



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR (KONVERSI ENERGI) - TM184835

**ANALISA NUMERIK PENGARUH
PENAMBAHAN JUMLAH CARS TERHADAP
PERFORMANSI AERODINAMIKA DESAIN
KERETA SEMI CEPAT JAKARTA-SURABAYA**

ADITIYA FAJAR BEKTI
NRP. 02111640000137

Dosen Pembimbing:
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TUGAS AKHIR (ENERGY CONVERSION) - TM184835

**ANALISA NUMERIK PENGARUH
PENAMBAHAN JUMLAH CARS
TERHADAP PERFORMANSI
AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMI
CEPAT JAKARTA-SURABAYA**

**ADITIYA FAJAR BEKTI
NRP. 02111640000137**

**Dosen Pembimbing:
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



FINAL PROJECT (ENERGY CONVERSION) - TM184835

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT BY
ADDITIONAL CARS ON AERODYNAMIC
PERFORMANCE IN JAKARTA-SURABAYA
MEDIUM SPEED TRAIN DESIGN**

**ADITIYA FAJAR BEKTI
NRP. 02111640000137**

**Advisor:
Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISA NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN JUMLAH CARS TERHADAP PERFORMANSI AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMI CEPAT JAKARTA-SURABAYA

TUGAS AKHIR





Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

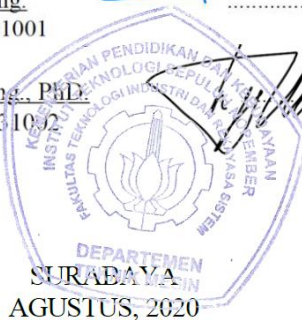
Oleh :

ADITIYA FAJAR BEKTI

NRP. 02111640000137

Disetujui oleh:

1. Vivien Supandhani, S.T.,M.Eng.,PhD  (Pembimbing)
NIP. 198105292003122001
2. Wawan Aries Widodo, S.T.,M.T.,Dr.  (Penguji I)
NIP. 197104051997021001
3. Nur Ikhwan, S.T.,M.Eng.  (Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD  (Penguji III)
NIP. 196412281990031032



**Analisa Numerik Pengaruh Penambahan Jumlah Cars
terhadap Performansi Aerodinamika Desain Kereta Semi
Cepat Jakarta - Surabaya**

Nama : Aditya Fajar Bekti
NRP : 02111640000137
Jurusan / Fakultas : Teknik Mesin / FTIRS – ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

ABSTRAK

Untuk memnuhi kebutuhan sarana transportasi yang berkualitas, PT. INKA mencanangkan layanan kereta semicepat yang menghubungkan Kota Jakarta dengan Kota Surabaya. Kedepannya, kereta semi cepat Jakarta – Surabaya mampu melaju hingga kecepatan 160 km/jam, melampaui kecepatan kereta yang sudah ada di Indonesia pada umumnya. Salah satu topik penting yang perlu diteliti adalah seberapa besar gaya hambat aerodinamik yang dialami kereta ketika dioperasikan karena semakin besar gaya hambat yang dialami kereta semakin besar energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan kereta tersebut. Salah satu faktor yang mempengaruhi performa aerodinamika desain kereta semi cepat adalah jumlah cars atau gerbong pada susunan konfigurasi kereta. Beberapa penelitian terkait pengaruh penambahan jumlah cars terhadap performa aerodinamika kereta semi cepat telah dilakukan, dimana penambahan jumlah cars dapat berpengaruh pada beberapa parameter diantaranya ialah Drag Coefficient, Pressure Coefficient, dan Boundary Layer Thickness yang terbentuk disekitar body kereta.

Metode yang dilakukan pada studi ini adalah studi numerik tiga dimensi dengan model desain kereta semi cepat Jakarta – Surabaya menggunakan pola aliran unsteady dan incompressible. Analisa numerik dilakukan menggunakan

software ANSYS 19.1. Geometri yang diuji terdiri dari dua model konfigurasi kereta semicepat Jakarta – Surabaya yaitu model konfigurasi 1 cars dan konfigurasi 3 cars. Simulasi dilakukan pada kecepatan aliran 33,33 m/s dan 44,44 m/s dengan menggunakan model turbulensi steady k- ω -SST. Boundary condition yang digunakan berupa velocity inlet, pressure outlet, no-slip moving wall pada tanah, dan symmetry untuk permukaan di bagian kiri, kanan, dan atas kereta. Pengeolahan data dilakukan setelah simulasi dilakukan, dimana data yang disajikan meliputi grafik dan kontur koefisien tekanan, kontur kecepatan, kontur boundary layer, dan koefisien drag kereta semi cepat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh kecepatan aliran udara yang membuat nilai C_D untuk konfigurasi 1 car mengalami perbedaan sebesar 0.7%, sedangkan untuk konfigurasi 3 cars mengalami perbedaan sebesar 0.8% pada head car, 0.30% pada middle car, dan 0.4% pada tail car. Perbedaan terbesar nilai C_D akibat pressure dan viscous pada head car dan tail car adalah sebesar 1.7% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 1.7% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.

Kata Kunci : Kereta Semicepat, Aerodinamis, Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, Koefisien Tekanan, Koefisien Drag

Numerical Analysis of The Effect By Additional Cars on Aerodynamic Performance in Jakarta-Surabaya Medium Speed Train Design

Name : Aditiya Fajar Bekti
NRP : 02111640000137
Department/Faculty : Mechanical Engineering/FTIRS – ITS
Academic Supervisor : Vivien Suphandani, ST, ME, PhD.

ABSTRACT

To fulfill the need for quality transportation facilities, PT. INKA has launched a medium speed train service that connects Jakarta and Surabaya. In the future, the Jakarta - Surabaya medium speed train will be able to go up to speeds of 160 km / hour, exceeding the speed of trains that already exist in Indonesia in general. One important topic that needs to be investigated is how much aerodynamic drag experienced by the train when operated because the greater the drag experienced by the train the more energy needed to operate the train. One of the factors that affect the aerodynamic performance of the semi-fast train design is the number of cars or carriages in the train configuration. Several studies related to the effect of increasing the number of cars on the aerodynamic performance of medium speed trains have been carried out, where the addition of the number of cars can affect several parameters, including Drag Coefficient, Pressure Coefficient, and Boundary Layer Thickness formed around the train body.

The method used in this study is a three-dimensional numerical study with the Jakarta – Surabaya medium speed train design model using unsteady and incompressible flow patterns. Numerical analysis was performed using ANSYS 19.1 software. The geometry tested consisted of two Jakarta-Surabaya medium

speed train configuration models, namely 1 cars configuration model and 3 cars configuration. Simulations were carried out at flow rates of 33.33 m/s and 44.44 m/s using the steady k- ω -SST turbulence model. The boundary conditions used are velocity inlet, pressure outlet, no-slip moving wall on the ground, and the symmetry for the surfaces on the left, right, and top of the train. Data processing is done after the simulation is done, where the data presented includes graphs and pressure coefficient contours, speed contours, boundary layer contours, and the drag coefficient of the medium speed train design.

The results showed that the effect of air flow velocity that made the C_D value for the configuration of 1 car experienced a difference of 0.7%, while for the configuration of 3 cars experienced a difference of 0.8% in the head car, 0.30% in the middle car, and 0.4% in the tail car. The difference in the spread of C_D values due to pressure and viscous on the head car and tail car is 1.7% for $Re_H = 7.06 \times 10^6$ and 1.7% for $Re_H = 10.07 \times 10^6$.

Key Words : Medium Speed Train, Aerodynamic, Velocity Contour, Pressure Contour, Pressure Coefficient, Drag Coefficient

KATA PENGANTAR

Puji syukur yang sebesar-besarnya penulis panjatkan atas kehadiran dan rahmat Allah SWT yang telah melimpahkan kasih, pertolongan, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul : “**Analisa Numerik Pengaruh Penambahan Jumlah *Cars* terhadap Performansi Aerodinamika Desain Kereta Semi Cepat Jakarta-Surabaya**”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah melimpahkan segala anugerah dan ridho kepada penulis hingga di tahap ini. Rasulullah Muhammad SAW yang telah menjadi panutan hidup bagi seluruh makhluk di semesta alam.
2. Bapak Karmani dan Ibu Robingatin, Ayah dan Ibu yang selalu sayang, sabar, merawat, mendidik, dan mendengarkan cerita-cerita penulis baik senang maupun sedih.
3. Okta Fajar Suryani dan Adelia Putri Agustin, kakak kandung penulis yang senantiasa memberikan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir.
4. Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, PhD. Selaku dosen pembimbing yang begitu luar biasa sabar membimbing penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
5. Ibu Dinny Harnany, S.T., M.Sc. Selaku dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
6. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT., Bapak Nur Ikhwan, ST., M.Eng., dan Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng.,PhD. Selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.

7. Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin ITS. Terima kasih yang tidak terkira.
8. Affrida Amalia, yang selalu memotivasi, menjadi teman bertukar pikiran dan membantu perkuliahan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini hingga tuntas. Terimakasih yang sebesar-besarnya.
9. M-59. Angkatan penulis yang Uber Alles
10. Quraisy Amri, Lentera Ruh Insan, dan Timothy Wibisono yang telah menjadi partner mengerjakan tugas akhir tanpa rasa lelah.
11. Rekan-rekan BENGKEL 16. Terima kasih pengalaman berorganisasi di bengkel yang sangat berwarna.
12. M. Darma Susilo Aji, Quraisy Amri, Rizal Syafrie, Muh Iqra Alhamidy Iffagano, dan Febrian Wahyu Ramadhan selaku Badan Pengurus Harian LBMM 2019/2020 yang telah membantu saya disegala bidang baik perkuliahan maupun organisasi. Semoga kesuksesan senantiasa menyertai kita.
13. Seluruh rekan-rekan pengurus LBMM yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan. Terima kasih.
14. Hilman Qasthari, Vio Ramadhana, Ajeng Tri Rahayu, dan Dika Andini, selaku keluarga kecil di Divisi Umum LBMM yang senantiasa memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis. Terima kasih.
15. Angkatan M55, M56, M57, M58 yang telah membantu penulis untuk berkembang di kampus merah Teknik Mesin ini, Terima kasih.
16. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Almamater tercinta, semoga kejayaan selalu menyertai.
17. Semua Ilmuwan yang menciptakan penemuan sehingga membantu mempermudah untuk menggali ilmu.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, 06 Agustus 2020

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL	xv
BAB I : PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II : TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Boundary Layer</i>	6
2.2 <i>Separation</i>	8
2.3 <i>Drag</i>	9
2.4 Parameter Dasar Aerodinamika Kereta	11
2.5 <i>Head Pressure Pulse</i>	12
2.6 <i>Skin Friction Drag</i>	14
2.7 <i>Slipstream</i>	16
2.8 <i>Pressure Coefficient (Cp)</i>	17
2.9 <i>Pressure Drag</i>	18
2.10 Penelitian Terdahulu	19
2.10.1 <i>Numerical Methods</i>	20
2.10.1.1 Penelitian <i>Dhan Zhou et al</i>	20
2.10.1.2 Penelitian <i>T.W. Muld et al</i>	28
2.10.2 Wind Tunnel Test	35
BAB III : METODOLOGI	36
3.1 Variasi Simulasi	36
3.2 Domain Simulasi	37
3.3 <i>Preprocessing</i>	40

3.3.1 Geometri Kereta Semicepat.....	40
3.3.2 <i>Meshing</i>	43
3.3.3 <i>Boundary Conditions</i>	45
3.4 Parameter Pemodelan.....	46
3.4.1 <i>Models</i>	46
3.4.2 <i>Materials</i>	46
3.4.3 <i>Operating Conditions</i>	46
3.4.4 <i>Boundary Conditions</i>	47
3.4.5 <i>Solutions</i>	47
3.4.6 <i>Initialization</i>	48
3.4.7 <i>Monitor Residual</i>	48
3.5 <i>Processing</i>	48
3.6 <i>Post Processing</i>	48
3.7 <i>Grid Independency Test</i>	49
3.8 Diagram Alir.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	52
4.1 <i>Grid Independency Test</i>	52
4.2 Hasil Simulasi Numerik.....	53
4.2.1 Kontur Dimensionless Kecepatan.....	53
4.2.2 Kontur Koefisien Tekanan.....	58
4.2.3 Grafik Distribusi Cp.....	63
4.2.3.1 Cp <i>upper side</i> kereta.....	63
4.2.3.2 Cp sisi samping kereta.....	67
4.2.4 <i>Boundary Layer Thickness</i>	70
4.2.4.1 <i>BL Thickness</i> kecepatan 33.33 m/s.....	71
4.2.4.2 <i>BL Thickness</i> kecepatan 44.44 m/s.....	74
4.2.5 <i>Momentum Thickness</i>	78
4.2.6 C_D total dan <i>Skin Friction Drag</i> ($C_{D\tau}$).....	82
BAB V KESIMPULAN.....	85
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran.....	87
DAFTAR PUSTAKA.....	88
LAMPIRAN.....	90
BIODATA PENULIS.....	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Boundary layer</i> pada plat datar (Fox dan Mc. Donald, 8th edition, 2011).....	7
Gambar 2.2 <i>Boundary layer flow</i> dengan <i>pressure gradient</i> (Fox dan Mc. Donald, 8th edition, 2011).....	8
Gambar 2.3 Gaya-gaya disekeliling fluida dalam penampang benda 2 dimensi (Munson et al, 2013).....	9
Gambar 2.4 <i>Ilustrasi Perbedaan Koefisien Tekanan dan Jarak</i> <i>Aman Dari Kereta</i> (Orellano, 2014).....	13
Gambar 2.5 Kontur Koefisien Tekanan Simulasi CFD (Orellano,2014)	14
Gambar 2.6 <i>Slipstream flow</i> (Orellano,2014).....	17
Gambar 2.7 Model konfigurasi 3 cars (Dan Zhou et al,2017).....	21
Gambar 2.8 <i>Meshing</i> (Dan Zhou et al,2017).....	22
Gambar 2.9 <i>Computational domain</i> dan <i>boundary conditions</i> (Dan Zhou et al,2017).....	23
Gambar 2.10 <i>Boundary layer</i> disekitar kereta (Dan Zhou et al, 2017).....	24
Gambar 2.11 Karakteristik <i>flow vortex</i> (Dan Zhou et al, 2017)..	25
Gambar 2.12 <i>Velocity distribution</i> dan <i>particle trace</i> (Dan Zhou et al,2017).....	26
Gambar 2.13 Nilai C_p sepanjang <i>body</i> kereta (Dan Zhou et al,2017).....	27
Gambar 2.14 Nilai C_d hasil simulasi (Dan Zhou et al, 2017).....	28
Gambar 2.15 Konfigurasi kereta untuk simulasi CFD (Muld et al,2012).....	29
Gambar 2.16 <i>Momentum Loss Thickness</i> sebagai fungsi panjang kereta (Muld et al,2012).....	30
Gambar 2.17 <i>Momentum Thickness</i> 2 cars terakhir (Muld et al,2012)	31
Gambar 2.18 <i>Momentum Thickness</i> sebagai fungsi jarak	

dari <i>head car</i> (Muld et al,2012).....	31
Gambar 2.19 <i>Mean Pressure Coefficient</i> (Muld et al,2012).....	32
Gambar 2.20 <i>Streamline</i> pada ATM2C (Muld et al,2012).....	33
Gambar 2.21 <i>Streamwise velocity</i> pada tail cars (Muld et al,2012).....	34
Gambar 2.22 <i>Strouhal Number vs Momentum Thickness</i> (Muld et al,2012).....	34
Gambar 2.23 Perbandingan Cd simulasi dan Cd hasil eksperimen (Lirong Jia et al, 2017).....	35
Gambar 3.1 <i>Computational domain dan boundary conditions</i> (Dan Zhou et al,2017).....	38
Gambar 3.2 Ukuran domain simulasi 1 cars tampak samping....	39
Gambar 3.3 <i>Orthogonal view</i> domain simulasi 1 <i>car</i>	39
Gambar 3.4 <i>Orthogonal view</i> domain simulasi 3 <i>cars</i>	40
Gambar 3.5 Geometri kereta semi cepat.....	41
Gambar 3.6 Dimensi geometri kereta semi cepat.....	42
Gambar 3.7 Meshing untuk simulasi CFD.....	43
Gambar 3.8 <i>Boundary conditions</i> penelitian.....	46
Gambar 3.9 <i>Flowchart</i> penelitian.....	50
Gambar 3.10 <i>Flowchart</i> simulasi CFD.....	51
Gambar 4.1 Kontur dan streamline kecepatan pada bidang longitudinal.....	55
Gambar 4.2 Kontur C_p pada bidang longitudinal.....	59
Gambar 4.3 Grafik distribusi C_p pada <i>upper side</i> kereta.....	64
Gambar 4.4 Grafik distribusi C_p di sisi samping kereta.....	67
Gambar 4.5 Kontur <i>boundary layer</i> di sekitar kereta (kecepatan 33.33 m/s).....	72
Gambar 4.6 Kontur <i>boundary layer</i> di sekitar kereta (kecepatan 44.44 m/s).....	75
Gambar 4.7 Pengaruh variasi Re_H terhadap <i>boundary layer</i>	77
Gambar 4.8 Grafik <i>boundary layer velocity profile</i>	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai <i>coefficient drag</i> untuk beberapa bentuk benda (White,2010).....	11
Tabel 3.1 Variasi Penelitian.....	37
Tabel 3.2 Ukuran domain referensi dan domain simulasi.....	38
Tabel 3.3 Dimensi Kereta Semi Cepat.....	40
Tabel 3.4 Nilai parameter <i>boundary conditions</i>	47
Tabel 3.5 <i>Solutions methods</i> penelitian.....	47
Tabel 3.6 Hasil <i>Grid Independency Test</i>	49
Tabel 4.1 Hasil <i>Grid Independency Test</i>	52
Tabel 4.2 Nilai <i>boundary layer thickness</i> dan <i>momentum thickness</i>	81
Tabel 4.3 Nilai C_D dan <i>Skin Friction Drag</i> ($C_{D\tau}$).....	82

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

τ_{yz}	: <i>Shear stress</i> (N/m ²)
μ	: <i>Viscosity</i> (kg/ms)
$\frac{d\vec{v}}{dy}$: Gradien kecepatan (1/s)
$\frac{du}{dy}$: Gradien kecepatan dalam arah x (1/s)
Re	: Bilangan Reynold
ρ	: <i>Density</i> (kg/m ³)
v	: Kecepatan (m/s)
L_c	: Panjang karakteristik (Meter)
D	: Gaya drag (Newton)
D_M	: <i>Mechanical</i> (Newton)
D_A	: <i>Aerodynamic</i> (Newton)
W	: Berat kereta
A'	: Luas penampang kereta (m ²)
C_{dp}	: Koefisien tekanan drag
λ'	: <i>Coefficient hydraulic friction</i> kereta
d'	: Diameter hidrolik kereta (m)
l	: Panjang kereta (m)
P_2	: Tekanan badan kereta (Pa)
P_0	: Tekanan atmosfer (Pa)
A	: Luas penampang terowongan (m ²)
f'	: Gaya gesek pada badan kereta (N)
F	: Gaya gesek pada dinding terowongan (N)
R	: Rasio luas penampang terowongan dan kereta
d	: Diameter hidrolik terowongan (m)
λ	: <i>Coefficient hydraulic friction</i> terowongan
v_2	: kecepatan aliran udara (m/s)
C_{ds}	: Koefisien drag untuk model kereta pendek
l_s	: Panjang kereta untuk model kereta pendek (m)
C_{dl}	: Koefisien drag untuk model kereta panjang
l_l	: Panjang kereta untuk model kereta panjang (m)
δ	: <i>Boundary layer thickness</i>
θ	: <i>Momentum thickness</i>

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api didefinisikan sebagai sarana transportasi berupa kendaraan dengan tenaga gerak, baik berjalan sendiri maupun dirangkaikan dengan kendaraan lainnya, yang akan ataupun sedang bergerak di rel. Kereta api merupakan alat transportasi massal yang umumnya terdiri dari lokomotif (kendaraan dengan tenaga gerak yang berjalan sendiri) dan rangkaian kereta atau gerbong (dirangkaikan dengan kendaraan lainnya). Rangkaian kereta api atau gerbong tersebut berukuran relatif luas sehingga mampu memuat penumpang maupun barang dalam skala besar. Perkembangan perkeretaapian terus berjalan termasuk dalam rancang bangun, teknologi komunikasi dan informasi, dan teknologi bahan. Hal ini membawa pula perkembangan sarana dan prasarana kereta api, misalnya kereta api super cepat, kereta api monorail (dengan satu rel), kereta api levitasi magnetik (maglev), kereta api pengangkut berat.

High Speed Train adalah tipe kereta yang beroperasi secara signifikan lebih cepat daripada kereta tradisional yang dilengkapi dengan sistem terintegrasi dan menggunakan jalur khusus. Meskipun tidak ada standar baku yang berlaku secara global, kereta dengan kecepatan diatas 250 kilometer per jam (160 mph) dan yang telah ada yaitu 200 kilometer per jam (120 mph) secara luas dianggap sebagai kategori *high speed train*. Beberapa negara telah mengembangkan kereta cepat untuk menghubungkan kota-kota besar, seperti Belgia, China, Denmark, Prancis, Jerman, Italia, Jepang, Maroko, Belanda, Rusia, Korea Selatan, Spanyol, dan Taiwan.

Penelitian mengenai *High Speed Train* salah satunya menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yaitu analisa yang dilakukan pada sebuah sistem yang meliputi fenomena aliran fluida, perpindahan panas, atau reaksi kimia

dengan menggunakan simulasi dikomputer. Salah satu penelitian *High Speed Train* menggunakan metode CFD ialah pengaruh panjang kereta terhadap performa aerodinamika kereta cepat. Penambahan jumlah *cars* pada konfigurasi suatu kereta semi cepat dapat berpengaruh terhadap *Boundary Layer Thickness*, *Coefficient Pressure*, *Coefficient Drag* (C_D).

Muld et al (2012) telah melakukan investigasi pengaruh penambahan jumlah *cars* pada suatu konfigurasi kereta cepat menggunakan *Delayed Detached Eddy Simulations* (DDES). Diperoleh bahwa struktur *wake flow* memiliki karakteristik yang berbeda tergantung pada jumlah penambahan *cars* pada konfigurasi kereta. Semakin banyak penambahan *cars*, semakin kecil *wake flow* yang ditimbulkan. **Bell et al (2015)** menemukan bahwa ketebalan momentum meningkat seiring bertambahnya jumlah *cars*. Hasil penelitian **Huang et al (2012)** menunjukkan bahwa koefisien *drag* pada *cars* terdepan dengan *cars* paling belakang mengalami sedikit perubahan walaupun jumlah *cars* semakin bertambah.

