TUGAS AKHIR – TM184835

# STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *BOGIE FAIRING* TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA - SURABAYA

LENTERA RUH INSAN
NRP 02111640000057

Dosen Pembimbing:
Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

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

**TUGAS AKHIR – TM184835**

# STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *BOGIE FAIRING* TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA - SURABAYA

LENTERA RUH INSAN
NRP 02111640000057

Dosen Pembimbing:
Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

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

**FINAL PROJECT – TM184835**

# NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF BOGIE FAIRINGS ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF JAKARTA – SURABAYA MEDIUM SPEED TRAIN DESIGN

LENTERA RUH INSAN
NRP 02111640000057

Supervisor:
Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

**LEMBAR PENGESAHAN**

**STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *BOGIE FAIRING* TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMICEPAT 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:
**LENTERA RUH INSAN**
NRP. 02111640000057
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D. ..... (Pembimbing)
   NIP. 198105292003122001

2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. ..... (Penguji I)
   NIP. 196001291987011001

3. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. ..... (Penguji II)
   NIP. 197104051997021001

4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. ..... (Penguji III)
   NIP. 196412281990031002

**SURABAYA**
**AGUSTUS, 2020**

# STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *BOGIE FAIRING* TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA – SURABAYA

**Nama Mahasiswa : Lentera Ruh Insan**
**NRP : 02111640000057**
**Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS**
**Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.**

**Abstrak**

*Seiring perkembangan zaman, kebutuhan akan transportasi pribadi maupun transportasi umum semakin tinggi. Untuk memenuhi kebutuhan akan moda transportasi umum, PT Kereta Api Indonesia akan membuat layanan kereta semicepat yang menghubungkan Kota Jakarta dengan Kota Surabaya. Kereta Api Semicepat Jakarta – Surabaya mampu melaju hingga kecepatan 160 km/jam, melampaui kecepatan kereta yang sudah ada di Indonesia pada umumnya. Minimnya riset tentang kereta semicepat menjadi kendala dalam implementasinya di Indonesia. 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. Dalam rangka mengurangi koefisien drag kereta semicepat, beberapa penelitian terkait penggunaan bogie fairing telah dilakukan, dimana pada penelitian terdahulu, bogie fairing mampu memberikan reduksi terhadap gaya drag yang dialami kereta, dengan nilai reduksi yang berbeda pada masing – masing kasusnya.*

*Metode yang dilakukan pada studi ini adalah studi numerik tiga dimensi desain lokomotif kereta semicepat Jakarta – Surabaya dengan aliran steady dan incompressible menggunakan software ANSYS Fluent. Geometri yang diuji adalah desain lokomotif kereta semicepat Jakarta – Surabaya dengan model*

*standard dan dengan penambahan bogie fairing. Simulasi dilakukan pada kecepatan aliran 33,33 m/s dan 44,44 m/s dengan menggunakan model turbulensi k-ω-SST. Boundary condition yang digunakan adalah velocity inlet, pressure outlet, no-slip moving wall pada tanah, dan symmetry untuk permukaan di bagian kiri, kanan, dan atas kereta. Meshing dilakukan dengan menggabungkan sel berbentuk heksahedral dengan tetrahedral. Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif yang didapatkan adalah kontur koefisien tekanan pada kereta, kontur isoline u/U = 0,99 yang terbentuk di sekeliling kereta, kontur kecepatan aliran di sekitar kereta, dan streamline aliran. Data kuantitatif yang didapatkan adalah grafik koefisien tekanan pada permukaan atas kereta dan underbody kereta, grafik ketebalan shear layer di sekitar kereta, dan nilai koefisien drag kereta semicepat.*

*Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bogie fairing meningkatkan koefisien drag kereta sebesar 1,83% baik pada kecepatan 33,33 m/s dan 44,44 m/s. Peningkatan koefisien drag terjadi karena penambahan bogie fairing menyebabkan aliran yang mengalir dari celah spoiler dengan bagian bawah nose kereta mengahantam permukaan endplate dengan lebih kuat sehingga timbul daerah bertekanan tinggi yang meningkatkan koefisien drag desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya.*

***Kata Kunci: Kereta semicepat, koefisien drag, bogie fairing, lokomotif***

# NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF BOGIE FAIRINGS ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF JAKARTA – SURABAYA MEDIUM SPEED TRAIN DESIGN

**Student's Name** : **Lentera Ruh Insan**
**NRP** : **02111640000057**
**Departement** : **Teknik Mesin FTIRS-ITS**
**Supervisor** : **Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.**

**Abstract**

*As times goes by, the needs of private transportation and public transportation continues to rise. To fulfill the demand of public transportation, PT. Kereta Api Indonesia will create a medium speed train service connecting the city of Jakarta and Surabaya. Jakarta – Surabaya medium speed train is able to attain maximum velocity of 160 km/hr, surpassing the maximum velocity of the trains operating in Indonesia nowadays. One of the major problem of implementing the medium speed train in Indonesia is the lack of the research on the medium speed train itself. One of the key topic for the research is the aerodynamic drag experienced by the train during its operation since the higher the aerodynamic drag, the train will consume more energy to operate. In order to reduce the aerodynamic drag of the medium speed train, several research on the application of bogie fairing has been reviewed. Bogie fairings can reduce the aerodynamic drag of highspeed train where the amount of reduction varies from case to case.*

*The method which used in this research is three dimensional numerical study on the design of Jakarta – Surabaya Medium Speed Train with steady and incompressible flow simulation using ANSYS Fluent. The geometries used in this research are standard design of the Jakarta – Surabaya Medium Speed Train locomotive and Jakarta – Suarabaya Medium Speed Train design using bogie fairings. The simulation is conducted with inlet velocity at 33,33 m/s and 44,44 m/s using k-ω SST turbulence*

*model. The boundary conditions used in this simulation are velocity inlet, pressure outlet, no slip moving wall at the ground, and symmetry in the top and the side of the domain. The mesh used in this simulation is a hybrid mesh which comprises of hexahedral and tetrahedral cells. Qualitative datas which will be evaluated are pressure coeffcicient contour, isoline u/U = 0,99 contour, velocity contour, and the flow streamlines. Quantitative data which will be evaluated are pressure coefficient distribution, shear layer thickness around the train, and the drag coefficient of the medium speed train.*

*From the simulation, bogie fairings increase the drag coefficient of the semihighpeed train by 1,83% either at the 33,33 m/s or 44,44 m/s. Increase in drag coefficient is caused by the airflow which flows through the gap between spoiler and the train's nose, impacting the bogie endplate surface at higher velocity and causes a high pressure zone which increases the drag coefficient of the medium speed train design.*

***Keywords: Medium speed train, drag coefficient, bogie fairing, locomotive***

# KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr. wb.

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

**STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *BOGIE FAIRING* TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA - SURABAYA**

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menghaturkan ucapan terimakasih kepada:

1. Vivien Suphandani Djanali, S.T, M.E., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan ilmu dan membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang membangun.
3. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang membangun.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang membangun.
5. Kedua orang tua penulis, atas kasih, ilmu, dan semangat yang telah beliau berikan kepada penulis selama menempuh studi dan pengerjaan tugas akhirnya.
6. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc. selaku Kepala Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS dan dosen wali yang telah memberi arahan selama masa studi penulis.

7. Seluruh dosen dan tenaga pendidik Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
8. Timothy, Aditiya, dan Quraisy selaku rekan penulis dalam mengerjakan tugas akhir yang telah senantiasa membantu dan menyemangati penulis dalam pengerjaan tugas akhirnya.
9. Serta semua pihak yang telah memberikan doa, bantuan, dan dukungannya bagi penulis selama mejalani masa studinya.

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

Wassalamu'alaikum wr.wb.

Surabaya, 10 Agustus 2020

Penulis

# DAFTAR ISI

JUDUL
HALAMAN PENGESAHAN
ABSTRAK ..... i
ABSTRACT ..... iii
KATA PENGANTAR ..... v
DAFTAR ISI ..... vii
DAFTAR GAMBAR ..... ix
DAFTAR TABEL ..... xvii
DAFTAR SIMBOL ..... xviii
BAB I ..... xx
1.1 Latar Belakang ..... 1
1.2 Rumusan Masalah ..... 4
1.3 Batasan Masalah ..... 4
1.4 Tujuan Penelitian ..... 5
1.5 Manfaat Penelitian ..... 5
BAB II ..... 7
2.1 Dasar Teori ..... 7
2.1.1. Konsep Lapis Batas (*Boundary layer*) ..... 7
2.1.2. Separasi pada *Boundary layer* ..... 11
2.1.3. Gaya Drag ..... 12
2.1.4. Gaya Drag pada Kereta ..... 14
2.1.5. Persamaan Tekanan ..... 16
2.2 Penelitian Terdahulu ..... 18
2.2.1. Pengaruh Penambahan *Bogie fairing* terhadap Karakteristik Aliran dan Performa Aerodinamika Kereta Cepat oleh Wang et al ..... 18
2.2.2. Pengaruh Sudut *Bogie Cut Out* terhadap Karakteristik Aliran dan Performa Aerodinamika Kereta Cepat oleh Zhang et al ..... 24
2.2.3. Pengaruh *Bogie fairing* terhadap *Aerodynamic Drag* Kereta Cepat ETR 500 oleh Mancini et al ..... 31

2.2.4. Studi Eksperimental Karakteristik *Aerodynamic Drag* dengan Variasi Bentuk *Underbody* Kereta oleh Kwak et al. ..... 34
2.2.5. Pengujian *Wind Tunnel* untuk Mengurangi Hambatan Aerodinamik Kereta dengan Meratakan Konstruksi *Underfloor* Kereta oleh Ido et al. ..... 39
BAB III ..... 45
3.1 Variasi Simulasi ..... 45
3.2 *Preprocessing* ..... 45
3.2.1 Geometri Desain Kereta Semi-Cepat Jakarta-Surabaya ..... 46
3.2.2 Domain Pemodelan ..... 52
3.2.3 *Meshing* ..... 54
3.2.4 Parameter Pemodelan ..... 55
3.3 *Processing* ..... 57
3.4 *Post Processing* ..... 57
3.4 *Grid Independency Test* ..... 60
3.5 Diagram Alir ..... 60
BAB IV ..... 62
4.1 Analisis Kecepatan dan Tekanan Aliran ..... 63
4.2 Analisis Cp pada Permukaan Kereta ..... 89
4.3 Analisis *Shear Layer* dan *Boundary Layer* ..... 102
4.4 Analisis Koefisien Drag ..... 110
BAB V ..... 115
5.1 Kesimpulan ..... 115
5.2 Saran ..... 116
DAFTAR PUSTAKA ..... 117
LAMPIRAN ..... 119
BIODATA PENULIS ..... 127

## DAFTAR GAMBAR

**Gambar 2.1** *Boundary layer* pada Pelat Datar (Pritchard, 2011) ..... 8
**Gambar 2.2** Aliran dengan pressure gradient (Pritchard, 2011) ..... 11
**Gambar 2.3** Gaya lift dan drag (Douglas et al, 2005) ..... 12
**Gambar 2.4** Benda pejal pada suatu aliran (Douglas et al, 2005) ..... 13
**Gambar 2.5** *Bogie fairing* pada kereta cepat (a) tanpa *bogie fairing* (b) setengah *bogie fairing* (c) *bogie fairing* penuh (Wang et al, 2019) ..... 16
**Gambar 2.6** Dimensi domain simulasi (Wang et al, 2019) .... 19
**Gambar 2.7** Variasi model simulasi kereta cepat CRH2 (a) Tanpa *bogie fairing* (b) Setengah *bogie fairing* (c) *full-size bogie fairing*. (Wang et al, 2019) ..... 20
**Gambar 2.8** Nilai koefisien drag pada masing-masing segmen model kereta CRH2 (Wang et al, 2019) ..... 20
**Gambar 2.9** Pengaruh *Bogie fairing* terhadap Ukuran Vortex yang Terbentuk Pada Bogie (Wang et al, 2019) ..... 21
**Gambar 2.10** Pengaruh *Bogie fairing* terhadap Lebar *Wake* (Wang et al, 2019) ..... 22
**Gambar 2.11** Distribusi *Boundary layer Thickness* (a) pada *head car, middle car,* dan *tail car* (b) pada ketinggian z/H=0.3 (c) di sekitar bogie. (Wang et al, 2019) ..... 22
**Gambar 2.12** (a) Kontur $C_P$ pada *Underbody* Kereta CRH2 (b) Distribusi $C_P$ pada *Underbody* Kereta CRH2 (Wang et al, 2019) ..... 23
**Gambar 2.13** Model kereta cepat yang digunakan untuk simulasi (Zhang et al, 2018) ..... 24
**Gambar 2.14** Dimensi domain simulasi (Zhang et al, 2018) . 25
**Gambar 2.15** Distribusi *mesh* pada (a) lokomotif depan (b) permukaan tanah (Zhang et al, 2018) ..... 25

**Gambar 2.16** Variasi bentuk bogie *cut out* untuk (a) Kasus 1 (b) Kasus 2 (c) Kasus 3 dan (d) Kasus 4 (Zhang et al, 2018) . 26
**Gambar 2.17** Pembagian daerah analisis koefisien drag (Zhang et al, 2018) ..... 27
**Gambar 2.18** Distribusi $C_p$ pada *centerline* kereta (a) bagian bawah (b) bagian atas (Zhang et al, 2018) ..... 29
**Gambar 2.19** Kontur $C_p$ pada bagian bawah kereta (Zhang et al, 2018) ..... 29
**Gambar 2.20** *Boundary layer* pada (a) lokomotif depan (b) gerbong penumpang (c) lokomotif belakang. (Zhang et al, 2018) ..... 30
**Gambar 2.21** Grafik persentase penurunan koefisien drag dengan penggunaan *bogie fairing* (Mancini et al, 2001) .. 31
**Gambar 2.22** *Bogie fairing* pada pengujian *full scale* lokomotif (Mancini et al, 2001) ..... 32
**Gambar 2.23** *Bogie fairing* pada pengujian *full scale* gerbong penumpang (Mancini et al, 2001) ..... 32
**Gambar 2.24** Ilustrasi tempat pengambila data pengujian *full scale* (Mancini et al, 2001) ..... 33
**Gambar 2.25** Grafik peningkatan gaya drag seiring peningkatan kecepatan kereta (Mancini et al, 2001) ..... 34
**Gambar 2.26** Variasi bentuk bogie dan letak bogie (a) *bogie* standar (b) *bogie* dengan *bogie cover* (c) *streamlined bogie* (d) letak *bogie* pada model kereta HEMU-430x (Kwak et al, 2012) ..... 35
**Gambar 2.27** Konfigurasi 3-*car* (Kwak et al, 2012) ..... 36
**Gambar 2.28** Gaya drag dengan penggunaan variasi bogie pada (a) Variasi bogie pertama lokomotif depan (b) Variasi bogie kedua lokomotif depan (Kwak et al, 2012) ..... 37
**Gambar 2.29** Gaya drag pada lokomotif belakang (a) Variasi bogie pertama lokomotif belakang (b) Variasi bogie kedua lokomotif belakang (Kwak et al, 2012) ..... 37
**Gambar 2.30** Konfigurasi 5-*car* (Kwak et al, 2012) ..... 38

**Gambar 2.31** Gaya drag pada lokomotif depan (a) Variasi bogie pertama lokomotif depan (b) Variasi bogie kedua lokomotif depan (Kwak et al, 2012) ..... 38
**Gambar 2.32** Gaya drag pada lokomotif belakang (a) Variasi bogie pertama lokomotif belakang (b) Variasi bogie kedua lokomotif belakang (Kwak et al, 2012)..... 38
**Gambar 2.33** Ilustrasi gambar pengujian kereta pada wind tunnel (Ido et al, 2001)..... 40
**Gambar 2.34** Ilustrasi variasi underbody kereta (Ido et al, 2001) ..... 40
**Gambar 2.35** Ilustrasi penempatan sensor tekanan (Ido et al, 2001) ..... 41
**Gambar 2.36** Cistribusi $C_p$ pada permukaan B dan C (Ido et al, 2001..... 42
**Gambar 2.37** Distribusi $C_p$ pada permukaan D dan C (Ido et al, 2001) ..... 42
**Gambar 2.38** $C_d$ pada setiap permukaan uji pada gerbong penumpang (Ido et al, 2001) ..... 43
**Gambar 2.39** Total drag pada gerbong penumpang dengan variasi underbody (Ido et al, 2001) ..... 44
**Gambar 3.1** Geometri desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (berlanjut) ..... 46
**Gambar 3.1** Geometri dasar desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (lanjutan)..... 47
**Gambar 3.2** Ilustrasi bagian bawah geometri dasar model kereta semicepat Jakarta – Surabaya..... 48
**Gambar 3.3** Ilustrasi tampak depan dan gambar potongan pada tengah kereta (a) tampak depan (b) tampak potongan (berlanjut)..... 48

**Gambar 3.3** Ilustrasi tampak depan dan gambar potongan pada tengah kereta (a) tampak depan (b) tampak potongan (lanjutan) ..... 49
**Gambar 3.4** Dimensi fairing pada model kereta semicepat Jakarta – Surabaya tanpa *bogie fairing*. ..... 49
**Gambar 3.5** Geometri desain kereta semicepat dengan penambahan *bogie fairing* (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (berlanjut) ..... 50
**Gambar 3.5** Geometri desain kereta semicepat dengan penambahan *bogie* (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (lanjutan) ..... 51
**Gambar 3.6** Ilustrasi bagian bawah model kereta semicepat Jakarta – Surabaya dengan penambahan *bogie fairing*. .... 51
**Gambar 3.7** Dimensi *bogie fairing* pada model desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya (a) tampak samping (b) tampak potongan ..... 52
**Gambar 3.8** Domain Simulasi (a) lokasi pusat koordinat simulasi (b) ukuran domain simulasi ..... 53
**Gambar 3.9** *Mesh* kereta semicepat (a) tampak isometri (b) tampak samping (c) prism layer (berlanjut) ..... 54
**Gambar 3.9** *Mesh* kereta semicepat (a) tampak isometri (b) tampak samping (c) prism layer (lanjutan) ..... 55
**Gambar 3.10** Bidang horizontal y/H = 0,235, y/H = 0,32, dan y/H = 0,706 ..... 58
**Gambar 3.11** Bidang melintang pada z/H = -1.09, z/H = -3.03, dan z/H = -4.97 ..... 59
**Gambar 3.12** Lokasi pengambilan profil kecepatan pada belakang kereta ..... 59
**Gambar 3.13** Diagram alir penelitian ..... 61
**Gambar 3.13** Diagram alir penelitian (lanjutan) ..... 62
**Gambar 4.1** Kontur dimensionless velocity ($u$/U) pada bagian midspan kereta ..... 65

