowerside*. Setelah aliran melewati daerah *leading edge* terjadi percepatan pada bagian *lowerside* yang diakibatkan oleh penyempitan area ke arah sumbu Z akibat bentuk *convergent-divergent* pada *tunnel*. hal ini ditunjukkan dengan *spektrum* warna merah yang mendominasi sebelum kontur *divergent* sepanjang *lowerside body*.



Gambar 4.8 *Velocity vector* di model uji B (*convergent-divergent tunnel* tipe 1; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$

Gambar 4.8 menampilkan gambar potongan bodi model uji B tampak belakang dengan posisi potongan $X=93\%L$. Pada bagian *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat pengaruh *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke sumbu Y dan sumbu Z, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran udara, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.7 di mana sebelumnya spektrum warna merah mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna hijau pada daerah *diffuser*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik laluan udara yang melintasi bodi model uji B, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9 Grafik *coefficient pressure* di model uji B (*convergent-divergent tunnel* tipe 1; $C/L = 0.027$)

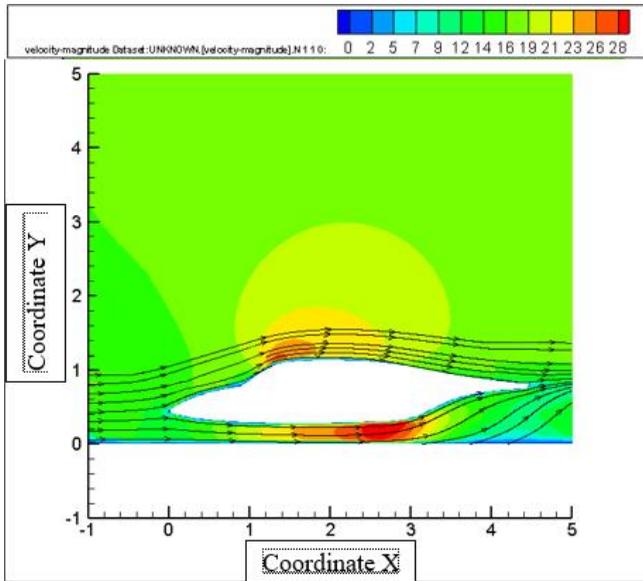
Gambar 4.9 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan aliran secara 2D. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Ketidaksimetrisan

kontur permukaan *upper body* dengan kontur permukaan *lower body* dan juga didukung adanya efek *convergent* yang menuntun aliran udara untuk masuk *tunnel* mengakibatkan penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena terbentuknya *bubble separation* tampak terjadi pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0176$) yang ditandai dengan terjadinya fluktuasi pada grafik. Fenomena *bubble separation* adalah injeksi *energy enterainment* dari *free stream* yang mampu mendorong aliran terseparasi untuk kembali *attach* ke kontur karena momentum *free stream* lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* dari kontur permukaan *lower body*. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L = 0.1756$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan *spektrum* warna menjadi merah yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan trendline grafik yang terus menurun hal ini diakibatkan karena adanya perubahan kontur bodi akibat bentuk *convergent-divergent tunnel*. Pada kontur *divergent* yang diikuti dengan adanya *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan seperti pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.673$). Efek kontur *divergent*, *diffuser* dan *ground clearance* pada *lower body* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya *vortex* pada daerah belakang kendaraan.

4.3.2 Analisa Medan Aliran Model Uji C (*Convergent-Divergent Tunnel Tipe 2; C/L 0.027*)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi dapat dilihat dari hasil *postprocessing* kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang ditunjang dengan *postprocessing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *contour* kecepatan disekitar bodi model uji C, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.



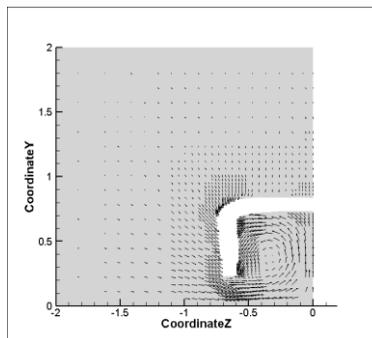
Gambar 4.10 *Velocity contour* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji C (*convergent-divergent tunnel* tipe 2; $C/L = 0.027$)

Gambar 4.10 menunjukkan *velocity contours* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.10 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah *leading edge* bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji C. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi sehingga timbul

gradient kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada kontur bodi menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji C sangat bervariasi.

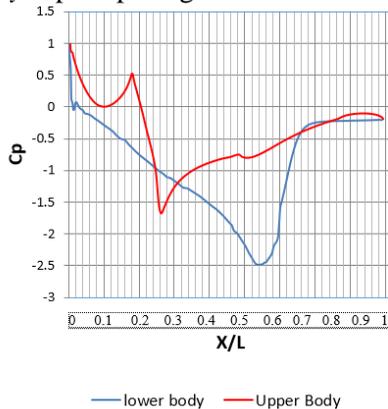
Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji C, akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi model uji C. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dari bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.10 juga ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upperside* hal ini disebabkan ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body* dimana kelengkungan kontur *upper body* yang lebih dibandingkan *lower body*. Setelah aliran melewati daerah *leading edge* terjadi percepatan pada bagian *lower body* yang diakibatkan oleh penyempitan area ke arah sumbu Z akibat bentuk *convergent-divergent* pada *tunnel*. hal ini ditunjukkan dengan spektrum warna merah yang mendominasi sebelum kontur *divergent* sepanjang *lower body*.



Gambar 4.11 *Velocity vector* di model uji C (*convergent-divergent tunnel* tipe 2; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$

Gambar 4.11 menampilkan gambar potongan mobil Widya Wahana V tampak belakang dengan posisi potongan $X=93\%L$. Pada bagian *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat pengaruh *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke sumbu Y dan sumbu Z, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.10 di mana sebelumnya spektrum warna merah mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna hijau pada daerah *diffuser*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik aliran udara yang melintasi bodi model uji C, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.12 berikut ini.



Gambar 4.12 Grafik *coefficient pressure* di model uji C (*convergent-divergent tunnel* tipe 2; $C/L = 0.027$)

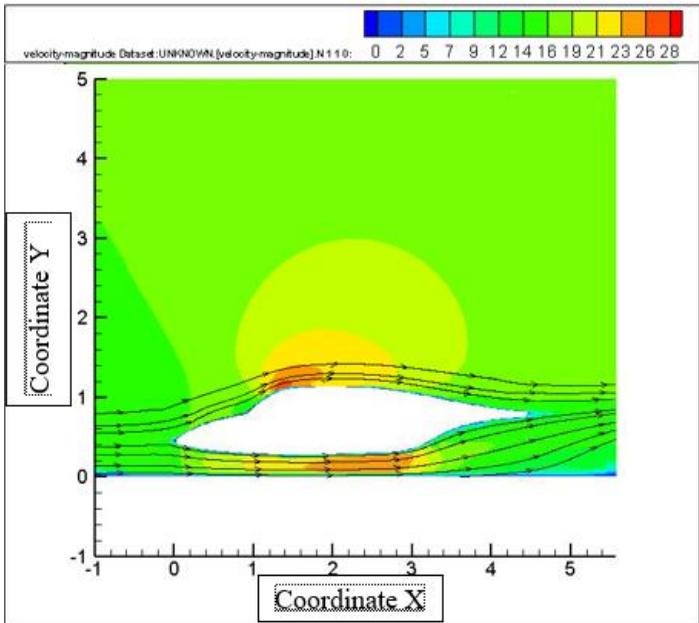
Gambar 4.12 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan aliran secara 2D. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Ketidaksimetrisan