Penelitian mengenai *Medium Speed Train* di Indonesia belum pernah dilakukan sebelumnya. Oleh karena itu, tugas akhir ini merupakan penelitian tahap awal mengenai desain kereta semi cepat di Indonesia yang merupakan bagian dari proyek kereta semi cepat Jakarta-Surabaya oleh PT. INKA. Model kereta semi cepat pada penelitian ini menggunakan konfigurasi lebar *railway* sebesar 1200 mm atau termasuk kedalam kategori *narrow gauge*. Sehingga lebar bagian *under body* pada model kereta semi cepat yang digunakan mengikuti desain *railway* tersebut. Proses validasi hasil penelitian dilakukan dengan membandingkan data hasil penelitian ini dengan data hasil dari penelitian-penelitian yang ada sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Desain kereta semi cepat dalam penelitian ini memiliki susunan geometri yang rumit pada bagian *nose* dan bagian *under body* yang terdiri dari beberapa komponen seperti *cowcatcher*, *boogie*, roda, dan *boogie fairing*. Tentunya geometri dan dimensi kereta mempengaruhi aerodinamika kereta tersebut. Penambahan jumlah *cars* akan berpengaruh pada susunan geometri dan dimensi panjang kereta. Luas permukaan bidang sentuh antara *body* kereta dengan udara akan semakin besar sehingga penambahan panjang kereta dapat berpengaruh pada karakteristik aliran udara yang melewati kereta. Permasalahan dari tugas akhir ini adalah mengetahui performansi aerodinamika dari desain kereta semi cepat serta pengaruh penambahan jumlah *cars* terhadap performansi aerodinamika desain kereta semi cepat tersebut. Hipotesa awal pada penelitian ini ialah :

1. Penambahan jumlah *car* dapat menyebabkan perubahan tekanan permukaan sehingga berpengaruh pada *pressure drag*, mengakibatkan perubahan pada *friction drag* dan *aerodynamic drag* desain kereta semi cepat. Ketebalan *boundary layer* pada daerah *tail car*, dimana terjadi separasi aliran, bervariasi bergantung pada panjang keseluruhan kereta sehingga mampu mempengaruhi struktur aliran *wake* yang terjadi di belakang susunan desain kereta semi cepat.
2. Penambahan jumlah *car* juga dapat mempengaruhi nilai C_p sepanjang permukaan *body* kereta. Hal ini diakibatkan oleh kenaikan energi disipasi pada *boundary layer* yang disebabkan adanya celah (*gap*) diantara gerbong kereta seiring pertambahan panjang kereta.

Hipotesa ini dapat dibuktikan dengan melakukan studi numerik desain kereta semi cepat dengan variasi jumlah *cars* yaitu 1 *cars* dan 3 *cars* dengan variasi kecepatan 33.33 m/s dan 44.44 m/s.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran fluida (udara) yang melewati desain kereta semi cepat akibat penambahan jumlah *cars*. Karakteristik aliran yang dimaksud antara lain :

1. Mengetahui kontur kecepatan dan kontur koefisien tekanan (C_p) pada desain kereta semi cepat akibat penambahan jumlah *cars*.
2. Membandingkan grafik distribusi *pressure coefficient* (C_p), nilai *drag coefficient* (C_D) serta kontur dan nilai *boundary layer thickness* untuk desain kereta semi cepat 1 *car* dan 3 *cars*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memperkecil ruang lingkup dan memudahkan dalam proses analisa masalah dibutuhkan adanya pembatasan masalah. Batasan masalah yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini antara lain :

1. Simulasi 3D, *steady*, *turbulent flow*, dan *incompressible flow*.
2. Udara satu arah mengalir dari depan desain kereta semi cepat mulai dari *inlet* menuju *outlet* dengan berbagai variasi kecepatan konstan.
3. Variasi kecepatan aliran fluida yaitu 33.33 m/s dan 44.44 m/s.
4. Analisa dilakukan pada desain kereta semi cepat dengan konfigurasi 1 *cars* dan 3 *cars*.
5. Desain kereta semi cepat disimulasikan dalam kondisi diam, dengan kecepatan udara mengalir relatif terhadap kereta.
6. Aksesoris desain kereta semi cepat disederhanakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penulisan tugas akhir ini adalah :

Memberikan sumbangsih nyata pada identifikasi pengaruh penambahan *cars* pada konfigurasi kereta semi cepat dimana hasil identifikasi tersebut dapat digunakan sebagai acuan atau referensi bagi penelitian-penelitian kereta semi cepat berikutnya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Boundary Layer*

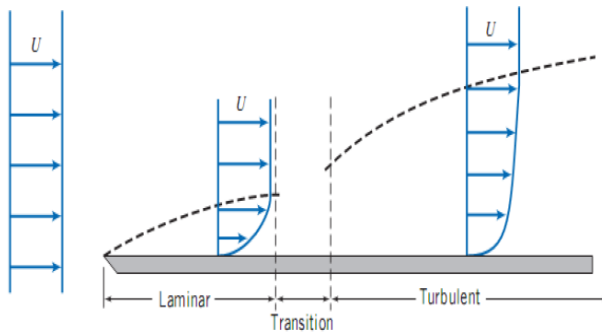
Boundary layer (lapis batas) merupakan lapisan tipis pada *solid surface* yang terbatas daerah sangat sempit dekat permukaan kontur dengan kecepatan fluida tidak uniform dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas.

Dari penjelasan di atas, aliran melintasi suatu kontur diklasifikasikan menjadi dua daerah yaitu :

- a. Daerah di dalam lapis batas (dekat permukaan kontur) dengan efek viskositas yang sangat berpengaruh (*viscous flow*).
- b. Daerah di luar lapis batas dengan efek viskositas diabaikan (*nonviscous flow*).

Saat aliran fluida nyata dari *free stream* menuju suatu *contour body*, fluida akan mengalami perubahan kecepatan dari keadaan uniform (U_∞) ke kondisi aliran yang mempunyai distribusi kecepatan (*velocity distribution*). Hal ini terjadi karena pengaruh dari viskositas fluida dan *contour body* yang dilewatinya. Distribusi kecepatan diawali dari suatu titik di permukaan padat, dimana harga kecepatannya nol (*zero velocity*). Kemudian menjadi semakin besar ketika menjauhi permukaan kontur bodi. Pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu sehingga kecepatan fluida mencapai harga kecepatan fluida *non viscous* ($u = 0,99 U_\infty$). Posisi tersebut merupakan batas daerah viscous dengan bagian non viscous. Jarak yang terukur dari permukaan padat arah normal hingga pada posisi tersebut disebut dengan tebal lapis batas (*boundary layer thickness*, δ). Dimana tebal lapis batas akan meningkat seiring dengan bertambah jarak lintasan yang dilalui oleh fluida.

Secara umum terjadinya *boundary layer* disebabkan oleh karena fluida menabrak suatu kontur permukaan padat, karena melewati kontur itulah terjadi perbedaan C_p di setiap titik yang menimbulkan C_D dan C_L . Struktur *boundary layer flow* dapat digambarkan dengan mengamati gerakan partikel fluida. Saat mengalir diluar *boundary layer*, partikel mempertahankan bentuk asalnya sambil bergerak translasi namun tidak berotasi dan efek viscosity dapat diabaikan. Kondisi dengan zero vorticity ini dinamakan irrotational. Gangguan mulai terjadi saat partikel memasuki *boundary layer* karena adanya velocity gradient dan efek viscosity. Akibatnya, selama bergerak translasi, partikel fluida juga bergerak rotasi. Dengan demikian vorticity-nya tidak sama dengan nol (non zero vorticity). Kondisi ini dinamakan rotational.



Gambar 2.1 *Boundary layer* pada pelat datar

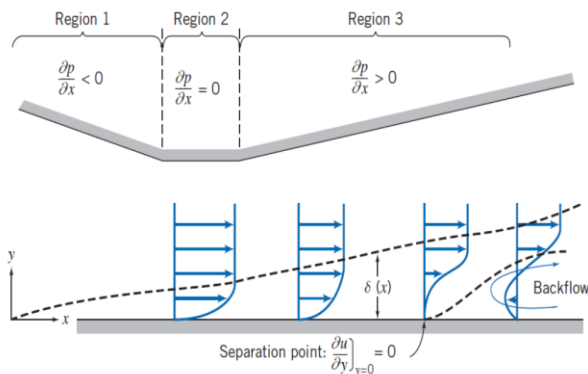
(Fox dan Mc. Donald, 8th edition, 2011, halaman 425)

Gambar di atas menunjukkan suatu pengembangan *boundary layer* sepanjang permukaan pelat. Pada daerah ini terjadi dua bentuk aliran. Awalnya aliran adalah laminar sepanjang jarak tertentu dari *leading edge*, kemudian terjadi suatu transisi aliran yang akhirnya akan berubah menjadi turbulen. Untuk aliran *incompressible*

melewati *smooth flat plate (zero pressure gradient)*, perubahan dari laminar ke turbulen dapat dipengaruhi oleh *Reynolds Number*

2.2 Separation

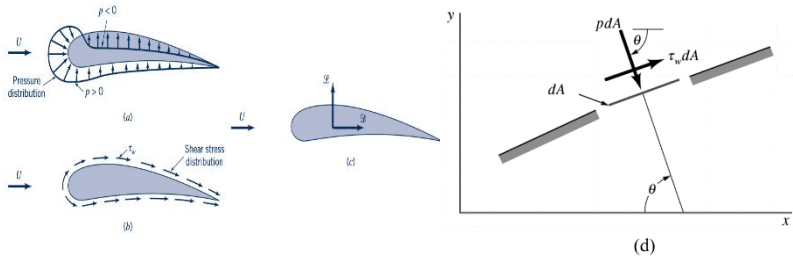
Dalam *boundary layer* akan ditemukan suatu fenomena yang disebut dengan separasi. Separasi ini mengakibatkan aliran yang terbalik arahnya dari aliran utama. Separasi merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Proses separasi diawali dengan adanya aliran fluida yang terus menerus mengalami perubahan karena adanya gaya gesek. Akibat adanya gaya gesek tersebut, momentum aliran akan berkurang sampai suatu saat momentum alirannya sudah tidak bisa mengatasi hambatan sehingga aliran fluida akan terpisah dari permukaan benda. Pada titik dimana separasi terjadi, *gradient* tekanan pada permukaan *body* adalah nol dan aliran fluida di belakang titik separasi arahnya berlawanan dengan aliran utama.



Gambar 2.2 *Boundary layer flow* dengan pressure gradient
(Fox dan Mc. Donald, 8th edition, 2011, halaman 443)

2.3 Drag

Benda yang bergerak melewati fluida akan menimbulkan interaksi antara benda dan fluida itu sendiri. Interaksi ini dapat dilihat dalam bentuk gaya pada permukaan bertemunya fluida dan benda. Terdapat dua buah gaya yang ditimbulkan dalam interaksi tersebut yaitu gaya gesek yang diakibatkan efek viskos, dan gaya kearah normal yang diakibatkan tekanan seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.3. Gaya-gaya ini kemudian diproyeksikan ke sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Resultan gaya kearah sumbu horizontal yang sejajar dengan arah kecepatan inilah yang disebut sebagai gaya hambat (*drag*). Gaya *drag* adalah gaya yang menghambat pergerakan sebuah benda padat melalui sebuah fluida (cairan atau gas). Gaya *drag* mempunyai arah yang sejajar dengan sumbu kecepatan aliran terhadap luas penampang dari suatu benda, dengan arah yang berlawanan dengan arah aliran tersebut.



Gambar 2.3 Gaya-gaya disekeliling fluida dalam penampang benda 2 dimensi (a) *Pressure Force*. (b) *Viscous Force*. (c) *Resultant Force*, (d) *Free body diagram* (Munson et al, 2013)

Resultan gaya gesek dan distribusi tekanan pada seluruh permukaan benda kearah sumbu horizontal didapatkan dengan cara mengintegrasikan nilai kedua buah gayanya. Sehingga didapatkan persamaan *drag* sebagai berikut,

$$Fd = \int F_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad 2.1$$

dimana P adalah distribusi tekanan dan τ_w adalah tegangan gesek. Persamaan diatas dapat diaplikasikan untuk segala jenis bentuk benda. Persamaan tersebut kemudian diubah kedalam bentuk yang lebih sederhana menjadi,

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \quad 2.2$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A} \quad 2.3$$

dimana :

A : Luas permukaan bidang sentuh dengan fluida (m^2)



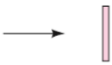
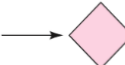

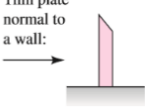
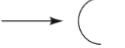
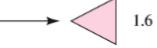


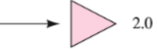

F_D : Gaya *Drag* (Newton)

ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)

U : Kecepatan aliran udara (m/s^2)

Coefficient drag adalah suatu bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besar kecilnya tahanan fluida yang diterima oleh suatu benda. Nilai C_D umumnya didapatkan dari hasil eksperimen. Nilai *Coefficient drag* untuk beberapa bentuk benda dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Nilai *coefficient drag* untuk beberapa bentuk benda (White, 2010)

Shape	C_D based on frontal area	Shape	C_D based on frontal area	Shape	C_D based on frontal area
Square cylinder: 	2.1	Half cylinder: 	1.2	Plate: 	2.0
	1.6		1.7	Thin plate normal to a wall: 	1.4
Half tube: 	1.2	Equilateral triangle: 	1.6	Hexagon: 	1.0
	2.3		2.0		0.7

2.4 Parameter Dasar Aerodinamika Kereta

Parameter dasar yang bisa digunakan untuk mendeskripsikan medan aliran disekitar kereta adalah medan kecepatan dan medan tekanan disekitar tekanan, $u_x(x, y, z)$, $u_y(x, y, z)$, $u_z(x, y, z)$, dan $P(x, y, z)$. u_i adalah kecepatan dalam arah i . Sumbu x adalah arah berjalannya kereta. Sumbu y adalah arah lateral yang diukur dari posisi tengah *track*. Sumbu z adalah arah vertikal yang diukur dari atas posisi tanah.

Parameter yang independent adalah :

- Tinggi kereta (h)
- Lebar kereta (b)
- Panjang kereta (L)
- Panjang train nose (l)
- Jarak bodi kereta dengan track bed (t)
- Kekasaran permukaan kereta (k)
- Kecepatan kereta (v)
- Densitas udara (ρ)

i. Viskositas udara (μ)

Parameter-parameter diatas bisa dideskripsikan menjadi bentuk tak

berdimensi menjadi :

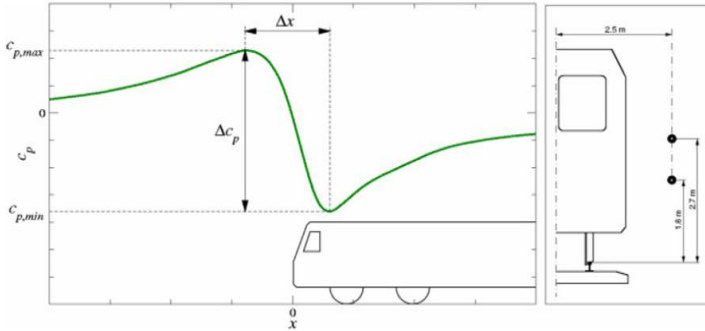
- a. u_i/v
- b. $C_p = \rho/0.5 \rho v^2$
- c. b/h
- d. L/h
- e. l/h
- f. t/h
- g. k/h

(Baker, 2014)

2.5 Head Pressure Pulse

Head pressure pulse merupakan tekanan yang akan menghasilkan gaya terhadap benda-benda yang ada disekitar kereta. Tekanan ini dihasilkan dari aliran kecepatan dan variasi tekanan pada kereta yang lewat.. Intensitas dari fenomena ini tergantung terhadap kecepatan kereta, bentuk *nose*, dan aksesoris tambahan seperti penyapu salju dan spoiler. Fenomena ini berbahaya untuk manusia ataupun benda yang berada di dekat rel kereta.

Kriteria dan batas standar Eropa yang harus dipenuhi kereta dengan kecepatan maksimum melebihi 190 km/jam adalah sebagai berikut. Kereta dengan gerbong lengkap yang berjalan dengan kecepatan tertentu pada kondisi udara terbuka (bukan terowongan), perbedaan tekanan dari titik paling atas ke titik paling rendah tidak boleh melebihi 720 Pa untuk kereta dengan kecepatan maksimum 250 km/jam dan 795 Pa untuk kereta dengan kecepatan maksimum melebihi 250 km/jam yang diukur saat kecepatan 250 km/jam. Kondisi perbedaan tekanan tersebut harus dipenuhi pada jarak 1.5 m hingga 3.3 m dari atas rel dan 2.5 m dari tengah rel kereta seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 *Ilustrasi Perbedaan Koefisien Tekanan dan Jarak Aman Dari Kereta (Orellano, 2014)*

Penilaian besarnya nilai head pressure pulse merupakan hasil dari pengurangan nilai koefisien tekanan maksimum dan minimum,

$$\Delta C_p = C_{p,max} - C_{p,min} \quad 2.4$$

dengan perhitungan koefisien tekanan menggunakan persamaan,

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad 2.5$$

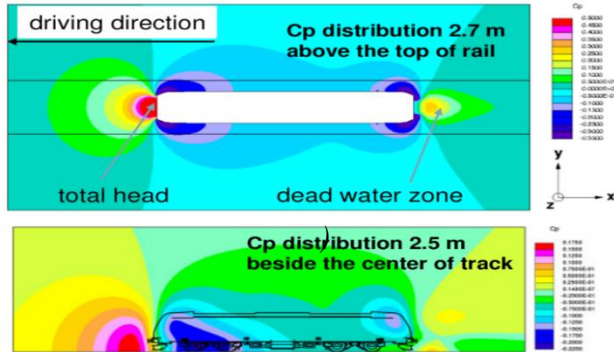
dengan,

C_p = koefisien tekanan

ρ = densitas udara = 1.2 kg/m^3

V = kecepatan kereta

p = tekanan



BR185_CFD solution..
Gambar 2.5 Kontur Koefisien Tekanan Simulasi CFD
 (Orellano,2014)

2.6 Skin Friction Drag

Skin friction drag adalah komponen dari profil *drag*, yang merupakan gaya tahan yang diberikan pada objek yang bergerak dalam fluida. *Skin friction drag* disebabkan oleh viskositas fluida dan berkembang dari *laminar drag* menjadi *turbulent drag* ketika fluida bergerak pada permukaan suatu objek. *Skin friction drag* secara umum dinyatakan dengan *Reynolds number* yang merupakan rasio antara *inertial force* dan *viscous force*.

Skin friction coefficient adalah perbandingan antara *skin shear stress* pada permukaan objek dengan tekanan dinamis *freestream* w

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad 2.6$$

dimana :

C_f : *Skin friction coefficient*

ρ : Densitas fluida

U : Kecepatan *freestream* fluida

$\frac{1}{2} \rho U^2$: Tekanan dinamis *freestream*

Untuk aliran laminar, nilai *skin friction coefficient* dinyatakan dengan *Blasius solution* untuk plat datar :

$$C_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re}} \quad 2.7$$

dimana,

$$Re = \frac{\rho V x}{\mu} \quad 2.8$$

x adalah jarak dari *reference point* dimana *boundary layer* mulai terbentuk. Sedangkan untuk aliran turbulen, nilai *skin friction coefficient* dinyatakan dengan *Prandtl's one-seventh-power law* : x

$$C_f = \frac{0.027}{Re x^{\frac{1}{7}}} \quad 2.9$$

Persamaan diatas yang diturunkan dari *Prandtl's one-seventh-power law* untuk menentukan *drag coefficient* untuk *turbulent boundary layer* dengan *Reynolds number* rendah. Dibandingkan dengan aliran laminar, nilai *skin friction coefficient* pada aliran turbulen berkurang lebih lambat dengan *Reynolds number* meningkat. *Skin friction drag* secara keseluruhan dapat dihitung dengan mengintegalkan nilai *skin shear stress* pada permukaan bodi sesuai persamaan :

$$F = \int_{surface} C_f \frac{1}{2} \rho v^2 dA \quad 2.10$$

Untuk menghitung nilai *skin friction drag* pada kereta dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$C_{fo} = \frac{F_o}{\frac{1}{2} \rho U^2 p L} \quad 2.11$$

dimana :

C_{fo} : *Train skin friction drag*

F_o : *Train skin friction drag force*

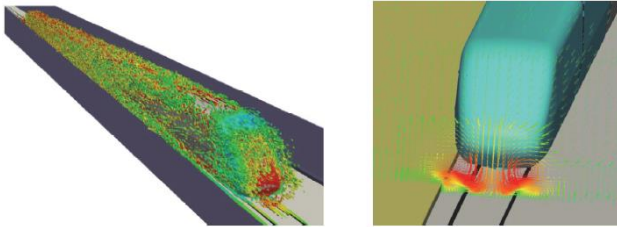
p : Train perimeter

L : Panjang kereta

2.7 Slipstream

Slipstream pada kereta akibat kecepatan yang tinggi dapat menjadi bahaya serius bagi keselamatan pekerja *track*, peralatan, orang-orang di peron, serta dapat berpengaruh pada *trackside* dan struktur peron akibat tekanan dan *pulse* kecepatan. Kekuatan *slipstream* akan meningkat atau semakin intensif dengan adanya efek *crosswind*, saat kereta bergerak dengan kecepatan tinggi dan apabila permukaan *body* kereta kasar atau *discontinuous*. Aliran *slipstream* disekitar kereta diilustrasikan pada gambar 2.6 menunjukkan aliran turbulen yang berisi sejumlah *vortice* dalam skala kecil dan besar.

Apabila aliran dapat terperangkap dekat dengan permukaan *body* kereta, efek *slipstream* dapat berkurang karena alirannya tetap melekat pada bagian yang lebih panjang dari kereta. Namun, hal tersebut memungkinkan terbentuknya *wake* yang lebih kuat juga meningkatkan *skin friction drag*.



Gambar 2.6 *Slipstream flow* : (a) aliran *slipstream* sepanjang *body* kereta, (b) *wake vortices* (Orellano, 2014)

2.8 Pressure Coefficient (C_p)

Pressure coefficient adalah bilangan tak berdimensi yang mendeskripsikan tekanan relatif sepanjang daerah aliran. *Pressure coefficient* sering digunakan dalam aerodinamika dan hidrodinamika. Setiap titik yang berada didalam daerah aliran memiliki C_p . *Pressure coefficient* merupakan salah satu parameter dalam mempelajari aliran *incompressible fluids* seperti air dan juga *compressible flow* berkecepatan rendah seperti udara.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} = \frac{P - P_\infty}{P_o - P_\infty} \quad 2.12$$

dimana :

P : Tekanan statis pada titik yang akan dievaluasi nilai C_p

P_∞ : Tekanan statis pada *freestream*

P_o : Tekanan stagnasi pada *freestream*

ρ : Densitas fluida *freestream*

U : Kecepatan *freestream* fluida

2.9 Pressure Drag

Pressure Drag berasal dari *pressure* di *fore-* dan *after-bodies* dari kereta, dan dalam kasus *bouble deck* pada seri kereta, karena terjadi perubahan tiba-tiba pada area penampang kereta. Dengan asumsi bahwa koefisien dari *Pressure Drag* adalah C_{dp} dan dalam kasus *bouble deck* adalah C_{dpd} .