**Gambar 4.2** Kontur koefisien tekanan pada bagian midspan kereta ..... 66
**Gambar 4.3** Lokasi pengambilan kontur aliran pada bidang horizontal. ..... 70
**Gambar 4.4** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) pada bagian *underbody* kereta pada ketinggian y/H = 0,235 ..... 72
**Gambar 4.5** Kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta pada ketinggian y/H = 0,235 ..... 73
**Gambar 4.6** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) pada ketinggian y/H = 0,32 ..... 76
**Gambar 4.7** Kontur koefisien tekanan pada ketinggian y/H = 0,32 (berlanjut) ..... 77
**Gambar 4.7** Kontur koefisien tekanan pada ketinggian y/H = 0,32 (lanjutan) ..... 78
**Gambar 4.8** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) kereta pada ketinggian y/H = 0,706 (berlanjut) ..... 79
**Gambar 4.8** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) kereta pada ketinggian y/H = 0,706 (lanjutan) ..... 80
**Gambar 4.9** Kontur koefisien tekanan kereta pada ketinggian y/H = 0,706 ..... 81
**Gambar 4.10** Garis pengambilan profil kecepatan pada daerah *wake* ..... 82
**Gambar 4.11** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) di sepanjang garis vertikal di belakang kereta pada kecepatan 33,33 m/s. ..... 83
**Gambar 4.12** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) di sepanjang garis vertikal di belakang kereta pada kecepatan 44,44 m/s. ..... 84
**Gambar 4.13** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) pada garis horizontal di ketingguan y/H = 0,32 pada kecepatan 33,33 m/s. ..... 85

**Gambar 4.14** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) pada garis horizontal di ketingguan y/H = 0,32 pada kecepatan 44,44 m/s. ..... 86
**Gambar 4.15** Kontur dimensionless velocity pada isosurface Q criterion = 1 ..... 89
**Gambar 4.16** Kontur koefisien tekanan pada permukaan luar kereta (berlanjut) ..... 90
**Gambar 4.16** Kontur koefisien tekanan pada permukaan luar kereta (lanjutan) ..... 91
**Gambar 4.17** Kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta (berlanjut) ..... 92
**Gambar 4.17** Kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta (lanjutan) ..... 93
**Gambar 4.18** Kontur koefisien tekanan pada bogie endplate 93
**Gambar 4.19** Kontur koefisien tekanan pada bogie belakang. ..... 94
**Gambar 4.20** Grafik distribusi Cp pada bagian midspan atas kereta ..... 95
**Gambar 4.21** Grafik distribusi Cp pada bagian midspan *underbody* kereta ..... 97
**Gambar 4.22** Grafik distribusi koefisien tekanan di sisi samping kereta pada ketinggian y/H = 0,32 ..... 99
**Gambar 4.23** Garis pengambilan koefisien tekanan ..... 100
**Gambar 4.24** Komparasi koefisien tekanan underbody kereta ..... 101
**Gambar 4.25** Lokasi pengambilan kontur isoline *u*/U = 0,99 yang memotong badan kereta searah sumbu x ..... 103
**Gambar 4.26** Kontur isoline *u*/U = 0,99 pada bidang yang memotong badan kereta pada (a) z/H = -1,09 (b) z/H = - 3,03 (c) z/H = -4,97 (Berlanjut) ..... 103
**Gambar 4.26** Kontur isoline *u*/U = 0,99 pada bidang yang memotong badan kereta pada (a) z/H = -1,09 (b) z/H = - 3,03 (c) z/H = -4,97 (lanjutan) ..... 104

**Gambar 4.27** Kontur isoline *u*/U = 0,99 pada ketinggian y/H = 0,32 ..... 104
**Gambar 4.28** Lokasi garis pengambilan sampel profil kecepatan pada ketinggian y/H = 0,5 pada bidang z/H = -3,03 ..... 106
**Gambar 4.29** Grafik sampel profil kecepatan pada *boundary layer* pada ketinggian y/H = 0,5 di bidang z/H = -3,03 ... 107
**Gambar 4.30** Grafik ketebalan batas *shear layer* pada ketinggian y/H = 0,32 ..... 108
**Gambar 4.31** Grafik koefisien drag terhadap Re. ..... 111
**Gambar 4.32** Distribusi koefisien drag kereta ..... 113
**Gambar 4.33** Koefisien pressure drag dan viscous drag pada permukaan atas kereta ..... 113

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

# DAFTAR TABEL

**Tabel 2.1** Perbandingan Nilai $C_d$ pada Simulasi dan Eksperimen (Zhang et al, 2018) ..... 27

**Tabel 2.2** Nilai $C_d$ di Setiap Bagian Kereta (Zhang et al, 2018) . 28

**Tabel 2.3** Perbedaan Gaya *Drag* pada Kereta Tanpa *Bogie fairing* dan dengan *Bogie fairing* (Mancini et al, 2001) ..... 34

**Tabel 2.4** Pengaruh *Bogie Cover* terhadap Penurunan Gaya *Drag* (Kwak et al, 2012) ..... 39

**Tabel 3.1** Variasi Penelitian ..... 45

**Tabel 3.2** Dimensi Kereta ..... 46

**Tabel 3.3** Nilai Parameter *Boundary Conditions* ..... 56

**Tabel 3.4** Analisa *Grid Independency* ..... 60

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

# DAFTAR SIMBOL

$\tau$ : *Shear stress* ($N/m^2$)

$\mu$ : *Viscosity* (kg/m.s)

Re : Bilangan Reynolds

$\rho$ : Massa jenis ($kg/m^3$)

*u* : Kecepatan aliran (m/s)

U : Kecepatan aliran freestream (m/s)

*w* : Kecepatan aliran kea rah sumbu z negatif (m/s)

P : Tekanan statik (Pa)

$P_{ref}$ : Tekanan referensi (Pa)

H : Tinggi kereta (m)

L : Panjang kereta (m)

W : Lebar kereta (m)

A : Luas penampang kereta ($m^2$)

h : Ketinggian digitung dari permukaan alir (m)

$\delta$ : *Boundary layer thickness* (m)

$\delta^*$ : *Displacement thickness* (m)

$\theta$ : *Momentum thickness* (m)

*H* : *Shape factor*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

# BAB I
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, permintaan akan moda transportasi baik transportasi pribadi maupun transportasi umum semakin tinggi. Hal ini tidak terlepas dari kebutuhan masyarakat untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lain dalam melakukan kegiatannya. Salah satu moda transportasi yang berusaha dikembangkan oleh pemerintah Indonesia saat ini adalah kereta api.

Kereta api adalah moda transportasi darat yang terdiri dari beberapa sambungan gerbong yang dapat mengangkut penumpang atau kargo. Kereta api dapat digerakkan oleh sebuah lokomotif yang menarik gerbong dibelakangnya atau dengan motor listrik yang dipasangkan pada setiap bogie pada lokomotif dan gerbong kereta. Kereta berjalan diatas dua buah rel sejajar dengan jarak antar rel yang konstan. Seiring dengan perkembangan zaman, kereta api telah dikembangkan menjadi beberapa macam jenis seperti *monorail* dan maglev.

Dalam ranga meningkatkan pelayanan kereta api di Indonesia, PT Kereta Api Indonesia bekerja sama dengan Japan International Cooperation Agency, akan membuat layanan kereta semi cepat yang menghubungkan Kota Jakarta dengan Kota Surabaya. Proyek ini direncanakan akan dimulai pada tahun 2022 dan selesai pada tahun 2026. Kereta Api Semicepat Jakarta-Surabaya mampu melaju dengan kecepatan maksimal sebesar 160 km/jam dan dapat memangkas waktu tempuh perjalanan kereta api antara Kota Jakarta dengan Kota Surabaya yang sebelumnya selama sembilan jam menjadi lima jam. Teknologi kereta semi-cepat merupakan hal yang masih baru di Indonesia, sehingga dalam proses penerapannya ditemukan beberapa kendala. Kendala tersebut antara lain adalah belum adanya riset yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh kecepatan kereta api semicepat pada

infrastruktur yang berada di samping rel kereta, pengaruh *crosswind* terhadap momen guling kereta semicepat dengan lebar rel konvensional sebesar 1067 mm, serta performa aerodinamika dari desain prototipe kereta api semicepat yang telah dibuat yang dapat berpengaruh terhadap konsumsi energi dan biaya operasional kereta api semicepat. Baker (2019) menjelaskan bahwa komponen *aerodynamic drag* pada kereta dapan dibagi menjadi tiga poin, yakni *pressure drag* akibat perbedaan tekanan pada hidung dan ekor kereta, *pressure drag* akibat perbedaan tekanan di sekitar bogie dan instalasi pada bagian bawah kereta, dan yang terakhir adalah *friction drag* akibat interaksi antara aliran fluida sepanjang permukaan kereta. Seluruh komponen drag tersebut berpengaruh terhadap koefisien *drag* kereta. Baker (2019) memberikan aproksimasi rasio persentase energi yang dapat dihemat dengan persentase reduksi koefisien *drag* aerdodinamik yang nilainya adalah sebesar 0,3 untuk *low speed train* dan 0.5 untuk *high speed train*. Hal ini menjadikan nilai koefisien *drag* kereta sebagai hal yang penting untuk karena berkaitan langsung dengan konsumsi energi kereta selama beroperasi.

Dalam rangka untuk mengurangi koefisien drag kereta cepat, beberapa penelitian terkait penggunaan *bogie fairing* telah dilakukan. Variabel yang dievaluasi dalam penelitian-penelitian yang dilakukan antara lain adalah perubahan *boundary layer thickness,* koefisien tekanan, kecepatan aliran, koefisien drag, dan *vortex* yang terbentuk di sekitar kereta.

**Wang et al (2019)** telah meneliti pengaruh penggunaan *full size bogie fairing, half size bogie fairing*, dan celah bogie tanpa *bogie fairing* dengan menggunakan simulasi numerik *Delayed Detached Eddy Simulations* (DDES). Diperoleh bahwa penggunaan *bogie fairing* dapat memperkecil koefisien drag kereta cepat, memperkecil ketebalan *boundary layer* di sekitar kereta, dan memperkecil lebar *vortex* yang terjadi pada bagian *wake* kereta cepat.

**Zhang et al (2018)** telah meneliti pengaruh penggunaan sudut *bogie cut out* terhadap performa aeorodinamika kereta dengan menggunakan simulasi numerik *Delayed Detached Eddy Simulation* (DDES). Diperoleh bahwa penggunaan sudut *bogie cut out* sebesar cotα=0,5 pada bagian rongga bogie depan dapat memperkecil koefisien drag kereta meskipun tidak signifikan.

**Mancini et al (2001)** telah melakukan eksperimen dengan menggunakan eksperimen *wind tunnel* dan pengujian *full scale* kereta cepat ETR 500. Dari eksperimen menggunakan *wind tunnel* didapatkan penurunan koefisien drag hingga 20% pada penggunaan *bogie fairing* yang telah dioptimasi. Pada pengujian *full scale* didapatkan penurunan gaya drag hingga 11,7%.

**Kwak et al (2012)** telah melakukan eksperimen *wind tunnel* dengan variasi *underbody* kereta dengan bogie tanpa *bogie fairing*, bogie dengan *bogie fairing*, dan *streamlined bogie*. Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan bahwa gaya drag yang dialami kereta menurun seiring penggunaan bogie tanpa *bogie fairing*, bogie dengan *bogie fairing*, dan *streamlined bogie*.

**Ido et al (2001)** telah melakukan eksperimen *wind tunnel* untuk mendapatkan pengaruh konstruksi *underfloor* kereta cepat terhadap gaya drag yang dialami gerbong penumpang, Didapatkan bahwa penggunaan konstruksi *underfloor* dengan *bogie fairing* dan *bottom cover* dapat menurunkan gaya drag yang dialami oleh gerbong penumpang.

Pada penelitian kali ini, dilakukan pengujian simulasi numerik desain kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya dengan variasi penggunaan bogie tanpa *bogie fairing* dan penggunaan bogie dengan *bogie fairing* untuk mengetahui performa aerodinamika desain kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya).

## 1.2 Rumusan Masalah

Model dari desain kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya yang akan diteliti saat ini memiliki geometri yang cukup kompleks, terutama pada bagian hidung kereta dan pada bagian *underfloor* seperti *spoiler*, bogie, dan instalasi pada bagian bawah kereta. Seluruh konstruksi tersebut memiliki pengaruh terhadap aerodinamika kereta semicepat. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh *bogie fairing* performa aerodinamika desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *bogie fairing* terhadap aliran udara di sekitar desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya?

Model dasar desain kereta semi-cepat yang digunakan dalam penelitian tidak memiliki *bogie fairing*. Hal ini menyebabkan aliran udara di sekitar kereta dapat memasuki rongga *bogie* dan membentur komponen-komponen pada bagian bawah kereta sehingga tercipta gaya drag akibat adanya tekanan tinggi pada *bogie* dan *bogie endplate*. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan studi numerik terhadap desain yang telah dibuat dengan variasi penambahan *bogie fairing* dengan harapan koefisien drag kereta dapat diperkecil karena aliran udara yang memasuki rongga bogie dapat diminimalisasi. Penambahan *bogie fairing* juga dapat mengubah struktur aliran di sekitar kereta, baik pada sisi samping kereta, bagian *underbody,* dan *wake*. Merujuk pada penelitian terdahulu, penambahan *bogie fairing* dapat mengurangi ketebalan *boundary layer* yang terbentuk di sepanjang kereta.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini adalah:

1. Simulasi dilakukan dengan model 3D, *steady, incompressible flow*.
2. Menggunakan *software* ANSYS Fluent.
3. Udara mengalir satu arah dimulai dari sebuah *inlet* dengan kecepatan konstan, dimana arah normal permukaan *inlet* sejajar dengan panjang kereta.
4. Aksesori kereta disederhanakan.
5. Analisa dilakukan pada desain lokomotif kereta semicepat Jakarta-Surabaya.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui performa aerodinamik desain kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya tanpa penggunaan *bogie fairing* dan dengan penggunaan *bogie fairing* dan untuk mengetahui pengaruh *bogie fairing* terhadap fenomena aliran yang terbentuk di sekitar kereta, baik pada sisi samping kereta, *underbody* kereta, dan zona *wake* di belakang kereta. Parameter yang dievaluasi untuk menganalisis hal tersebut adalah adalah:

1. Kontur kecepatan aliran dan kontur tekanan di sekitar desain kereta semicepat
2. Koefisien tekanan ($C_p$) di sekitar kereta semi-cepat.
3. Ketebalan *boundary layer* di sekitar desain kereta semicepat.
4. Koefisien drag ($C_d$) kereta semi-cepat.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diberikan oleh penelitian ini adalah sebagai kontribusi terhadap evaluasi performa aerodinamika dari desain kereta semicepat tanpa *bogie fairing* dan dengan *bogie fairing* terutama pada aliran di sekitar bagian *underbody* kereta. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan pengembangan kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya dan juga sebagai acuan untuk penelitian kereta berikutnya.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

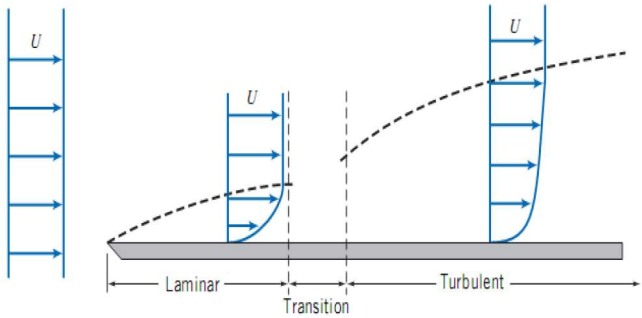
# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Dasar Teori

### 2.1.1. Konsep Lapis Batas (*Boundary layer*)

Aliran yang melewati sebuah permukaan benda padat dapat dibagi menjadi dua daerah aliran, yaitu daerah aliran di dalam lapis batas (*boundary layer)* yang berada di di atas permukaan benda padat dan aliran di luar lapis batas (*free stream*) dimana aliran fluida di luar lapis batas memiliki distrubusi kecepatan yang *uniform*.

Tegangan geser yang disebabkan oleh viskositas fluida mempengaruhi aliran pada daerah lapis batas sehingga profil kecepatan aliran pada daerah lapis batas tidak *uniform*. Gambar 2.1 mengilustrasikan aliran fluida yang melewati sebuah plat datar. Fluida mengalir dengan distribusi kecepatan yang *uniform* (U). Ketika fluida mengalir di atas plat datar, profil kecepatan aliran fluida di dekat permukaan plat menjadi tidak *uniform* karena adanya pengaruh tegangan geser. Kecepatan aliran fluida meningkat ketika menjauhi permukaan plat dan kembali menjadi uniform ketika kecepatan aliran fluida sama dengan kecepatan *free stream* (u = 0,99U). Jarak antara permukaan benda padat dengan dengan titik tersebut disebut tebal lapis batas (*boundary layer thickness*). Ketebalan *boundary layer thickness* meningkat seiring naiknya jarak tempuh aliran fluida.




**Gambar 2.1** *Boundary layer* pada Pelat Datar (Pritchard, 2011)

Parameter lain yang digunakan untuk mendeskripsikan boundary layer adalah *displacement thickness* ($\delta^*$) dan *momentum thickness* ($\theta$). *Displacement thickness* didefinisikan sebagai jarak ketinggian dari permukaan alir dimana laju massa yang hilang akibat terbentuknya boundary layer sama dengan laju massa pada aliran tanpa gradien kecepatan yang dihitung dari permukaan alir hingga ketinggian tersebut. *Momentum thickness* adalah jarak ketinggian dari permukaan alir dimana *momentum loss* yang ditimbulkan oleh boundary layer sama dengan momentum aliran tanpa gradien kecepatan yang dihitung dari permukaan alir hingga ketinggian tersebut. Persamaan 2.1 menunjukkan persamaan untuk *displacement thickness* dan persamaan 2.2 menunjukkan persamaan untuk *momentum thickness*.