kontur permukaan *upper body* dan kontur permukaan *lower body* dan juga didukung adanya efek *ground clearance* yang mengakibatkan penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena terbentuknya *bubble separation* tampak terjadi pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0176$) yang ditandai dengan terjadinya fluktuasi pada grafik. Fenomena *bubble separation* adalah injeksi *energi enterainment* dari *free stream* yang mampu mendorong aliran terseparasi untuk kembali *attach* ke kontur karena momentum *free stream* lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* dari kontur permukaan *lower body*. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L = 0.1756$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan *spektrum* warna menjadi merah yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan trendline grafik yang terus menurun hal ini diakibatkan karena terjadinya perubahan kontur bodi akibat bentuk *convergent-divergent tunnel*. Pada model uji C di mana pada lebar *throat* (w_t) diperkecil yang sebelumnya pada model uji B $w_t = 400$ mm menjadi $w_t = 300$ mm. Perubahan ini mengakibatkan penurunan nilai C_p *lower body* pada bagian *throat* jika dibandingkan dengan model uji B. Pada kontur *divergent* yang diikuti dengan adanya efek *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan seperti pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.673$). Efek kontur *divergent*, *diffuser* dan *ground clearance* pada *lowerbody* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya *vortex* pada daerah belakang kendaraan.

4.3.3 Analisa Medan Aliran Model Uji D (*Constant Area Tunnel*; $C/L = 0.027$)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi dapat dilihat dari hasil *post-processing* kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang ditunjang dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *contour* kecepatan disekitar bodi model uji D, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.



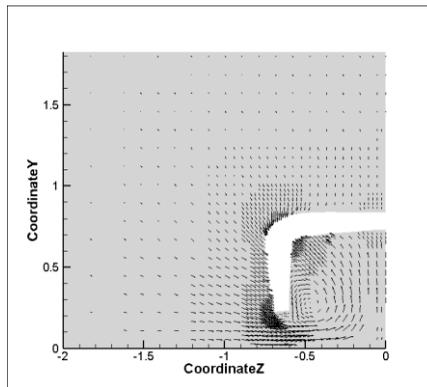
Gambar 4.13 *Velocity contour* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji D (*constant area tunnel*; C/L 0.027)

Gambar 4.13 menunjukkan *velocity contour* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.13 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji D. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada

kontur bodi menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji D sangat bervariasi.

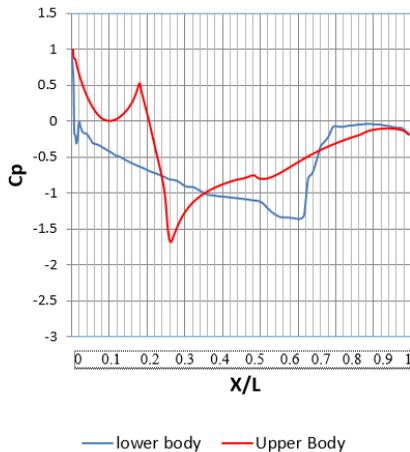
Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji D akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi model uji D akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dari bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.13 juga ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upper side* hal ini disebabkan ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body* dimana kelengkungan kontur *upper body* yang lebih dibandingkan *lower body*. Setelah aliran melewati daerah *leading edge* terjadi percepatan pada bagian *lower body* yang diakibatkan oleh pelebaran laluan udara ke arah sumbu Y. hal ini ditunjukkan dengan *spektrum* warna kuning yang mendominasi sepanjang *lower body*.



Gambar 4.14 *Velocity vector* di model uji D (*constant area tunnel*; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$

Gambar 4.14 menampilkan gambar potongan model uji D tampak belakang dengan posisi potongan $X=93\%L$. Pada *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat pengaruh *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke arah sumbu Y, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.13 di mana sebelumnya *spektrum* warna merah mendominasi pada *lower body* berubah menjadi *spektrum* warna hijau pada daerah *diffuser*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik laluan udara yang melintasi bodi model uji D, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4.15 Grafik *coefficient pressure* di model uji D (*constant area tunnel*; $C/L = 0.027$)

Gambar 4.15 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan aliran secara 2D. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan,

hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Ketidaksimetrisan kontur permukaan *upper body* dan kontur permukaan *lower body* dan juga didukung adanya efek *ground clearance* yang mengakibatkan penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena terbentuknya *bubble separation* tampak terjadi pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0176$) yang ditandai dengan terjadinya fluktuasi pada grafik. Fenomena *bubble separation* adalah injeksi *energi enterainment* dari *free stream* yang mampu mendorong aliran terseparasi untuk kembali *attach* ke kontur karena momentum *free stream* lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* dari kontur permukaan *lower body*. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L = 0.1756$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan *spektrum* warna menjadi kuning yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan *trendline* grafik yang terus menurun hal ini diakibatkan karena adanya ruang laluan udara dengan bentuk *constant area tunnel*. Pada model uji D tidak adanya perubahan pada lebar *tunnel* ke arah sumbu Z. Hal ini mengakibatkan penurunan nilai C_p tidak sebesar jika dibandingkan dengan model uji B dan C. Namun dengan adanya efek *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan seperti pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.673$). Efek *diffuser* dan *ground clearance* pada *lower body* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya *vortex* pada daerah belakang kendaraan.

4.3.4 Analisa Gaya Aerodinamika *Origin Model* Dengan *Tunnel* ($C/L = 0.027$)

Analisa mengenai data kuantitatif diperlukan untuk menunjang dan sekaligus menyimpulkan argumentasi mengenai fenomena yang terobservasi pada data kualitatif. Konsep perhitungan gaya-gaya aerodinamika pada model uji seperti gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*), akan dibahas lebih lanjut baik melalui pemodelan 3D pada daerah *midspan*.

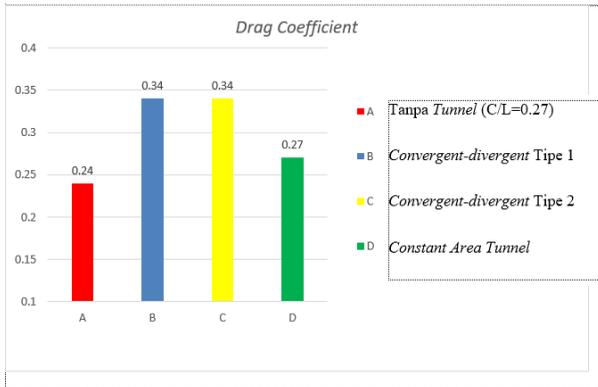
4.3.4.1 Analisa *Drag Force* Model Uji A, B, C, dan D ($C/L = 0.027$)

Terminologi perhitungan gaya *drag* pada model uji B,C dan D dapat ditunjukkan melalui hasil analisa numerik. Gaya *drag* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *drag*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$CD = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

dimana :

- F_D = Gaya *drag* ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)
- V = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- A_f = Luas frontal model uji (m^2)
- ρ = Densitas (kg/ m^3)



Gambar 4.16 Grafik *Drag Coefficient* model uji A,B,C, dan D ($C/L = 0.027$)

Gambar 4.16 menunjukkan grafik perbandingan *drag coefficient* pada tiap model uji untuk *origin model* dengan *ground clearance* rendah. Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa model uji A dengan variasi *ground clearance* rendah memiliki nilai *drag coefficient* yang lebih baik jika dibandingkan dengan model uji B,C dan D. Hal ini dapat terjadi dikarenakan penambahan area laluan udara pada *lowerside bodi* ke arah sumbu Z dan sumbu Y mengakibatkan udara lebih memilih untuk melewati bagian *lowerside*. Hal ini dapat dibuktikan bahwa pada gambar *contour velocity* pada model uji B, C, dan D bagian *lower body* menunjukkan percepatan udara yang lebih lebar jika dibandingkan dengan konfigurasi uji tanpa *tunnel*. Efek dari pelebaran dua arah sumbu ini mengakibatkan terbentuknya *blockage area* yang diikuti dengan membesarnya nilai *coefficient drag*. Hasil analisa numerik diatas membuktikan bahwa penambahan ruang laluan udara yang terlalu besar membuat nilai *coefficient drag* ikut membesar.