T Maeda et al, 1988 telah melakukan tes *wind tunnel* telah dilakukan untuk mengetahui *pressure drag* dengan masing – masing model untuk kereta *fore-* dan *after-bodies*, serta bagian *middle* kereta telah dibuat. Pada pengujian ini tergantung pada panjang dari bagian *middle* kereta. Untuk model kereta dengan *short length*, *coefficient of the aerodynamic drag* dapat ditulis sebagai

$$C_{ds} = \frac{D_s}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2 A'\right)} \quad 2.13$$

dimana C_{ds} adalah *coefficient of the aerodynamic drag* untuk model kereta pendek, D_s adalah *aerodynamic drag*, A' adalah area penampang kereta model, U adalah kecepatan angin, ρ adalah densitas udara. Selanjutnya, *coefficient of the aerodynamic drag* dapat dibagi menjadi dua komponen: satu tergantung pada panjang kereta model dan lainnya tidak tergantung dari panjang kereta model, seperti

$$C_{ds} = C_{dp} + \lambda' m \frac{l_s}{d'} \quad 2.14$$

di mana C_{dp} adalah *coefficient of the pressure drag* pada bagian *fore-* dan *after-bodies* kereta model, λ'_m adalah *coefficient of the hydraulic friction* pada kereta model, l_s adalah panjang kereta, dan d' adalah diameter hidrolik kereta model.

Sementara itu, untuk model kereta panjang, *coefficient of the aerodynamic drag* juga diberikan

$$C_{dl} = C_{dp} + \lambda'_m \frac{l_1}{d'} \quad 2.15$$

di mana l_1 adalah panjang kereta model yang lebih panjang. Sehingga didapatkan C_{dp} , yaitu

$$C_{dp} = \frac{C_{ds}l_1 - C_{dl}l_s}{l_1 - l_s} \quad 2.16$$

Pada kenyataannya, koefisien λ'_m dari gesekan hidrolik pada kereta model dapat sangat berbeda dari kereta nyata.

2.10 Penelitian Terdahulu Mengenai Efek Penambahan *Cars* pada Konfigurasi Kereta Semi Cepat

Saat kereta berjalan, panjangnya berubah sesuai dengan tuntutan beban. Pertambahan panjang kereta dapat mempengaruhi *Boundary Layer Thickness*, *Flow Vortex Structure*, *Friction Drag Coefficient* (CD_T), *Coefficient Drag* (C_D). Ketebalan boundary layer pada ujung gerbong kereta, dimana terjadi *separation*, bervariasi tergantung pada panjang kereta, mempengaruhi struktur *wake flow*. Sementara itu, perubahan *surface pressure*, yang mempengaruhi *pressure drag*, menghasilkan perubahan pada *friction drag* dan *aerodynamic drag* kereta.

Untuk menganalisa efek penambahan jumlah *cars* pada *Medium Speed Train* penelitian biasanya dilakukan dengan melakukan pengujian fisik model dan perhitungan numerik (*Computational Fluid Dynamics*). Pengujian fisik model meliputi pengujian statik model di wind tunnel (*scaled experiment*), dan pengujian dinamik atau *train rig* pada model. Sementara itu pengujian numerik meliputi pemodelan kereta dengan menggunakan komputer untuk menganalisis aliran pada kereta.

2.10.1 Computational Fluid Dynamics (Numerical Methods)

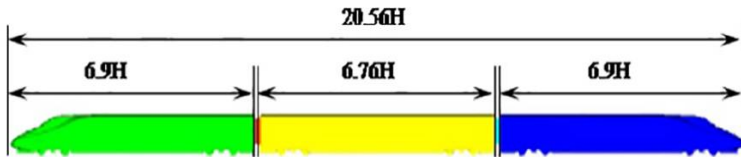
Computational Fluid Dynamics, atau CFD, adalah analisa yang dilakukan pada sebuah sistem yang meliputi fenomena aliran fluida, perpindahan panas, atau reaksi kimia dengan menggunakan simulasi di komputer. Metode ini dianggap cukup akurat sehingga sering digunakan untuk analisa aerodinamika pesawat, kendaraan, hidrodinamika kapal, pembangkit listrik, dll. (Versteeg, 1995)

Metode CFD tersebut menurut Baker, 2019 digunakan dengan cara mengubah persamaan diferensial parsial non linear orde dua yang berasal dari persamaan Navier-Stokes menjadi persamaan linear. Persamaan linear tersebut kemudian diselesaikan dengan menggunakan perhitungan di komputer. Untuk dapat menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut secara numerik, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan domain komputasi untuk menyelesaikan medan tekanan dan kecepatan. Domain komputasi tersebut kemudian didiskritisasi menjadi sel-sel kecil untuk diselesaikan.

2.10.1.1 Penelitian Dan Zhou et al (2017)

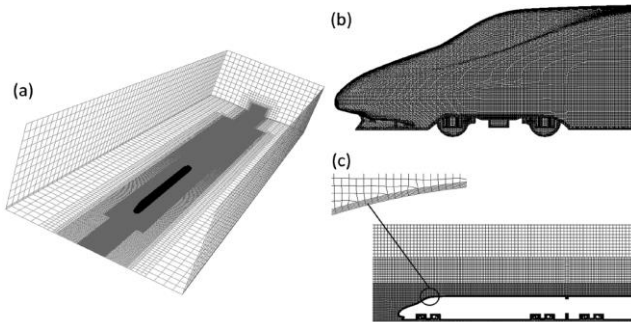
Simulasi numerik pada penelitian tersebut dilakukan menggunakan *Delayed Detached Eddy Simulations* (DDES) untuk mengetahui pengaruh penambahan jumlah *cars* pada konfigurasi kereta semi cepat terhadap performansi aerodinamika kereta semi cepat antara lain : *boundary layers, wake vortices, surface*

pressures, aerodynamic drag, coefficients and friction drag coefficients. Simulasi CFD dilakukan dengan rangkaian gerbong kereta terdiri dari 3 *cars*, 5 *cars*, 8 *cars*. Panjang total konfigurasi kereta adalah $L = 6.9 H + n \times (6.76 H) + 6.9 H$, dengan H adalah ketinggian kereta yang di skala.



Gambar 2.7 Model konfigurasi 3 *cars* (Dan Zhou et al, 2017)

Domain dan *boundary conditions* ditunjukkan pada Gambar 2.4 dengan menggunakan contoh 3 *cars*. Jarak sebelum kereta adalah 10 H, dan jarak di belakang kereta 40 H. Ketinggian domain adalah 10 H dan lebarnya 20 H dengan model kereta berada di pusat domain. *Mesh* yang digunakan yaitu *coarse*, *medium*, dan *fine* dimana masing-masing berjumlah 18 juta *cells*, 24 juta *cells*, dan 36 juta *cells*. Tiga penyempurnaan daerah diterapkan di bidang aliran di sekitar kereta. Lima lapisan prisma diciptakan permukaan kereta untuk memecahkan lapisan batas. *Mesh* untuk model kereta ditunjukkan pada Gambar 2.8 contoh model kereta 3 *cars*.



Gambar 2.8 Meshing : (a) *Mesh* keseluruhan, (b) *Surface mesh* disekitar *nose* kereta, (c) Potongan bidang longitudinal *mesh* (Dan Zhou et al,2017)

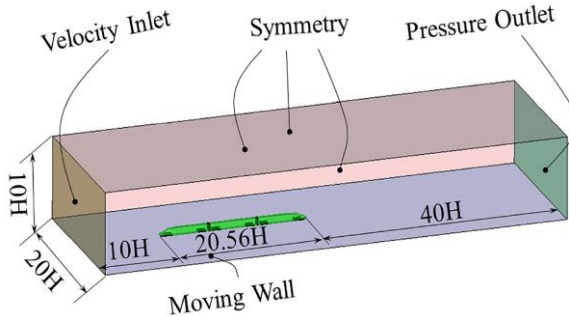
Mesh pada penelitian ini didominasi *cells* berbentuk hexahedral (segi empat). Boundary layer mesh pada penelitian ini menggunakan 5 prism layer. Agar memenuhi kriteria model turbulen $k-\omega$ SST pada daerah dekat *wall*, digunakan jarak *cell* pertama pada boundary layer sebesar 0.39 mm. *Boundary condition* pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Pada bagian inlet menggunakan *velocity inlet* dengan kecepatan udara yang mengalir melalui kereta (U_m) sebesar 60 m/s. *Turbulent kinetic energy* (k) dan *special dissipation rate* (ω) dihitung menggunakan persamaan :

$$k = \frac{3}{2(I U_m)^2} \quad 3.1$$

$$\omega = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{(C_\mu^{\frac{1}{4}} \times 0.07H)} \quad 3.2$$

Dimana I adalah *turbulence intensity* sebesar 0.5%. H adalah panjang karakteristik sebesar 0.4625 m. C_μ adalah konstanta empiris bernilai 0.09. Pada sisi outlet menggunakan *pressure outlet* sebesar 0 Pa dan kondisi *moving wall* digunakan pada bidang bawah kereta (*ground*).

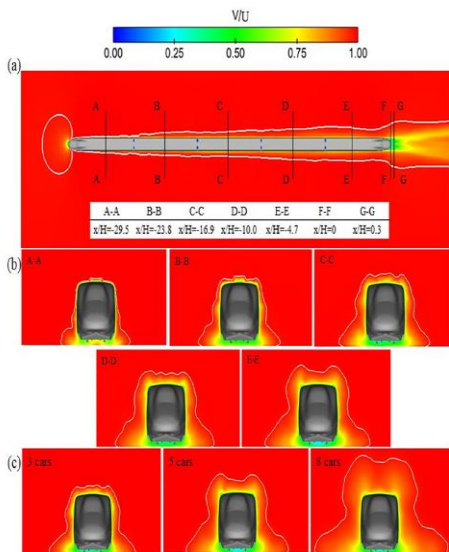


Gambar 2.9 *Computational domain dan boundary conditions* (Dan Zhou et al,2017)

Simulasi CFD pada penelitian ini menggunakan jenis simulasi *unsteady pressure-based*. Metode yang digunakan yaitu *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation* (SIMPLE) untuk meng-*couple* tekanan dan kecepatan. Skema diskritisasi standar digunakan untuk menyelesaikan perhitungan tekanan. Simulasi *second-order upwind* digunakan untuk persamaan k dan ω . *Time step size* yang digunakan sebesar 10^{-4} dengan jumlah iterasi setiap *time step* sebesar 30 agar kalkulasi mampu konvergen setelah 30 iterasi. Kriteria konvergensi untuk residual simulasi diatur mencapai 10^{-5} .

Analisa numerik yang dilakukan **Dan Zhou et al** tersebut menunjukkan pengaruh panjang kereta terhadap beberapa parameter antara lain *Boundary Layer Thickness*, *Flow Vortex Structure*, *Surface Pressure*, *Friction Drag Coefficient* (CD_T), dan *Coefficient Drag* (C_D). Gambar 2.10 menunjukkan pengaruh penambahan panjang kereta pada ketebalan *boundary layer*

disekitar *body* kereta dengan mengambil contoh konfigurasi 5 *cars* kereta.

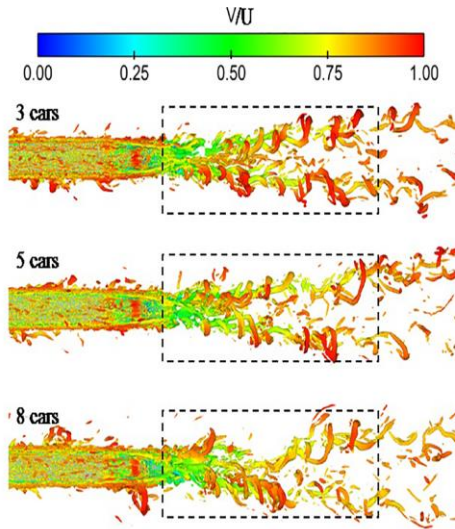


Gambar 2.10 *Boundary layer* disekitar kereta : (a) Ketebalan *boundary layer* pada bidang horizontal untuk konfigurasi 5 *cars*, (b) Ketebalan *boundary layer* di area *middle section* masing-masing gerbong pada konfigurasi 5 *cars*, (c) Ketebalan *boundary layer* dibagian *tail cars* untuk konfigurasi 3 *cars*, 5 *cars*, dan 8 *cars* (Dan Zhou et al,2017)

Diperoleh hasil berdasarkan **Gambar 2.10** bahwa *boundary-layer thickness* mengalami sedikit sedikit fluktuasi dibagian dekat *wake*, namun tidak berpengaruh terhadap kembangan ketebalan *boundary layer* secara keseluruhan. Bagian kereta yang lebih mendekati *ground* memiliki *boundary layer* yang lebih tebal dibandingkan dengan bagian kereta yang posisinya lebih menjauhi *ground*. Perbedaan ketebalan *boundary layer* tersebut dapat diakibatkan oleh aliran melalui *cowcatcher* dibagian *head* kereta. Pengaruh penambahan jumlah *cars* terhadap ketebalan

boundary layer terlihat jelas. Ketebalan *boundary layer* pada bagian ekor (*tail*) kereta semakin bertambah tebal seiring dengan semakin panjang konfigurasi kereta.

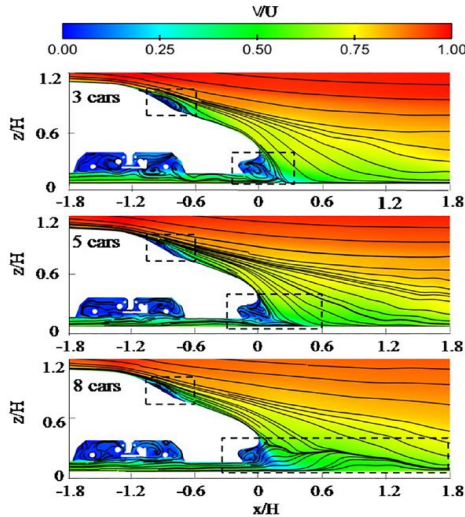
Penelitian tersebut juga memperlihatkan adanya pengaruh penambahan panjang kereta pada karakteristik *flow vortex* didaerah timbulnya *wake* untuk konfigurasi kereta 3 cars, 5 cars, dan 8 cars.



Gambar 2.11 Karakteristik *flow vortex* didaerah timbulnya *wake* untuk konfigurasi kereta 3 cars, 5 cars, dan 8 cars (Dan Zhou et al,2017)

Diperoleh hasil berdasarkan **Gambar 2.11** bahwa struktur *flow vortex* didaerah dekat *wake* memiliki kemiripan untuk jumlah cars yang berbeda-beda. Namun pusaran yang terjadi lebih tidak bertaturan untuk konfigurasi kereta yang lebih panjang. Kondisi tersebut terjadi karena aliran turbulen pada *boundary layer* yang lebih tebal menjadi lebih rumit. Secara simultan, kecepatan pusaran *wake* yang terbentuk semakin berkurang seiring semakin banyaknya penambahan cars. Sehingga dapat dianggap bahwa

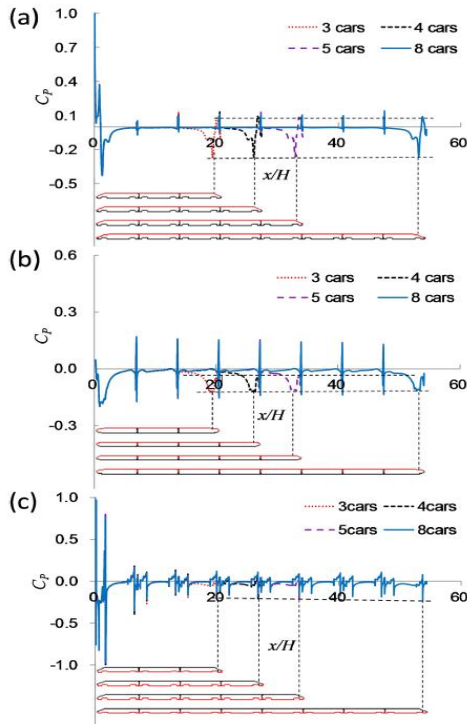
semakin panjang konfigurasi kereta maka energi yang hilang semakin besar.



Gambar 2.12 *Velocity distribution* dan *particle trace* pada bidang longitudinal (Dan Zhou et al,2017)

Separation bubble yang terbentuk pada daerah transisi *streamline* lebih kecil untuk konfigurasi kereta yang lebih panjang. Kondisi tersebut diakibatkan karena energi disipasi meningkat seiring dengan semakin tebalnya *boundary layer*. Sehingga turbulen energi dari *boundary layer* pada bagian ekor (*tail*) kereta untuk konfigurasi kereta yang lebih panjang semakin kecil.

Simulasi CFD tersebut juga menunjukkan adanya pengaruh pertambahan panjang kereta pada *surface pressure* disepanjang body kereta. **Gambar 2.13** memperlihatkan pengaruh penambahan jumlah *cars* pada konfigurasi kereta terhadap nilai *pressure surface coefficient* (C_p).



Gambar 2.13 Nilai C_p disepanjang *body* kereta : (a) C_p disepanjang bagian sisi atas kereta, (b) C_p disepanjang sisi samping kereta, (c) *curve fitting between the negative peak of the tail car and the train length* (Dan Zhou et al,2017)

Kesimpulan dari penelitian **Dan Zhou et al** pada tahun 2017 yaitu ketebalan *boundary layer* disekitar *body* kereta semi cepat semakin besar seiring bertambahnya jumlah *cars*. Pusaran dominan didekat *wake* menjadi kurang simetris dan jarak antara pusaran kecil dengan pusaran dominan semakin besar apabila penambahan jumlah *cars* semakin banyak. *Separation bubble* di daerah transisi pada bagian *tail cars* lebih kecil sementara *separation bubble* diantara *nose* dan *cowcatcher* lebih besar.

Reattachment area lebih panjang untuk kereta yang lebih panjang. Penambahan jumlah *cars* berpengaruh kecil terhadap tekanan permukaan pada *head car*, namun memiliki pengaruh besar terhadap tekanan permukaan pada *tail car*. Penambahan jumlah *cars* berpengaruh signifikan pada *friction drag coefficient*. *Friction drag coefficient* pada setiap *car* berkurang seiring dengan semakin banyaknya jumlah penambahan *cars* pada konfigurasi kereta.

C_D	Head car	Middle car1	Middle car2	Middle car3	Middle car4	Middle car5	Middle car6	Tail car
3 cars	0.1439	0.0824	\	\	\	\	\	0.1594
4 cars	0.1437	0.0820	0.0823	\	\	\	\	0.1582
5 cars	0.1434	0.0819	0.0823	0.0817	\	\	\	0.1546
8 cars	0.1448	0.0814	0.0824	0.0827	0.0819	0.0817	0.0816	0.1535

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189798.t003>

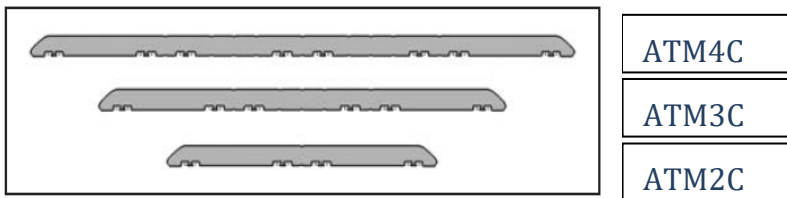
Gambar 2.14 Nilai C_D pada setiap *car* (Dan Zhou et al,2017)

2.10.1.2 Penelitian Thomas W Muld et al (2012)

Simulasi numerik pada penelitian **Thomas W Muld et al** dilakukan menggunakan *Delayed Detached Eddy Simulations* (DDES). DDES adalah perpaduan (*hybrid*) dari model RANS dan LES dimana biasanya RANS untuk menganalisa aliran didekat *wall* sedangkan LES digunakan untuk aliran yang jauh dari *wall*. Struktur aliran dianalisa menggunakan 2 metode dekomposisi yang berbeda yaitu *proper orthogonal decomposition* (POD) dan *dynamic mode decomposition* (DMD). Simulasi CFD dilakukan dengan rangkaian gerbong kereta terdiri dari 2 *cars* (ATM2C), 3 *cars* (ATM3C), dan 4 *cars* (ATM4C) dimana masing-masing konfigurasi kereta tersebut telah diskala sebesar 1:50.

Tiga *boundary conditions* yang berbeda digunakan pada simulasi CFD tersebut yaitu : *inlet*, *pressure outlet*, *wall*. Ketiga kondisi batas tersebut diaplikasikan untuk semua konfigurasi kereta pada penelitian ini. Pada bagian inlet menggunakan kondisi

batas Dirichlet dengan *turbulent intensity* (TI) sebesar 0.3% dengan kecepatan aliran fluida yang memasuki inlet sebesar 200 km/jam dan *lenth scale* $L_T = 0.1d_h$. Kondisi *moving wall* digunakan pada bidang bawah kereta (*ground*) yang bergerak relative terhadap kereta. Kondisi *wall* stasioner digunakan pada permukaan kereta. Kondisi batas pada *Outlet* sebesar 0 Pa. *Boundary conditions* tersebut diterapkan dengan penyelesaian *hybrid*, yang bergantung pada nilai y^+ , memadukan perlakuan Re rendah dengan *wall model*. *Grid* yang digunakan memiliki $y^+ = 1$ pada *wall surface*, yang berarti perlakuan Re rendah pada *wall surface*. *Grid* untuk semua kasus pada penelitian ini didekati dengan $y^+ = 1$ dan memiliki 5 *prism layer*.



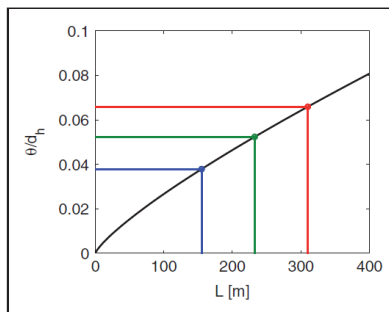
Gambar 2.15 Konfigurasi kereta untuk simulasi CFD (Muld et al,2012)

Aliran disekitar kereta diselesaikan secara numerik dengan *software* Star-CD v.4 dimana persamaan *Navier-Stokes* didiskritisasi dengan metode volume hingga. Simulasi CFD yang dilakukan **Thomas W Muld et al** tersebut menunjukkan pengaruh penambahan jumlah *cars* terhadap beberapa parameter antara lain *Momentum-Loss Thickness* dan *Mean Pressure Coefficient*. **Gambar 2.16** menunjukkan pengaruh penambahan panjang kereta pada *momentum-loss thickness*. Terdapat beberapa parameter untuk menentukan *boundary layer thickness* yaitu : *boundary layer* (δ), *displacement thickness* (δ^*), dan *momentum thickness* (θ). Pada penelitian tersebut, θ digunakan untuk membandingkan

ketebalan *boundary layer* pada *tail car* mengikuti persamaan **Munson et al** berikut :

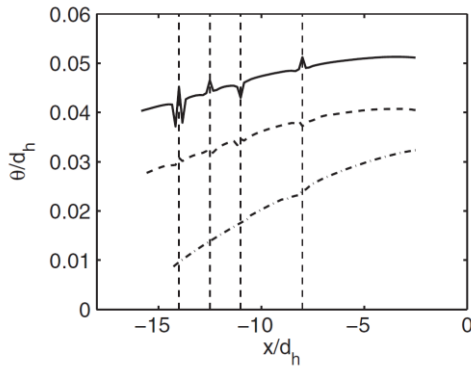
$$\theta(x) = 0.0360 \left(\frac{v}{U_\infty} \right)^{\frac{1}{5}} x^{\frac{4}{5}} \quad 3.3$$

Selanjutnya, *momentum loss-thickness* ditampilkan sebagai fungsi dari panjang keseluruhan kereta berdasarkan jumlah *cars* kereta tersebut. Telah diketahui bahwa panjang keseluruhan untuk masing-masing model kereta adalah 150 meter untuk ATM2C, 225 meter untuk ATM3C, dan model kereta ATM4C sepanjang 300 meter.