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dh \qquad 2.1$$

$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U}\left(1 - \frac{u}{U}\right) dh \qquad 2.2$$

Dimana:

δ = Boundary layer thickness (m)

*u* = Kecepatan lokal aliran (m/s)

*U* = Kecepatan aliran freestream (m/s)

*h* = Ketinggian dihitung dari permukaan alir (m)

Terdapat dua jenis profil boundary layer yang dapat terbentuk pada suatu aliran di dekat permukaan, yaitu laminar boundary layer dan turbulent boundary layer. Turbulent boundary layer memiliki profil kecepatan yang lebih tumpul, yaitu kecepatan aliran di dekat permukaan yang lebih tinggi daripada aliran laminar boundary layer. Pada umumnya profil kecepatan turbulent boundary layer dapat didekati dengan *power law velocity profile* dengan mengasumsikan tidak ada gradien tekanan pada aliran. Berikut adalah persamaan profil kecepatan power law.

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (h < \delta) \qquad 2.3$$

Dimana:

δ = Boundary layer thickness (m)

*u* = Kecepatan lokal aliran (m/s)

*U* = Kecepatan aliran freestream (m/s)

*h* = Ketinggian pada boundary layer dihitung dari permukaan alir (m)

Secara kuantitatif laminar *boundary layer* dan *turbulent boundary* layer dapat dibedakan dengan menghitung *shape factor* (*H*) yaitu perbandingan *displacement thickness* dengan *momentum thickness*. *Turbulent boundary layer* memiliki nilai *H* sebesar 1,3 hingga 2,5 pada titik separasi, sedangkan *laminar boundary layer*

memiliki nilai *H* sebesar 2,6 hingga 3,5 pada titik separasi. Dengan mengasumsikan profil kecepatan power law pada turbulent boundary layer, maka nilai *displacement thickness, momentum thickness*, dan *shape factor* dapat dihitung pada persamaan di bawah ini.

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dh = \int_0^\delta \left(1 - \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}\right) dh \qquad 2.4$$

$$\theta = \int_0^\delta \frac{u}{U}\left(1 - \frac{u}{U}\right) dh = \int_0^\delta \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \left(1 - \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}\right) dh \qquad 2.5$$

Dengan mengasumsikan $\eta = \frac{h}{\delta}$ dan melakukan subtitusi maka persamaan di atas dapat ditulis menjadi

$$\delta^* = \delta \int_0^1 \left(1 - (\eta)^{\frac{1}{n}}\right) d\eta = \frac{\delta}{n+1} \qquad 2.6$$

$$\theta = \delta \int_0^1 (\eta)^{\frac{1}{n}} \left(1 - (\eta)^{\frac{1}{n}}\right) d\eta = \frac{\delta . n}{(n+1)(n+2)} \qquad 2.7$$

Sehingga shape factor (*H*) dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} = \frac{n+2}{n} \qquad 2.8$$

Dimana:

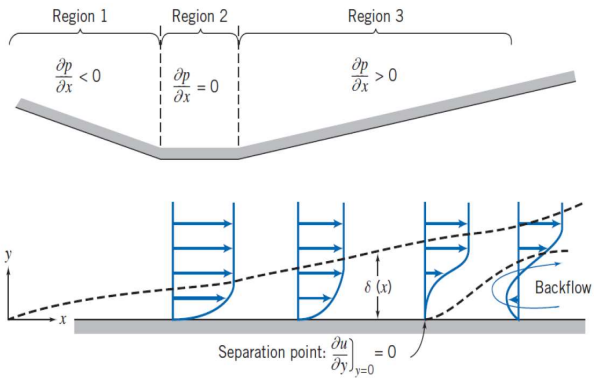
$\delta^*$ = displacement thickness (m)

$\theta$ = momentum thickness (m)

n = nilai penyebut eksponen

### 2.1.2. Separasi pada *Boundary layer*

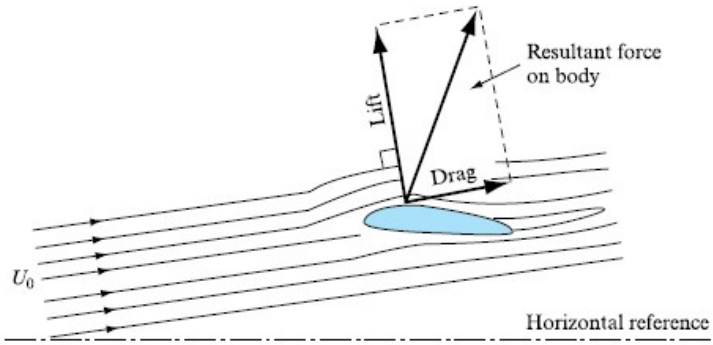
Separasi merupakan fenomena yang terjadi di dalam *boundary layer*. Separasi adalah peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda sehingga timbul zona *wake* dimana aliran pada zona *wake* bersifat turbulen. Separasi dapat terjadi ketika aliran mengalami *adverse pressure gradient*, yaitu kondisi dimana terjadi peningkatan tekanan seiring dengan arah aliran mengalir. Proses separasi diawali dengan adanya fluida yang mengalir sepanjang sebuah permukaan benda padat. Dapat dilihat pada gambar 2.2, pada daerah 3 fluida akan mengalami perluasan penampang alir sehingga timbul *adverse pressure gradient*, hal ini menyebabkan aliran fluida melambat. Titik separasi terjadi ketika gradien kecepatan aliran di dekat permukaan bernilai nol. Di belakang titik separasi terjadi *backflow* dimana arah aliran *backflow* melawan arah aliran *freestream*.




**Gambar 2.2** Aliran dengan pressure gradient (Pritchard, 2011)

### 2.1.3. Gaya Drag

Gaya drag adalah salah satu gaya yang timbul ketika fluida mengalir melewati suatu benda. Gaya drag bekerja searah dengan arah laju aliran ketika melewati benda. Gaya drag yang dialami suatu benda merupakan jumlah dari dua komponen gaya drag, yaitu *pressure drag* dan *skin friction drag*. Jumlah total dari kedua komponen tersebut umumnya disebut *total drag* atau *profile drag*.

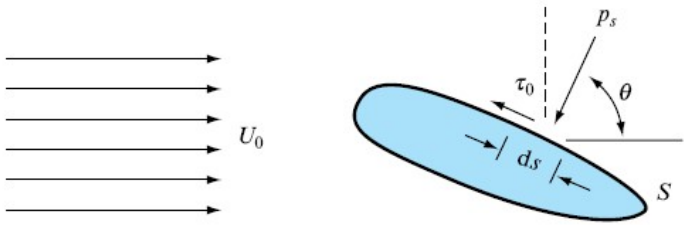



**Gambar 2.3** Gaya lift dan drag (Douglas et al, 2005)

Gaya drag yang timbul akibat dari perbedaan tekanan disebut dengan *pressure drag*. Pada sebuah benda padat yag dialiri oleh fluida, perbedaan tekanan pada sisi depan dan belakang benda dapat terjadi karena adanya zona *wake* dimana aliran pada *wake* bersifat sangat turbulen. *Pressure drag* terjadi ketika tekanan yang tinggi pada sisi depan benda padat (tekanan stagnasi) lebih tinggi dari tekanan rendah yang ada pada zona *wake* sehingga resultan gaya akibat gaya dari tekanan yang bekerja pada permukaan benda memiliki arah searah dengan laju aliran. *Pressure drag* dapat diminimalisasi dengan cara mengubah bentuk benda agar separasi aliran yang terjadi dapat ditunda (*streamlining)*. Dengan tertundanya separasi aliran, zona *wake* yang terbentuk pada bagian

belakang benda menjadi lebih kecil sehingga *pressure drag* yang terjadi pada benda menjadi lebih kecil.

Gaya drag yang timbul akibat dari tegangan geser yang terjadi pada permukaan benda ketika dialiri oleh fluida disebut dengan *skin friction drag*. Besarnya *pressure drag* dan *friction drag* yang dialami suatu benda dipengaruhi oleh bentuk benda dan orientasi benda terhadap arah laju aliran. Sebagai contoh, sebuah benda pipih apabila dihadapkan sejajar dengan arah aliran, gaya drag akibat perbedaan tekanan dapat diabaikan karena tekanan udara bekerja pada permukaan depan yang kecil. Nilai *friction drag* menjadi substansial karena permukaan benda yang terkena aliran menjadi lebih besar. Apabila benda pipih tersebut diletakkan tegak lurus aliran, nilai *pressure drag* menjadi lebih signifikan, sementara nilai *friction drag* dapat diabaikan.




**Gambar 2.4** Benda pejal pada suatu aliran (Douglas et al, 2005)

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

$$F_D = \int p_s \cos\theta \, ds + \int \tau_0 \sin\theta \, \mathrm{ds} \qquad (2.9)$$

dimana P adalah distribusi tekanan, $\tau_0$ adalah tegangan geser. Persamaan diatas dapat diaplikasikan untuk segala jenis bentuk benda. Persamaan tersebut kemudian diubah kedalam bentuk yang lebih sederhana menjadi,

$$F_D = C_D . \frac{1}{2} . \rho . U^2 . A \tag{2.10}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} . \rho . U^2 . A} \tag{2.11}$$

dimana :

A : Proyeksi luas permukaan benda tegak lurus terhadap arah aliran ($m^2$)

$F_D$ : Gaya *Drag* (Newton)

$\rho$ : Massa jenis fluida (kg/m$^3$)

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

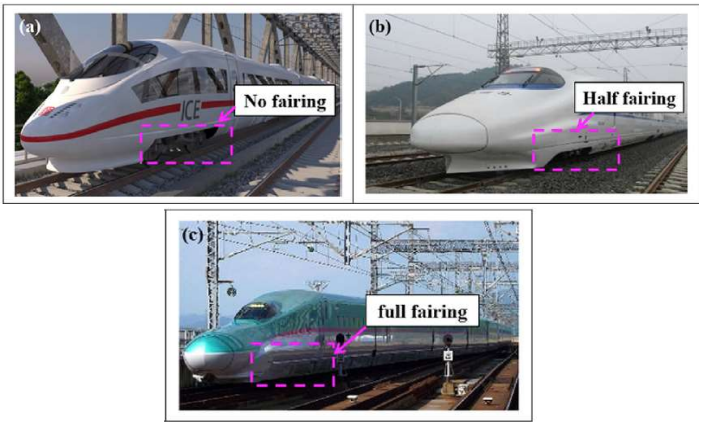
*Coefficient drag* ($C_D$) adalah suatu bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besar kecilnya tahanan fluida yang diterima oleh suatu benda di sebuah aliran. Nilai $C_D$ umumnya didapatkan dari hasil eksperimen atau simulasi.

### 2.1.4. Gaya Drag pada Kereta

Gaya drag pada kereta meningkat secara kuadratik seiring bertambahnya kecepatan kereta. Pada kereta, gaya hambat aerodinamik akan melampaui gaya hambat mekanik pada kecepatan diatas 200 km/jam, dan pada kecepatan 250 km/jam, gaya hambat aerodinamik akan mencakup 75% - 80% dari total hambatan yang dialami oleh kereta (Baker, 2019). Secara umum komponen penyusun drag pada kereta dapat dibagi menjadi tiga poin. Komponen pertama adalah *pressure drag* akibat perbedaan tekanan pada hidung dan ekor kereta. Perbedaan tekanan pada bagian hidung dan ekor kereta dipengaruhi oleh bentuk hidung dan

ekor kereta, sehingga dapat dikurangi dengan melakukan *streamlining* bentuk hidung dan ekor. Komponen kedua adalah *pressure drag* akibat dari perbedaan tekanan sepanjang bogie dan instalasi yang dipasang pada bagian bawah kereta. Komponen ketiga adalah *friction drag* akibat dari permukaan samping, atas, dan bawah kereta.

Gaya drag yang bekerja pada kereta dapat direduksi dengan beberapa metode, yaitu dengan merubah desain kereta secara keseluruhan, optimasi komponen kereta, dan modifikasi pada cara pengoperasian kereta (Baker, 2019). Pengubahan desain untuk mereduksi drag dapat dilakukan dengan melakukan *streamlining* pada bagian hidung dan ekor kereta. Pada kereta yang panjang, drag yang dihasilkan oleh perbedaan tekanan pada hidung dan ekor kereta tidak terlalu signifikan dan besarnya penurunan drag akan semakin kecil seiring derajat *streamlining* ditingkatkan. Cara lain adalah dengan membuat permukaan kereta serata mungkin sehingga terbebas dari tonjolan dan diskontinuitas. Cara terakhir yang dapat dilakukan untuk mereduksi drag adalah dengan menggunakan *fairing* di samping kereta yang dapat menutupi rongga *bogie* sehingga separasi aliran udara pada daerah *bogie* dapan diminimalisasi. *Fairing* adalah komponen pada kereta berupa pelat yang digunakan untuk mengurangi diskontinuitas pada permukaan kereta. *Fairing* dapat digunakan untuk menutupi celah antar gerbong, komponen di samping kereta, dan celah rongga bogie. *Bogie fairing* atau *bogie cover* adalah pelat yang dipasang di sisi samping kereta untuk menutup diskontinuitas pada sisi samping kereta akibat dari adanya rongga bogie. Berikut merupakan foto perbandingan kereta cepat yang menggunakan *bogie fairing* dan tidak menggunakan *bogie fairing* pada sisi samping kereta. Gambar 2.5(a) menampilkan kereta cepat yang tidak memiliki *bogie fairing* sehingga rongga bogie di sisi samping kereta terbuka. Penggunaan *bogie fairing* berukukuran setengah dan penuh ada pada gambar 2.5(b) dan gambar 2.5(c) di mana penggunaan bagian rongga bogie di sisi samping kereta dapat tertutupi.




**Gambar 2.5** *Bogie fairing* pada kereta cepat (a) tanpa *bogie fairing* (b) setengah *bogie fairing* (c) *bogie fairing* penuh (Wang et al, 2019)

Optimasi komponen kereta dapat dilakukan dengan mengevaluasi model kereta dengan simulasi numerik dan menambahkan variasi pada komponen kereta untuk mengoptimasi performa komponen kereta tersebut untuk mencapai performa yang diinginkan. Penyesuaian terhadap pengoperasian kereta juga dapat mempengaruhi drag dan konsumsi energi yang diperlukan kereta. Baker (2014b) menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan kereta yang tidak sesuai dapat meningkatkan konsumsi energi sebesar 4% yang mana ekuivalen dengan penambahan koefisien drag sebesar 7% - 8%.

### 2.1.5. Persamaan Tekanan

Udara yang bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah akan dipercepat alirannya, dan sebaliknya akan diperlambat jika udara bergerak dari tekan rendah ke tekanan tinggi.

Dengan mengasumsikan sebuah aliran udara sebagai *steady flow*, aliran tanpa gesekan, aliran sepanjang *streamline*, dan tidak

ada perbedaan densitas di sepanjang aliran (aliran *incompressible*), hubungan antara kecepatan dan tekanan aliran yang melewati bodi kendaraan dapat diekspresikan persamaan Bernoulli sebagai berikut.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} + gz = konstan \tag{2.12}$$

Dengan mengasumsikan tidak ada perubahan ketinggian di sepanjang aliran, makan persamaan Bernoulli dapat ditulis menjadi

$$\frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} = konstan \tag{2.13}$$

dimana

P : Tekanan udara (Pa)

ρ : Densitas udara (kg/m$^3$)

*u* : Kecepatan aliran udara (m/s)

Tekanan statis ($P_{statik}$) adalah tekanan yang diukur melalui suatu instrumen atau alat ukur dimana kecepatan alat ukur tersebut sama dengan kecepatan aliran fluida. Tekanan statis merupakan tekanan udara di setiap titik aliran. Tekanan dinamik ($P_{dinamik}$) menunjukkan energi kinetik tiap satuan volume. Tekanan stagnasi adalah tekanan yang diukur pada suatu titik dimana aliaran fluida diperlambat hingga kecepatannya mendekati nol dengan proses tanpa gesekan dan arah tumbukan aliran fluida tegak lurus dengan bidang tumbukan.

Rasio perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dangan tekanan static pada *free stream* dengan tekanan dinamik pada *free stream* disebut dengan koefisien

tekanan atau *presscure coefficient* (Cp). Nilai koefisien tekanan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$Cp = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 1 - \frac{u^2}{U^2} \tag{2.14}$$

dimana

P : Tekanan statik lokal atau tekanan pada kontur (Pa)

$P_\infty$ : Tekanan static *free stream* (Pa)

: Kecepatan lokal aliran (m/s)

U : Kecepatan *free stream* (m/s)

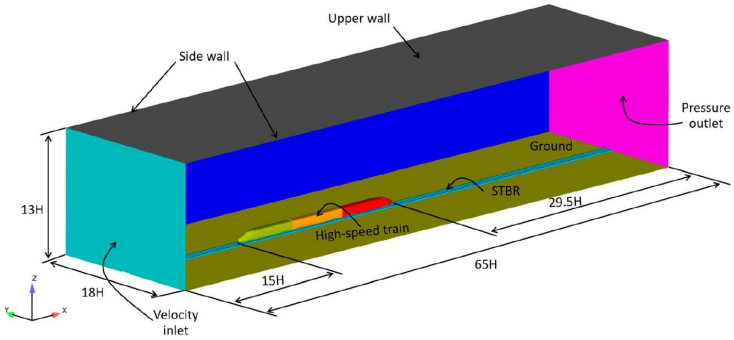
## 2.2 Penelitian Terdahulu

### 2.2.1. Pengaruh Penambahan *Bogie fairing* terhadap Karakteristik Aliran dan Performa Aerodinamika Kereta Cepat oleh Wang et al

Penelitian ini dilakukan **Wang et al (2019)** dengan memodelkan kereta cepat CRH2 menjadi tiga bagian, yakni *head car*, *middle car*, dan *tail car* dengan variasi tanpa *bogie fairing,* setengah *bogie fairing* dan *full-size bogie fairing*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *bogie fairing* terhadap performa aerodinamika dan karakteristik aliran yang melewati badan kereta. Sebagai contoh adalah nilai koefisien drag ($C_D$) kereta, distribusi *boundary layer*, dan distribusi tekanan.