4.3.4.2 Analisa Lift Force Model Uji A, B, C, dan D (C/L = 0.027)

Terminologi perhitungan gaya *lift* pada model mobil Widya Wahana V dapat ditunjukkan melalui hasil analisa numerik. Gaya *lift* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *lift*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$CL = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

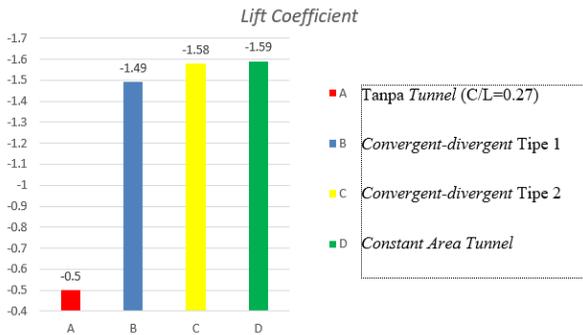
dimana :

F_L = Gaya *drag* (kg.m/s²)

V = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)

A_f = Luas frontal model uji (m²)

ρ = Densitas (kg/ m³)



Gambar 4.17 Grafik *Lift Coefficient* model uji A, B, C, dan D ($C/L = 0.027$)

Gambar 4.17 menunjukkan grafik perbandingan *lift coefficient* pada tiap model uji untuk *origin model* dengan *ground clearance* rendah. Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa mobil model uji A memiliki nilai *coefficient lift* yang terbaik dibandingkan model uji B,C,dan D. Penambahan ruang laluan udara dengan *tunnel* terbukti justru menambah jumlah dan percepatan udara sehingga tidak menghasilkan *lift force* yang lebih baik. Hasil analisa numerik diatas membuktikan bahwa penambahan ruang laluan udara dengan *tunnel* yang terlalu besar tidak membuat nilai *coefficient lift* ikut membesar.

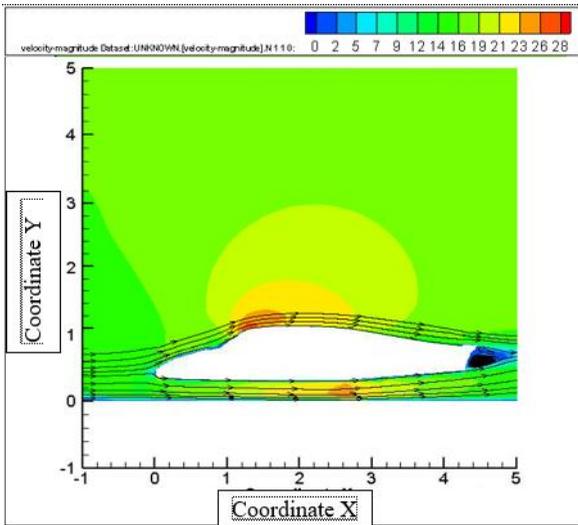
Dari hasil analisa *drag force* dan juga *lift force* dapat diambil kesimpulan untuk mengurangi ruang laluan udara ke arah sumbu Y dengan harapan dapat mengurangi *drag force* yang terjadi dan juga menambah *lift force*. Sehingga desain mobil Widya Wahana V tidak hanya mampu untuk menghasilkan *coefficient drag* yang rendah namun juga mampu mengurangi *rolling resistance* pada kendaraan dengan *lift force*.

4.4 Analisa Karakteristik Aliran *Modified Model* Dengan *Tunnel* ($C/L = 0.027$)

Setelah diambil kesimpulan pada sub-bab sebelumnya bahwa pemodelan Widya Wahana V yang menggabungkan pengaruh *ground clearance* rendah dengan *ground clearance* tinggi membutuhkan evaluasi desain. Dimana penambahan *tunnel* pada mobil tidak menghasilkan nilai *coefficient drag* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan konfigurasi uji tanpa *tunnel*. Begitu juga dengan nilai *coefficient lift* yang tidak lebih besar jika dibandingkan dengan konfigurasi uji tanpa *tunnel*. Sehingga dilakukan analisa karakteristik laluan udara pada *modified model*. Hasil analisa ini akan menunjang pemilihan variasi desain *tunnel* pada bodi Widya Wahana V.

4.4.1 Analisa Medan Aliran Model Uji E (*Convergent-Divergent Tunnel Tipe 1*; $C/L = 0.027$)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi dapat dilihat dari hasil *post-processing* kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang ditunjang dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *contour* kecepatan disekitar bodi model uji E, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.



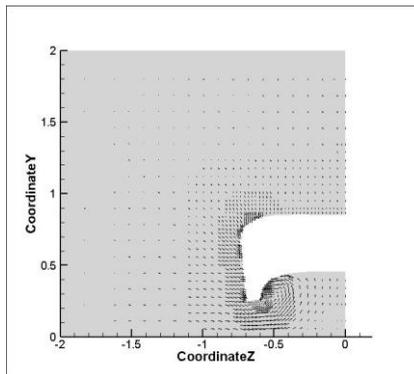
Gambar 4.18 *Contour velocity* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji E (*convergent-divergent tunnel* tipe 1; $C/L = 0.027$)

Gambar 4.18 menunjukkan *velocity contour* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Dikarenakan nilai $C_p = 1$ terjadi di daerah dengan lingkup lebih luas, maka disebut titik multistagnasi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.18 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji E. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada

kontur bodi menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji E sangat bervariasi.