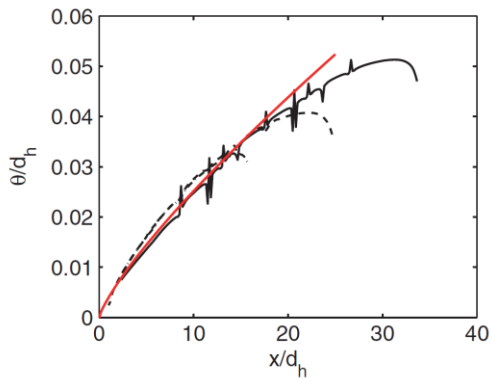


Gambar 2.16 *Momentum-loss thickness* sebagai fungsi panjang kereta saat kereta melaju dengan kecepatan 200 km/jam. Garis hitam menunjukkan kereta skala penuh, garis biru : ATM2C, garis hijau: ATM3C, garis merah: ATM4C (**Muld et al,2012**)

Gambar 2.17 dan Gambar 2.18 memperlihatkan *momentum thickness* untuk tiga model kereta yang berbeda dan membandingkannya dengan hasil perhitungan menggunakan persamaan empiris **Munson et al**. Garis putus-putus pada Gambar 2.17 tersebut menunjukkan titik lokasi adanya *gap* antar gerbong kereta.

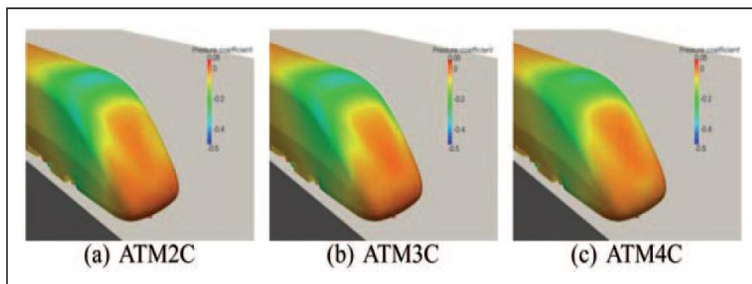


Gambar 2.17 *Momentum thickness* pada 2 cars terakhir sebagai fungsi jarak *streamwise* dari *tail car* kereta. Garis putus-putus vertikal menunjukkan posisi *gap* antar gerbong kereta (Muld et al,2012)



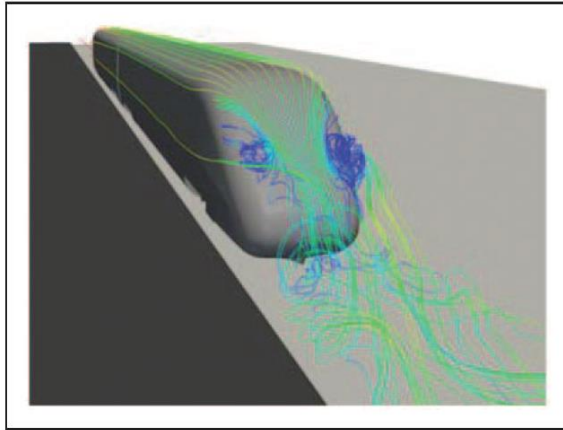
Gambar 2.18 *Momentum thickness* sebagai fungsi jarak dari *head car* yang telah dibandingkan dengan nilai empiris. Garis merah : nilai empiris, garis solid : ATM4C, garis putus-putus : ATM3C, dan garis titik garis : ATM2C (Muld et al,2012)

Terlihat jelas bahwa terjadi sedikit osilasi nilai θ pada daerah *gap* antar gerbong kereta. Kecocokan dengan nilai empiris **Munson et al** terlihat bagus pada permulaan kereta. Mendekati *tail car*, nilai θ lebih rendah dibanding nilai empiris, dimana dapat disebabkan adanya *gap* antar gerbong kereta. Simulasi CFD tersebut juga menunjukkan adanya pengaruh pertambahan panjang kereta pada *mean pressure coefficient* pada bagian ekor (*tail*) kereta. **Gambar 2.17** memperlihatkan pengaruh pertambahan panjang kereta terhadap *mean pressure coefficient*.



Gambar 2.19 *Mean pressure coefficient* pada bagian ekor kereta dengan konfigurasi kereta yang berbeda (**Muld et al,2012**)

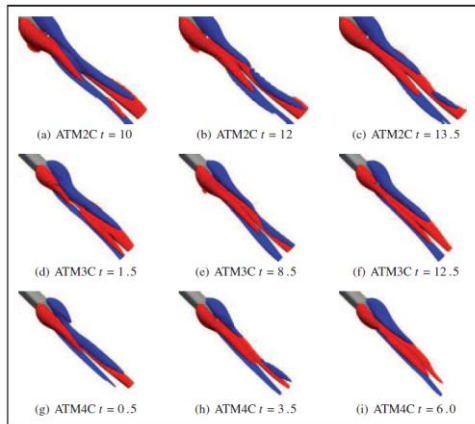
Tekanan pada sisi atas permukaan bagian belakang kereta lebih besar untuk kereta yang lebih panjang dan lebih kecil untuk kereta yang lebih pendek. Tekanan pada bagian bawah permukaan miring lebih besar untuk kereta yang lebih pendek, dan lebih kecil untuk kereta yang konfigurasi lebih panjang. Kontur *mean pressure coefficient* hampir sama untuk ketiga model konfigurasi kereta yang diuji. Hal tersebut mengindikasikan bahwa topologi aliran adalah sama untuk ketiga model yang diuji.



Gambar 2.20 *Streamline* berdasarkan rata-rata aliran disekitar ATM2C (Muld et al,2012)

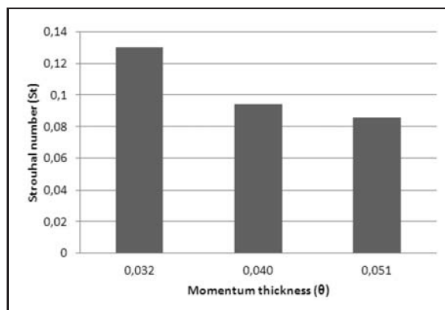
Dari **Gambar 2.20** diketahui bahwa aliran masih menyatu dengan *tail car* kereta pada bagian *centerline*. Hal tersebut dapat berdampak pada penurunan tekanan dimana aliran fluida mengalami akselerasi saat melewati bagian *nose* dari *tail car*. *Pressure drop* yang terjadi menyebabkan seolah terdapat hisapan aliran digambarkan dengan adanya aliran menuju kedepan *nose* dari samping *body* kereta.

Penambahan jumlah cars pada konfigurasi kereta mempengaruhi karakteristik *streamwise velocity* (u) pada bagian *tail* (ekor) kereta diperlihatkan pada **Gambar 2.21**.



Gambar 2.21 Karakteristik *streamwise velocity* (u) pada bagian *tail* kereta dari POD model (Muld et al,2012)

Proses rekonstruksi bidang aliran dengan hanya memperhatikan rata-rata aliran dan fluktuasi pertama model POD menunjukkan bahwa karakteristik struktur aliran memiliki kemiripan untuk ketiga konfigurasi kereta yang diuji.



Gambar 2.22 Strouhal Number (S_t) dari struktur paling dominan pada *wake* yang terbentuk sebagai fungsi *momentum thickness* (θ) pada *body* kereta yang dekat dengan *tail car* (Muld et al,2012)

Perbedaan yang sering terjadi akibat penambahan jumlah *cars* utamanya adalah perbedaan ketebalan *boundary layer* sebelum terjadi separasi dan ditemukan pada penelitian ini bahwa Strouhal number dari struktur paling dominan pada *wake* yang terbentuk berkurang seiring dengan bertambahnya ketebalan *boundary layer*.

2.10.2 Wind Tunnel Test (Lirong Jia et al, 2017)

Percobaan pada *wind tunnel* dilakukan oleh **Lirong Jia et al** untuk memvalidasi hasil pengujian CFD yang dilakukan sebelumnya. Percobaan tersebut dilakukan didalam *wind tunnel* berukuran 8m x 6m yang berlokasi di *China's Aerodynamics Research and Development Center*. Jarak antara permukaan lantai dengan bagian dasar *wind tunnel* adalah 1,06 m, ukuran efektif bagian uji adalah 16,1 m panjang, lebar 8,0 m dan tinggi 4,9 m. Luas *cross-section area* adalah 39,2 m². *Turbulent intensity* sebesar 0,5%. Model kereta kecepatan tinggi yang digunakan memiliki konfigurasi 3 *cars* dengan skala 1:8. Untuk memperoleh *Reynolds* dan *Mach number* yang sama pada *wind tunnel test*, kecepatan inlet sebesar 60 m/s dengan bagian bawah kereta (*ground*) diatur menjadi *no-slip wall* yang konsisten dengan *wind tunnel test*.

Method	Mesh resolution	Head car	Middle car	Tail car
Numerical simulation	coarse	0.167	0.074	0.148
	medium	0.142	0.081	0.155
	fine	0.143	0.080	0.157
Wind tunnel test		0.145	0.084	0.163

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189798.t001>

Gambar 2.23 Perbandingan nilai C_D hasil simulasi CFD dengan *wind tunnel test* (Lirong Jia et al, 2017)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Dikarenakan keterbatasan alat ukur dan visualisasi aliran melintasi body kereta api semi cepat maka penelitian ini menggunakan metode numerik dengan bantuan *software* ANSYS Fluent 18.1. Dalam penelitian ini terdapat tiga tahapan utama yang harus dilakukan yaitu: *preprocessing*, *solving* atau *processing*, dan *postprocessing*.

3.1 Variasi Simulasi

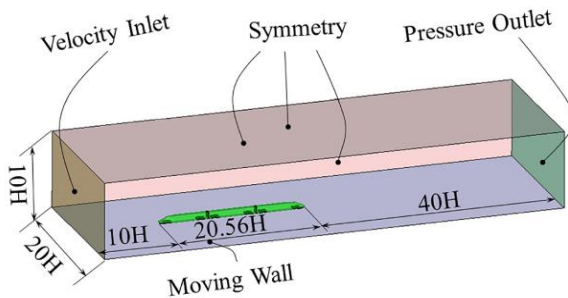
Model yang dibuat pada penelitian ini berupa geometri tiga dimensi kereta semi cepat yang mengalami penyederhanaan bentuk pada bagian *boogie* dan roda kereta. Variasi simulasi pada penelitian ini meliputi variasi jumlah gerbong (*cars*) pada konfigurasi model kereta semi cepat yang digunakan yaitu menggunakan konfigurasi 1 *cars* (hanya lokomotif kereta) dan 3 *cars* (2 lokomotif dan 1 gerbong). Pengaruh kedua variasi jumlah *car* tersebut dapat diketahui dengan memvariasikan kecepatan angin (fluida) yang berhembus dari *inlet* menuju ke *outlet*. Sehingga pada penelitian ini terdapat 4 jenis simulasi yang berbeda. Parameter dan juga variasi untuk penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1 dibawah ini :

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

Parameter	Nilai
Konfigurasi Model Desain Kereta Semi Cepat	Kereta Semi Cepat dengan 1 <i>cars</i> (1 lokomotif) dan Kereta Semi Cepat dengan 3 <i>cars</i> (2 lokomotif dan 1 gerbong). Tipe konfigurasi kereta yang digunakan adalah tipe <i>push and pull</i> .
Kecepatan Fluida relatif terhadap Kereta Semi Cepat (m/s)	33.33 m/s dan 44.44 m/s (<i>Mach Number</i> aliran fluida pada masing-masing variasi kecepatan sebesar 0.097 dan 0.129)
<i>Reynolds Number</i> (Re_H)	7.5×10^6 dan 10.07×10^6

3.2 Domain Simulasi

Penentuan dimensi domain penelitian ini merujuk pada penelitian CFD pengaruh penambahan jumlah *cars* pada perforansi aerodinamika kereta yang dilakukan oleh **Dan Zhou et al** pada tahun 2017. Terdapat sedikit perbedaan ukuran domain penelitian Tugas Akhir ini dengan domain referensi tersebut dikarenakan adanya perbedaan kecepatan fluida yang digunakan. Dimensi domain yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah 26% lebih kecil dari ukuran domain referensi. Dimensi domain tersebut selanjutnya digunakan sebagai batasan pada *software Fluent*. **Gambar 3.1** menunjukkan dimensi domain referensi :

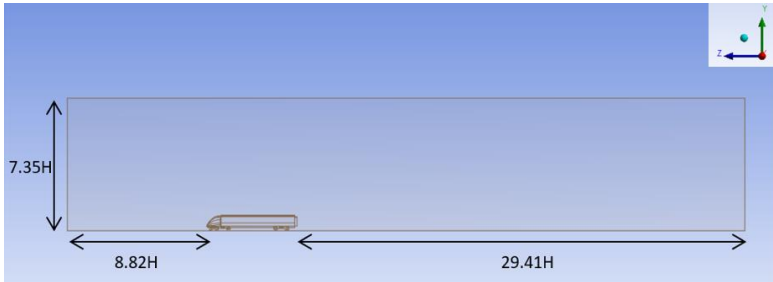


Gambar 3.1 *Computational domain dan boundary conditions*
(Dan Zhou et al, 2017)

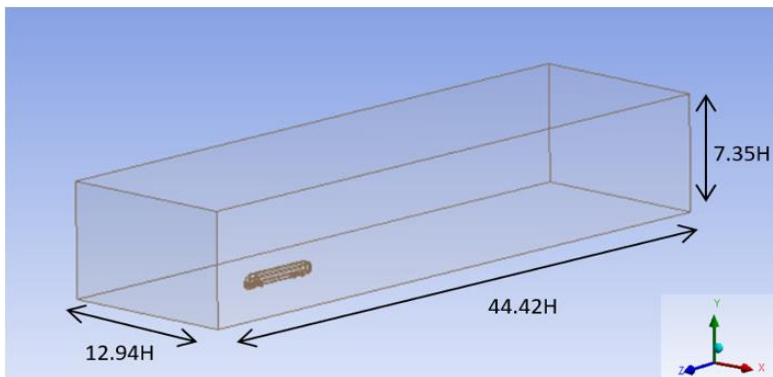
Tabel 3.2 Ukuran domain referensi dan ukuran domain simulasi

Parameter	Ukuran Referensi (H)	Ukuran Referensi (m)	Ukuran karakteristik yang digunakan	Ukuran yang digunakan
Jarak <i>head car</i> dengan <i>inlet</i>	10H	34 meter	8.82H	30 meter
Jarak <i>tail car</i> dengan <i>outlet</i>	40H	136 meter	29.41H	100 meter
Ketinggian domain	10H	34 meter	7.35H	25 meter
Lebar Domain	20H	68 meter	12.94H	44 meter

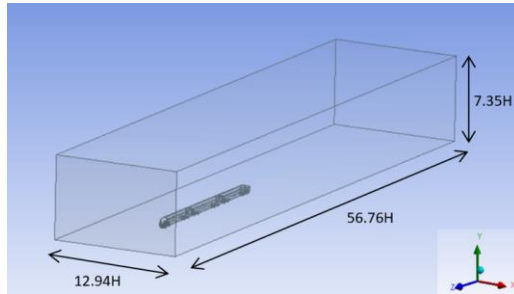
Gambar 3.2, Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 dibawah ini menunjukkan ukuran domain yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini :



Gambar 3.2 Ukuran domain simulasi 1 cars tampak samping



Gambar 3.3 *Isometric view* domain simulasi 1 cars



Gambar 3.4 *Isometric view domain simulasi 3 cars*

3.3 Tahap *Preprocessing*

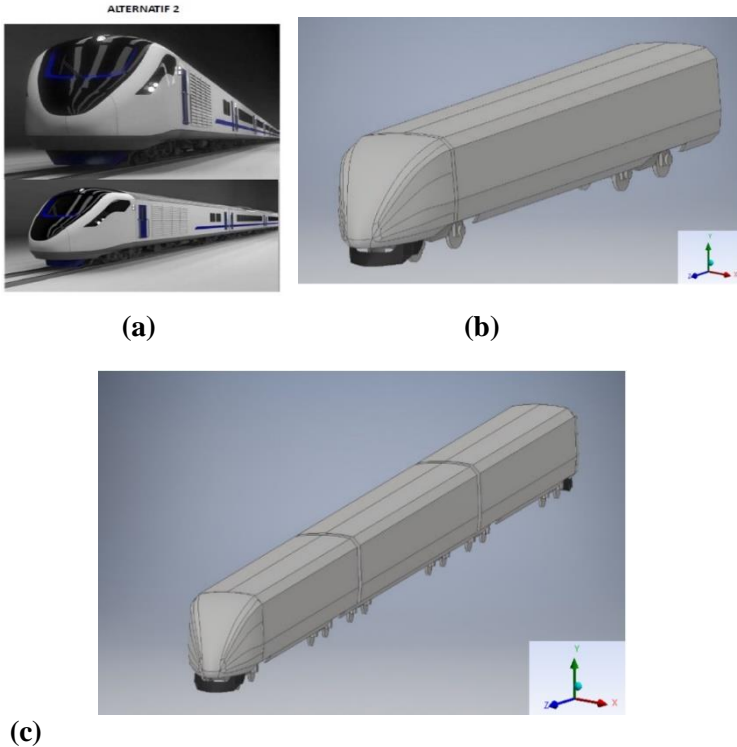
Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD). Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan meshing dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

3.3.1 Geometri Kereta Semi Cepat

Adapun geometri dan dimensi dari kereta semi cepat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 3.3 Dimensi Kereta Semi Cepat

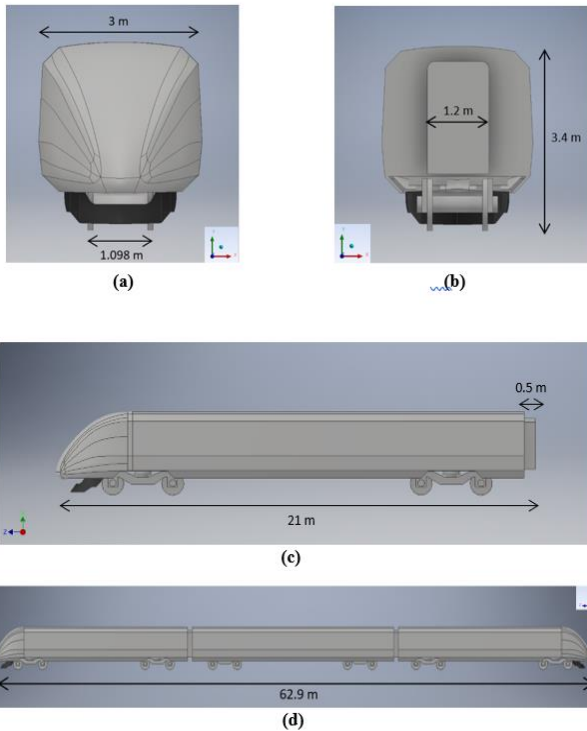
Parameter	Dimensi (mm)
Panjang <i>Head Car</i> atau <i>Tail Car</i>	20500
Panjang <i>Middle Car</i>	20900
Lebar <i>body</i> kereta	3000
Lebar <i>railway</i>	1098
Tinggi kereta	3400
Lebar celah atau <i>gap</i> antar gerbong	500



Gambar 3.5 Geometri kereta (a) Model digital kereta semi cepat, (b) Geometri 1 cars kereta semi cepat, (c) Geometri 3 cars kereta semi cepat

Geometri yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah geometri *non-scaled* atau geometri dengan ukuran sebenarnya. Oleh karena itu berdampak pada domain simulasi yang cukup besar. Pada tahap pembuatan geometri kereta semi cepat tersebut dilakukan modifikasi dan simplifikasi pada bagian *boogie* dan roda kereta dengan cara menghilangkan detail *part-part* tertentu untuk mempermudah proses *meshing* serta mengurangi beban simulasi

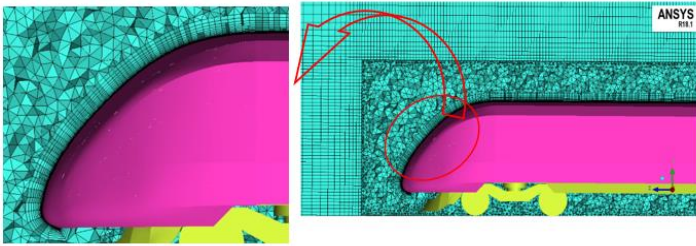
sehingga proses simulasi tidak terlalu berat untuk komputer-komputer komersial.



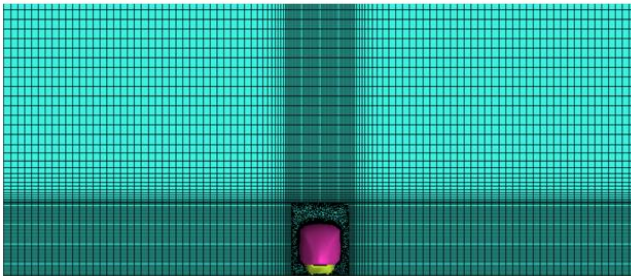
Gambar 3.6 Dimensi geometri kereta (a) Geometri kereta tampak depan, (b) Geometri kereta tampak belakang, (c) Dimensi lateral geometri kereta 1 cars, (d) Dimensi lateral geometri kereta 3 cars

3.3.2 Meshing

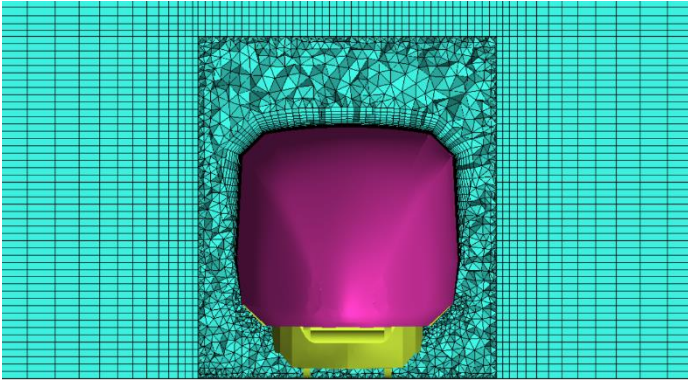
Bidang atau volum yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan kedalam elemen-elemen kecil tersebut. Terdapat dua jenis *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *tetra mesh* dan *hexa mesh*. Penggunaan *tetra mesh* dan *hexa mesh* dalam satu model simulasi biasanya disebut dengan istilah *hybrid mesh*. Geometri kereta semi cepat dilingkupi oleh *surface box* untuk membatasi *tetra mesh* yang digunakan, sehingga untuk kembangan *mesh* ke arah mendekati *wall* menggunakan *hexa mesh*. Penggunaan *tetra mesh* disekitar *body* kereta adalah untuk mempermudah proses *meshing* dikarenakan bentuk dan kontur yang rumit dari geometri kereta semi cepat yang digunakan terutama pada bagian *under body* seperti *cowcatcher*, *boogie*, *boogie fairing*, dan roda kereta.