Simulasi dilakukan dengan model turbulensi *IDDES with Shear Stress Transport (SST) k-ω* pada bilangan Reynolds Re = 1.85 x $10^6$. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi model kereta CRH2 tanpa *bogie fairing* dengan hasil eksperimen *wind tunnel*. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen menghasilkan perbedaan nilai $C_D$ sekitar 2%. Nilai koefisien drag hasil simulasi pada masing masing gerbong cukup

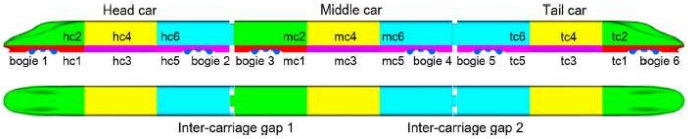
mendekati dengan nilai koefisien drag eksperimen sehingga pemodelan dianggap sesuai.




**Gambar 2.6** Dimensi domain simulasi (Wang et al, 2019)

Dari tiga variasi simulasi yang telah dilakukan, digunakan hasil simulasi model kereta CRH2 dengan setengah *bogie fairing* sebagai acuan perbandingan. Didapatkan bahwa jumlah total koefisien drag kereta CRH2 dengan setengah *bogie fairing* lebih rendah 14.62% daripada koefisien drag keretan CRH2 tanpa *bogie fairing*. Apabila dibandingkan dengan koefisien drag kereta CRH2 dengan *full-size bogie fairing*, nilai koefisien drag kereta CRH2 dengan setengah *bogie fairing* lebih besar 12.54% daripada kereta CRH2 dengan *full-size bogie fairing*. Nilai koefisien drag didapatkan dari jumlah koefisien drag pada masing-masing segmen kereta seperti pada gambar 2.7, dimana *case 1* adalah model kereta CRH2 tanpa *bogie fairing*, *case 2* adalah model kereta CRH2 dengan setengah *bogie fairing*, dan *case 3* adalah model kereta CRH2 dengan *full-size bogie fairing*.

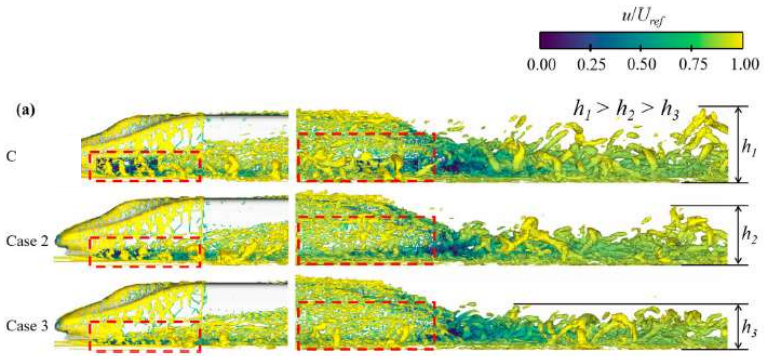
**Gambar 2.7** Variasi model simulasi kereta cepat CRH2 (a) Tanpa *bogie fairing* (b) Setengah *bogie fairing* (c) *full-size bogie fairing*. (Wang et al, 2019)




| | $C_d$ | | |
|---|---|---|---|
| Components | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
| hc1 | 0.1099 | 0.0878 | 0.0773 |
| hc2 | 0.0119 | 0.0102 | 0.0080 |
| hc3 | 0.0064 | 0.0063 | 0.0067 |
| hc4 | 0.0131 | 0.0132 | 0.0122 |
| hc5 | 0.0329 | 0.0171 | 0.0078 |
| hc6 | −0.0018 | −0.0129 | −0.0144 |
| bogie1 | 0.0056 | 0.0215 | 0.0094 |
| bogie2 | −0.0036 | 0.0029 | 0.0066 |
| Total head car | 0.1744 | 0.1461 | 0.1136 |
| mc1 | 0.0338 | 0.0271 | 0.0211 |
| mc2 | 0.0423 | 0.0492 | 0.0503 |
| mc3 | 0.0038 | 0.0043 | 0.0044 |
| mc4 | 0.0123 | 0.0127 | 0.0123 |
| mc5 | 0.0225 | 0.0087 | 0.0037 |
| mc6 | 0.0114 | −0.0068 | −0.0069 |
| bogie3 | −0.0023 | 0.0013 | 0.0038 |
| bogie4 | −0.0029 | 0.0005 | 0.0020 |
| Total middle car | 0.1209 | 0.0970 | 0.0907 |
| tc1 | 0.0430 | 0.0271 | 0.0187 |
| tc2 | 0.0598 | 0.0573 | 0.0574 |
| tc3 | 0.0039 | 0.0042 | 0.0043 |
| tc4 | 0.0121 | 0.0124 | 0.0124 |
| tc5 | 0.0300 | 0.0227 | 0.0167 |
| tc6 | 0.0313 | 0.0454 | 0.0436 |
| bogie5 | −0.0011 | 0.0004 | 0.0018 |
| bogie6 | 0.0009 | 0.0020 | 0.0034 |
| Total tail car | 0.1799 | 0.1715 | 0.1583 |
| Total | 0.4752 | 0.4146 | 0.3626 |

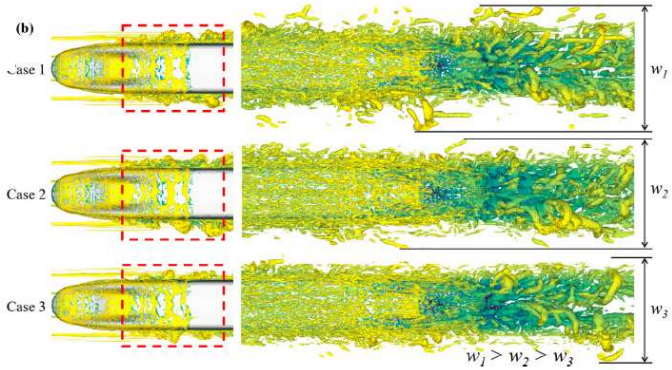
**Gambar 2.8** Nilai koefisien drag pada masing-masing segmen model kereta CRH2 (Wang et al, 2019)

Penambahan *bogie fairing* dapat mengurangi ukuran vortex yang terjadi di sekitar *bogie,* terbukti dari *vortex* yang terbentuk di sekitar *bogie* pada kasus 3 lebih kecil daripada kasus lainnya. Penambahan *bogie fairing* juga membantu memperkecil ukuran *wake* di belakang kereta. Dapat dilihat pada gambar 2.9 dan gambar 2.10 dimana tinggi dan lebar *wake* pada kereta dengan *full size bogie fairing* lebih kecil.

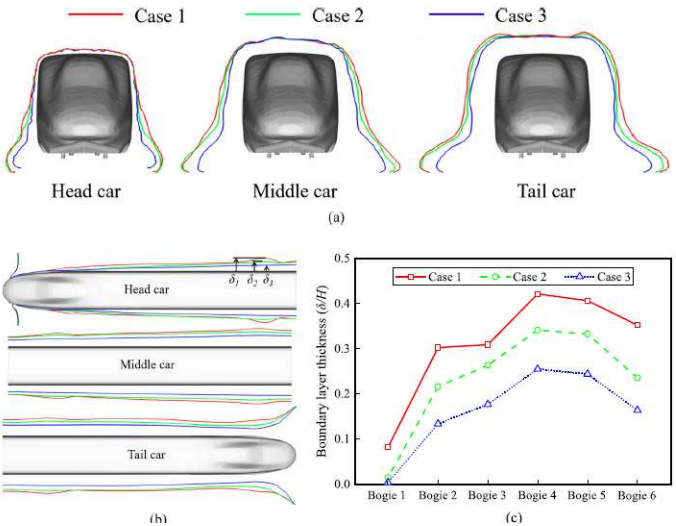



**Gambar 2.9** Pengaruh *Bogie fairing* terhadap Ukuran Vortex yang Terbentuk Pada Bogie (Wang et al, 2019)

Gaya drag yang bekerja pada kereta merupakan jumlah dari pengaruh *viscous drag* dan *pressure drag* yang terjadi pada kereta. Besar *viscous drag* yang terjadi pada kereta dipengaruhi oleh ketebalan *boundary layer*, dimana semakin tebal *boundary layer* maka menandakan adanya *viscous drag* yang besar. Gambar 2.11 (b) mengevaluasi ketebalan *boundary layer* pada ketinggian z/H=0.3 dan didapatkan bahwa secara keseluruhan ketebalan *boundary layer* pada kereta dengan *full-size bogie fairing* paling tipis.

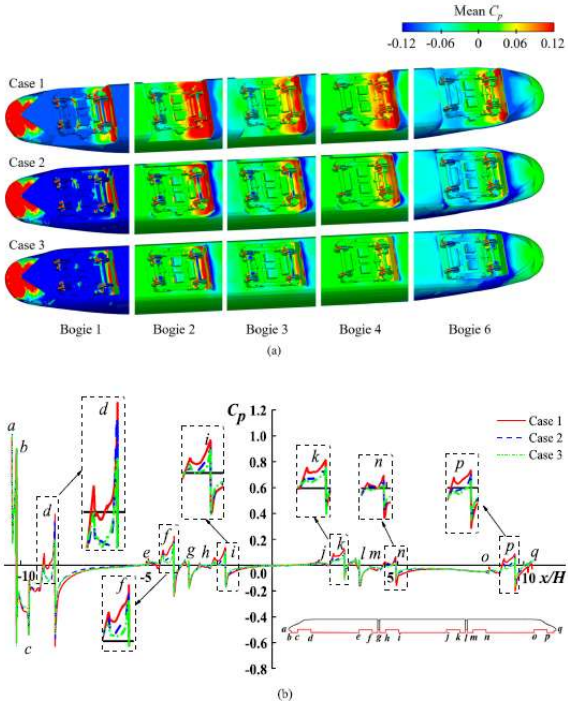



**Gambar 2.10** Pengaruh *Bogie fairing* terhadap Lebar *Wake* (Wang et al, 2019)




**Gambar 2.11** Distribusi *Boundary layer Thickness* (a) pada *head car, middle car,* dan *tail car* (b) pada ketinggian z/H=0.3 (c) di sekitar bogie. (Wang et al, 2019)

Penambahan *bogie fairing* menyebabkan menurunnya nilai koefisien tekanan ($C_P$) pada bagian belakang rongga *bogie* kereta. Kontur dan distribusi nilai $C_P$ pada bagian rongga *bogie* kereta dapat dilihat pada gambar 2.12. Nilai $C_P$ kereta tanpa *bogie fairing* pada daerah *bogie* pertama lebih besar daripada nilai $C_P$ kereta yang menggunakan *bogie fairing* karena aliran udara pada bagian bawah kereta akan langsung menghantam rongga *bogie* bagian belakang kereta sehingga terjadi *impact flow* yang cukup kuat. Dapat dilihat pada gambar 2.12(b) bahwa nilai Cp pada bagian *bogie endplate* tertinggi ada pada kereta tanpa *bogie fairing*.



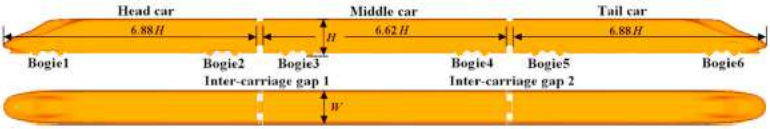

**Gambar 2.12** (a) Kontur $C_P$ pada *Underbody* Kereta CRH2 (b) Distribusi $C_P$ pada *Underbody* Kereta CRH2 (Wang et al, 2019)

Dapat disimpulkan bahwa penggunaan *full size bogie fairing* mampu menurunkan *drag* yang dialami kereta cepat sebesar 12,5% dibandingkan dengan desain kereta saat ini (*half size bogie fairing*). Konfigurasi *fairing* mempengaruhi aliran pada bagian bawah kereta, utamanya di bagian rongga *bogie*. Tidak ada pengaruh signifikan terhadap aliran pada bagian atas kereta.

### 2.2.2. Pengaruh Sudut *Bogie Cut Out* terhadap Karakteristik Aliran dan Performa Aerodinamika Kereta Cepat oleh Zhang et al

Penelitian ini dilakukan oleh **Zhang et al (2018)** untuk mengetahui pengaruh sudut *bogie cut out* terhadap karakteristik aliran udara di sekitar kereta dan *drag* yang dialami kereta. Penelitian dilakukan dengan metode numerik dan validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dengan menggunakan *wind tunnel*.

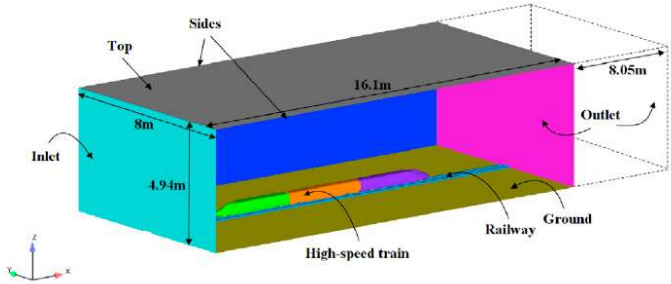
Model yang digunakan adalah model kereta cepat dengan skala 1:8 yang telah disederhanakan. Model terdiri dari lokomotif (*head car*), gerbong penumpang (*middle car*), dan lokomotif belakang (*tail car*), seluruhnya tanpa pantograf dan struktur pelengkap lainnya. Ketinggian kereta, H, sebesar 0,4625 m digunakan sebagai panjang karakteristik dalam proses simulasi. Gambar 2.13 menunjukkan geometri yang digunakan dalam simulasi.



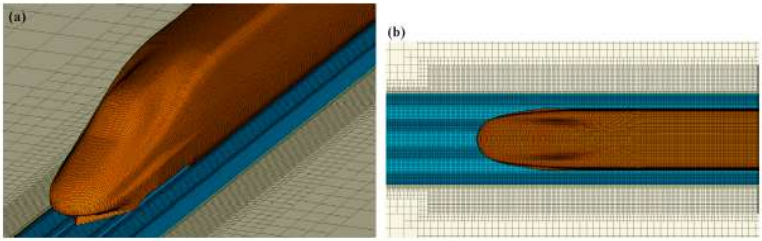

**Gambar 2.13** Model kereta cepat yang digunakan untuk simulasi (Zhang et al, 2018)

Penelitian terdahulu dilakukan pada *wind tunnel* dengan panjang 16,1 m, tinggi 4,94 m, dan lebar 8 m. Domain komputasi disesuaikan dengan dimensi *wind tunnel* pada penelitian

eksperimen, namun pada domain simulasi terdapat penambahan panjang domain sepanjang 8,05 m untuk membandingkan hasil simulasi dari domain tanpa penambahan panjang dan domain dengan penambahan panjang. Kereta dengan luas penampang depan seluas 0,175 $m^2$ menghasilkan rasio *blockage* sebesar 0,443% sehingga simulasi dapat dijalankan dengan asumsi *incompressibility*. Simulasi dilakukan pada bilangan Reynolds sebesar 1.85 x $10^6$. Pembuatan mesh dilakukan dengan menggunakan OpenFOAM dengan jumlah sel sebanyak 16 juta sel untuk *grid* kasar dan 23 juta sel untuk *grid* halus. Berikut merupakan gambar domain dan *mesh* dari simulasi yang dijalankan.

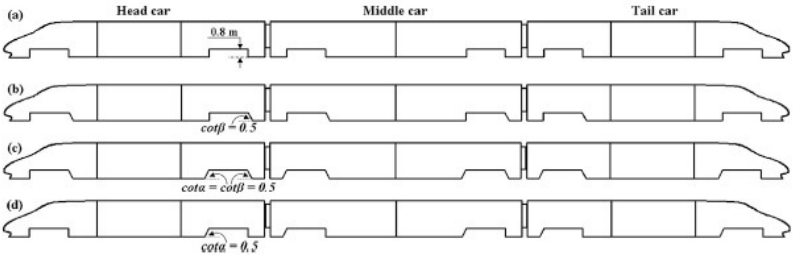



**Gambar 2.14** Dimensi domain simulasi (Zhang et al, 2018)




**Gambar 2.15** Distribusi *mesh* pada (a) lokomotif depan (b) permukaan tanah (Zhang et al, 2018)

Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah variasi sudut *cut out* pada bogie. Pada kasus pertama, digunakan *bogie cut out* tegak lurus dengan permukaan tanah, pada kasus kedua digunakan bogie *cut out* dengan sudut cotβ = 0,5 pada bogie bagian belakang, pada kasus ketiga digunakan bogie cut out dengan sudut cotα = cotβ = 0,5, dan pada kasus keempat digunakan *bogie cut out* dengan sudut cotα = 0,5. Gambar 2.15 menunjukkan ilustrasi variasi bentuk bogie *cut out* yang dilakukan.




**Gambar 2.16** Variasi bentuk bogie *cut out* untuk (a) Kasus 1 (b) Kasus 2 (c) Kasus 3 dan (d) Kasus 4 (Zhang et al, 2018)

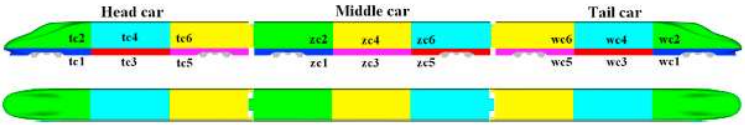
Simulasi dijalankan dengan metode *Detached Eddy Simulation* (DES) dengan Realizable k-ε. DES mampu memprediksi hambatan aerodinamik dan lokasi separasi dengan cukup akurat pada kendaraan darat. DES juga mampu memprediksi *trailing vortices* pada zona *wake* dengan baik. Tahap pertama simulasi dilakukan untuk melakukan validasi hasil simulasi simulasi dengan eksperimen *wind tunnel*. Nilai $C_d$ hasil simulasi dengan domain yang pendek cukup mirip dengan hasil eksperimen, dengan error kurang dari 2% untuk *grid* kasar dan *grid* halus.

**Tabel 2.1** Perbandingan Nilai $C_d$ pada Simulasi dan Eksperimen (Zhang et al, 2018)

Comparison between experimental and numerical results.

| Method | Grid | Cells | $C_{d\text{-Head car}}$ | $C_{d\text{-Middle car}}$ | $C_{d\text{-Tail car}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Numerical simulation (Short domain) | Coarse grid | 16 million | 0.144 | 0.081 | 0.160 |
| | Fine grid | 23 million | 0.145 | 0.082 | 0.160 |
| Numerical simulation (Long domain) | Coarse grid | 20 million | 0.149 | 0.077 | 0.159 |
| Wind tunnel test (Zhang and Zhou, 2013) | – | – | 0.145 | – | 0.163 |
| IDDES (Niu et al., 2017) | – | 25 million | 0.1404 | 0.0764 | 0.1661 |

Zhang et al membagi kereta menjadi 18 bagian untuk menganalisa koefisien drag pada bagian – bagian kereta tersebut. Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa total drag pada kasus keempat paling kecil apabila dibandingkan dengan kasus lainnya. Kasus ketiga menghasilkan nilai drag yang paling besar. Pada seluruh kasus, nilai koefisen drag pada segmen tc1 paling besar daripada segmen lainnya.