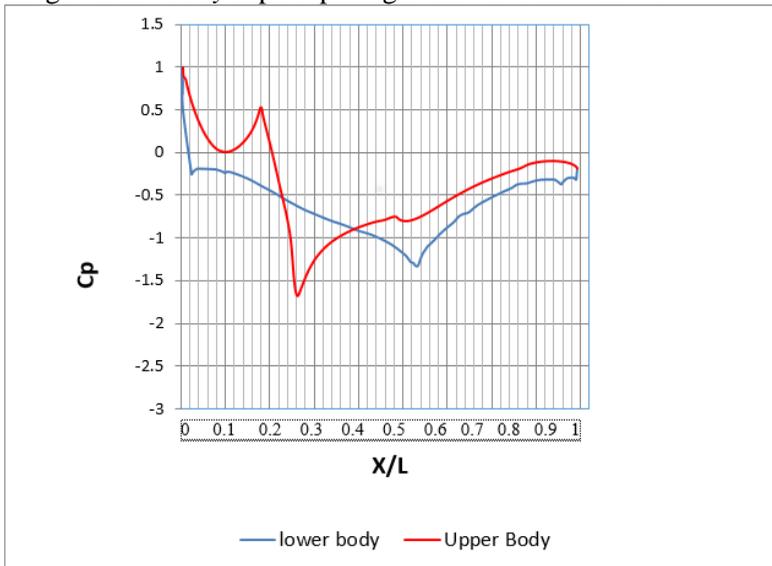
Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji E akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi model uji akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi model uji E. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dari bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.18 juga ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upper side* hal ini disebabkan ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body* dimana kelengkungan kontur *upper body* yang lebih dibandingkan *lower body*. Setelah aliran melewati daerah *leading edge* terjadi percepatan pada bagian *lower body* yang diakibatkan oleh penyempitan area ke arah sumbu Z akibat bentuk *convergent-divergent* pada *tunnel*. Hal ini ditunjukkan dengan *spektrum* warna kuning yang mendominasi sebelum kontur *divergent* sepanjang *lower body*.



Gambar 4.19 *Velocity vector* di model uji E (*convergent-divergent tunnel* tipe 1; $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$

Gambar 4.19 menampilkan gambar potongan model uji E tampak belakang dengan posisi potongan $X=93\%L$. Terlihat pada *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat pengaruh *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke sumbu Y dan sumbu Z, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.19 di mana sebelumnya spektrum warna kuning mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna hijau pada daerah *diffuser*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik laluan udara yang melintasi bodi model uji E, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.20 berikut ini.



Gambar 4.20 Grafik *coefficient pressure* di model uji E (*convergent-divergent tunnel* tipe 1; $C/L = 0.027$)

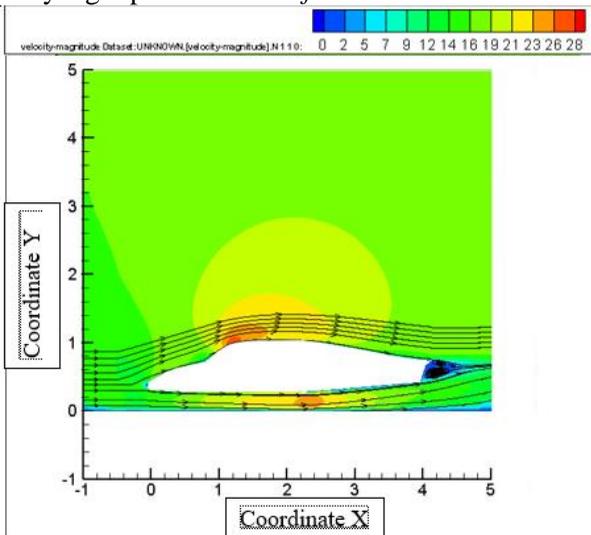
Gambar 4.20 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan aliran secara 2D. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan

pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Ketidaksimetrisan kontur permukaan *upper body* dengan kontur permukaan *lower body* dan juga didukung adanya efek *convergent* yang menuntun aliran udara untuk masuk *tunnel* mengakibatkan penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena terbentuknya *bubble separation* pada *tunnel* dengan model uji B tidak tampak terjadi pada variasi model uji E bisa dilihat pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0176$) yang pada *tunnel* dengan model uji B terjadi fluktuasi pada grafik namun pada variasi model uji E tidak terjadi, hal ini membuktikan bahwa terjadi perbaikan pada kontur bodi *tunnel* dengan variasi model uji E. Fenomena *bubble separation* adalah injeksi *energi enterainment* dari *free stream* yang mampu mendorong aliran terseparasi untuk kembali *attach* ke kontur karena momentum *free stream* lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* dari kontur permukaan *lower body*. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L = 0.1756$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan *spektrum* warna menjadi kuning yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan *trendline* grafik yang terus menurun hal ini diakibatkan karena terjadinya perubahan kontur bodi akibat bentuk *convergent-divergent tunnel*. Berbeda dengan model uji B dimana penurunan nilai C_p pada *lowerside* menyentuh nilai -2.3 untuk *tunnel* dengan variasi model uji B penurunan nilai C_p hanya menyentuh nilai -1.3. Pada kontur *divergent* ditambah dengan adanya *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan seperti pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.673$). Efek kontur *divergent*, *diffuser* dan *ground clearance* pada *lower body* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya *vortex* pada daerah belakang kendaraan.

4.4.2 Analisa Medan Aliran Model Uji F (*Convergent-Divergent Tunnel Tipe 2; C/L = 0.027*)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi dapat dilihat dari hasil *postprocessing* kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang ditunjang dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *contour* kecepatan disekitar bodi model uji F, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.

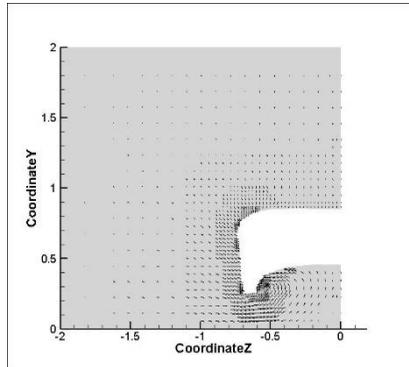


Gambar 4.21 *Contour velocity* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji F (*convergent-divergent tunnel tipe 2; C/L = 0.027*)

Gambar 4.21 menunjukkan *velocity contour* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.21 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji F. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada kontur bodi menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji F sangat bervariasi.

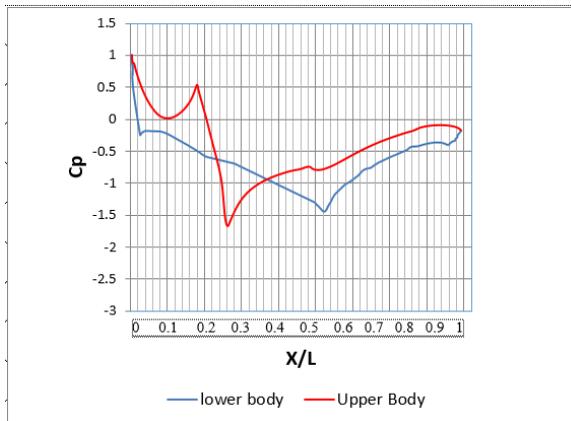
Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji F akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi model uji akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dari bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.21 juga ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upperside* hal ini disebabkan ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body* dimana kelengkungan kontur *upper body* yang lebih dibandingkan *lower body* sehingga terjadi pergeseran *stagnation point* pada *leading edge*. Setelah aliran melewati daerah *leading edge* terjadi percepatan pada bagian *lower body* yang diakibatkan oleh penyempitan area ke arah sumbu Z akibat bentuk *convergent-divergent* pada *tunnel*. hal ini ditunjukkan dengan spektrum warna kuning yang mendominasi setelah kontur *convergent* sepanjang *lower body*.



Gambar 4.22 *Velocity vector* di model uji F (*convergent-divergent tunnel* tipe 2; $C/L = 0.027$)

Gambar 4.22 menampilkan gambar potongan model uji F tampak belakang dengan posisi potongan $X=93\%L$. Terlihat pada *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat pengaruh *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perubahan luas area ke sumbu Y dan sumbu Z, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.21 di mana sebelumnya spektrum warna kuning mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna hijau pada daerah *diffuser*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik laluan udara yang melintasi bodi model uji F, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.23 berikut ini.