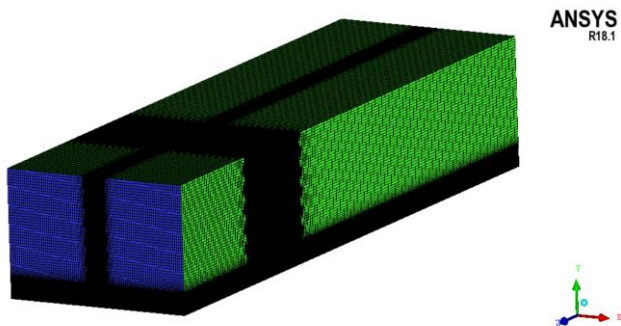
(a)



(b)



(c)



(d)

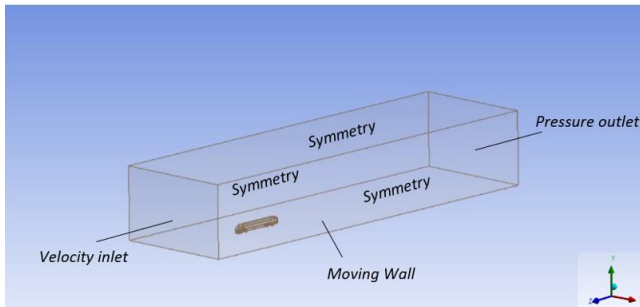
Gambar 3.7 Meshing untuk simulasi CFD (a) Meshing disekitar *body* kereta tampak samping, (b) Meshing disekitar *body* kereta tampak depan, (c) Tetra mesh didalam *surface box*, (d) Isometric view meshing kereta dan domain

Agar *mesh* yang dibuat mampu menangkap fenomena turbulensi aliran dan separasi yang terjadi di dekat *body* kereta

secara lebih akurat, *boundary layer mesh* pada penelitian tugas akhir ini memiliki 20 *prism layer* dengan jarak *cell* pertama (*first height cell*) terhadap *body* kereta adalah sebesar 1 mm. *Mesh* yang dibuat menggunakan pendekatan $y^+ = 70$ untuk semua model simulasi. Kualitas *mesh* dapat dinilai berdasarkan *skewness* dan *orthogonal quality*. ANSYS Fluent menyarankan nilai *skewness* maksimal sebesar 0.95 dan *orthogonal quality* minimal di atas 0.1 agar simulasi yang dijalankan stabil. Didapatkan *mesh* dengan kualitas *skewness* maksimal sebesar 0.92 dan *orthogonal quality* minimum sebesar 0.151.

3.3.3 Boundary Condition

Merupakan penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun pemberian kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta kondisi pada *wall*. Batasan-batasan yang ditetapkan untuk penelitian ini adalah *inlet*, *outlet*, *wall*, *interior*, dan *symetry*. Kondisi batas yang digunakan pada *inlet* adalah *velocity inlet* dimana kecepatan aliran fluida yang mengalir diatur sebesar 33.33 m/s dan 44.44 m/s dengan *turbulent intensity* (TI) sebesar 1% dengan *length scale* sebesar 0.052 meter. Pada bagian *outlet* ditetapkan *pressure outlet* dan diatur tekanan pada *outlet* sebesar -50 Pa dengan *backflow intensity* sebesar 1 % dan *length scale* 0.052 meter. Untuk *wall* bagian atas, kiri dan kanan digunakan kondisi batas yaitu *symmetry*, sedangkan untuk *wall* bagian bawah ditetapkan sebagai *moving wall* dengan arah menuju sumbu *z* negative atau berlawanan dengan arah pergerakan kereta. Kecepatan *moving wall* diatur mengikuti kecepatan aliran fluida yaitu sebesar 33.33 m/s dan 44.44 m/s. Kondisi batas yang digunakan pada *surface box* disekitar *body* kereta adalah *interior*. *Boundary condition* untuk penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut ini :



Gambar 3.8 *Boundary conditions* penelitian

3.4 Parameter Pemodelan

Penelitian dilakukan menggunakan salah satu *software Computational Fluid Dynamic* (CFD) yaitu ANSYS Fluent 18.1 dengan parameter sebagai berikut :

3.4.1 *Models*

Pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) dimana *viscous model* yang digunakan yaitu $k-\omega$ SST mengacu pada penelitian **Dan Zhou et al (2017)**.

3.4.2 *Materials*

Dalam tahap ini dipilih material yang digunakan dalam simulasi dan *properties* yang dimiliki material tersebut. Simulasi CFD pada penelitian ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan densitas 1.225 kg/m^3 dan viskositas $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

3.4.3 *Operating Conditions*

Operating conditions merupakan perkiraan daerah operasi. Tekanan pada daerah operasi diatur sebesar 1 atm atau 101325 Pa.

3.4.4 Boundary Conditions

Boundary Conditions adalah pengaturan permukaan yang membatasi zona fluida di dalam domain komputasi. *Boundary conditions* yang digunakan dalam simulasi ini adalah *Velocity inlet* pada domain bagian depan, *pressure outlet* pada bagian belakang, *symmetry* pada bagian samping dan atas domain, *moving wall* pada domain bagian bawah, dan *wall* pada permukaan kereta. Nilai nilai yang diatur pada *boundary conditions* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3.4 Nilai Parameter *Boundary Conditions*

Boundary Conditions	Parameter
<i>Velocity inlet</i>	Kecepatan: 44,44 m/s dan 33,33 m/s Turbulence intensity: 1% Turbulence length Scale: 0.052 m
<i>Pressure Outlet</i>	Pressure: 0 Pa Turbulence intensity: 1% Turbulence length scale: 0.052 m
<i>Moving Wall</i>	Kecepatan: 44,44 m/s dan 33,33 m/s

3.4.5 Solutions

Solutions methods yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut ini :

Tabel 3.5 *Solutions methods* penelitian

<i>Method</i>	<i>Steady, 3 Dimensi</i>
<i>Solver type</i>	<i>Pressure based</i>
<i>Model viscous</i>	k- ω SST
<i>Pressure-velocity coupling scheme</i>	SIMPLE
<i>Gradient</i>	<i>Least square cell based</i>

<i>Pressure</i>	<i>Second order</i>
<i>Momentum</i>	<i>Second order upwind</i>
<i>Turbulent kinetic energy</i>	<i>Second order upwind</i>
<i>Laminar kinetic energy</i>	<i>Second order upwind</i>
<i>Specific dissipation rate</i>	<i>Second order upwind</i>
Kriteria konvergensi	10^{-4}

3.4.6 Initialization

Initialization adalah penentuan nilai awal yang dihitung dari kondisi batas yang digunakan pada simulasi. *Initialization* perlu dilakukan sebelum simulasi dapat dijalankan. Proses *initialization* yang digunakan adalah *hybrid initialization*.

3.4.7 Monitor Residual

Pengaturan pada *monitor residual* dilakukan untuk mengatur kriteria konvergensi *residual* selama proses simulasi berlangsung. Nilai konvergensi residual ditetapkan sebesar 1×10^{-5} .

3.5 Processing

Menggunakan *software* ANSYS Fluent 18.1, kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada proses *preprocessing* akan dihitung dengan jumlah iterasi tertentu hingga parameter yang diobservasi telah konvergen. Apabila simulasi tidak memenuhi kriteria konvergensi yang sudah ditetapkan, proses *preprocessing* diulang dari tahap *meshing*.

3.6 Post Processing

Setelah simulasi berhasil dilakukan, tahap selanjutnya adalah tahap penyajian data (*post processing*). Terdapat dua jenis data yang disajikan, yaitu data kuantitatif dan data kualitatif. Data

kuantitatif yang disajikan antara lain adalah koefisien *drag* (C_d) dan koefisien tekanan (C_p) sedangkan data kualitatif yang akan disajikan berupa visualisasi dalam bentuk plot kontur untuk C_p , kecepatan aliran, dan *boundary layer*, serta plot *pathline* aliran di sekitar kereta semicepat.

3.7 Grid Independency Test

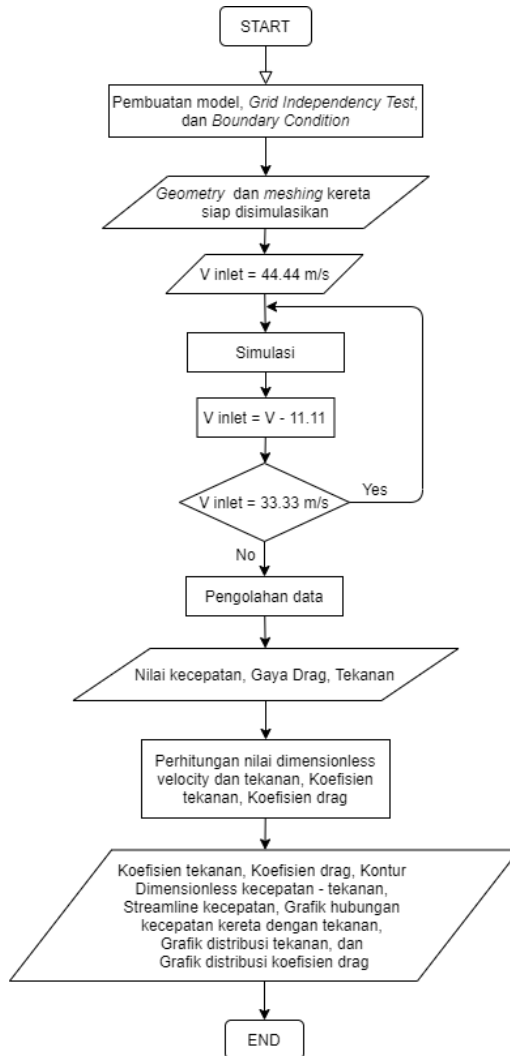
Grid independency test dilakukan untuk menguji pengaruh jumlah *mesh* terhadap hasil simulasi. Dalam simulasi ini, nilai yang digunakan sebagai pembanding adalah koefisien *drag* kereta semicepat. Berikut merupakan tabel analisa *grid independency*.

Tabel 3.6 Hasil *Grid Independency Test*

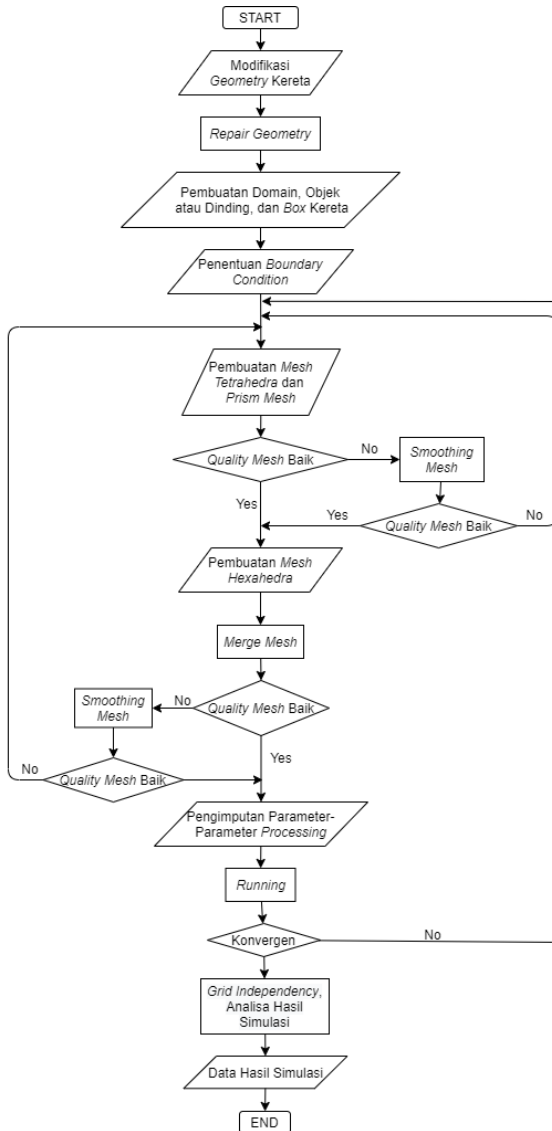
Nama <i>Mesh</i>	Jumlah <i>Cell</i>	C_d	<i>Error relative (%)</i>
A	3152270	0,3158	-
B	5210351	0,3143	0,447
C	6502183	0,3161	0,553
D	8340012	0,3187	0,815

3.8 Diagram Alir

Pada penelitian ini terdapat diagram alir penelitian umum dan diagram alir simulasi numerik yang ditunjukkan sebagai berikut :



Gambar 3.9 Flowchart penelitian



Gambar 3.10 Flowchart Simulasi CFD

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari simulasi numerik yang dilakukan terdiri dari hasil kualitatif dan kuantitatif. Hasil kualitatif yang akan ditampilkan adalah visualisasi aliran yaitu kontur kecepatan dan kontur tekanan. Hasil kuantitatif yang akan ditampilkan adalah nilai koefisien drag total, koefisien skin friction drag dan koefisien tekanan.

4.1 *Grid Independency Test*

Sebelum dilakukan analisa numerik terlebih dahulu dilakukan *grid independency test*, yaitu dengan cara membuat beberapa *meshing* dengan jumlah *cell* yang berbeda kemudian dilihat salah satu hasil perhitungannya.

Tabel 4. 1 Hasil *Grid Independency Test*

Nama <i>Mesh</i>	Jumlah <i>Cell</i>	Cd	<i>Error relative</i> (%)
A	3152270	0,3158	-
B	5210351	0,3143	0,447
C	6502183	0,3161	0,553
D	8340012	0,3187	0,815

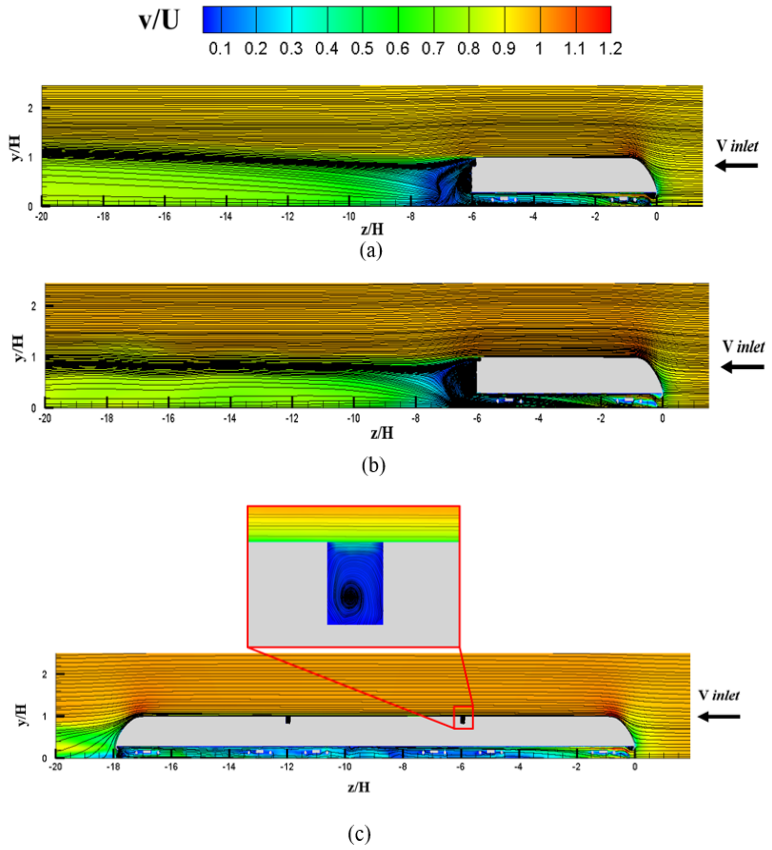
Berdasarkan tabel 4.1, dapat disimpulkan bahwa untuk pengujian numerik terhadap desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya menggunakan mesh dengan jumlah elemen 5.2 juta dikarenakan nilai error relatif sudah dibawah 5%.

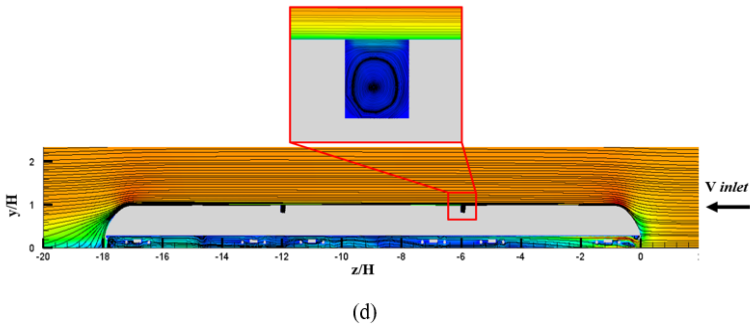
4.2 Hasil Simulasi Numerik Desain Kereta Semi Cepat Jakarta-Surabaya

Pada sub bab ini akan dijelaskan bagaimana kontur koefisien kecepatan dan kontur koefisien tekanan yang terbentuk pada desain kereta semi cepat untuk masing-masing variasi kecepatan serta pengaruh penambahan jumlah *cars* atau gerbong terhadap parameter-parameter tersebut. *Dimensionless* kecepatan merupakan perbandingan antara kecepatan pada domain terhadap kecepatan *freestream*. Koefisien tekanan merupakan nilai yang dapat digunakan untuk melihat seberapa besar penurunan tekanan yang terjadi. Dengan besarnya daerah dengan tekanan rendah dapat memberikan ilustrasi koefisien *drag* yang terjadi. Pada sub bab ini juga akan ditampilkan beberapa parameter aerodinamika desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya lainnya seperti kontur ketebalan *boundary layer*, nilai koefisien *drag* total dan koefisien *skin friction drag*, serta karakteristik struktur *vortex* yang terbentuk dibelakang desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya.

4.2.1 Kontur *Dimensionless* Kecepatan dan *Streamline* Kecepatan

Ditampilkannya kontur *dimensionless* kecepatan ini bertujuan untuk melihat perbedaan yang signifikan pengaruh penambahan jumlah *cars* atau gerbong terhadap distribusi kecepatan aliran fluida yang melalui desain kereta semi cepat. *Streamline* kecepatan menunjukkan arah pergerakan aliran fluida pada area yang ditinjau. Pada sub bab ini akan dibahas bagaimana nilai *dimensionless* kecepatan pada masing – masing variasi kecepatan (33.33 m/s dan 44.44 m/s) dan jumlah *car* atau gerbong pada konfigurasi desain kereta semi cepat (1 *car* dan 3 *cars*).





Gambar 4.1 Kontur dan *streamline* kecepatan pada bidang longitudinal (a) 1 car kecepatan 33.33 m/s, (b) 3 cars kecepatan 33.33 m/s, (c) 1 car kecepatan 44.44 m/s, dan (d) 3 cars kecepatan 44.44 m/s

Gambar 4.1 menunjukkan velocity contour dan *streamline* laluan udara pada daerah *midspan* desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya. Terihat bahwa udara yang mengalir dari *inlet* menuju *outlet* akan melewati *body* kereta dimana kecepatan udara mengalir relatif terhadap kereta yang diam. Aliran udara bertumbukan pada daerah *leading edge*, sehingga aliran udara mengalami perlambatan. Kecepatan aliran udara dari *freestream* mencapai kondisi terendah pada kondisi stagnasi yang ditandai dengan warna biru yang mendominasi pada area didepan *nose head car*.

Setelah aliran udara bertumbuk dengan *nose* kereta, selanjutnya aliran udara akan terdefleksi menuju permukaan atas (*upper side*) dan permukaan bawah (*underbody*) dari desain kereta semi cepat. Akibat adanya efek viskositas udara menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan *body* desain kereta semi cepat, sehingga menimbulkan *velocity gradient*.

Adanya velocity gradient menyebabkan aliran udara pada permukaan body desain kereta semi cepat sangat bervariasi. Pada

Gambar 4.1 juga ditunjukkan bahwa percepatan aliran terjadi pada bagian atas dan bagian bawah kereta, hal ini diakibatkan adanya titik stagnasi yang membuat udara mengalir melewati titik stagnasi dan aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan warna merah pada bagian atas dan juga pada bagian bawah *body* kereta. Percepatan yang terjadi pada bagian bawah desain kereta terjadi karena tumbukan antara aliran *freestream* dengan komponen *underbody* kereta seperti *cowcatcher* dan *fairing* bagian depan kereta. Namun seperti terlihat pada Gambar 4.1, pada bagian *underbody* kereta didominasi oleh warna biru yang menandakan bahwa setelah aliran fluida mengalami percepatan, berangsur-angsur kecepatan aliran udara berkurang akibat terhambat oleh banyaknya komponen pada daerah *underbody* kereta seperti roda kereta, *boogie*, dan adanya *boogie fairing* dibagian sisi samping *underbody* desain kereta semi cepat

Pada konfigurasi kereta 1 *car*, percepatan aliran udara juga terjadi pada bagian atas belakang bodi kereta dan juga terbentuk titik separasi pada bagian atas belakang kereta yang mengakibatkan terbentuknya daerah *wake* pada bagian belakang kereta. Daerah *wake* ini merupakan daerah dimana nilai dari kecepatan adalah 0 atau mendekati 0 yang dilambangkan dengan warna biru yang mendominasi bagian belakang kereta dengan luasan daerah yang semakin mengecil semakin menjauhnya dari *body* kereta. Pada konfigurasi kereta 1 *car*, *vortex* yang terbentuk dibelakang kereta disebabkan karena perubahan kontur *body* kereta yang ekstrim pada area *trailing edge* sehingga menyebabkan aliran udara tidak mampu mengikuti bentuk sehingga terlepas dan membentuk *vortex*. Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa besar kecepatan aliran *freestream* berpengaruh pada *wake* yang terbentuk dibelakang kereta. Untuk konfigurasi 1 *car*, terlihat bahwa pada kecepatan

freestream sebesar 44.44 m/s menghasilkan *wake* yang lebih intensif dengan luasan *wake* yang lebih lebih besar apabila dibandingkan dengan kecepatan *freestream* sebesar 33.33 m/s.