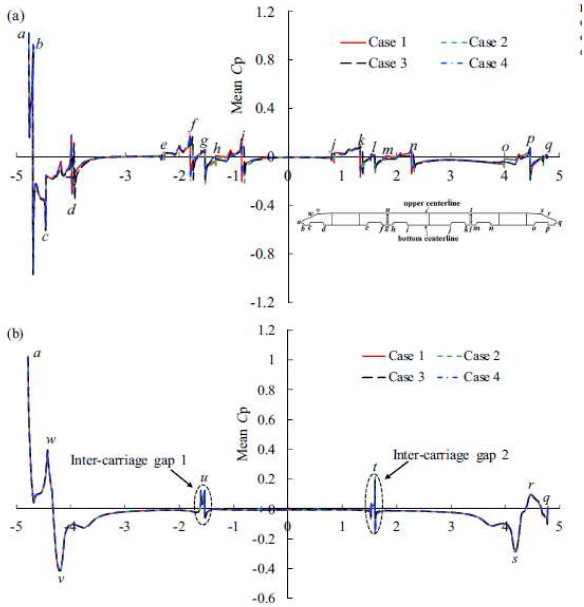

**Gambar 2.17** Pembagian daerah analisis koefisien drag (Zhang et al, 2018)

**Tabel 2.2** Nilai $C_d$ di Setiap Bagian Kereta (Zhang et al, 2018)

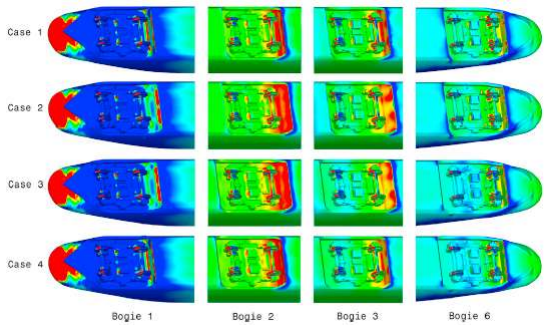
Aerodynamic drag coefficient $C_d$ of each part.

| Component | $C_d$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 |
| tc1 (head car) | 0.0905 | 0.0916 | 0.0916 | 0.0905 |
| tc2 | 0.0231 | 0.0224 | 0.0224 | 0.0231 |
| tc3 | 0.0068 | 0.0070 | 0.0070 | 0.0068 |
| tc4 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 | 0.0130 |
| tc5 | 0.0173 | 0.0210 | 0.0235 | 0.0204 |
| tc6 | −0.0088 | −0.0001 | 0.0007 | −0.0078 |
| Total head car | 0.1419 | 0.1549 | 0.1582 | 0.1460 |
| zc1 (middle car) | 0.0339 | 0.0285 | 0.0291 | 0.0303 |
| zc2 | 0.0409 | 0.0380 | 0.0372 | 0.0432 |
| zc3 | 0.0044 | 0.0042 | 0.0042 | 0.0043 |
| zc4 | 0.0102 | 0.0104 | 0.0104 | 0.0102 |
| zc5 | 0.0176 | 0.0177 | 0.0187 | 0.0171 |
| zc6 | −0.0088 | 0.0001 | −0.0028 | −0.0106 |
| Total middle car | 0.0982 | 0.0989 | 0.0968 | 0.0945 |
| wc1 (tail car) | 0.0329 | 0.0328 | 0.0317 | 0.0283 |
| wc2 | 0.0635 | 0.0638 | 0.0624 | 0.0621 |
| wc3 | 0.0041 | 0.0040 | 0.0040 | 0.0041 |
| wc4 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 | 0.0106 |
| wc5 | 0.0214 | 0.0196 | 0.0210 | 0.0217 |
| wc6 | 0.0350 | 0.0287 | 0.0309 | 0.0365 |
| Total tail car | 0.1675 | 0.1595 | 0.1606 | 0.1633 |
| Total | 0.4076 | 0.4133 | 0.4156 | 0.4038 |

Penelitian ini juga mengevaluasi pengaruh sudut *cut out* pada rongga *bogie* terhadap distribusi koefisien tekanan sepanjang kereta cepat dan *boundary layer* yang terbentuk. Gambar 2.18 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada bagian bawah kereta dan pada bagian atas kereta. Pada bagian bawah kereta, Cp relative konstan kecuali di sekitar *bogie* kereta. Penggunaan *bogie* endplate tegak pada kasus 1 dan 4 menghasilkan tekanan yang lebih besar daripada *bogie* endplate miring pada kasus 2 dan 3 namun secara umum, sudut rongga *bogie* tidak terlalu berpengaruh terhadap distribusi Cp di permukaan kereta.

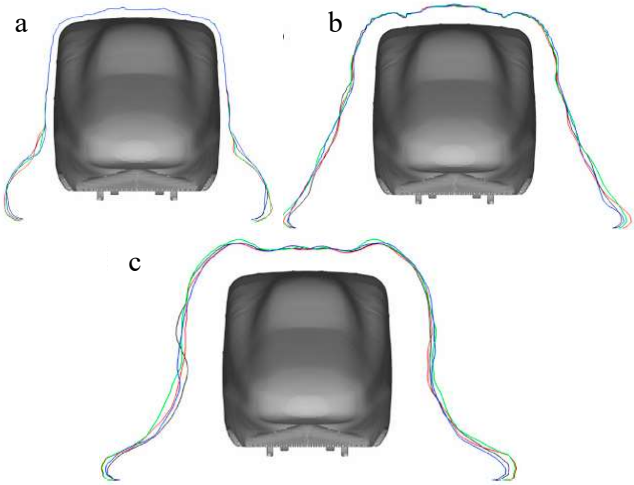



**Gambar 2.18** Distribusi $C_p$ pada *centerline* kereta (a) bagian bawah (b) bagian atas (Zhang et al, 2018)




**Gambar 2.19** Kontur $C_p$ pada bagian bawah kereta (Zhang et al, 2018)

Gambar 2.20 Menunjukkan *boundary layer* pada bagian tengah masing masing *car*. Garis hitam menunjukkan *boundary layer* pada kasus pertama, garis merah untuk kasus kedua, garis hijau untuk kasus ketiga, dan garis biru untuk kasus keempat. Secara umum *boundary layer* pada seluruh kasus tidak memiliki perbedaan yang signifikan.



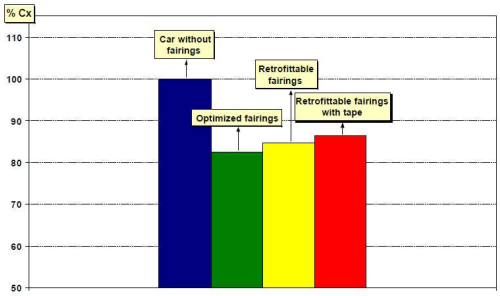

**Gambar 2.20** *Boundary layer* pada (a) lokomotif depan (b) gerbong penumpang (c) lokomotif belakang. (Zhang et al, 2018)

Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan bahwa nilai koefisien drag terkecil didapatkan dengan menggunakan sudut *bogie cut out* pada kasus keempat. Apabila dibandingkan dengan kereta dengan sudut *cut out* tegak (kasus pertama), penggunaan bogie cut out pada kasus keempat dapat mengurangi drag hingga 2,35%. Zhang et al (2018) menyarankan untuk menggunakan sudut *bogie cut out* pada kasus pertama karena untuk penggunaan sudut *bogie cut out* pada kasus keempat membutuhkan mekanisme untuk merubah sudut ketika kereta harus bergerak ke arah sebaliknya.

### 2.2.3. Pengaruh *Bogie fairing* terhadap *Aerodynamic Drag* Kereta Cepat ETR 500 oleh Mancini et al

Penelitian ini dilakukan oleh **Mancini et al (2001)** dilakukan untuk menganalisa pengaruh penambahan *bogie fairing* terhadap *drag* yang terjadi pada kereta cepat ETR 500 secara eksperimental. Pengambilan data dilakukan dengan dua tahap. Pengambilan data tahap pertama dilakukan dalam *wind tunnel* dengan model kereta cepat ETR 500 dengan skala 1:7.5 dengan konfigurasi satu lokomotif dan dua gerbong. Pengambilan data tahap kedua dilakukan secara langsung di lapangan dengan menggunakan kereta cepat ETR 500.

Pada pengambilan data tahap pertama, dilakukan variasi penggunaan *bogie fairing* yang dioptimasi, faring *retrofittable,* fairing *retrofittable with tape*, dan tanpa *bogie fairing*. Dari pengambilan data tahap pertama, didapatkan persentase penurunan kofisien drag dengan penggunaan *bogie fairing* dimana penggunaan *bogie fairing* yang dioptimasi dapat menurunkan koefisien drag kereta hingga 20 %.




**Gambar 2.21** Grafik persentase penurunan koefisien drag dengan penggunaan *bogie fairing* (Mancini et al, 2001)

Pengambilan data tahap kedua dilakukan dengan variasi kereta tanpa *bogie fairing*, kereta dengan *bogie fairing*, penambahan jumlah gerbong. Pengambilan data tahap kedua dilakukan untuk mengetahui pengaruh *bogie fairing* terhadap

*overall drag* yang dialami kereta dan pengaruh penambahan gerbong terhadap *drag* yang dialami kereta. Pada bagian lokomotif, digunakan *bogie fairing* dengan lubang pada bagian tengahnya agar indikator rem pada kereta dapat diamati. Gambar 2.22 menampilkan bogie lokomotif dengan dan tanpa fairing.

**Gambar 2.22** *Bogie fairing* pada pengujian *full scale* lokomotif (Mancini et al, 2001)

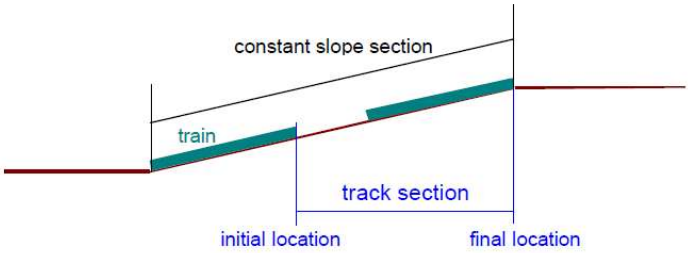
Pada bagian gerbong, digunakan *bogie fairing* yang terdiri dari dua komponen , yaitu *bogie fairing* yang dipasangkan pada badan kereta dan *bogie fairing* yang dipasangkan pada bogie kereta.

**Gambar 2.23** *Bogie fairing* pada pengujian *full scale* gerbong penumpang (Mancini et al, 2001)

Eksperimen dilakukan dengan dua lokomotif dan delapan gerbong. Nilai drag keseluruhan yang dialami kereta dihitung dengan menggunakan persamaan energi mekanik, pengambilan data dilakukan pada kondisi kereta meluncur sehingga tidak ada gaya traksi yang terjadi. Lintasan yang digunakan dalam

pengambilan data adalah rel menanjak dengan kemiringan konstan, pengambilan data dilakukan pada jarak tempuh lintasan sepanjang 400 m, 800 m, dan 1200 m.

Pengambilan data dilakukan sebanyak 95 kali dengan tiga konfigurasi. Konfigurasi pertama terdiri dari dua lokomotif dan delapan gerbong tanpa *bogie fairing,* konfigurasi kedua terdiri dari dua lokomotif dan delapan gerbong dengan *bogie fairing*, dan konfigurasi ketiga dengan dua lokomotif dan tiga gerbong untuk mengetahui pengaruh penambahan panjang kereta terhadap gaya drag. Pengambilan data dilakukan pada kecepatan 100 km/jam hingga 300 km/jam.

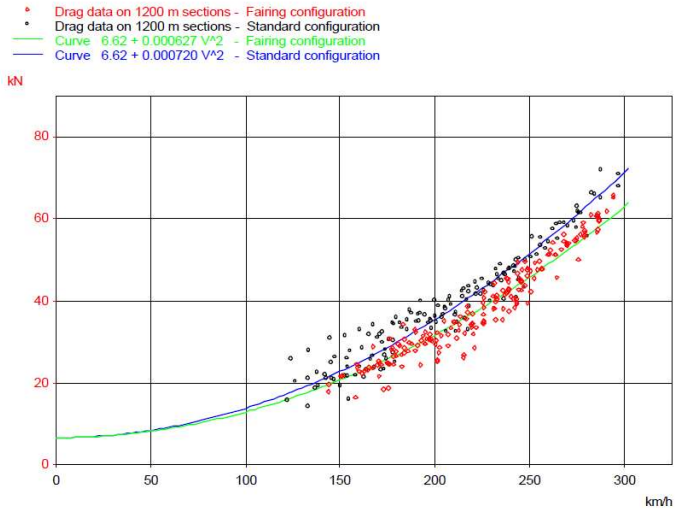



**Gambar 2.24** Ilustrasi tempat pengambila data pengujian *full scale* (Mancini et al, 2001)

Berdasarkan eksperimen, drag yang dialami kereta dengan *bogie fairing* lebih kecil 9,2 % hingga 11,7 % daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Eksperimen *full scale* ini mengabaikan pengaruh angin ketika pengambilan data.

**Tabel 2.3** Perbedaan Gaya *Drag* pada Kereta Tanpa *Bogie fairing* dan dengan *Bogie fairing* (Mancini et al, 2001)

| Velocity [ km/h ] | Standard train [ kN ] | Fairings [ kN ] | Drag difference [ kN ] | Drag difference [ % ] |
|---|---|---|---|---|
| 150 | 22.8 | 20.7 | -2.1 | -9.2 |
| 200 | 35.4 | 31.7 | -3.7 | -10.5 |
| 250 | 51.6 | 45.8 | -5.8 | -11.3 |
| 280 | 63.0 | 55.8 | -7.3 | -11.6 |
| 300 | 71.4 | 63.0 | -8.4 | -11.7 |



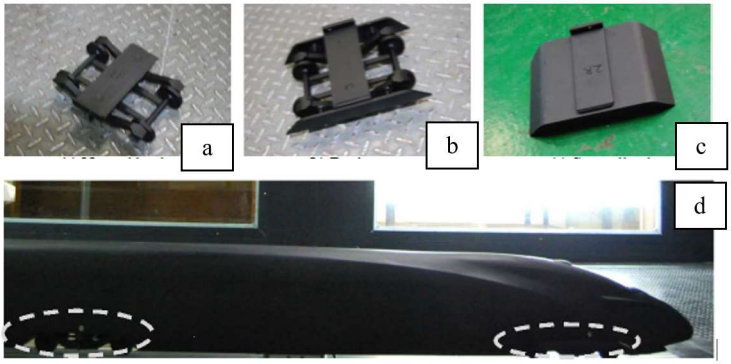

**Gambar 2.25** Grafik peningkatan gaya drag seiring peningkatan kecepatan kereta (Mancini et al, 2001)

### 2.2.4. Studi Eksperimental Karakteristik *Aerodynamic Drag* dengan Variasi Bentuk *Underbody* Kereta oleh Kwak et al.

Penelitian tentang pengaruh bentuk underbody terhadap daya hambat yang dialami oleh kereta dilakukan oleh **Kwak et al (2012)**. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan model kereta cepat HEMU-430x dengan skala 1:20 di dalam *wind tunnel* dengan blockage ratio sebesar 0,3 %.

Pengujian dilakukan pada kecepatan 30 m/s, 40 m/s, 50 m//s, dan 60 m/s dengan bilangan Reynolds sebesar 370.000 hingga 620.000.

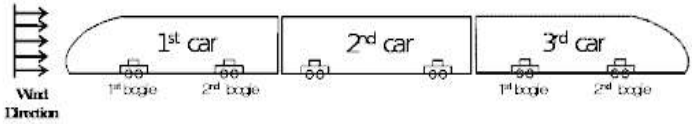
Model kereta cepat HEMU-430x yang digunakan terdiri dari model 3-*car* dan 5-*car* dengan variasi pengujian bogie normal, bogie dengan bogie *cover* (*bogie fairing*), dan *streamlined bogie*. Perubahan variasi dilakukan dengan mengganti bagian bogie model kereta HEMU-430x dengan bogie yang dapat ditukar seperti pada gambar 2.24




**Gambar 2.26** Variasi bentuk bogie dan letak bogie (a) *bogie* standar (b) *bogie* dengan *bogie cover* (c) *streamlined bogie* (d) letak *bogie* pada model kereta HEMU-430x (Kwak et al, 2012)

Pengujian dengan model 3-*car* dilakukan dengan konfigurasi seperti pada gambar 2.27 dan dengan variasi perubahan bogie pada lokomotif depan dan lokomotif belakang. Gambar 2.28 menyajikan besar gaya *drag* yang dialami oleh lokomotif depan dimana variasi bogie hanya diterapkan pada lokomotif depan, sedangkan pada lokomotif belakang dan gerbong penumpang digunakan bogie normal. Gaya *drag* yang dialami oleh kereta pada penggunaan bogie normal lebih besar daripada gaya drag yang dialami kereta dengan penggunan bogie berpenutup dan *streamlined bogie*. Hal serupa juga terjadi dengan penerapan

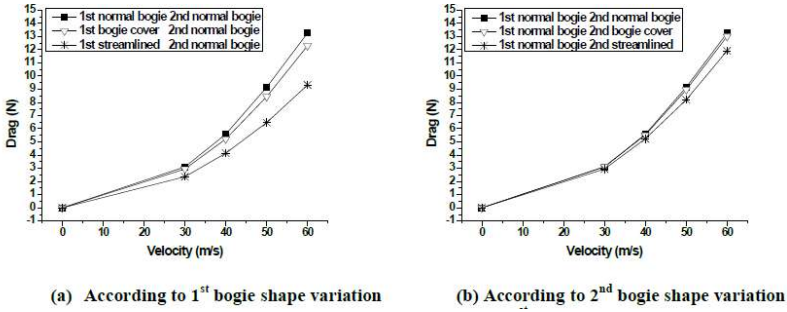
variasi bogie kedua pada lokomotif depan dan bogie normal pada lokomotif belakang dan gerbong penumpang.