Gambar 4.23 Grafik *coefficient pressure* di model uji F (*convergent-divergent tunnel tipe 2; C/L = 0.027*)

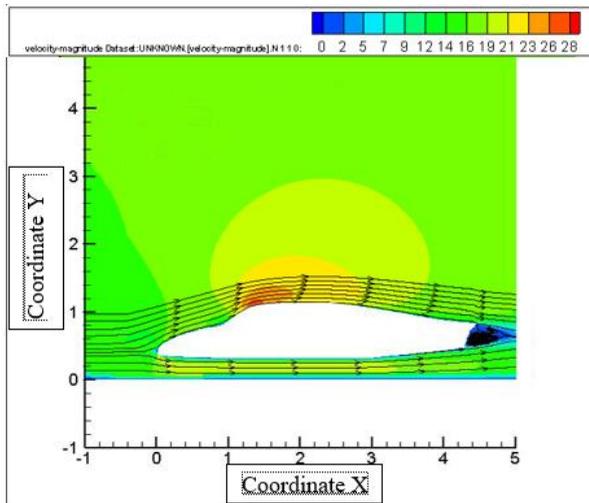
Gambar 4.23 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan aliran secara 2D. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Ketidaksimetrisan kontur permukaan *upper body* dan kontur permukaan *lower body* dan juga didukung adanya efek *ground clearance* yang mengakibatkan penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena terbentuknya *bubble separation* pada *tunnel* dengan model uji C tidak tampak terjadi pada *tunnel* dengan variasi model uji F bisa dilihat pada grafik C_p $X/L = 0.0176$ yang pada *tunnel* dengan model uji C terjadi fluktuasi pada grafik namun pada model uji F tidak terjadi, hal ini membuktikan bahwa terjadi perbaikan pada kontur bodi *tunnel* dengan variasi model uji F mobil Widya Wahana V. Fenomena *bubble separation* adalah injeksi *energy enterainment* dari *free stream* yang mampu mendorong aliran terseparasi untuk kembali *attach* ke kontur karena momentum *free stream* lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* dari kontur permukaan *lower body*. Pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.1756$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*,

diikuti dengan perubahan *spektrum* warna menjadi kuning yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan *trendline* grafik yang terus menurun hal ini diakibatkan karena terjadinya perubahan kontur bodi akibat bentuk *convergent-divergent tunnel*. Pada model uji F lebar *throat* (w_t) diperkecil yang sebelumnya pada model uji E, $w_t = 400$ mm menjadi $w_t = 300$. Perubahan ini mengakibatkan penurunan nilai C_p *lower body* pada bagian *throat* jika dibandingkan model uji E. Pada kontur *divergent* ditambah dengan adanya efek *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan seperti pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.673$). Efek kontur *divergent*, *diffuser* dan *ground clearance* pada *lower body* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya *vortex* pada daerah belakang kendaraan.

4.4.3 Analisa Medan Aliran Model Uji G (*Constant Area Tunnel*; $C/L = 0.027$)

Evaluasi dari pemodelan 3D terhadap detail karakteristik aliran yang melintasi bodi dapat dilihat dari hasil *post-processing* kuantitatif berupa grafik distribusi C_p yang ditunjang dengan *post-processing* kualitatif berupa visualisasi aliran. Analisis *contour* kecepatan disekitar bodi model uji G, dapat dijelaskan berdasarkan visualisasi yang diperoleh dari *software FLUENT*.

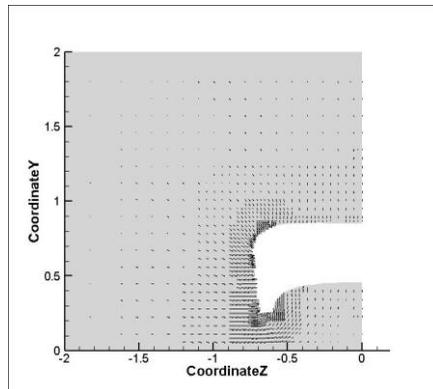


Gambar 4.24 *Velocity contour* dan *streamline* laluan udara disekitar bodi model uji G (*constant area tunnel*; $C/L = 0.027$)

Gambar 4.24 menunjukkan *velocity contour* dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan*. Tampak laluan udara dari *free stream* mengalir menuju bodi kendaraan bagian depan. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga laluan udara mengalami perlambatan. Kecepatan laluan udara dari *free stream* mencapai kecepatan terendah dan tekanan tertinggi pada kondisi stagnasi, yang ditandai dengan adanya nilai $C_p = 1$. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.24 dengan ditandai warna biru yang mendominasi pada daerah bodi bagian depan.

Setelah aliran udara bertumbukan dengan *leading edge*, selanjutnya aliran udara terdefleksi pada permukaan atas (*upper body*) dan permukaan bawah (*lower body*) dari model uji G. Adanya efek viskositas dari udara akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan bodi sehingga timbul *gradient* kecepatan. Adanya *gradient* kecepatan yang terjadi pada kontur bodi menyebabkan aliran udara pada permukaan bodi model uji G sangat bervariasi.

Pada pola kecepatan aliran di *upstream* yang jauh letaknya dari bodi model uji G akan sejajar dan tidak terjadi gangguan pada aliran tersebut. Sedangkan pada pola kecepatan aliran *streamline* di sekitar bodi akan mengalami gangguan aliran karena pengaruh dari bentuk bodi model uji G. Dengan demikian dapat dikatakan gerakan partikel aliran yang terletak dekat dari bodi akan memiliki kecepatan relatif yang bervariasi. Pada gambar 4.13 juga ditunjukkan *pathlines* kecepatan pada daerah *midspan*, tampak visualisasi *pathlines* pada daerah *leading edge* menunjukkan aliran cenderung terdefleksi dengan cepat menuju *lowerside* dibandingkan *upper side* hal ini disebabkan ketidaksimetrisan antara permukaan *upper body* dan *lower body* dimana kelengkungan kontur *upper body* yang lebih dibandingkan *lower body*. Setelah aliran melewati daerah *leading edge* terjadi percepatan pada bagian *lower body* yang diakibatkan oleh pelebaran laluan udara ke arah sumbu Y. hal ini ditunjukkan dengan *spektrum* warna kuning yang mendominasi sepanjang *lower body*.

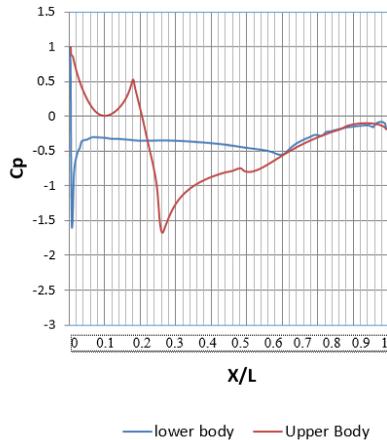


Gambar 4.25 *Velocity vector* di model uji G (*constant area tunnel* $C/L = 0.027$) pada potongan buritan $X=93\%L$

Gambar 4.25 menampilkan gambar potongan model uji G tampak belakang dengan posisi potongan $X=93\%L$. Terlihat pada *trailing edge* mobil terlihat adanya *vortex* yang terbentuk akibat pengaruh *diffuser* yang diberikan pada mobil. Hal ini dapat terjadi

dikarenakan adanya perubahan luas area sumbu Y, dari luas area kecil menuju luas area besar. Perubahan luas area diikuti juga dengan perubahan tekanan dan percepatan aliran, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.24 di mana sebelumnya spektrum warna kuning mendominasi pada *lower body* berubah menjadi spektrum warna hijau pada daerah *diffuser*.