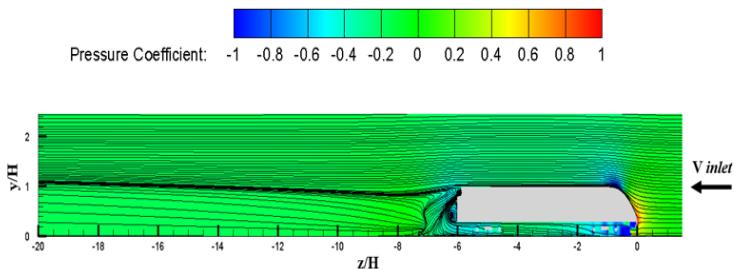
Pada konfigurasi 3 *cars* aliran udara juga mengalami percepatan pada pada area *trailing edge* yang ditunjukkan dengan warna merah dibagian atas belakang susunan kereta. Kontur geometri desain kereta dibagian akhir konfigurasi untuk 3 *cars* berbeda dengan kontur geometri dibagian akhir konfigurasi untuk 1 *car*. Perubahan kontur *body* kereta pada konfigurasi 3 *cars* tidak seekstrim pada 1 *cars* sehingga membuat aliran udara masih mampu mengikuti bentuk geometri hingga pada area *trailing edge*. Kondisi tersebut menyebabkan pada kecepatan aliran *freestream* yang sama, *wake* yang terbentuk pada konfigurasi 3 *cars* hanya terjadi di bawah *nose tail car* yang ditunjukkan dengan spektrum warna biru pada daerah tersebut. Sementara di bagian atas *nose tail car* cenderung didominasi oleh warna hijau yang menunjukkan bahwa pada daerah tersebut kecepatan aliran udara masih relatif tinggi. Artinya, *wake* yang terbentuk di daerah belakang susunan kereta pada konfigurasi 3 *cars* tidak sebesar dan seintensif *wake* yang terbentuk pada konfigurasi 1 *car* untuk kecepatan *freestream* yang sama. Adanya celah antar gerbong atau *inter-carriage gap* pada konfigurasi 3 *cars* menyebabkan adanya aliran udara yang terperangkap sehingga menimbulkan kecepatan udara mengalami perlambatan di daerah *gap* tersebut. Kondisi ini ditunjukkan dengan warna biru yang mendominasi pada area *gap* dimana apabila diamati *streamline* aliran udara pada daerah tersebut terjadi pusaran aliran udara berkecepatan rendah.

Dari Gambar 4.1 juga dapat diketahui bahwa pada daerah bagian badan kereta untuk setiap variasi memiliki warna kontur yang sama, yaitu berwarna orange. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan pada daerah tersebut stabil. Pada kontur *dimensionless* kecepatan dengan jumlah *car* yang sama memiliki kontur yang

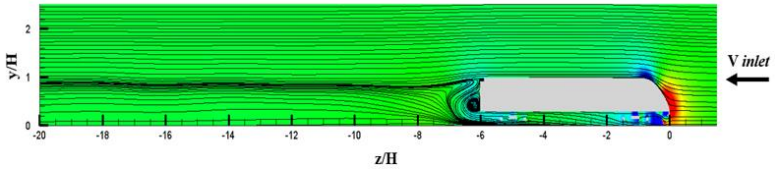
mirip meskipun kecepatannya berbeda. Ini menunjukkan bahwa untuk konfigurasi kereta yang sama, variasi kecepatan aliran udara tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap konturnya. Namun demikian, untuk kecepatan aliran udara yang sama, semakin bertambah banyak jumlah *car* pada konfigurasi kereta akan menyebabkan perbedaan kontur kecepatan dan bentuk *streamline* utamanya pada daerah dibelakang kereta. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kontur geometri masing-masing konfigurasi kereta.

4.2.2 Kontur Koefisien Tekanan

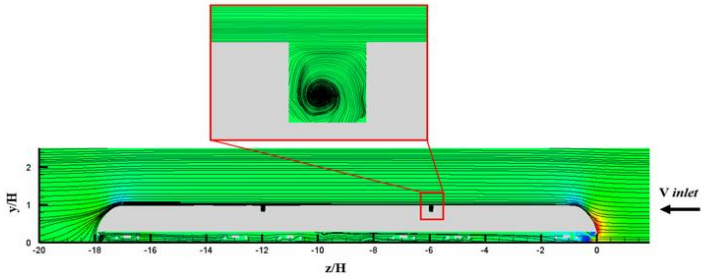
Perbandingan kontur tekanan pada variasi *Reynolds number* dan jumlah *car* pada susunan desain kereta semi cepat bertujuan untuk melihat bagaimana pengaruh dari besarnya *Reynolds number* dan jumlah *car* pada susunan desain kereta terhadap terbentuknya daerah bertekanan rendah, kenaikan tekanan, dan besarnya daerah *wake* dibagian belakang kereta. Perbandingan kontur koefisien tekanan ditampilkan pada Gambar 4.2 dibawah ini.



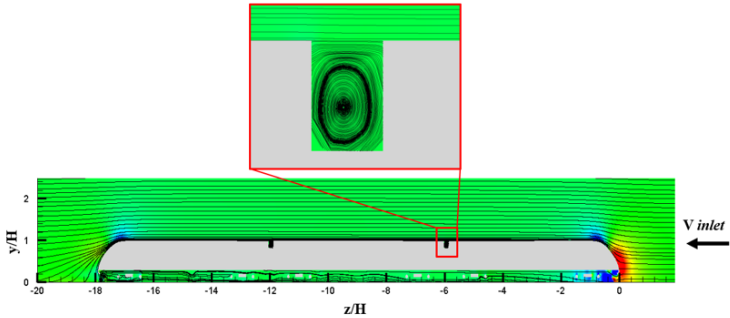
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.2 Kontur koefisien tekanan pada bidang longitudinal, (a) 1 car kecepatan 33.33 m/s, (b) 3 cars kecepatan 33.33 m/s, (c) 1 car kecepatan 44.44 m/s, dan (d) 3 cars kecepatan 44.44 m/s

Gambar 4.2 diatas menunjukkan bahwa pada konfigurasi desain kereta 1 *car* dengan kecepatan aliran udara sebesar 44.44 m/s, titik stagnasi terbentuk pada bagian paling depan dari *body* kereta yang dilambangkan dengan warna merah dengan nilai mendekati 1. Percepatan aliran yang terjadi pada bagian atas dan bagian bawah *nose head car* mengakibatkan turunnya nilai koefisien tekanan hingga nilai paling kecil yaitu -0.63 yang dilambangkan dengan daerah warna biru, setelah daerah tersebut nilai koefisien tekanan mengalami sedikit kenaikan yang dilambangkan dengan spektrum warna hijau di sepanjang badan kereta. Daerah disekitar *trailing edge* didominasi oleh spektrum warna biru muda yang menandakan bahwa mendekati titik separasi aliran udara mengalami sedikit penurunan tekanan.

Sementara untuk konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan aliran udara sebesar 33.33 m/s, titik stagnasi yang terbentuk pada bagian paling depan dari *body* kereta memiliki sedikit perbedaan spektrum warna dengan tekanan pada titik stagnasi konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s dimana daerah spektrum warna merah yang terbentuk pada konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s memiliki luasan yang lebih sempit. Hal ini menandakan bahwa dengan menurunnya kecepatan aliran udara yang melewati *body* kereta berpengaruh pula terhadap penurunan tekanan pada titik stagnasi desain kereta semi cepat.

Untuk konfigurasi desain kereta 1 *car* pada kecepatan aliran udara 33.33 m/s dan 44.44 m/s, area yang bertekanan rendah yang terletak pada bagian atas dan bagian belakang *cowcatcher* yang terjadi karena percepatan aliran, memiliki nilai dan area yang tidak berbeda jauh besarnya. Pada daerah bagian belakang kereta koefisien tekanan rendah terjadi kemudian naik sedikit yang ditandai dengan adanya daerah berwarna hijau. Daerah berwarna hijau memiliki daerah yang sedikit berbeda untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan udara 33.33 m/s dan konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan udara 44.44 m/s, dimana semakin kecil area berwarna

hijau menandakan akan semakin besar nilai koefisien *drag* yang terjadi.

Perubahan kontur geometri secara ekstrim pada *trailing edge* menimbulkan terbentuknya daerah bertekanan rendah pada daerah belakang kereta yang ditunjukkan dengan warna dominan biru pada area di belakang kereta. Daerah bertekanan rendah tersebut adalah daerah *wake*. Luasan daerah bertekanan rendah dibelakang kereta untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s sedikit lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s.

Pada konfigurasi desain kereta 3 *car* dengan kecepatan aliran udara sebesar 44.44 m/s, titik stagnasi terbentuk pada bagian paling depan dari *body* kereta yang dilambangkan dengan warna merah dengan nilai sebesar 0.98. Percepatan aliran yang terjadi pada bagian atas dan bagian bawah *nose head car* mengakibatkan turunnya nilai koefisien tekanan hingga nilai paling kecil yaitu -0.68 yang dilambangkan dengan daerah warna biru, setelah daerah tersebut nilai koefisien tekanan mengalami sedikit kenaikan yang dilambangkan dengan spektrum warna hijau di sepanjang badan kereta. Daerah disekitar *trailing edge* didominasi oleh spektrum warna biru muda yang menandakan bahwa mendekati titik separasi aliran udara mengalami sedikit penurunan tekanan. Sementara untuk konfigurasi kereta 3 *car* dengan kecepatan aliran udara sebesar 33.33 m/s, titik stagnasi yang terbentuk pada bagian paling depan dari *body* kereta memiliki sedikit perbedaan spektrum warna dengan tekanan pada titik stagnasi konfigurasi kereta 3 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s dimana daerah spektrum warna merah yang terbentuk pada konfigurasi 3 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s memiliki luasan yang lebih sempit. Hal ini menandakan bahwa dengan menurunnya kecepatan aliran udara yang melewati *body* kereta berpengaruh pula terhadap penurunan tekanan pada titik stagnasi desain kereta semi cepat.

Perubahan kontur *body* kereta pada konfigurasi 3 *cars* tidak seekstrim pada 1 *cars* sehingga menyebabkan daerah bertekanan rendah yang ditunjukkan oleh spektrum warna biru

pada konfigurasi 3 *cars* hanya terjadi pada beberapa area dimana daerah bertekanan rendah yang muncul tidak seluas daerah bertekanan rendah pada konfigurasi 1 *car* untuk kecepatan aliran udara yang sama, terutama pada daerah dibelakang susunan kereta, nampak jelas bahwa daerah bertekanan rendah (*wake*) yang terbentuk di daerah belakang susunan kereta pada konfigurasi 3 *cars* tidak sebesar dan seintensif *wake* yang terbentuk pada konfigurasi 1 *car* untuk kecepatan aliran udara yang sama. Adanya celah antar gerbong atau *inter-carriage gap* pada konfigurasi 3 *cars* menyebabkan adanya aliran udara yang terperangkap sehingga menimbulkan kecepatan udara mengalami perlambatan di daerah *gap* tersebut yang dapat menimbulkan fluktuasi nilai koefisien tekanan. Namun tampak pada Gambar 4.2 daerah *inter-carriage gap* didominasi oleh warna hijau atau warna pada daerah *gap* cenderung sama dengan warna kontur pada daerah badan kereta. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi nilai koefisien tekanan yang terjadi pada daerah *gap* masih berada dalam satu spektrum warna dengan daerah disekitar badan kereta.

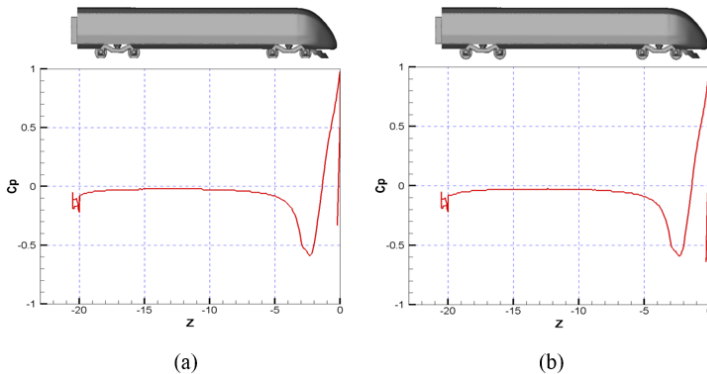
Dari Gambar 4.1 juga dapat diketahui bahwa pada daerah bagian badan kereta untuk setiap variasi memiliki warna kontur yang hampir sama, yaitu berwarna hijau. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien tekanan pada daerah tersebut stabil. Pada kontur koefisien dengan jumlah *car* yang sama memiliki kontur koefisien tekanan yang mirip meskipun kecepatan aliran udara berbeda. Ini menunjukkan bahwa untuk konfigurasi kereta yang sama, variasi kecepatan aliran udara tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap konturnya. Namun demikian, untuk kecepatan aliran udara yang sama, semakin bertambah banyak jumlah *car* pada konfigurasi kereta akan menyebabkan perbedaan kontur koefisien tekanan utamanya pada daerah dibelakang kereta. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kontur geometri masing-masing konfigurasi kereta.

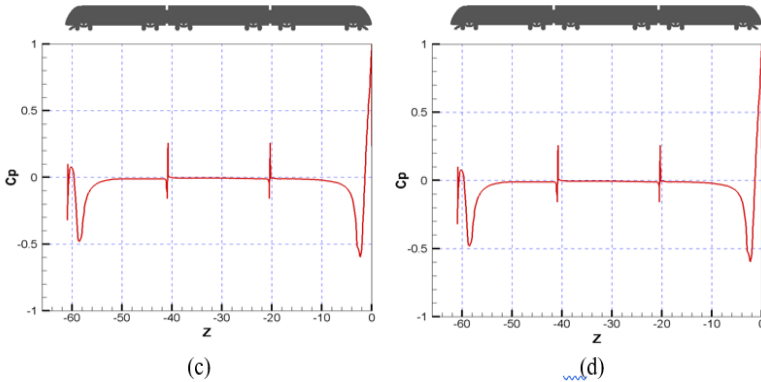
4.2.3 Grafik Distribusi Koefisien Tekanan (C_p)

Pada sub bab ini akan dilakukan analisa mengenai grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) pada permukaan atas (*upper side*) desain kereta semi cepat dan koefisien tekanan (C_p) pada permukaan samping desain kereta semi cepat untuk masing-masing variasi kecepatan aliran fluida.

4.2.3.1 Grafik Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Permukaan Atas (*Upper Side*) Desain Kereta Semi Cepat Jakarta - Surabaya

Grafik distribusi koefisien tekanan pada sepanjang permukaan atas desain kereta dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini.





Gambar 4.3 Grafik distribusi koefisien tekanan pada permukaan atas (*upper side*) desain kereta semi cepat, (a) 1 *car* kecepatan 33.33 m/s, (b) 1 *car* kecepatan 44.44 m/s, (c) 3 *cars* kecepatan 33.33 m/s, dan (d) 3 *cars* kecepatan 44.44 m/s

Gambar 4.3 (a) dan (b) menunjukkan bahwa nilai koefisien tekanan paling tinggi yaitu $C_p=1$ untuk konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan aliran udara sebesar 33.33 m/s dan kecepatan 44.44 m/s terletak pada bagian depan *nose head car*. Nilai koefisien tekanan semakin menurun pada daerah *leading edge* dimana aliran udara mengalami percepatan setelah melewati titik stagnasi. Untuk konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.56 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Sementara untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.59 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Nilai terendah atau *negative peak* C_p sebesar -0.56 dan -0.59 untuk masing-masing variasi kecepatan terletak pada daerah yang merupakan perbatasan antara *nose head car* dan bagian badan kereta ($z=-2.15$) dimana pada daerah tersebut

aliran udara mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum sebelum akhirnya memasuki daerah badan kereta. Memasuki daerah badan kereta, nilai C_p perlahan mengalami kenaikan seiring dengan berkurangnya kecepatan udara yang melewati daerah tersebut. Kenaikan nilai C_p pada daerah badan kereta mencapai nilai tertinggi sebesar -0.034 ($z = -10.5$) untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s dan sebesar -0.036 ($z = -10.5$) untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s. *Trendline* nilai C_p pada daerah badan kereta cenderung konstan sebesar -0.034 dan -0.036 akibat aliran udara mengalami kecepatan yang stabil pada daerah tersebut. Pada Gambar 4.3 (a) dan (b) terlihat bahwa pada daerah *inter carriage-gap* terjadi fluktuasi nilai C_p akibat udara mengalami perlambatan namun pada daerah tersebut juga masih mengalami pengaruh udara berkecepatan tinggi tepat di atas *gap* tersebut.

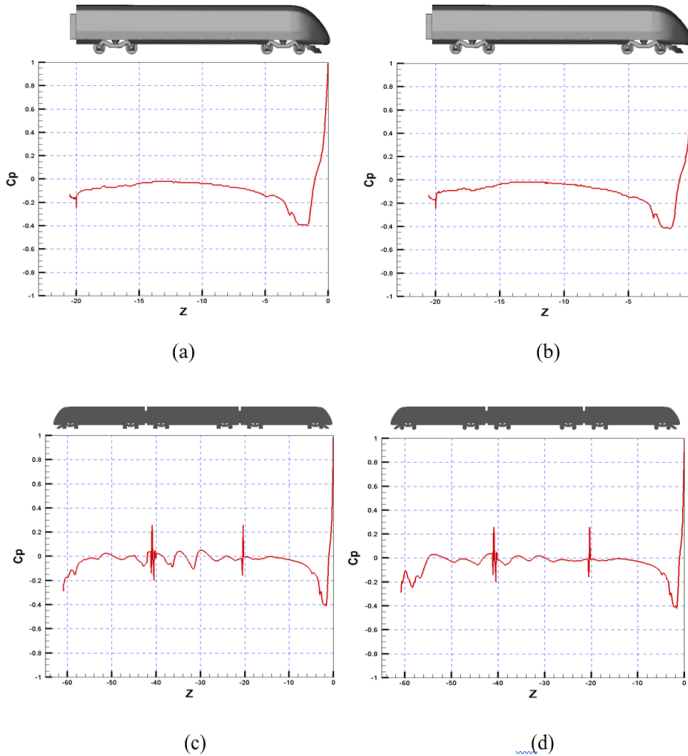
Gambar 4.3 (c) dan (d) menunjukkan bahwa nilai koefisien tekanan paling tinggi yaitu $C_p=1$ untuk konfigurasi kereta 3 *cars* dengan kecepatan aliran udara sebesar 33.33 m/s dan kecepatan 44.44 m/s terletak pada bagian depan *nose head car*. Nilai koefisien tekanan semakin menurun pada daerah *leading edge* dimana aliran udara mengalami percepatan setelah melewati titik stagnasi. Untuk konfigurasi kereta 3 *cars* dengan kecepatan 33.33 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.58 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Sementara untuk konfigurasi 3 *cars* dengan kecepatan 44.44 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.62 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Nilai terendah atau *negative peak* C_p sebesar -0.58 dan -0.62 terletak pada daerah yang merupakan perbatasan antara *nose head car* dan bagian badan kereta ($z = -2.15$) dimana pada daerah tersebut aliran udara mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum sebelum akhirnya memasuki daerah badan kereta. Memasuki daerah badan kereta,

nilai C_p perlahan mengalami kenaikan seiring dengan berkurangnya kecepatan udara yang melewati daerah tersebut. Kenaikan nilai C_p pada daerah badan kereta mencapai nilai tertinggi sebesar -0.036 ($z = -10.5$) untuk konfigurasi 3 *cars* dengan kecepatan 33.33 m/s dan sebesar -0.038 ($z = -10.5$) untuk konfigurasi 3 *cars* dengan kecepatan 44.44 m/s. *Trendline* nilai C_p pada permukaan atas *head car*, *middle car*, dan *tail car* cenderung konstan sebesar -0.036 dan -0.038 akibat aliran udara mengalami kecepatan yang stabil pada daerah tersebut. Pada Gambar 4.3 (c) terlihat bahwa pada daerah *inter carriage-gap* terjadi fluktuasi nilai C_p akibat udara mengalami perlambatan namun pada daerah tersebut juga masih mengalami pengaruh udara berkecepatan tinggi tepat di atas *gap* tersebut.

Secara keseluruhan, variasi kecepatan aliran udara yang melewati desain kereta dengan konfigurasi yang sama berpengaruh pada besarnya *negative peak* C_p pada masing-masing variasi kecepatan. Dimana untuk kecepatan yang semakin tinggi menyebabkan *negative peak* C_p semakin rendah. Variasi kecepatan juga mempengaruhi tingkat nilai C_p pada daerah badan kereta dimana pada daerah tersebut nilai C_p cenderung konstan hingga mendekati daerah *inter-carriage gap* kereta. Semakin tinggi kecepatan aliran udara yang melewati desain kereta, menyebabkan sedikit menurunnya nilai C_p pada daerah badan kereta tersebut. Sementara itu, penambahan jumlah *car* pada kecepatan aliran udara yang sama memiliki sedikit pengaruh pada nilai C_p di bagian *head car* dan *middle car*, namun berpengaruh besar terhadap nilai C_p di bagian *tail car*. *Negative peak* C_p yang terbentuk di daerah *nose tail car* semakin rendah untuk konfigurasi kereta yang lebih panjang. Hal ini diakibatkan karena adanya peningkatan energi disipasi pada daerah *boundary layer* yang disebabkan adanya *inter-carriage gap*.

4.2.3.2 Grafik Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Permukaan Samping Desain Kereta Semi Cepat Jakarta - Surabaya

Grafik distribusi koefisien tekanan pada sepanjang permukaan atas desain kereta dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Grafik distribusi koefisien tekanan pada permukaan samping desain kereta semi cepat pada ketinggian 0.3 H dari ground (a) 1 car kecepatan 33.33 m/s, (b) 1 car kecepatan 44.44 m/s, (c) 3 cars kecepatan 33.33 m/s, dan (d) 3 cars kecepatan 44.44 m/s

Gambar 4.4 (a) dan (b) menunjukkan bahwa nilai koefisien tekanan paling tinggi yaitu $C_p=1$ untuk konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan aliran udara sebesar 33.33 m/s dan kecepatan 44.44 m/s terletak pada bagian depan *nose head car*. Nilai koefisien tekanan semakin menurun pada daerah *leading edge* dimana aliran udara mengalami percepatan setelah melewati titik stagnasi. Untuk konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.39 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Sementara untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.41 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Nilai terendah atau *negative peak* C_p sebesar -0.39 dan -0.41 untuk masing-masing variasi kecepatan terletak pada daerah yang merupakan perbatasan antara *nose head car* dan bagian badan kereta ($z=-1.82$) dimana pada daerah tersebut aliran udara mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum sebelum akhirnya memasuki daerah badan kereta. Memasuki daerah badan kereta, nilai C_p perlahan mengalami kenaikan yang disertai dengan sedikit fluktuasi pada $z=2.94$. Kenaikan nilai C_p pada daerah badan kereta mencapai nilai tertinggi sebesar -0.042 ($z=-12.5$) untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s dan sebesar -0.044 ($z=-12.5$) untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s. *Trendline* nilai C_p pada daerah badan kereta cenderung konstan sebesar -0.042 dan -0.044 akibat aliran udara mengalami kecepatan yang stabil pada daerah tersebut. Pada Gambar 4.3 (a) dan (b) terlihat bahwa pada daerah *inter carriage-gap* terjadi fluktuasi nilai C_p akibat udara mengalami perlambatan namun pada daerah tersebut juga masih mengalami pengaruh udara berkecepatan tinggi tepat diatas *gap* tersebut.