**Gambar 2.27** Konfigurasi 3-*car* (Kwak et al, 2012)

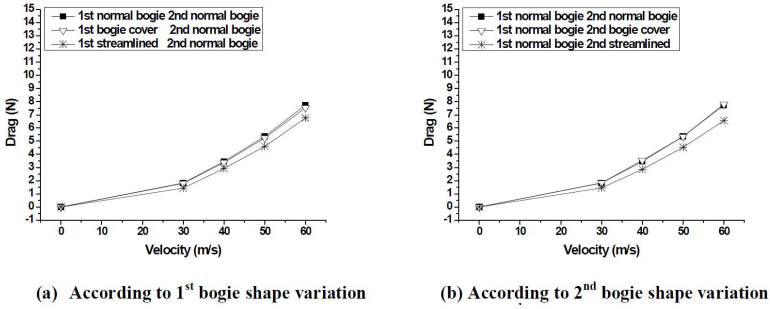
Penggunaan *streamlined bogie* dan *bogie* berpenutup pada bogie pertama lokomotif depan mampu menurunkan gaya drag kereta. Variasi di *bogie* pertama lebih berpengaruh terhadap pengurangan gaya drag yang dialami lokomotif depan daripada variasi bogie pada bogie kedua lokomotif depan karena bogie pertama berhadapan dengan aliran *freestream* secara langsung.

Pengujian model 3-*car* selanjutnya dilakukan dengan melakukan variasi bogie pada lokomotif belakang. Gaya drag yang terjadi pada *tail car* dapat dilihat pada gambar 2.29 Besar gaya drag yang dialami lokomotif belakang lebih kecil daripada lokomotif depan. Penggunaan bogie berpenutup tidak berpengaruh banyak terhadap *drag* lokomotif belakang. Penurunan gaya *drag* terjadi ketika *streamlined* bogie digunakan.




(a) According to 1st bogie shape variation (b) According to 2nd bogie shape variation

**Gambar 2.28** Gaya drag dengan penggunaan variasi bogie pada (a) Variasi bogie pertama lokomotif depan (b) Variasi bogie kedua lokomotif depan (Kwak et al, 2012)

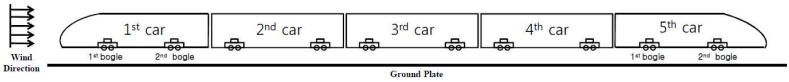



(a) According to 1st bogie shape variation (b) According to 2nd bogie shape variation

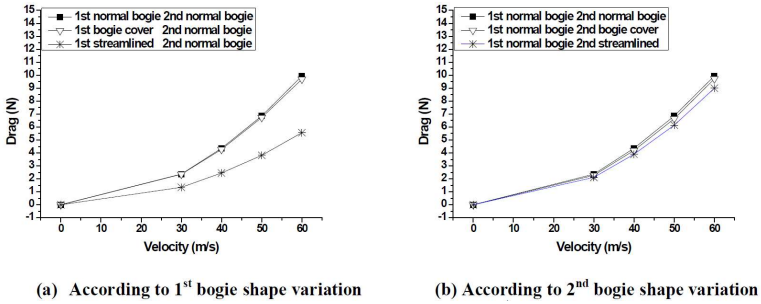
**Gambar 2.29** Gaya drag pada lokomotif belakang (a) Variasi bogie pertama lokomotif belakang (b) Variasi bogie kedua lokomotif belakang (Kwak et al, 2012)

Pengujian dengan model 5-*car* dilakukan dengan konfigurasi kereta seperti pada gambar 2.30. Variasi yang dilakukan adalah variasi pada bogie lokomotif depan dan belakang seperti yang dilakukan pada pengujian dengan 3-*car*. Gambar 2.31 menunjukkan perubahan gaya drag yang terjadi pada lokomotif depan dan belakang dengan variasi bogie tertentu. Dapat terlihat bahwa terdapat penurunan gaya drag dengan penggunaan bogie

berpenutup meskipun selisih nilai dragnya dengan bogie normal tidak terlalu signifikan.

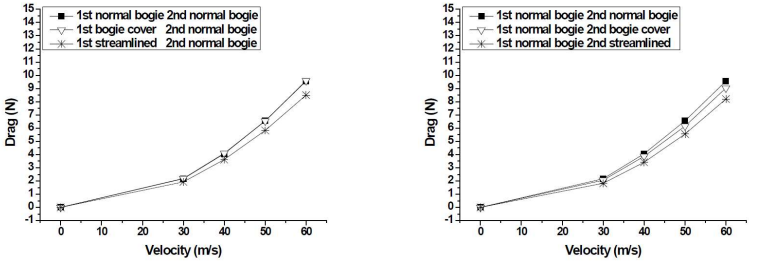



**Gambar 2.30** Konfigurasi 5-*car* (Kwak et al, 2012)




(a) According to 1st bogie shape variation (b) According to 2nd bogie shape variation

**Gambar 2.31** Gaya drag pada lokomotif depan (a) Variasi bogie pertama lokomotif depan (b) Variasi bogie kedua lokomotif depan (Kwak et al, 2012)




(a) According to 1st bogie shape variation (b) According to 2nd bogie shape variation

**Gambar 2.32** Gaya drag pada lokomotif belakang (a) Variasi bogie pertama lokomotif belakang (b) Variasi bogie kedua lokomotif belakang (Kwak et al, 2012)

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan variasi bogie untuk lokomotif depan dan belakang, sementara bogie yang digunakan untuk gerbong penumpang adalah bogie biasa. Pengujian dilakukan dengan kecepatan uji sebesar 60 m/s. Berikut merupakan tabel konfigurasi pengujian beserta persentase penurunan gaya drag yang terjadi pada kereta dengan variasi bogie normal dan bogie berpenutup.

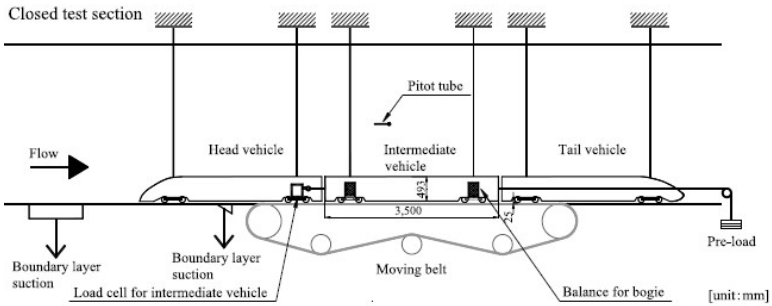
**Tabel 2.4** Pengaruh *Bogie Cover* terhadap Penurunan Gaya *Drag* (Kwak et al, 2012)

| Case | Bogie Shape Configuration | | | | | Decrease Rate | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1st car (nose) | | Passenger cars | Last car (tail) | | 3-car test | 5-car test |
| | 1st bogie | 2nd bogie | | 1st bogie | 2nd bogie | | |
| 1 | Normal bogie | Normal bogie | Normal bogie | Normal bogie | Normal bogie | - | - |
| 2 | Bogie cover | Normal bogie | Normal bogie | Normal bogie | Bogie cover | 3.7% | 3.5% |
| 3 | Bogie cover | Bogie cover | Normal bogie | Bogie cover | Bogie cover | 7.6% | 5.2% |

Dapat dilihat bahwa penggunaan bogie berpenutup mampu menurunkan gaya drag yang dialami oleh kereta sebesar 7,6 % untuk konfigurasi 3 *car* dan sebesar 5,2 % untuk konfigurasi 5 *car*.

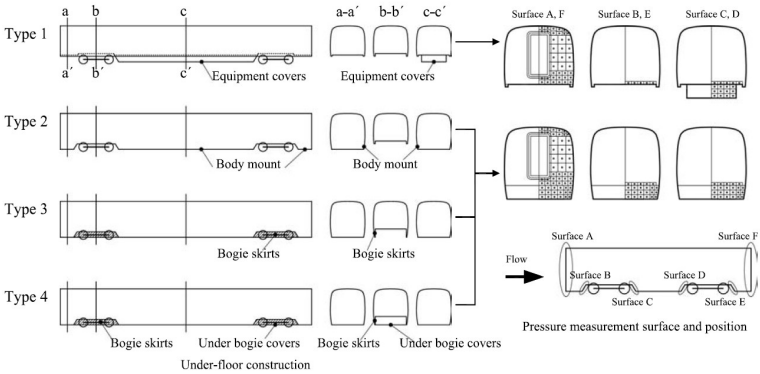
### 2.2.5. Pengujian *Wind Tunnel* untuk Mengurangi Hambatan Aerodinamik Kereta dengan Meratakan Konstruksi *Underfloor* Kereta oleh Ido et al.

Pengujian aerodinamika kereta cepat dengan menggunakan wind tunnel telah dilakukan oleh **Ido et al** pada tahun 2001. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh konstruksi *underfloor* terhadap *aerodynamic drag* yang dialami oleh bogie dan gerbong penumpang. Pengujian dilakukan dalam *wind tunnel* dengan lebar 5 m, tinggi 3 m, dan panjang 20 m dengan sabuk berjalan dan *boundary layer suction device*. Berikut adalah gambar konfigurasi pengujian pada *wind tunnel*.

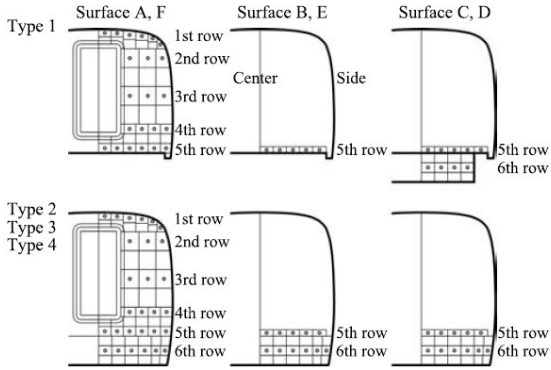



**Gambar 2.33** Ilustrasi gambar pengujian kereta pada wind tunnel (Ido et al, 2001)

Pengujian dilakukan pada kecepatan aliran sebesar 50 m/s dengan empat variasi model. Model tipe 1 hanya menggunakan penutup peralatan pada bagian bawah kereta, model tipe 2 menggunakan penutup yang disesuaikan dengan bentuk badan kereta, model tipe 3 merupakan model tipe 2 dengan *bogie skirts* dan model tipe 4 adalah model tipe 3 dengan penutup bogie bagian bawah. Ilustrasi model kereta dan penempatan sensor tekanan udara dapat dilihat pada gambar 2.34

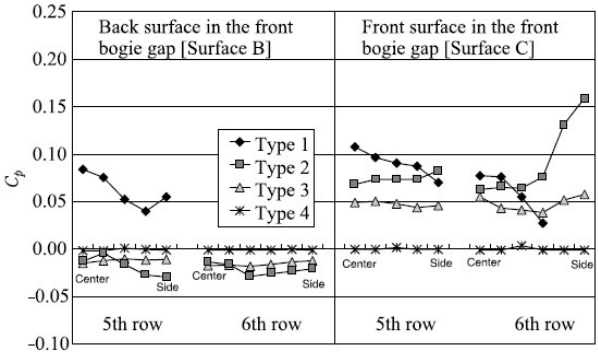



**Gambar 2.34** Ilustrasi variasi underbody kereta (Ido et al, 2001)

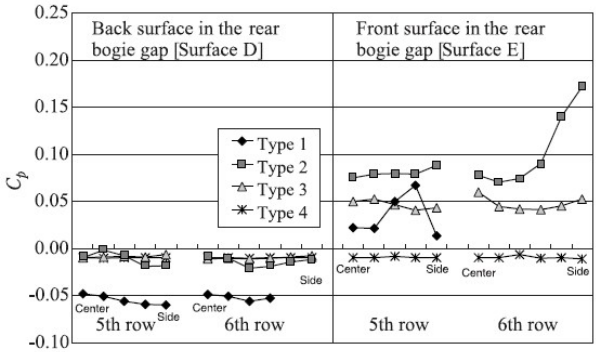



**Gambar 2.35** Ilustrasi penempatan sensor tekanan (Ido et al, 2001)

Berdasarkan gambar 2.34 apabila terdapat tekanan udara yang bernilai positif pada permukaan A, C, dan E dan tekanan udara yang bernilai negatif pada permukaan B, D, F, akan timbul hambatan aerodinamik yang arahnya searah dengan *freestream*. Berdasarkan dari hasil eksperimen, grafik koefisien tekanan pada permukaan yang diamati dapat dilihat pada gambar 2.36 dan gambar 2.37. Apabila hasil pengujian model tipe 2 dan model 3 dibandingkan, tekanan pada sisi C dan E pada pengujian model 2 jauh lebih besar daripada pengujian dengan model 3. Hal ini disebabkan karena penggunaan *bogie skirt* dapat mengalangi aliran udara untuk mengalir ke daerah bogie dan membentur permukaan C dan E. Pada pengujian dengan model tipe 1, nilai absolut tekanan negatif pada permukaan D lebih besar daripada tekanan pada model tipe 2 dan 3. Pada pengujian dengan model tipe 4, distribusi tekanan sepanjang lebar kereta relative konstan karena penutup bogie bagian bawah dapat menghalangi aliran udara untuk masuk ke ruang bogie.



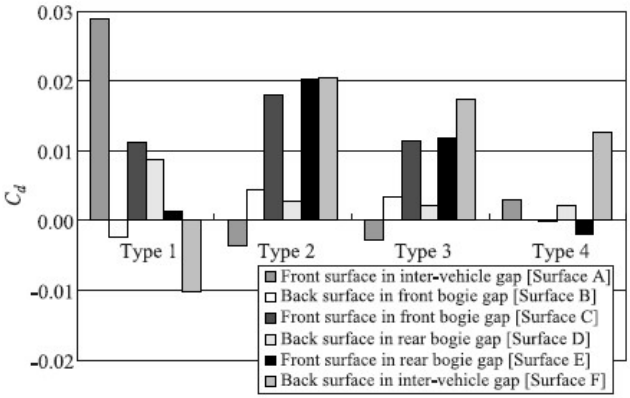

**Gambar 2.36** Cistribusi $C_p$ pada permukaan B dan C (Ido et al, 2001




**Gambar 2.37** Distribusi $C_p$ pada permukaan D dan C (Ido et al, 2001)

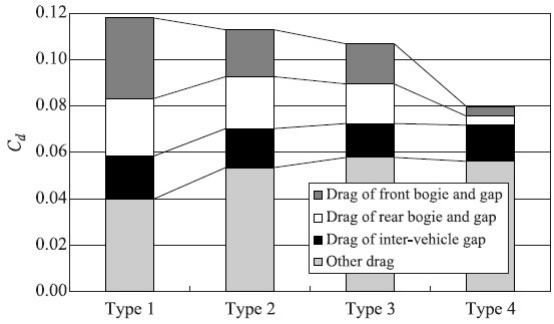
Gaya yang bekerja pada masing masing permukaan uji dapat dihitung dengan mengintegrasikan hasil pengukuran tekanan. Didapatkan gaya yang bekerja pada masing masing permukaan uji dalam bentuk koefisien drag seperti pada gambar 2.38. Pada pengujian dengan model tipe 1, hambatan aerodinamik paling besar bekerja pada celah antar gerbong bagian depan. Pada pengujian dengan model tipe 2 dan 3, hambatan aerodinamik

paling besar bekerja pada bagian belakang gerbong. Secara keseluruhan, model tipe 3 mengalami hambatan yang lebih kecil daripada model tipe 2. Pada model tipe 4, hambatan terbesar berada di bagian belakang gerbong sementara bagian sisi depan gerbong hingga bogie bagian belakang tidak mengalami gaya hambat yang signifikan. Koefisien hambatan udara ($C_d$) untuk gerbong penumpang beserta bogienya dapat dapat dilihat pada gambar 2.39.




**Gambar 2.38** $C_d$ pada setiap permukaan uji pada gerbong penumpang (Ido et al, 2001)

Gambar 2.39 menampilkan koefisien drag dari intermediate car pada pengujian yang dilakukan dan didapatkan bahwa konstruksi *underbody* tipe satu menghasilkan koefisien drag terbesar, sementara underbody tipe empat menghasilkan koefisien drag paling kecil.




**Gambar 2.39** Total drag pada gerbong penumpang dengan variasi underbody (Ido et al, 2001)

# BAB III
# METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode numerik menggunakan *software* ANSYS Fluent 18.1. Dalam penelitian, terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan, yaitu tahap *preprocessing, solving* atau *processing*, dan *postprocessing*.

## 3.1 Variasi Simulasi

Model kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya berupa geometri tiga dimensi. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah penambahan *bogie fairing* terhadap geometri dasar desain kereta semi-cepat Jakarta-Surabaya. Kedua model diuji pada dua kecepatan yang berbeda, berikut merupakan tabel variasi parameter yang diuji dalam penelitian ini.