Untuk mendukung data kualitatif terhadap karakteristik laluan udara yang melintasi bodi, perlu ditampilkan data kuantitatif tentang distribusi tekanan pada *midspan*. Karakteristik aliran dapat didefinisikan melalui grafik C_p antara *upper body* dengan *lower body* seperti pada gambar 4.26 berikut ini.



Gambar 4.26 Grafik *coefficient pressure* di model uji G (*constant area tunnel* C/L 0.027) pada potongan buritan $X=93\%L$

Gambar 4.26 menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan aliran secara 2D. Dapat dilihat bahwa slope penurunan tekanan pada daerah *upper body* dan daerah *lower body* tidak berhimpitan, hal ini dikarenakan adanya hambatan aerodinamika yang membuat aliran terdefleksi pada daerah *leading edge*. Ketidaksimetrisan kontur permukaan *upper body* dan kontur permukaan *lower body*

dan juga didukung adanya efek *ground clearance* yang mengakibatkan penurunan tekanan yang tajam pada *lower body*.

Fenomena terbentuknya *bubble separation* tampak terjadi pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.0176$) yang ditandai dengan terjadinya fluktuasi pada grafik. Fenomena *bubble separation* adalah injeksi *energi enterainment* dari *free stream* yang mampu mendorong aliran terseparasi untuk kembali *attach* ke kontur karena momentum *free stream* lebih mampu melawan *adverse pressure gradient* dari kontur permukaan *lower body*. Pada grafik C_p *upper body* ($X/L = 0.1756$) terjadi penurunan nilai *pressure* pada bagian *upper body*, diikuti dengan perubahan spektrum warna menjadi kuning yang menunjukkan bahwa terjadi percepatan laluan udara. Bagian *lower body* didominasi dengan *trendline* grafik yang terus menurun hal ini diakibatkan karena adanya ruang laluan udara dengan bentuk *constant area tunnel*. Pada model uji G, tidak adanya perubahan pada lebar *tunnel* ke arah sumbu Y. Hal ini mengakibatkan penurunan nilai C_p tidak sebesar jika dibandingkan dengan model uji E dan F. Namun dengan adanya efek *diffuser* nilai C_p mengalami peningkatan seperti pada grafik C_p *lower body* ($X/L = 0.673$). Efek *diffuser* dan *ground clearance* pada *lower body* memberikan pengaruh terbesar terbentuknya *vortex* pada daerah belakang kendaraan yang disebut.

4.4.4 Analisa Gaya Aerodinamika Modified Model Dengan Tunnel ($C/L = 0.027$)

Analisa mengenai data kuantitatif diperlukan untuk menunjang dan sekaligus menyimpulkan argumentasi mengenai fenomena yang terobservasi pada data kualitatif. Konsep perhitungan gaya-gaya aerodinamika pada model uji seperti gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*), akan dibahas lebih lanjut baik melalui pemodelan 3D pada daerah *midspan*.

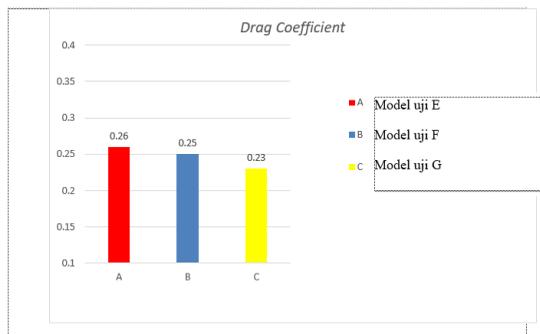
4.4.4.1 Analisa *Drag Force* Model Uji E,F, dan G Dengan *Tunnel C/L 0.027*

Terminologi perhitungan gaya *drag* pada model uji E, F, dan G dapat ditunjukkan melalui hasil analisa numerik. Gaya *drag* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *drag*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$CD = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

dimana :

- F_D = Gaya *drag* (kg.m/s²)
- V = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- A_f = Luas frontal model uji (m²)
- ρ = Densitas (kg/ m³)



Gambar 4.27 Grafik *Drag Coefficient* model uji E,F dan G (C/L = 0.027)

Gambar 4.27 menunjukkan grafik perbandingan *drag coefficient* pada model uji E, F, dan G. Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa model uji G memiliki nilai *drag coefficient* yang lebih

baik jika dibandingkan dengan model uji E dan F. Hal ini dapat terjadi dikarenakan tidak adanya penyempitan ruang laluan udara pada *lowerside body* ke arah sumbu Z sehingga aliran udara pada *lowerside* tidak mengalami percepatan seperti yang dialami pada model uji E dan F. Hal ini dapat dibuktikan bahwa pada gambar *contour velocity* pada model uji G bagian *lowerside body* menunjukkan percepatan udara yang lebih pelan jika dibandingkan dengan model uji E dan F. Dengan mengecilkan pelebaran ke arah sumbu Y dapat mengurangi terbentuknya *blockage area* yang diikuti dengan membaiknya nilai *coefficient drag* jika dibandingkan dengan *origin model*. Hasil analisa numerik diatas membuktikan bahwa pengurangan lebar ke arah sumbu Y untuk ruang laluan udara efektif membuat nilai *coefficient drag* membaik.

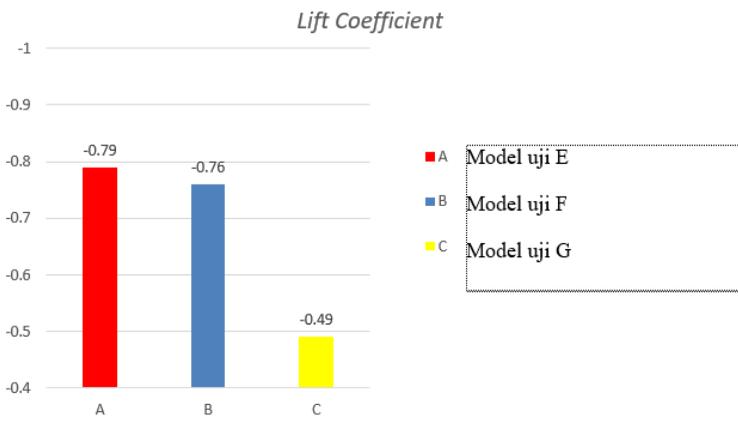
4.4.4.2 Analisa Lift Force Model Uji E, F, dan G Dengan Tunnel C/L 0.027

Terminologi perhitungan gaya *lift* pada model uji E, F, dan G dapat ditunjukkan melalui hasil analisa numerik. Gaya *lift* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *lift*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$CL = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

dimana :

- F_L = Gaya *drag* (kg.m/s²)
- V = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- A_f = Luas frontal model uji (m²)
- ρ = Densitas (kg/ m³)



Gambar 4.28 Grafik *Lift Coefficient* model uji E, F, dan G ($C/L = 0.027$)

Gambar 4.28 menunjukkan grafik perbandingan *lift coefficient* pada model uji E, F, dan G *ground clearance* rendah. Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa model uji G memiliki nilai *coefficient lift* yang terbaik dibandingkan dengan model uji E dan F. Grafik di atas menunjukkan bahwa penambahan ruang laluan udara dengan model uji G terbukti dapat menghasilkan *lift force* yang lebih baik dibandingkan model uji A.