Gambar 4.4 (c) dan (d) menunjukkan bahwa nilai koefisien tekanan paling tinggi yaitu $C_p=1$ untuk konfigurasi kereta 1 *car*

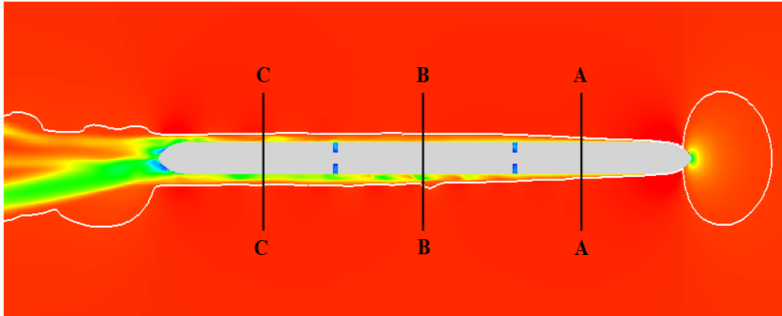
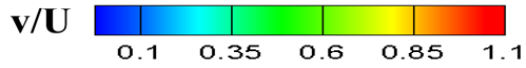
dengan kecepatan aliran udara sebesar 33.33 m/s dan kecepatan 44.44 m/s terletak pada bagian depan *nose head car*. Nilai koefisien tekanan semakin menurun pada daerah *leading edge* dimana aliran udara mengalami percepatan setelah melewati titik stagnasi. Untuk konfigurasi kereta 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.42 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Sementara untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s, penurunan nilai koefisien tekanan pada daerah *leading edge* dimulai dari nilai satu menjadi -0.44 yang merupakan nilai terendah koefisien tekanan. Nilai terendah atau *negative peak* C_p sebesar -0.42 dan -0.44 untuk masing-masing variasi kecepatan terletak pada daerah yang merupakan perbatasan antara *nose head car* dan bagian badan kereta ($z = -1.82$) dimana pada daerah tersebut aliran udara mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum sebelum akhirnya memasuki daerah badan kereta. Memasuki daerah badan kereta, nilai C_p perlahan mengalami kenaikan yang disertai dengan sedikit fluktuasi pada $z = 4.20$. Kenaikan nilai C_p pada daerah badan kereta mencapai nilai tertinggi sebesar -0.018 ($z = -13.8$) untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 33.33 m/s dan sebesar -0.022 ($z = -13.8$) untuk konfigurasi 1 *car* dengan kecepatan 44.44 m/s. *Trendline* nilai C_p pada daerah badan kereta cenderung konstan sebesar -0.018 dan -0.022 akibat aliran udara mengalami kecepatan yang stabil pada daerah tersebut. Pada Gambar 4.3 (c) dan (d) terlihat bahwa pada daerah *middle car* dan *tail car* terjadi fluktuasi nilai C_p akibat kecepatan aliran udara yang cenderung tidak stabil setelah melewati *inter-carriage gap* dimana fluktuasi semakin besar pada daerah *tail car*. Pada daerah *inter carriage-gap* juga terjadi fluktuasi nilai C_p akibat udara mengalami perlambatan namun pada daerah tersebut juga masih mengalami pengaruh udara berkecepatan tinggi tepat di atas *gap* tersebut.

Secara keseluruhan, variasi kecepatan aliran udara yang melewati desain kereta dengan konfigurasi yang sama berpengaruh pada besarnya *negative peak* C_p pada masing-masing variasi kecepatan. Dimana untuk kecepatan yang semakin tinggi menyebabkan *negative peak* C_p semakin rendah. Variasi kecepatan juga mempengaruhi tingkat nilai C_p pada daerah *middle car* dan *tail car* dimana pada daerah tersebut nilai C_p cenderung mengalami fluktuasi. Semakin tinggi kecepatan aliran udara yang melewati desain kereta, menyebabkan sedikit menurunnya nilai C_p pada daerah tersebut. Sementara itu, penambahan jumlah *car* pada kecepatan aliran udara yang sama memiliki sedikit pengaruh pada nilai C_p di bagian *head car* dan *middle car*, namun berpengaruh besar terhadap nilai C_p di bagian *tail car*. *Negative peak* C_p yang terbentuk di daerah *nose tail car* semakin rendah untuk konfigurasi kereta yang lebih panjang. *Trendline* yang ditunjukkan memang mirip dengan C_p *upper side* kereta karena kembangan *boundary layer* dominan pada kedua daerah tersebut yaitu sisi atas dan sisi samping kereta.

4.2.4 *Boundary Layer Thickness*

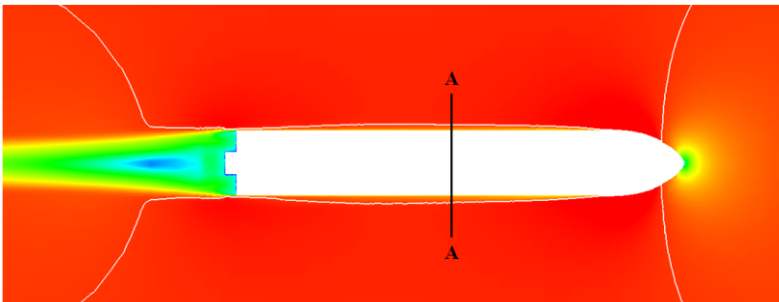
Pada sub bahasan ini, akan ditampilkannya kontur nilai *dimensionless* kecepatan pada arah transversal (bidang XY) dan bidang XZ yang bertujuan untuk melihat perbedaan yang signifikan pengaruh penambahan jumlah *cars* atau gerbong terhadap kontur ketebalan *boundary layer* yang terbentuk disekitar *body* desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya. Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 dibawah ini menampilkan kontur ketebalan *boundary layer* dengan nilai 99 % kecepatan *inlet* untuk masing-masing variasi simulasi.

4.2.4.1 Kontur Ketebalan *Boundary Layer* pada Kecepatan Aliran Udara Sebesar 33.33 m/s ($Re_H = 7.06 \times 10^6$)



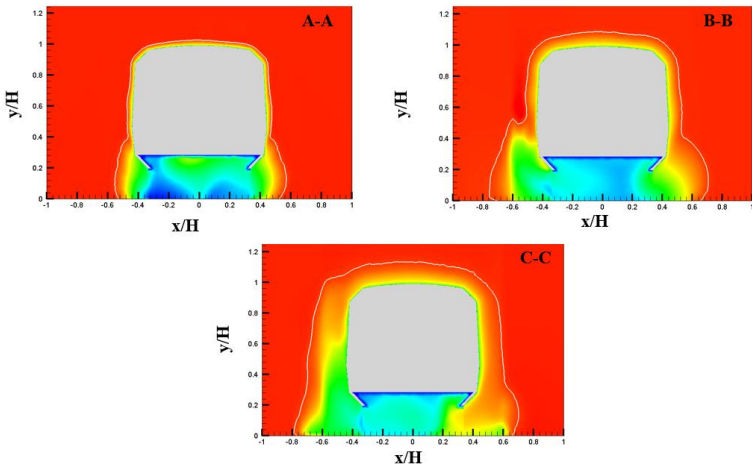
C-C	B-B	A-A
$z/H = 15.14$	$z/H = 9.11$	$z/H = 3.08$

(a)

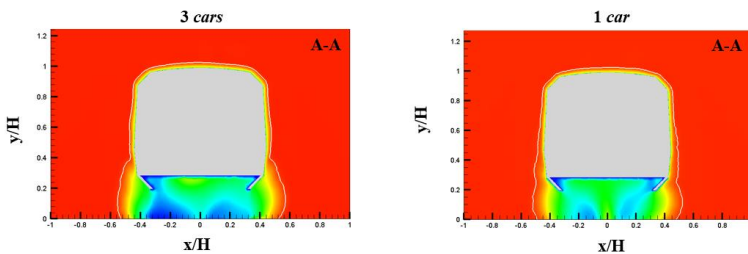


A-A
$z/H = 3.08$

(b)



(c)



(d)

Gambar 4.5 Kontur *boundary layer* di sekitar kereta (a) Ketebalan *boundary layer* pada bidang XZ berjarak $0.3H$ dari *ground* untuk konfigurasi 3 cars, (b) Ketebalan *boundary layer* pada bidang XZ berjarak $0.3H$ dari *ground* untuk konfigurasi 1 car, (c) Ketebalan *boundary layer* pada *mid plane* tiap car untuk konfigurasi 3 cars, (d) Perbandingan ketebalan *boundary layer* pada jarak $3.08 H$ dari *nose head car*

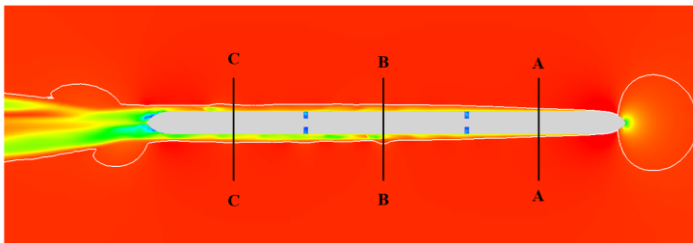
Gambar 4.5 (a) dan (b) menunjukkan ketebalan *boundary layer* dengan nilai 99% kecepatan *inlet* pada bidang horizontal (bidang XZ) yang berjarak $0.3H$ dari *ground* agar menangkap titik stagnasi yang terjadi di depan *nose head car* untuk konfigurasi 3 *cars* dan 1 *car*. Terlihat bahwa ketebalan *boundary layer* mengalami fluktuasi yang relatif kecil saat mendekati daerah *wake*, tetapi tidak mempengaruhi kembangan *boundary layer* secara keseluruhan. Pada Gambar 4.5 (a), dapat terlihat bahwa ketebalan *boundary layer* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *car*.

Gambar 4.6 (c) menunjukkan bahwa *boundary layer* yang terbentuk pada *mid plane tail car* memiliki ketebalan yang lebih besar dibanding dengan ketebalan *boundary layer* pada *mid plane head car* dan *middle car*. Tampak bahwa ketebalan *boundary layer* sensitif terhadap jarak tertentu di atas *ground*. Ketebalan *boundary layer* pada daerah *underbody* kereta ($y/H=0.2$) lebih besar daripada ketebalan *boundary layer* pada daerah *body* kereta ($y/H=0.6$). Perbedaan tersebut diakibatkan karena aliran udara melewati *cowcatcher* kereta yang terletak di bawah *nose*. Pada Gambar 4.5 (c) juga terlihat bahwa tingkat kembangan *boundary layer* pada bagian atas kereta lebih cepat dibandingkan pada bagian samping kereta. Hal tersebut terjadi karena aliran udara yang melewati *nose head car* menyimpang (*divergen*) dari sisi samping kereta dan terkonsentrasi (*konvergen*) di bagian atas permukaan *body* kereta.

Gambar 4.6 (d) menampilkan perbandingan langsung antara ketebalan *boundary layer* pada bidang vertikal berjarak $3.08 H$ dari *nose head car* untuk konfigurasi kereta 3 *cars* dan 1 *car*. Dari gambar tersebut diketahui bahwa *boundary layer* pada jarak $3.08 H$ dari *nose head car* untuk konfigurasi 3 *cars* memiliki ketebalan yang serupa dengan *boundary layer* pada jarak yang sama untuk konfigurasi 1 *car*. Artinya, penambahan jumlah *car* pada level *Reynolds number* yang sama akan menyebabkan perubahan ketebalan *boundary layer* sensitif terhadap jarak yang diukur dari *nose head car* dimana untuk jarak yang sama akan

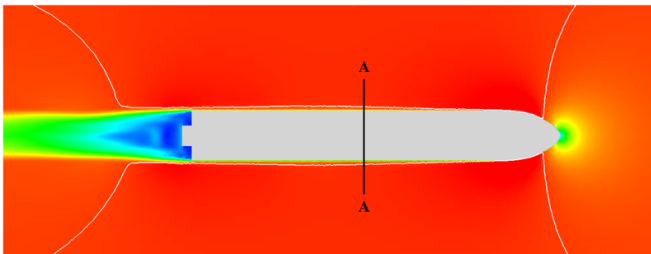
memiliki ketebalan *boundary layer* yang mendekati sama atau serupa.

4.2.4.2 Kontur Ketebalan *Boundary Layer* pada Kecepatan Aliran Udara Sebesar 44.44 m/s ($Re_H = 10.07 \times 10^6$)



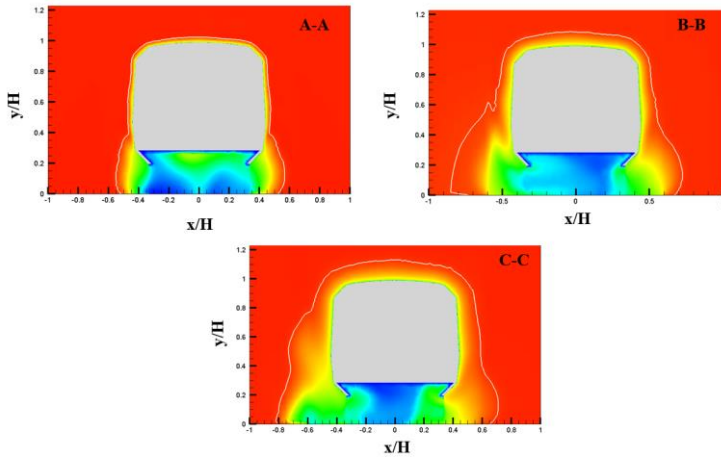
C-C	B-B	A-A
$z/H = 15.14$	$z/H = 9.11$	$z/H = 3.08$

(a)

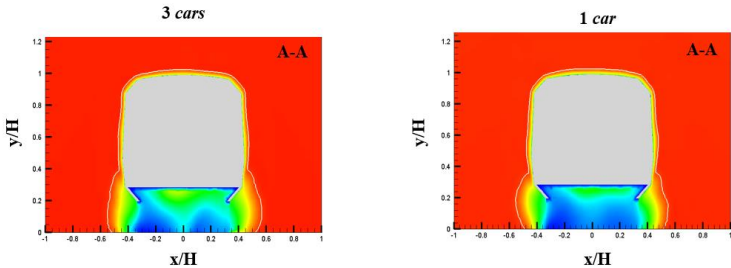


A-A
$z/H = 3.08$

(b)



(c)



(d)

Gambar 4.6 Kontur *boundary layer* di sekitar kereta (a) Ketebalan *boundary layer* pada bidang XZ berjarak $0.3H$ dari *ground* untuk konfigurasi 3 cars, (b) Ketebalan *boundary layer* pada bidang XZ berjarak $0.3H$ dari *ground* untuk konfigurasi 1 car, (c) Ketebalan *boundary layer* pada *mid plane* tiap car untuk konfigurasi 3 cars, (d) Perbandingan ketebalan *boundary layer* pada jarak $3.08 H$ dari *nose head car*

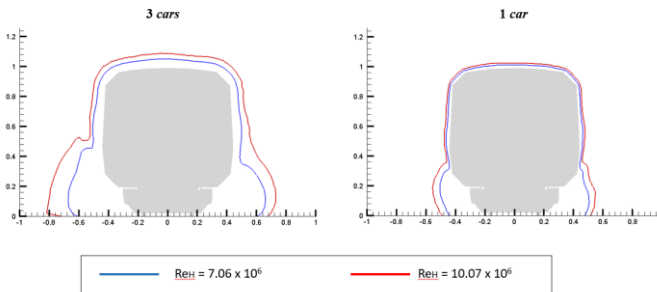
Gambar 4.5 (a) dan (b) menunjukkan ketebalan *boundary layer* dengan nilai 99% kecepatan *inlet* pada bidang horizontal (bidang XZ) yang berjarak $0.3H$ dari *ground* agar menangkap titik stagnasi yang terjadi di depan *nose head car* untuk konfigurasi 3 *cars* dan 1 *car*. Terlihat bahwa ketebalan *boundary layer* mengalami fluktuasi yang relatif kecil saat mendekati daerah *wake*, tetapi tidak mempengaruhi kembangan *boundary layer* secara keseluruhan. Pada Gambar 4.5 (a), dapat terlihat bahwa ketebalan *boundary layer* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *car*.

Gambar 4.6 (c) menunjukkan bahwa *boundary layer* yang terbentuk pada *mid plane tail car* memiliki ketebalan yang lebih besar dibanding dengan ketebalan *boundary layer* pada *mid plane head car* dan *middle car*. Tampak bahwa ketebalan *boundary layer* sensitif terhadap jarak tertentu di atas *ground*. Ketebalan *boundary layer* pada daerah *underbody* kereta ($y/H=0.2$) lebih besar daripada ketebalan *boundary layer* pada daerah *body* kereta ($y/H=0.6$). Perbedaan tersebut diakibatkan karena aliran udara melewati *cowcatcher* kereta yang terletak di bawah *nose*. Pada Gambar 4.5 (c) juga terlihat bahwa tingkat kembangan *boundary layer* pada bagian atas kereta lebih cepat dibandingkan pada bagian samping kereta. Hal tersebut terjadi karena aliran udara yang melewati *nose head car* menyimpang (*divergen*) dari sisi samping kereta dan terkonsentrasi (*konvergen*) di bagian atas permukaan *body* kereta.

Gambar 4.6 (d) menampilkan perbandingan langsung antara ketebalan *boundary layer* pada bidang vertikal berjarak $3.08 H$ dari *nose head car* untuk konfigurasi kereta 3 *cars* dan 1 *car*. Dari gambar tersebut diketahui bahwa *boundary layer* pada jarak $3.08 H$ dari *nose head car* untuk konfigurasi 3 *cars* memiliki ketebalan yang serupa dengan *boundary layer* pada jarak yang sama untuk konfigurasi 1 *car*. Artinya, penambahan jumlah *car* pada level *Reynolds number* yang sama akan menyebabkan perubahan ketebalan *boundary layer* sensitif terhadap jarak yang diukur dari *nose head car* dimana untuk jarak yang sama akan

memiliki ketebalan *boundary layer* yang mendekati sama atau serupa.

Dari kedua pembahasan ketebalan *boundary layer* pada masing-masing variasi *Reynolds number*, tampak bahwa terdapat pengaruh kecepatan aliran udara terhadap ketebalan *boundary layer* yang tidak terlalu signifikan pada masing-masing konfigurasi kereta. Garis ketebalan *boundary layer* yang ditunjukkan dengan garis berwarna putih disekitar kereta mengalami perubahan mengikuti adanya variasi *Reynolds number*. Terlihat jelas bahwa ketebalan *boundary layer* pada daerah yang semakin mendekati area *wake* semakin besar seiring dengan penambahan jumlah *car*. Pengaruh variasi *Reynolds number* terhadap ketebalan *boundary layer* ditunjukkan pada gambar 4.7 dibawah ini untuk mendukung penjelasan pada kedua pembahasan diatas.

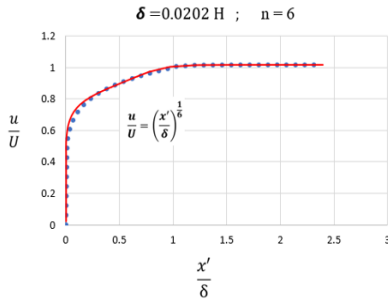


Gambar 4.7 Pengaruh variasi *Reynolds number* terhadap ketebalan *boundary layer* pada masing-masing *mid plane* konfigurasi kereta

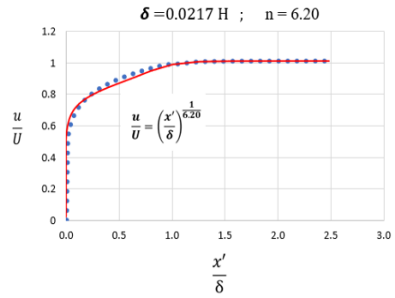
4.2.5 Analisa *Momentum Thickness* (θ)

Pada sub bahasan ini akan ditampilkan pembahasan tentang pengaruh penambahan jumlah *cars* dan variasi *Reynolds number* terhadap *momentum thickness* pada *head car*, *middle car*,

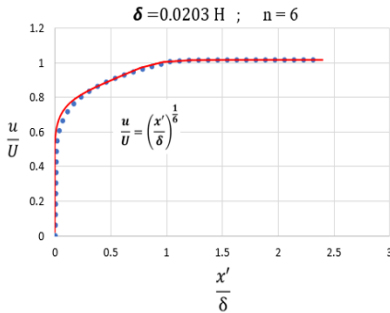
dan *tail car* untuk masing-masing konfigurasi desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya baik 1 *car* maupun 3 *cars*. Pada Gambar 4.8 dibawah ini ditampilkan *boundary layer velocity profile* untuk masing-masing konfigurasi kereta pada masing-masing variasi *Reynolds number*.