**Tabel 3.1** Variasi Penelitian

| Parameter | Variasi |
|---|---|
| Geometri Kereta | Kereta semicepat tanpa *bogie fairing* dan kereta semi cepat dengan penambahan *bogie fairing*. |
| Kecepatan inlet | 44,44 m/s dan 33,33 m/s |
| $Re_H$ | 10.343.835,923 dan 7.757.876,941 |

## 3.2 *Preprocessing*

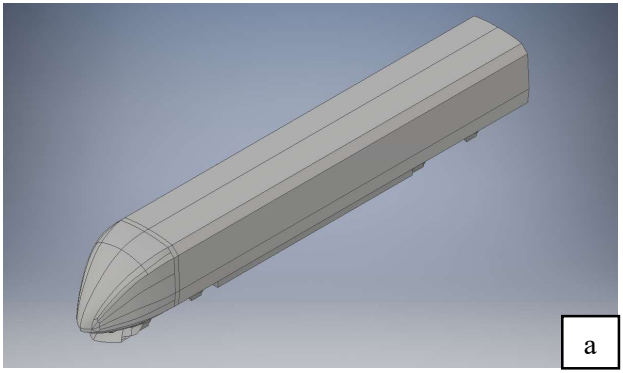
*Preprocessing* merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi fluida. Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

### 3.2.1 Geometri Desain Kereta Semi-Cepat Jakarta-Surabaya

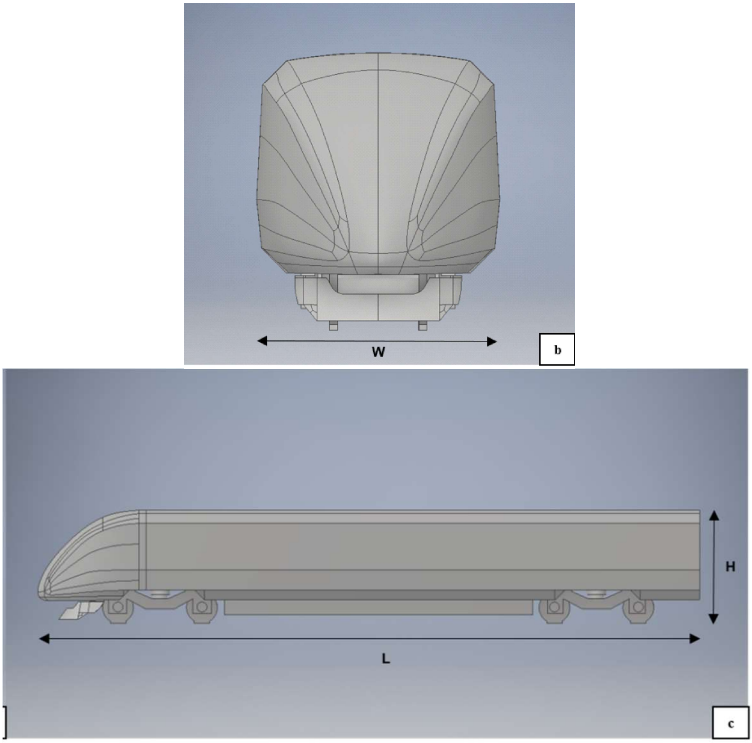
Terdapat dua geometri kereta yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu geometri kereta standar, dan geometri kereta dengan penambahan *bogie fairing*. Karena keterbatasan perangkat keras simulasi, geometri yang digunakan hanya geometri desain lokomotif kereta semicepat Jakarta-Surabaya. Tabel 3.2 menyajikan dimensi umum dari desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya, yaitu tinggi, panjang, dan lebar kereta. Gambar desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya tanpa *bogie fairing* dapat dilihat pada gambar 3.1.

**Tabel 3.2** Dimensi Kereta

| Parameter | Dimensi |
|---|---|
| Tinggi (H) | 3,4 m |
| Panjang (L) | 20,03 m |
| Lebar (W) | 3 m |

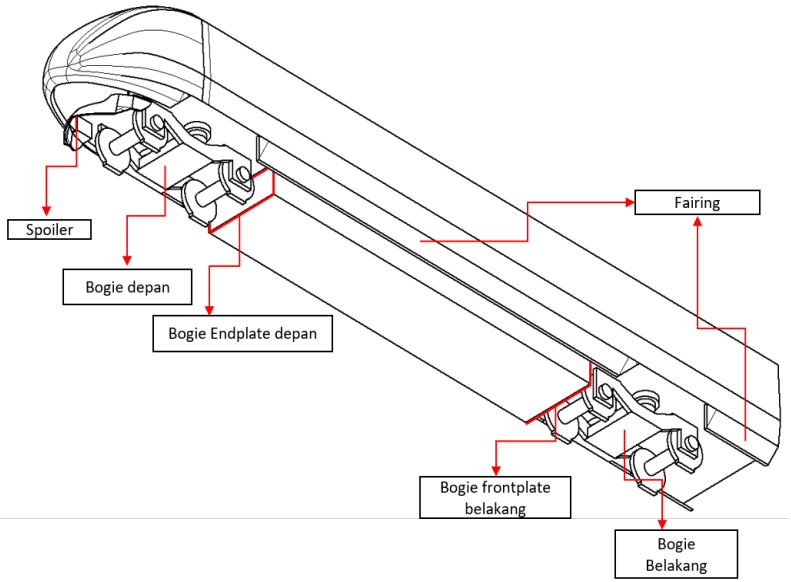



**Gambar 3.1** Geometri desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (berlanjut)

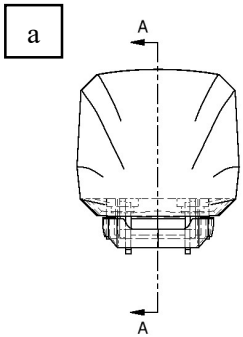



**Gambar 3.1** Geometri dasar desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (lanjutan)

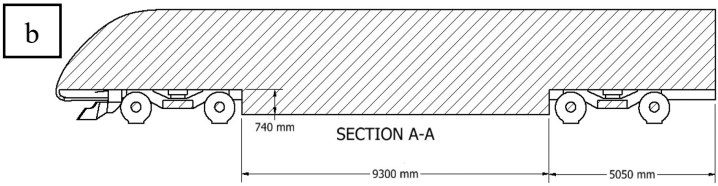
Pada geometri dasar, di bagian bawah kereta terdapat balok yang merupakan simplifikasi dari komponen di bagian underbody kereta dimana permukaan balok yang tegak lurus arah aliran adalah bagian bogie endplate dan frontplate kereta, ilustrasi bagian bawah kereta dapat dilihat pada gambar 3.2. Gambar 3.3 menampilkan gambar sisi belakang kereta dan potongan pada bagian *midspan* kereta beserta dimensi dari balok pada bagian bawah kereta.



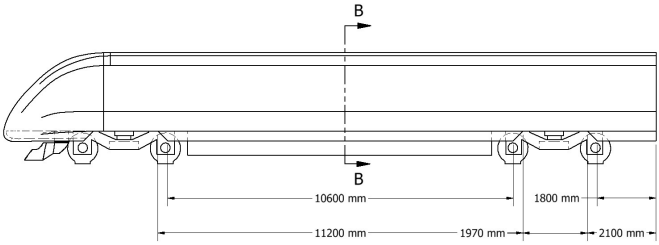

**Gambar 3.2** Ilustrasi bagian bawah geometri dasar model kereta semicepat Jakarta – Surabaya.

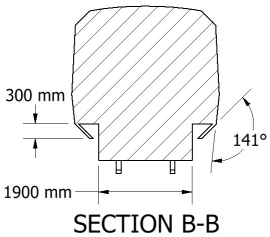



**Gambar 3.3** Ilustrasi tampak depan dan gambar potongan pada tengah kereta (a) tampak depan (b) tampak potongan (berlanjut)




**Gambar 3.3** Ilustrasi tampak depan dan gambar potongan pada tengah kereta (a) tampak depan (b) tampak potongan (lanjutan)

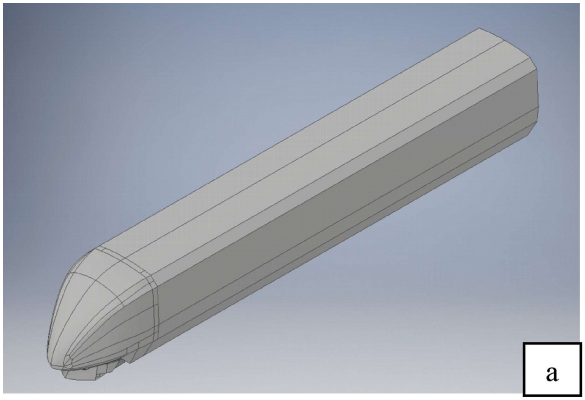


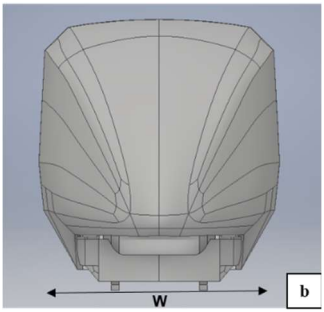




**Gambar 3.4** Dimensi fairing pada model kereta semicepat Jakarta – Surabaya tanpa *bogie fairing*.

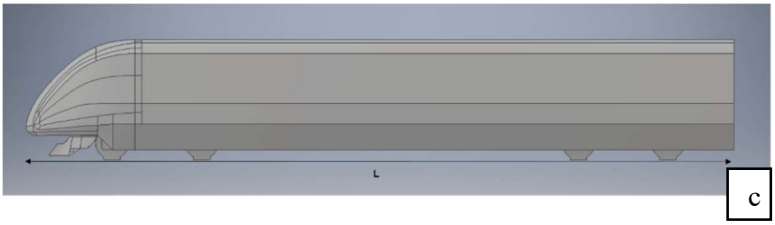
Pada model kereta dengan *bogie fairing*, dilakukan modifikasi dengan cara menambahkan plat pada sisi samping kereta semicepat, sehingga bagian samping kereta tertutupi hingga ke daerah bogie depan dan belakang. Pada penelitian terdahulu, *bogie fairing* dapat disambungkan secara dengan spoiler secara langsung karena spoiler menyatu dengan bagian bawah nose

kereta, namun hal tersebut tidak dapat dilakukan pada desain kereta semicepat saat ini karena komponen spoiler dengan bagian bawah nose kereta tidak menyatu sehingga pada desain kereta semicepat dengan *bogie fairing* spoiler dan *bogie fairing* tidak dapat disatukan. Gambar 3.5 menampilkan model kereta dengan *bogie fairing* pada pandangan isometrik, pandangan depan, dan pandangan samping.



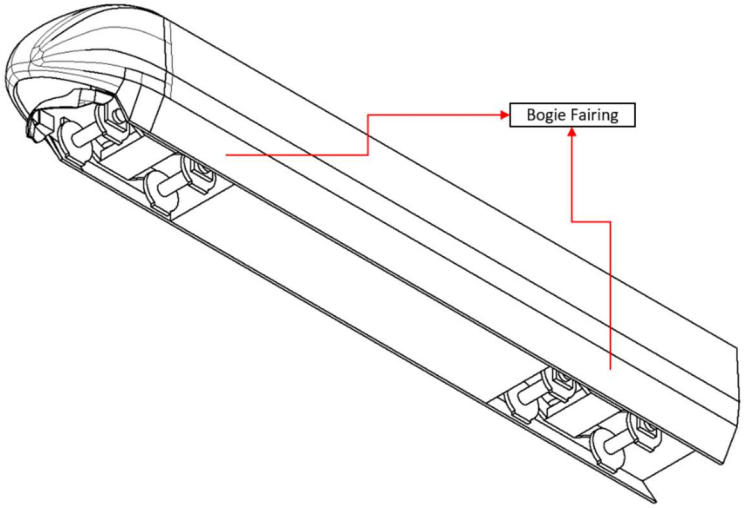




**Gambar 3.5** Geometri desain kereta semicepat dengan penambahan *bogie fairing* (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (berlanjut)

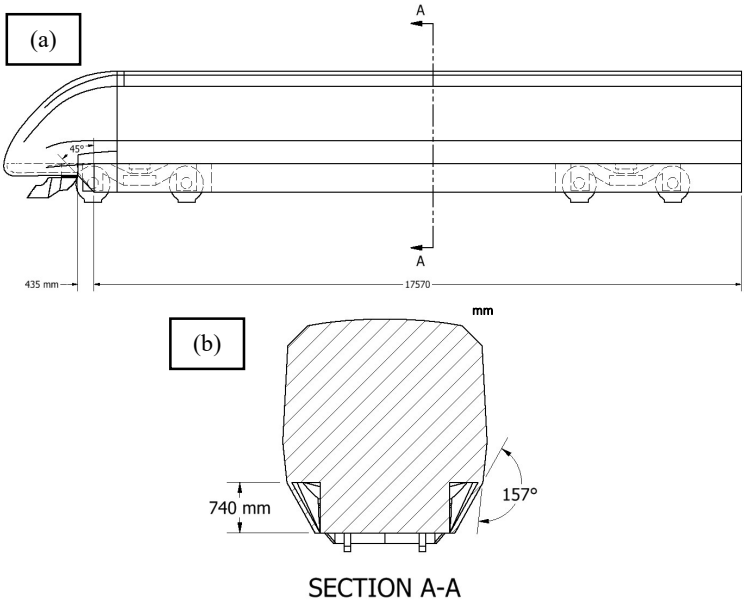



**Gambar 3.5** Geometri desain kereta semicepat dengan penambahan *bogie* (a) tampak isometri (b) tampak depan (c) tampak samping (lanjutan)

Detail dari bagian bawah model kereta dengan penambahan *bogie fairing* dapat dilihat pada gambar 3.6. Gambar 3.7 menampilkan potongan melintang kereta dan bentuk dari bogie frontplate belakang.



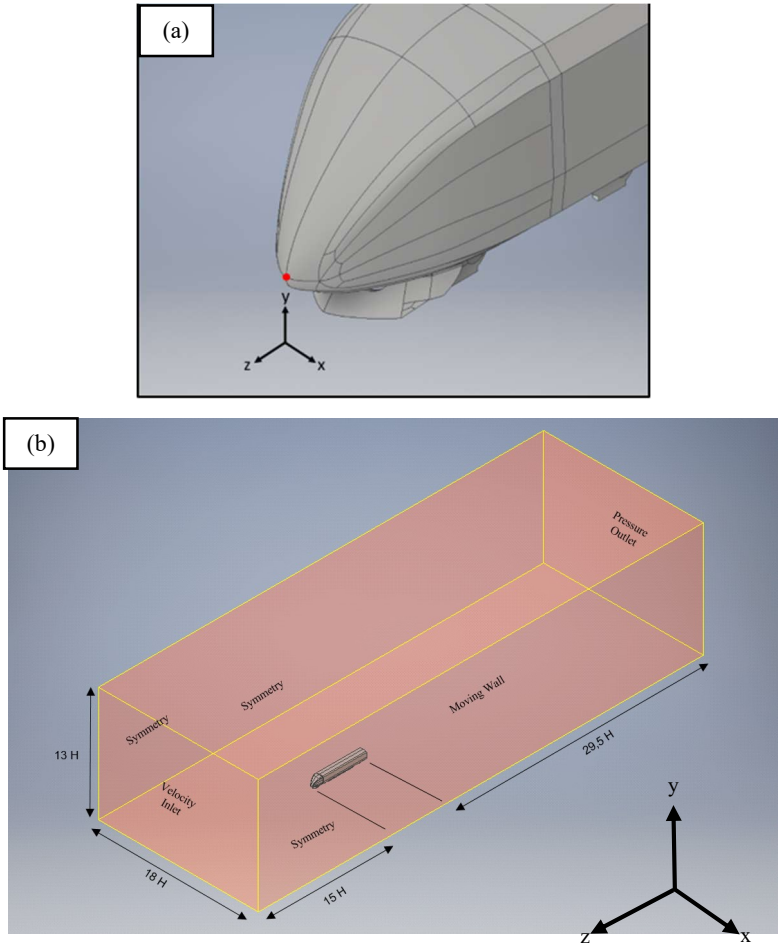

**Gambar 3.6** Ilustrasi bagian bawah model kereta semicepat Jakarta – Surabaya dengan penambahan *bogie fairing*.




**Gambar 3.7** Dimensi *bogie fairing* pada model desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya (a) tampak samping (b) tampak potongan

### 3.2.2 Domain Pemodelan

Penentuan dimensi domain merujuk pada penelitian Wang et al (2019). Pembuatan domain dilakukan di *Software* Autodesk Inventor Model turbulensi yang digunakan adalah model turbulensi k-ω SST. Gambar lokasi pusat koordinat dan domain yang digunakan untuk simulasi dapat dilihat pada gambar 3.8.



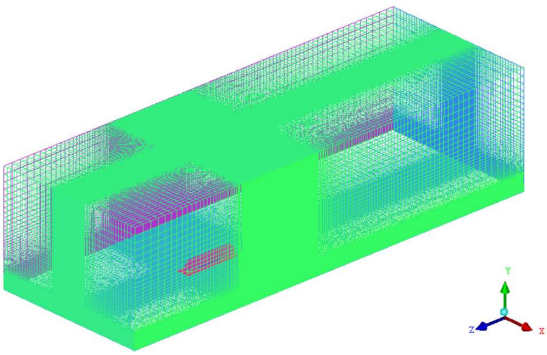

**Gambar 3.8** Domain Simulasi (a) lokasi pusat koordinat simulasi (b) ukuran domain simulasi

Berdasarkan gambar 3.8 (a), lokasi pusat koordinat sebagai acuan ukuran dalam penelitian ini diletakkan pada projeksi ujung nose kereta pada permukaan tanah.

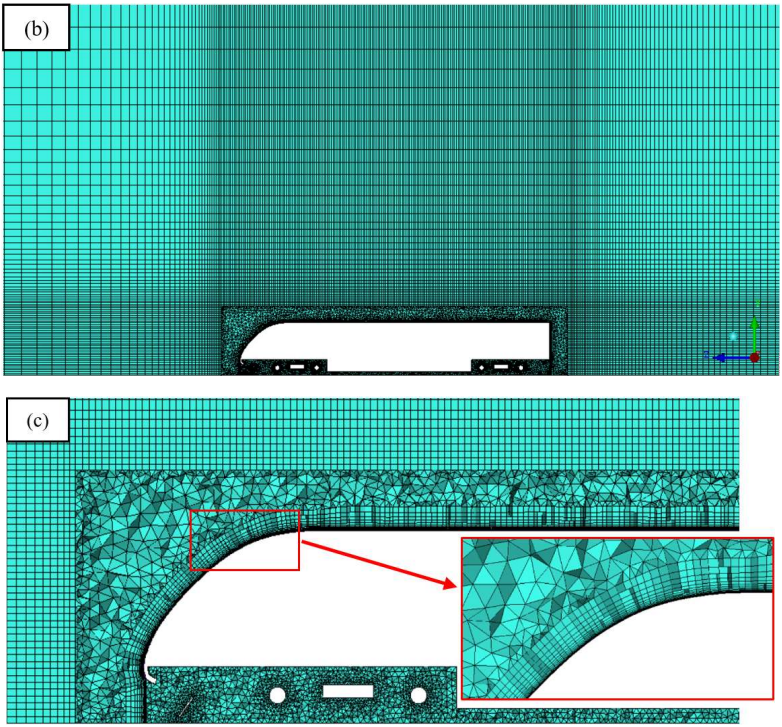
### 3.2.3 *Meshing*

Bidang atau volume yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*mesh*). Jenis *mesh* yang digunakan adalah kombinasi antara *tetrahedral mesh* dan *hexahedral mesh*. Keunggulan *mesh tetrahedral* adalah mempu menangkap bentuk geometri yang rumit, maka dari itu *mesh tetrahedral* digunakan pada sekitar kereta. *Mesh tetrahedral* dan *hexahedral* disambung pada kotak yang mengelilingi kereta. *Mesh hexahedral* digunakan karena jumlah *mesh* dapat dikontrol dengan lebih mudah dan *mesh hexahedral* mampu membagi sebuah volume dengan jumlah *cell* yang lebih sedikit daripada *mesh tetrahedral*. *Prism layer* digunakan untuk menangkap *boundary layer* yang terbentuk di permukaan kereta. Gambar 3.9 menyajikan *mesh* untuk model kereta yang akan disimulasikan. Kualitas *mesh* dapat dinilai berdasarkan *skewness* dan *orthogonal quality*. ANSYS Fluent menyarankan nilai *skewness* maksimal sebesar 0,94 dan *orthogonal quality* minimal di atas 0,01 agar simulasi yang dijalankan stabil. Didapatkan *mesh* dengan kualitas *skewness* maksimal sebesar 0,75 dan *orthogonal quality* minimum sebesar 0,013.