Dari hasil analisa *drag force* dan juga *lift force* dapat diambil kesimpulan dengan mengurangi ruang laluan udara ke arah sumbu Y dapat mengurangi *drag force* yang terjadi dan juga menambah *lift force*. Sehingga dengan model uji G tidak hanya mampu untuk menghasilkan *coefficient drag* yang rendah namun juga mampu mengurangi *rolling resistance* pada kendaraan dengan perbaikan *lift force*.

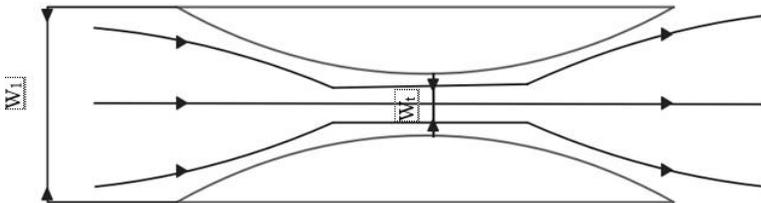
4.5 Diskusi

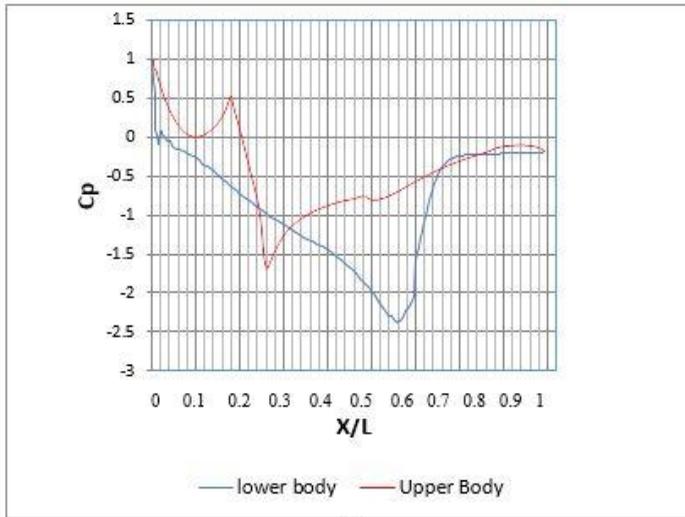
Pemilihan variasi model uji pada mobil Widya Wahana V dengan *tunnel* mempertimbangkan bahwa penambahan ruang laluan udara dapat menambah nilai *coefficient lift* sehingga mampu

untuk mengurangi *rolling resistance* pada mobil. Pengujian ini sudah dilakukan dengan membandingkan antara model uji A dengan variasi ketinggian *ground clearance*. Didapatkan bahwa dengan penambahan *ground clearance* yang lebih tinggi dapat menghasilkan *coefficient lift* yang lebih baik jika dibandingkan dengan *ground clearance* rendah. Sehingga diambil kesimpulan untuk tetap mempertahankan *ground clearance* rendah pada mobil dengan menambah *tunnel* sebagai ruang laluan udara.

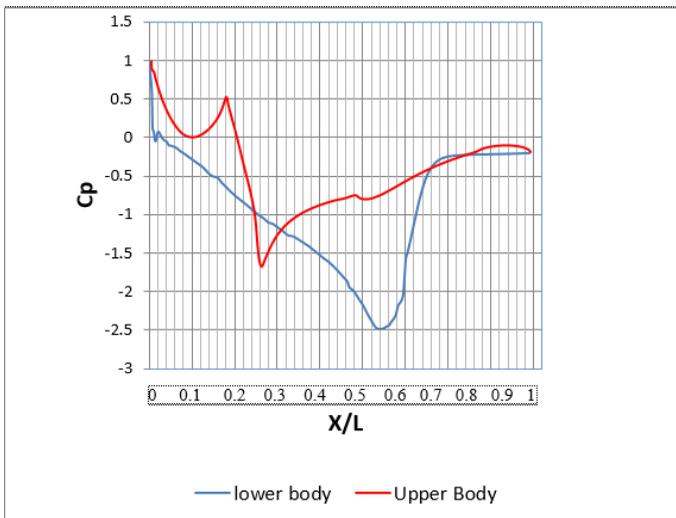
Fungsi *tunnel* sebagai ruang laluan udara menuntut bentuk geometri yang dapat menuntun laluan udara. Sehingga dipilih dua bentuk pembanding sebagai konfigurasi uji, tipe 1 adalah *convergent-divergent tunnel* dan untuk tipe 2 adalah *constant area tunnel*. Pemilihan *convergent-divergent tunnel* pada konfigurasi uji tipe 1 diharapkan dapat menuntun aliran tanpa terbentuknya *vortex* sepanjang *tunnel* seperti pada gambar 4.29.

Gambar 4.29 Laluan udara melewati *convergent-divergent tunnel* Namun dalam analisa numerik yang sudah dilakukan didapatkan bahwa grafik *coefficient pressure* dan nilai CD/CL *constant area tunnel* lebih baik jika dibandingkan dengan *convergent-divergent tunnel*.

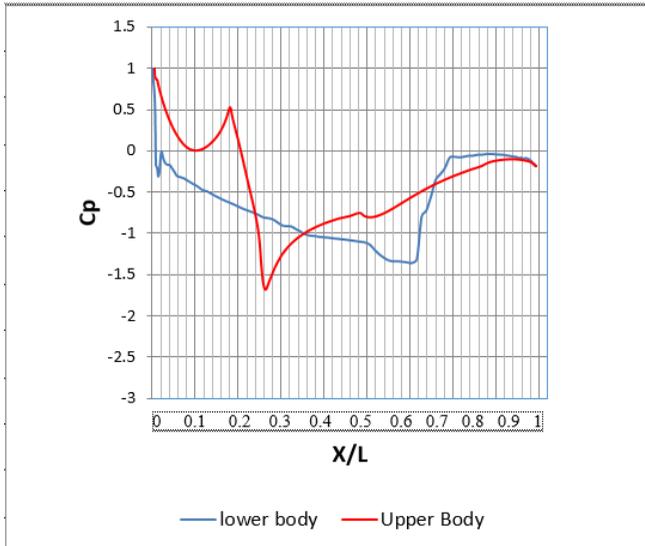




(i)



(ii)



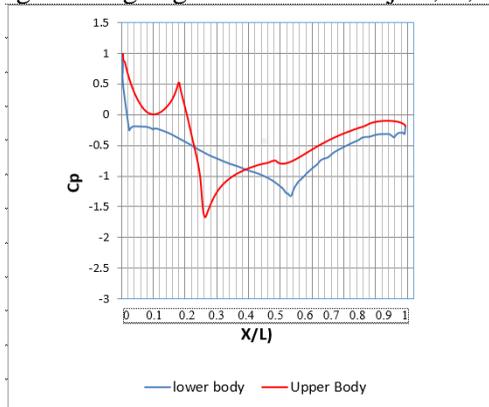
(iii)

- Gambar 4.30 (i) Grafik *coefficient pressure* model uji B ($C/L=0.027$)
(ii) Grafik *coefficient pressure* model uji C ($C/L=0.027$)
(iii) Grafik *coefficient pressure* model uji D ($C/L=0.027$)