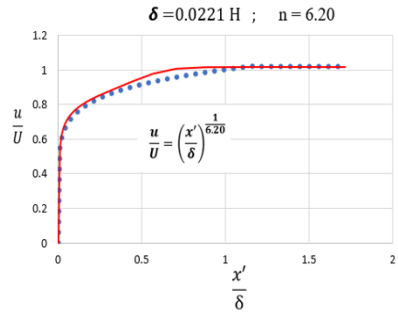
(a)



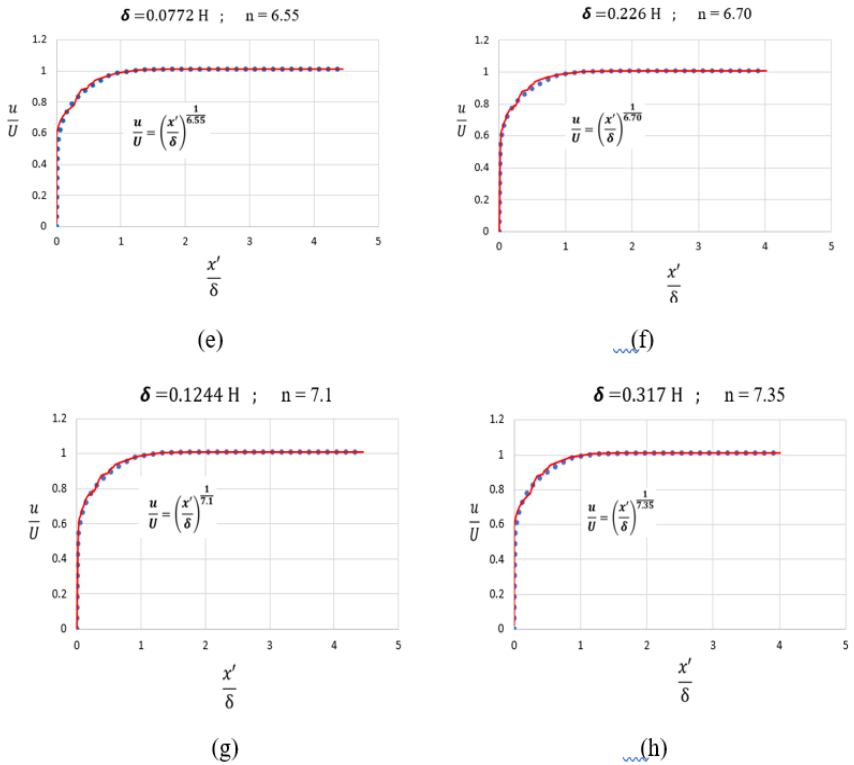
(b)



(c)



(d)



Gambar 4.8 Grafik *boundary layer velocity profile* pada *mid plane* masing-masing *car*, (a) 1 *car* kecepatan 33.33 m/s, (b) 1 *car* kecepatan 44.44 m/s, (c) *head car* kecepatan 33.33 m/s, (d) *head car* kecepatan 44.44 m/s, (e) *middle car* kecepatan 33.33 m/s, (f) *middle car* kecepatan 44.44 m/s, (g) *tail car* kecepatan 33.33 m/s, dan (h) *tail car* kecepatan 44.44 m/s

Nilai n pada masing-masing grafik diperoleh dengan melakukan *plot velocity magnitude* pada sebuah garis yang dibuat pada *mid plane* masing-masing *car* dengan ketinggian $0.5H$ dari *ground* untuk kedua level *Reynolds number*. Dari distribusi kecepatan yang

diperoleh, diambil nilai *boundary layer thicknes* (δ) pada titik yang memiliki nilai 99 persen kecepatan *freestream* (U). Selanjutnya nilai *boundary layer thickness* yang diperoleh tersebut diolah untuk mendapatkan nilai n dengan melakukan pendekatan secara *trial and error* sehingga hasil yang diperoleh dari pendekatan tersebut memiliki kesesuaian dengan *power law* untuk *turbulent boundary layer*. Proses pendekatan yang dilakukan untuk memperoleh nilai n mengacu pada persamaan *power law velocity profile* dengan mengasumsikan *zero pressure gradient (flat plate)* sebagai berikut :

$$\frac{v}{U} = \left(\frac{x}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (x < \delta)$$

Sehingga, *momentum thickness* (θ) dan *shape factor* (H) dapat diperoleh mengikuti perumusan sebagai berikut :

$$\theta = \frac{n}{(n+1)(n+2)} \delta$$

$$H = \frac{n+2}{n}$$

Nilai *boundary layer thickness* dan *momentum thickness* pada tiap-tiap car untuk masing-masing variasi Reynolds number ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut ini :

Tabel 4.2 Nilai *boundary layer thickness* (δ) dan *momentum thickness* (θ) dalam satuan meter

<i>Reynolds number</i>	Konfigurasi	Head		Middle		Tail	
		δ	θ	δ	θ	δ	θ
7.06×10^6	1 car	0.068	0.0073	-	-	-	-
	3 cars	0.069	0.0074	0.262	0.0266	0.423	0.0407
10.07×10^6	1 car	0.073	0.0077	-	-	-	-
	3 cars	0.076	0.0080	0.270	0.0270	0.547	0.0514

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa variasi *Reynolds number* menyebabkan perubahan terhadap nilai *boundary layer thickness* dan *momentum thickness*. Dimana dengan semakin bertambahnya level *Reynolds number* yang menandakan semakin meningkatnya kecepatan aliran udara, menyebabkan semakin bertambah pula ketebalan *boundary layer* dan ketebalan momentum pada suatu titik pengukuran yang sama. Terlihat bahwa kenaikan ketebalan *boundary layer* akibat peningkatan *Reynolds number* adalah sebesar 5.1% pada konfigurasi 1 car, sementara untuk konfigurasi 3 cars sebesar 5% pada *head car*, 4.8% pada *middle car*, dan 9.8% pada *tail car*. Kenaikan ketebalan momentum akibat pengaruh variasi *Reynolds number* adalah sebesar 0.43% untuk konfigurasi 1 car, sementara untuk konfigurasi 3 cars sebesar 0.42% pada *head car*, 0.35% pada *middle car*, dan sebesar 0.59% pada *tail car*.

Pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap ketebalan *boundary layer* dan ketebalan momentum dapat diamati pada konfigurasi kereta 3 cars, dimana untuk posisi yang semakin menjauhi *nose head car*, ketebalan *boundary layer* maupun ketebalan momentum mengalami kenaikan. Perbedaan terbesar nilai *boundary layer thickness* dan *momentum thickness* pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 85.7 % dan 7.35% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 90.5% dan 7.52% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.

4.2.6 Analisa Koefisien *Drag Total* (C_D) dan *Skin Friction Drag* ($C_{D\tau}$)

Koefisien *drag* merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besarnya hambatan aerodinamis yang terjadi pada permukaan benda akibat tekanan dan gesekan *viscous*. Berikut ini tabel 4.1 menampilkan nilai koefisien *drag* total pada masing-masing *car* untuk semua variasi kecepatan.

Tabel 4.3 Nilai C_D akibat *pressure* dan *friction* untuk masing-masing variasi simulasi

<i>Reynolds Number</i>	C_D	<i>Head</i>	<i>Middle</i>	<i>Tail</i>
7.06×10^6	1 car	0.323	-	-
	3 cars	0.177	0.130	0.194
10.07×10^6	1 car	0.316	-	-
	3 cars	0.173	0.127	0.190

<i>Reynolds number</i>	Konf.	Head		Middle		Tail		C_D total
		C_{Dp}	$C_{D\tau}$	C_{Dp}	$C_{D\tau}$	C_{Dp}	$C_{D\tau}$	
7.06×10^6	1 car	0.216	0.107	-	-	-	-	0.323
	3 cars	0.118	0.059	0.078	0.052	0.162	0.032	0.512
10.07×10^6	1 car	0.216	0.100	-	-	-	-	0.316
	3 cars	0.110	0.063	0.072	0.055	0.166	0.024	0.490

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pengaruh variasi kecepatan dan pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap nilai koefisien *drag* (C_D) untuk konfigurasi kereta 1 *car* dan 3 *cars*. Pada *Reynolds number* 7.06×10^6 , untuk konfigurasi kereta 1 *car* memiliki C_D sebesar 0.323 sedangkan untuk konfigurasi 3 *cars* memiliki nilai C_D sebesar 0.177 pada *head car*, 0.130 pada *middle car*, dan 0.194 pada *tail car*. Pada *Reynolds number* 10.07×10^6 , untuk konfigurasi

kereta 1 *car* memiliki C_D sebesar 0.316 sedangkan untuk konfigurasi 3 *cars* memiliki nilai C_D sebesar 0.173 pada *head car*, 0.127 pada *middle car*, dan 0.190 pada *tail car*.

Pengaruh kecepatan aliran udara yang selanjutnya berpengaruh pada *Reynolds number* membuat nilai C_D untuk konfigurasi 1 *car* mengalami perbedaan sebesar 0.7%, sedangkan untuk konfigurasi 3 *cars* mengalami perbedaan sebesar 0.8% pada *head car*, 0.30% pada *middle car*, dan 0.4% pada *tail car*. Pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap nilai C_D akibat *pressure* dan *viscous* dapat diamati pada konfigurasi kereta 3 *cars*. Perbedaan tersebar nilai C_D akibat *pressure* dan *viscous* pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 1.7% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 1.7% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.

Skin friction drag merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besarnya hambatan aerodinamis yang terjadi pada permukaan benda akibat gesekan *viscous*. Pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pengaruh variasi kecepatan dan pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap nilai *skin friction drag* ($C_{D\tau}$) untuk konfigurasi kereta 1 *car* dan 3 *cars*. Pada *Reynolds number* 7.06×10^6 , untuk konfigurasi kereta 1 *car* memiliki $C_{D\tau}$ sebesar 0.107 sedangkan untuk konfigurasi 3 *cars* memiliki nilai $C_{D\tau}$ sebesar 0.059 pada *head car*, 0.052 pada *middle car*, dan 0.032 pada *tail car*. Pada *Reynolds number* 10.07×10^6 , untuk konfigurasi kereta 1 *car* memiliki $C_{D\tau}$ sebesar 0.100 sedangkan untuk konfigurasi 3 *cars* memiliki nilai $C_{D\tau}$ sebesar 0.063 pada *head car*, 0.055 pada *middle car*, dan 0.024 pada *tail car*.

Pengaruh kecepatan aliran udara yang selanjutnya berpengaruh pada *Reynolds number* membuat nilai $C_{D\tau}$ untuk konfigurasi 1 *car* mengalami perbedaan sebesar 0.7%, sedangkan untuk konfigurasi 3 *cars* mengalami perbedaan sebesar 0.4% pada *head car*, 0.30% pada *middle car*, dan 0.8% pada *tail car*. Pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap nilai $C_{D\tau}$ dapat diamati pada konfigurasi kereta 3 *cars*. Perbedaan tersebar nilai $C_{D\tau}$ pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 2.7% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 3.6% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Analisa numerik pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap performansi aerodinamika desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya dengan variasi kecepatan kereta sebesar 33.33 m/s dan 44.44 m/s, serta variasi jumlah *car* atau gerbong pada konfigurasi desain kereta semi cepat yang digunakan yaitu 1 car dan 3 cars menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Kecepatan aliran udara yang lebih tinggi menghasilkan daerah *wake* yang lebih luas dan lebih intensif di belakang susunan kereta. Adanya celah atau *gap* antar gerbong menyebabkan fluktuasi pada nilai koefisien tekanan pada *upper side* dan koefisien tekanan sisi samping kereta.
2. Variasi kecepatan berpengaruh terhadap *negative peak* C_p *upper side* dan *negative peak* C_p di sisi samping kereta. Kecepatan aliran udara yang semakin tinggi menyebabkan *negative peak* C_p *upper side* dan sisi samping semakin rendah.
3. Variasi kecepatan aliran udara yang melalui *inlet* berpengaruh terhadap nilai *boundary layer thickness*, *momentum thickness*, nilai koefisien *drag* (C_D), dan nilai *skin friction drag* (C_{Df}) pada masing-masing *car* didalam susunan desain kereta semi cepat.
 - a. Kenaikan ketebalan *boundary layer* akibat variasi *Reynolds number* adalah sebesar 5.1% pada konfigurasi 1 car, sementara untuk konfigurasi 3 cars sebesar 5% pada *head car*, 4.8% pada *middle car*, dan 9.8% pada *tail car*.

- b. Kenaikan ketebalan momentum akibat variasi *Reynolds number* adalah sebesar 0.43% untuk konfigurasi 1 car, sementara untuk konfigurasi 3 cars sebesar 0.42% pada *head car*, 0.35% pada *middle car*, dan sebesar 0.59% pada *tail car*.
 - c. Perbedaan nilai koefisien *drag* (C_D) akibat variasi *Reynolds number* adalah sebesar 0.7% untuk konfigurasi 1 car, sedangkan untuk konfigurasi 3 cars mengalami perbedaan sebesar 0.8% pada *head car*, 0.30% pada *middle car*, dan 0.4% pada *tail car*.
 - d. Perbedaan nilai *skin friction drag* ($C_{D\tau}$) akibat variasi *Reynolds number* adalah sebesar 0.7% untuk konfigurasi 1 car, sedangkan untuk konfigurasi 3 cars mengalami perbedaan sebesar 0.4% pada *head car*, 0.30% pada *middle car*, dan 0.8% pada *tail car*.
4. Variasi penambahan jumlah car atau gerbong pada susunan konfigurasi desain kereta semi cepat berpengaruh terhadap nilai *boundary layer thickness*, *momentum thickness*, nilai koefisien drag (C_D), dan nilai *skin friction drag* ($C_{D\tau}$) pada masing-masing car didalam susunan desain kereta semi cepat.
- a. Perbedaan terbesar nilai *boundary layer thickness* pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 85.7 % untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 90.5% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.
 - b. Perbedaan terbesar nilai *momentum thickness* pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 7.35% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 7.52% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.
 - c. Perbedaan terbesar nilai koefisien *drag* (C_D) total pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 1.7% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 1.7% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.

- d. Perbedaan tersebar nilai *skin friction drag* (C_{Df}) pada *head car* dan *tail car* adalah sebesar 2.7% untuk $Re_H = 7.06 \times 10^6$ serta sebesar 3.6% untuk $Re_H = 10.07 \times 10^6$.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran atau rekomendasi yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Diperlukan adanya penelitian berbasis eksperimen untuk proses validasi hasil simulasi numerik
2. Diperlukan analisa numerik lebih lanjut dengan menggunakan metode *dynamic mesh* dan *transient simulation* untuk lebih menangkap fenomena turbulen disekitar desain kereta semi cepat.
3. Diperlukan variasi penambahan jumlah *car* yang lebih banyak untuk mendapatkan perbandingan yang lebih jelas terkait pengaruh penambahan jumlah *car* terhadap parameter-parameter aerodinamika desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya.
4. Mempercepat proses pembuatan geometri desain kereta semi cepat serta memastikan geometri yang digunakan tidak bermasalah pada saat disimulasikan.
5. Meningkatkan kualitas *mesh* khususnya *tetra mesh* yang digunakan untuk daerah *underbody* kereta agar didapatkan residual yang lebih rendah.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Baker, Christopher. 2019. *A Review of Train Aerodynamics-Fundamentals*. Research at Birmingham, University of Birmingham. UK
- Bell JR, Burton D, Thompson MC, Herbst AH, Sheridan J. *Moving Model Analysis of The Slipstream and Wake of a High-Speed Train*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015; 136: 127-137.
- Fox R.W., Pritchard P.J., McDonald A.T., 2010, **Introduction to Fluid Mechanics 7th**, John Wiley & Sons, Inc, Singapore.
- Huang, S., Hemida, H., Yang, M. 2014. *Numerical Calculation of The Slipstream Generated by a CRH2 High Speed Train*, Proc IMechE Part F : J Rail and Rapid Transit, pp. 1-14
- Muld TW, Efraimsson G, Henningson DS. *Wake Characteristics of High-Speed Trains With Different Lengths*. Journal of Rail and Rapid Transit. 2012; 228: 333-342.
- Munoz-Paniagua, J., Garcia, J., Lehugeur, B. 2017. *Evaluation of RANS, SAS, IDDES Models For The Simulation of The Flow Around a High Speed Train Subjected To Crosswind*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics Vol. 171, pp. 50-66.
- Munson, B. R. 2009. **Fundamental of Fluid Mechanics**. John Wiley & sons., United States of America.
- Orellano, Alexander. 2014. *Aerodynamics of High Speed Trains*. Vehicle Aerodynamics Lecture, KTH. Sweden

Tian HQ, Huang S., Yang MZ. *Flow Structure Around High-Speed Train in Open Air*. Journal of Central South University of Technology. 2015; 22: 747-752.

Versteeg, Malalasekera. 2007. *An Introduction of Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*, Second Editions. Prentice Hall. USA

Zhou Dan, Jia Lirong, Niu Jiqiang. *Numerical Calculation of Boundary Layers and Wake Characteristic of High-Speed Trains With Different Length*. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University.China

LAMPIRAN

1. Perhitungan Tekanan Referensi (P_{reff})

Pada penampilan kontur koefisien tekanan, pertama-tama dilakukan perhitungan tekanan referensi (P_{reff}) agar nilai maksimum C_p adalah 1. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan P_{reff} adalah sebagai berikut :

$$C_p = \frac{P_{st} - P_{\text{reff}}}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

dimana :

P : Tekanan statis pada titik yang akan dievaluasi nilai C_p

P_{∞} : Tekanan statis pada *freestream*

P_o : Tekanan stagnasi pada *freestream*

ρ : Densitas fluida *freestream*

U : Kecepatan *freestream* fluida

Berikut ini contoh perhitungan P_{reff} untuk konfigurasi kereta 1 car dengan variasi kecepatan aliran udara sebesar 44.44 m/s.

Diketahui : P maksimal = 1130 Pa ; $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Untuk $C_p = 1$, maka :

$$C_p = \frac{P_{st} - P_{\text{reff}}}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

$$1 = \frac{1130 - P_{\text{reff}}}{\frac{1}{2} \times 1.225 \times 44.44^2}$$

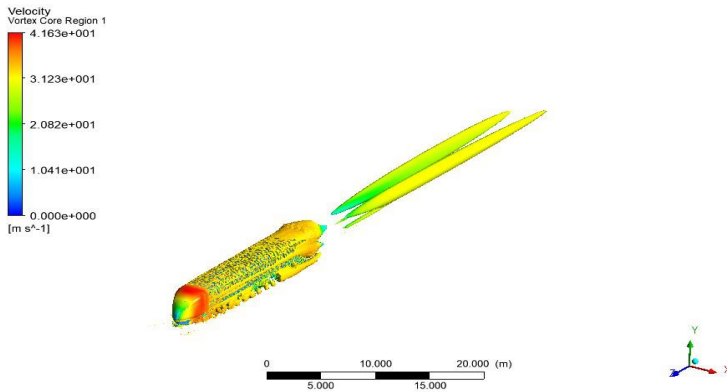
$$P_{\text{pref}} = -55.8 \text{ Pa}$$

Nilai P_{pref} untuk masing-masing variasi simulasi ditampilkan dalam tabel berikut ini :

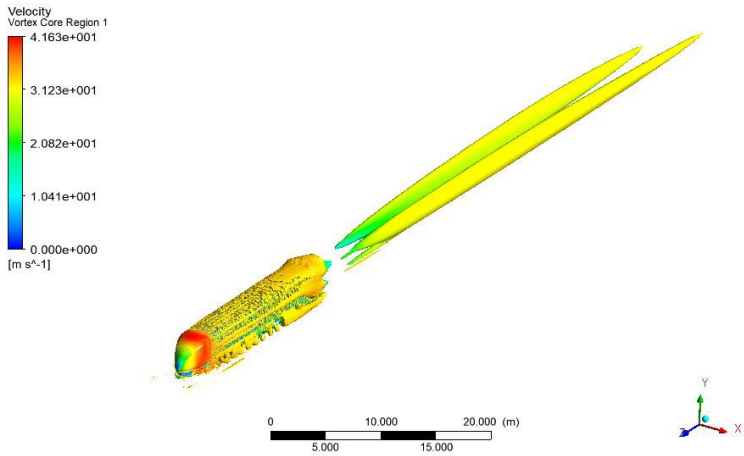
Tabel 1 P_{pref} untuk masing-masing variasi simulasi

No	Kecepatan (m/s)	Reynolds number	Konfigurasi	Pst (Pa)	Pref (Pa)
1	33.33	$Re_H = 7.06 \times 10^6$	1 car	462.02	-218.39
			3 car	654.30	-26.12
2	44.44	$Re_H = 10.07 \times 10^6$	1 car	1130	-55.8
			3 car	1158.08	-51.6

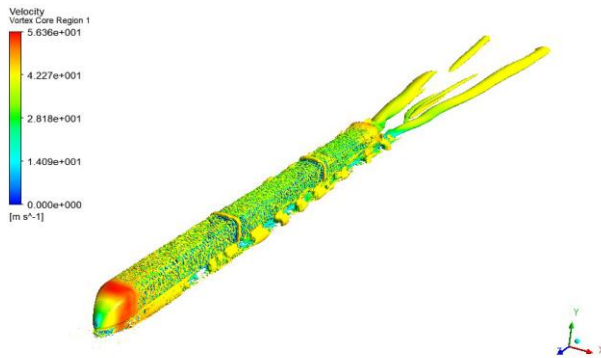
2. Instantaneous Q criterion



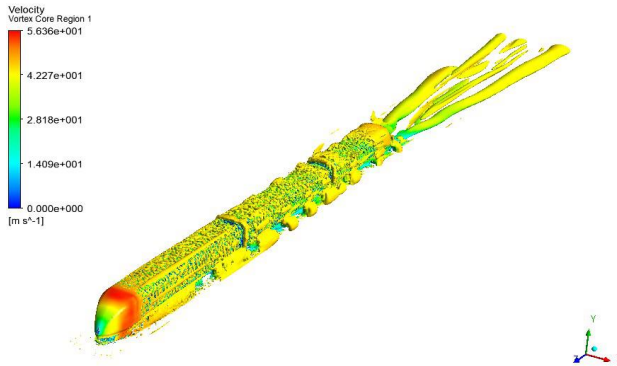
(a)



(b)



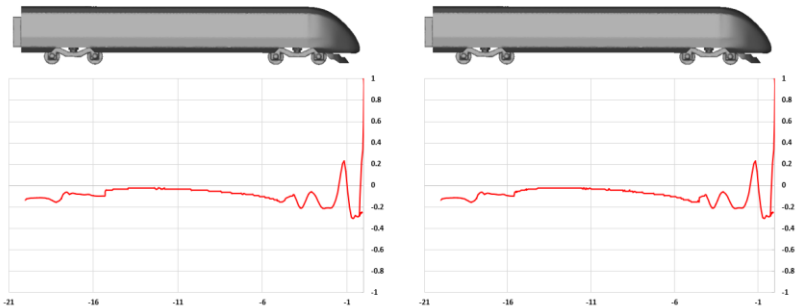
(c)



(d)

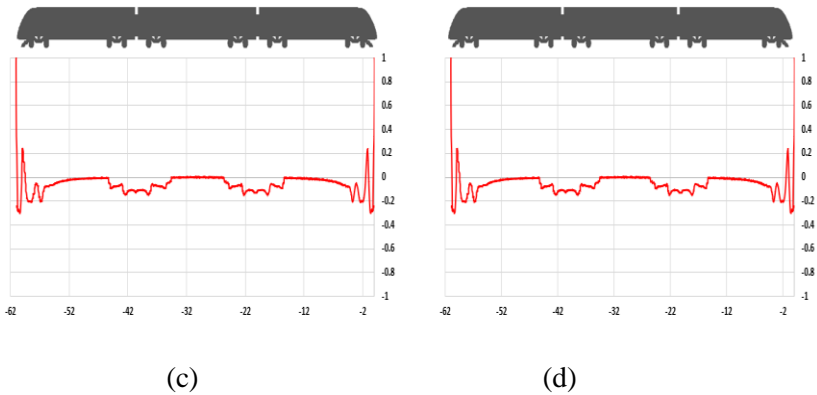
Gambar 1 *Instantaneous Q criterion* untuk masing-masing variasi (a) 1 *car* kecepatan 33.33 m/s, (b) 1 *car* kecepatan 44.44 m/s, (c) 3 *cars* kecepatan 33.33 m/s, (d) 3 *cars* kecepatan 44.44 m/s

3. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan C_p *Underbody*



(a)

(b)



Gambar 2 Grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) *underbody* untuk masing-masing variasi (a) 1 *car* kecepatan 33.33 m/s, (b) 1 *car* kecepatan 44.44 m/s, (c) 3 *cars* kecepatan 33.33 m/s, (d) 3 *cars* kecepatan 44.44 m/s

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Aditiya Fajar Bekti lahir di Tulungagung, 19 Oktober 1996, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Karmani dan Robingatin. Penulis diterima di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada tahun 2016. Selama berstatus sebagai Mahasiswa, penulis aktif di kegiatan organisasi kampus. Mendapat amanah sebagai Ketua Divisi Umum Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin periode 2018-2019. Kemudian menjadi Ketua Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin periode 2019-2020. Pengalaman menyenangkan dan menantang menempa karakter penulis menjadi manusia yang lebih baik selama di LBMM. Beberapa penghargaan yang pernah diterima penulis selama duduk di bangku perkuliahan antara lain: Juara 2 Lomba *Essay* Nasional “BIG LENSEA” tahun 2017 yang diadakan oleh Universitas Airlangga, Finalis *Young Leader Energy Camp* yang diadakan oleh *Gajah Mada Oil and Gas Club (GOGC)* tahun 2019, dan Juara 5 Nasional Kompetisi Go Kart “*ESHARK ROK CUP 2020*” bersama Mesin ITS Karting Club. Penulis juga merupakan penerima Beasiswa Adaro Foundation periode 2019-2020. Penulis berharap tugas akhir ini dapat membawa kebermanfaatannya bagi banyak orang. Untuk informasi, saran, dan kepentingan sehubungan dengan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik : aditiyafajar68@gmail.com