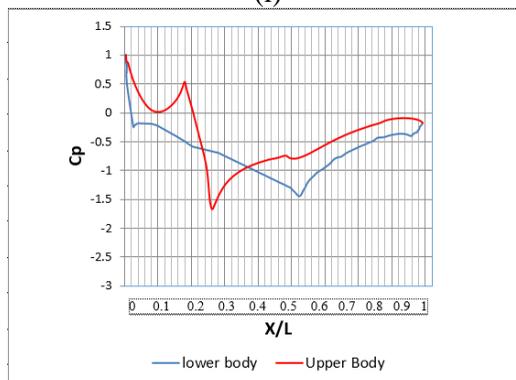
Gambar 4.30 menunjukkan grafik hasil analisa numerik pada mobil Widya Wahana V dengan model uji B, C, dan D. Dapat dilihat bahwa pada grafik CP model uji D memiliki hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan grafik CP model uji B dan C. Dapat dilihat nilai CP *lower body* pada model uji D posisi ($X/L = 0.673$) adalah -1.3569, sedangkan pada posisi X yang sama nilai CP model uji B adalah -2.37 dan untuk nilai CP model uji C adalah -2.45. Hal dapat terjadi dikarenakan pada posisi ($X/L = 0.673$) adalah letak *diffuser* pada mobil sedangkan pada konfigurasi uji *convergent-*

divergent tunnel laluan udara mengalami pelebaran area ke arah sumbu Y dan sumbu Z karena efek *diffuser* dan *divergent* geometri *tunnel*. Pelebaran ruang laluan udara ke dua arah sumbu memungkinkan terbentuknya *blockage area* yang mengakibatkan meningkatnya nilai CD pada kendaraan dan menurunnya nilai CL.

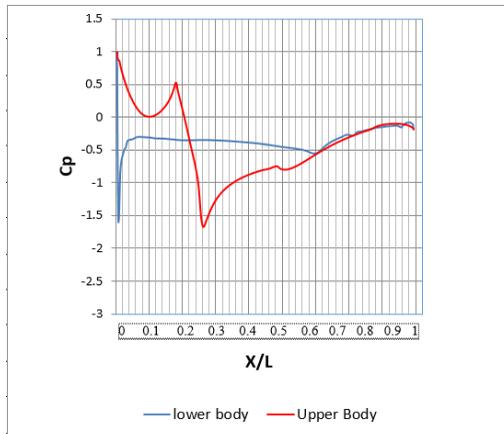
Sehingga solusi dari penelitian ini adalah dengan mengurangi pelebaran area ke arah sumbu Y untuk mengurangi kemungkinan terbentuknya *blockage area*. Dan dapat dilihat pada grafik CP hasil analisa numerik pada model uji E, F dan G mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan grafik CP model uji B, C, dan D.



(i)



(ii)



(iii)

- Gambar 4.31 (i) Grafik coefficient pressure model uji E ($C/L = 0.027$)
(ii) Grafik coefficient pressure model uji F ($C/L = 0.027$)
(iii) Grafik coefficient pressure model uji G ($C/L = 0.027$)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah menganalisa karakteristik aliran pada variasi model uji secara numerik maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut. Penambahan ruang laluan udara dengan bentuk *tunnel* pada mobil belum tentu dapat meningkatkan *lift* ataupun mengurangi *drag* pada kendaraan. Pada *tunnel* dengan model uji B, C, dan D didapatkan bahwa penambahan *tunnel* justru memperburuk gaya *drag* dan *lift*. Sehingga diberikan alternatif *tunnel* dengan variasi model uji E, F dan G yang didapatkan konfigurasi uji optimum sebagai berikut :

1. Dengan melihat perbandingan CL dan CD pada tiap variasi, konfigurasi uji optimum pada mobil Widya Wahana V adalah model uji G (*constant area tunnel*) dengan besar CL = - 0.49 dan besar CD = 0.23.
2. Pada grafik *coefficient pressure* model uji G menunjukkan perbaikan nilai distribusi tekanan sepanjang *midspan* jika dibandingkan model uji A, B, C, D, E, dan F.
3. Pengurangan lebar *diffuser* pada *modified model* memberikan pengaruh yang signifikan pada perbaikan nilai CL dan CD.

5.2 Saran

Berikut merupakan beberapa saran yang dapat diberikan setelah penelitian dilakukan untuk penelitian berikutnya adalah :

1. Adanya evaluasi *aerodynamic* lebih lanjut mengenai bentuk geometri kendaraan selain *underbody* untuk memperlengkap data.
2. Optimasi desain mobil untuk kedepannya menggunakan model uji G (*constant area tunnel*) yang sudah diuji pada penelitian ini, sehingga memiliki nilai CD dan CL yang lebih baik.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

1. Douglas, J.F., Gasiorek, J., Swaffield, J., and Jack, L., 2011, "Fluid Mechanics 6th edition",.
2. Barnard, R.H., 1996, "Road Vehicle Aerodynamic Design: An Introduction",. United Kingdom.
3. McBeath, S., 2015, "*Competition Car Aerodynamics 3th edition : A Practical Handbook*".
4. Hucho, W.H., Janssen, L.J., and Emmelmann, H.J., 1975 "*The Optimization of Bodi Details-A method for Reducting the Aerodynamic drag of Road Vehicle*", SAE Journal, 760185. Germany.
5. Fukuda, H., Yanagimoto, K., China, H., and Nakagawa, K., 1994 "*Improvement of Vehicle Aerodynamics by Wake Control*", JSAE Review 1, p.p. 151-155. Japan.
6. Ambrose, S., 2015. "*Aerodynamic Testing and Development of Sunswift eVe*". 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech.
7. Prakoso, M.A.B., 2011. "*Numerikal Study of 3 Dimensional Flow Characteristics Around Sapuanguin Model With Ground Clearance to Models Length Ratio (C/L= 0.027)*". Undergraduated Thesis. Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
8. Damjanović, D., Kozak, D., Zicic, M., Ivandic, Z., and Baskaric, T., 2010. "*Car Design As A New Conceptual And CFD Analysis In Purpose Of Improving Aerodynamics*". Croatia.
9. Mulvany, N.J., Chen, L., Tu, J.Y., and Anderson, B., 2004. "*Steady State Evaluation of 'Two-Equation' RANS Turbulence Models Simulation for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow*". DSTO Platform Division, Australia.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Aufar Nugraha dilahirkan di Jakarta, 17 Mei 1992. Anak kedua dari Sofyan Effendi dan Diah Asih Prasetiawati. Penulis menyelesaikan masa studi di SDI Al-Izhar Jakarta pada tahun 2003, dilanjutkan ke SMPI Al-Izhar Jakarta pada tahun 2008, dan SMA Negeri 34 Jakarta pada tahun 2010.

Selepas SMA penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Mesin pada tahun ajaran 2010/2011. Selama kuliah di Teknik Mesin ITS penulis pernah mengemban amanah menjadi ketua Himpunan Mahasiswa Mesin pada tahun ajaran 2012/2013. Tidak hanya itu penulis juga telah bergabung dalam *ITS Solar Car Racing Team* yang telah berkompetisi di Australia pada *World Solar Challenge 2015* sebagai *general manager team*. Di Teknik Mesin ITS penulis memilih untuk masuk Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida dengan topik tugas akhir *aerodynamic* dibawah bimbingan Prof.Dr.Ing.Herman Sasongko. Pada tahun 2017 penulis menyelesaikan studi S1-nya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”