(a)




**Gambar 3.9** *Mesh* kereta semicepat (a) tampak isometri (b) tampak samping (c) prism layer (berlanjut)




**Gambar 3.9** *Mesh* kereta semicepat (a) tampak isometri (b) tampak samping (c) prism layer (lanjutan)

### 3.2.4 Parameter Pemodelan

#### 3.2.4.1 *Models*

Model turbulensi yang digunakan adalah RANS, pemilihan jenis RANS dalam simulasi ini mengacu pada penelitian Wang et al (2019), yaitu model turbulensi k-ω SST. Hal ini dipilih karena simulasi dilakukan secara *steady*.

#### 3.2.4.2 *Materials*

Dalam tahap ini dipilih material ynag digunakan dalam simulasi dan *properties* yang dimiliki material tersebut. Dalam simulasi ini udara dipilih sebagai fluida kerja. *Properties* udara yang digunakan adalah udara dengan densitas 1,225 kg/m$^3$ dan viskositas sebesar 1,7894 x 10$^{-5}$ kg/m.s.

#### *3.2.4.3 Operating Conditions*

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

#### 3.2.4.4 *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* dengan kecepatan yang sama dengan *inlet* pada domain bagian bawah, dan *wall* pada permukaan kereta. Nilai nilai yang diatur pada *boundary conditions* dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.3** Nilai Parameter *Boundary Conditions*

| **Boundary Conditions** | **Parameter** |
|---|---|
| *Velocity inlet* | Kecepatan: 44,44 m/s & 33,33 m/s<br>*Turbulence intensity*: 1%<br>*Turbulence length Scale*: 0.05 m |
| *Pressure Outlet* | *Pressure*: 0 Pa<br>*Turbulence intensity*: 1%<br>*Turbulence length scale*: 0.05 m |
| *Moving Wall* | Kecepatan: 44,44 m/s & 33,33 m/s |

#### 3.2.4.5 *Solution*

*Solution* yang digunakan dalam simulasi ini menggunakan skema SIMPLE dengan pengaturan *second order* untuk *pressure*, *second order upwind* untuk *momentum turbulent kinetic energy* dan *turbulent dissipation rate*.

#### 3.2.4.6 *Initialization*

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

#### 3.2.4.7 *Monitor Residual*

Pengaturan pada *monitor residual* dilakukan untuk mengatur kriteria korvengensi *residual* selama proses simulasi berlangsung. Nilai konvergensi residual ditetapkan sebesar $1x10^{-4}$.

## 3.3 *Processing*

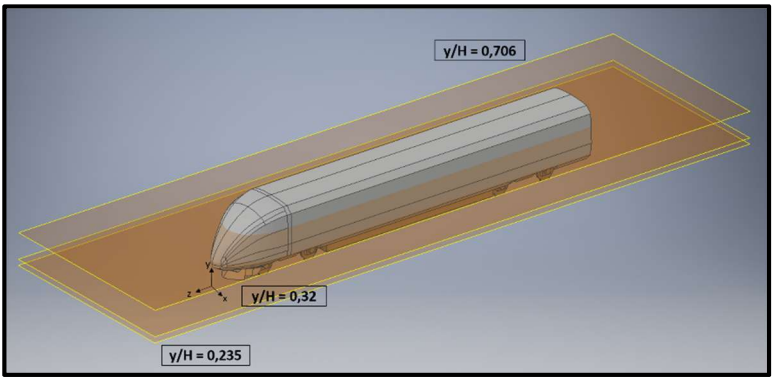
Dengan *software* ANSYS Fluent, kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada proses *preprocessing* akan dihitung dengan jumlah iterasi tertentu hingga parameter yang diobservasi telah konvergen. Apabila simulasi tidak memenuhi kriteria konvergensi yang sudah ditetapkan, proses *preprocessing* diulang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

## 3.4 *Post Processing*

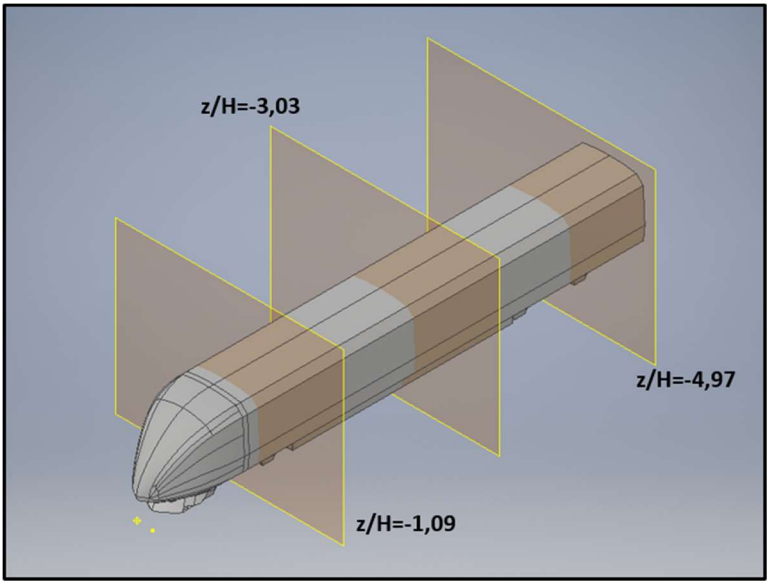
Setelah simulasi berhasil dilakukan, tahap selanjutnya adalah tahap penyajian data (*post processing*). Terdapat dua jenis data yang disajikan, yaitu data kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif berupa kontur koefisien tekanan pada kereta, kontur ketebalan *boundary layer* dan *shear layer* yang terbentuk di sekeliling kereta, kontur kecepatan dan koefisien tekanan aliran di sekitar kereta, dan *streamline* aliran. Data kuantitatif yang didapatkan adalah grafik koefisien tekanan *midspan* pada permukaan atas kereta, *underbody* kereta dan samping kereta,

profil kecepatan pada dearah wake, grafik ketebalan batas *shear layer* di samping kereta, dan nilai koefisien *drag* kereta semicepat.

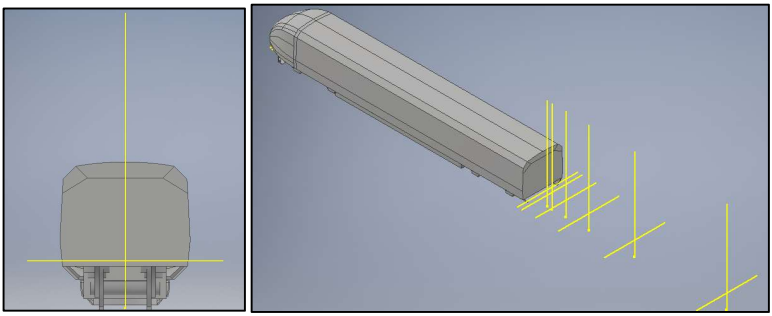
Visualisasi kontur kecepatan dan kontur koefisien tekanan aliran akan dilakukan pada bidang midspan kereta, dan bidang horizontal pada ketinggian y/H = 0,235, y/H = 0,32 dan y/H = 0,706. Pengambilan grafik ketebalan batas *shear layer* akan dilakukan pada bidang horizontal yang sejajar dengan titik stagnasi kereta, yaitu pada ketinggian y/H = 0,32. Pengambilan kontur *boundary layer* pada bidang melintang pada z/H = -1,09, z/H = -3,03, dan z/H = -4,97, serta bidang horizontal sejajar dengan titik stagnasi y/H = 0,32. Gambar 3.10 menampilkan lokasi bidang horizontal dan gambar 3.11 menampilkan bidang melintang di sepanjang kereta. Pengambilan kontur dan grafik koefisien tekanan akan dilakukan pada permukaan midspan kereta dan pada zona wake di belakang kereta. Pada daerah wake kereta dibuat enam garis vertikal dan enam garis horizontal untuk pengambilan profil kecepatan sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.12.




**Gambar 3.10** Bidang horizontal y/H = 0,235, y/H = 0,32, dan y/H = 0,706




**Gambar 3.11** Bidang melintang pada z/H = -1.09, z/H = -3.03, dan z/H = -4.97



**Gambar 3.12** Lokasi pengambilan profil kecepatan pada belakang kereta

## 3.4 *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. Tabel 3.4 menyajikan hasil analisa *grid independency*. Prism layer hanya digunakan pada permukaan atas kereta saja, sehingga nilai y+ yang tertera pada tabel menyatakan nilai y+ pada permukaan atas kereta. Bagian underbody kereta tidak diberi prism layer.

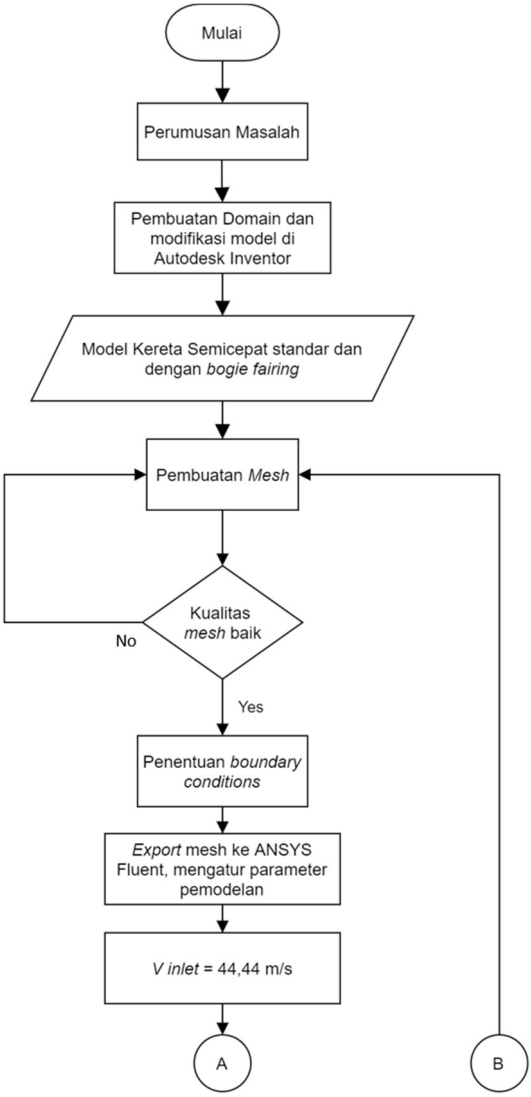
**Tabel 3.4** Analisa *Grid Independency*

| Nama *Mesh* | Jumlah *Cell* | Y+ | Prism Layer | Cd | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 5188745 | 8,3 | 20 | 0,3415 | - |
| B | 6163566 | 7,54 | 20 | 0,3274 | 4,128 |
| C | 7639462 | 7,5 | 20 | 0,3262 | 0,367 |
| D | 9083934 | 7,5 | 20 | 0,3265 | 0,083 |

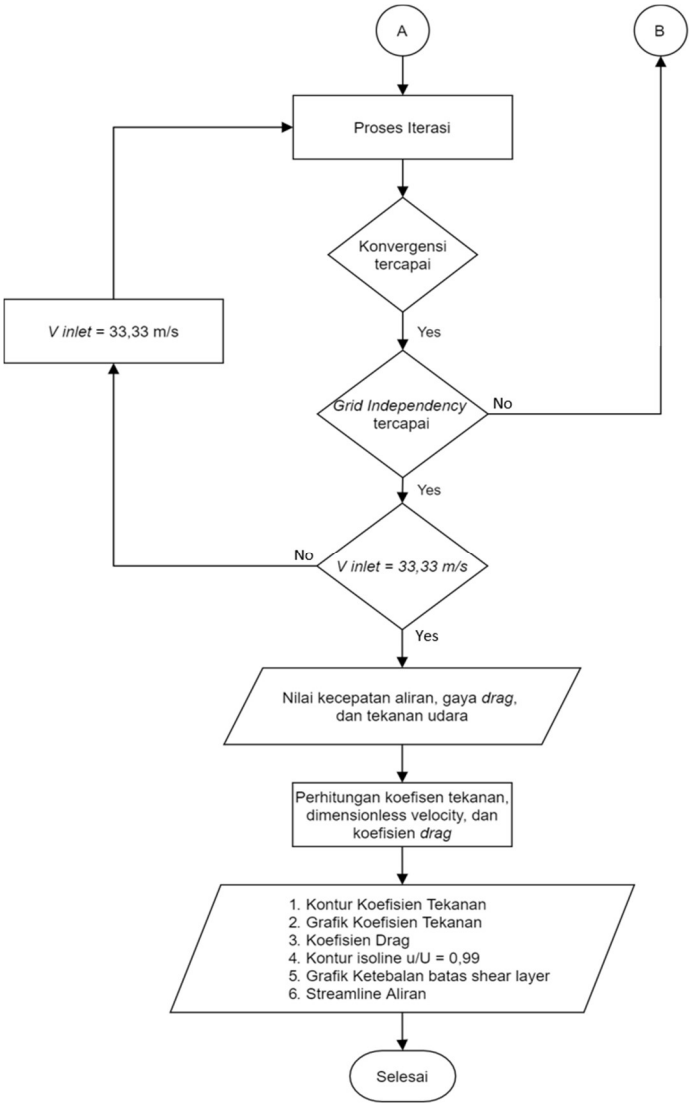
Berdasarkan tabel 3.4, seluruh nilai error relatif sudah dibawah 5%. Error relatif sebesar 4,128% antara *mesh* A dengan *mesh* B. Setelah dilakukan simulasi menggunakan *mesh* C dan *mesh* D, nilai error tidak lagi meningkat secara signifikan. *Mesh* B dapat dikatakan telah *grid independent* karena error nilai koefisien *drag* pada mesh B dibawah 5% dan tidak terdapat lonjakan nilai error relatif yang signifikan pada *mesh* dengan jumlah *cell* yang lebih besar daripada *mesh* B, maka mesh B dapat digunakan untuk simulasi.

## 3.5 Diagram Alir

Diagram alir penelitian yang dilakukan terdapat pada gambar 3.5. Diagram alir menjelaskan urutan pelaksanaan studi numerik yang akan dilakukan.




**Gambar 3.13** Diagram alir penelitian




**Gambar 3.13** Diagram alir penelitian (lanjutan)

# BAB IV
# HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, dilakukan analisa gaya drag yang dialami kereta dan fenomena aliran fluida yang terjadi di sekitar kereta. Analisa aliran pada desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya dilakukan secara 3 dimensi dengan uji numerik menggunakan *software* FLUENT. Hasil simulasi yang akan disajikan adalah koefisien drag kereta dan aliran di sekitar kereta, meliputi koefisien tekanan pada midspan, koefisien tekanan pada daerah *wake*, dan kontur isoline u/U = 0,99 yang terbentuk di sekitar kereta.

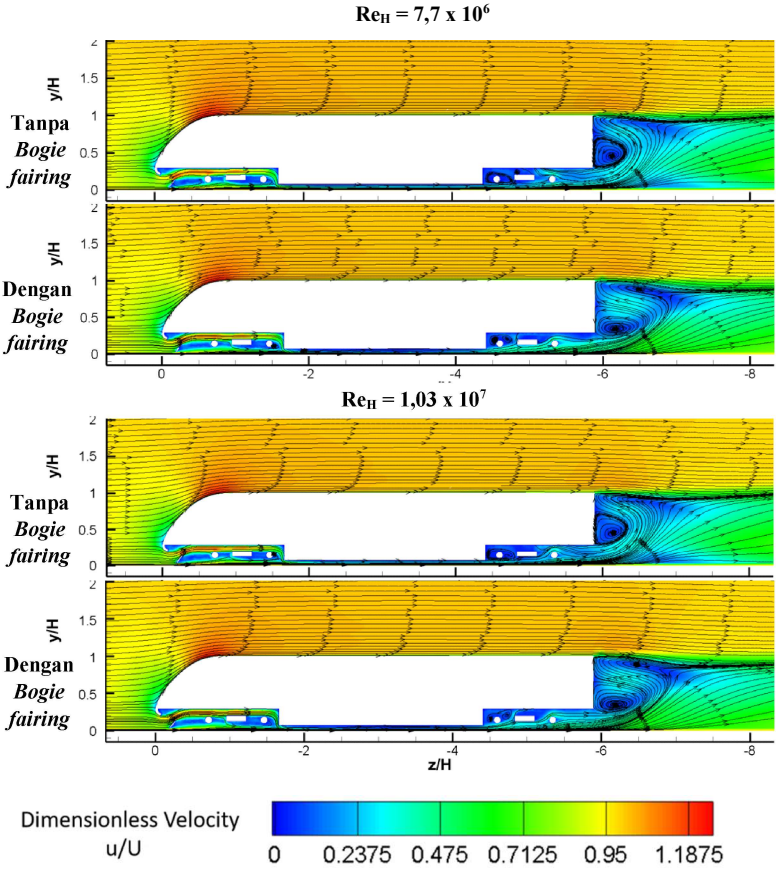
## 4.1 Analisis Kecepatan dan Tekanan Aliran

Dalam subbab ini akan dibahas data kualitatif berupa kontur kecepatan dimensionless dan kontur koefisien tekanan aliran pada simulasi dengan kecepatan aliran sebesar 33,33 m/s atau dengan $Re_H$ sebesar 7,7 x $10^6$ dan pada kecepatan aliran 44,44 m/s atau dengan $Re_H$ sebesar 1,03 x $10^7$. Aliran mengalir dari sisi kiri ke Kenan, menuju sisi outlet pada sumbu z/H negatif. Gambar 4.1 menyajikan kontur *dimensionless velocity* pada midspan kereta dan gambar 4.2 menyajikan kontur koefisien tekanan pada midspan kereta.

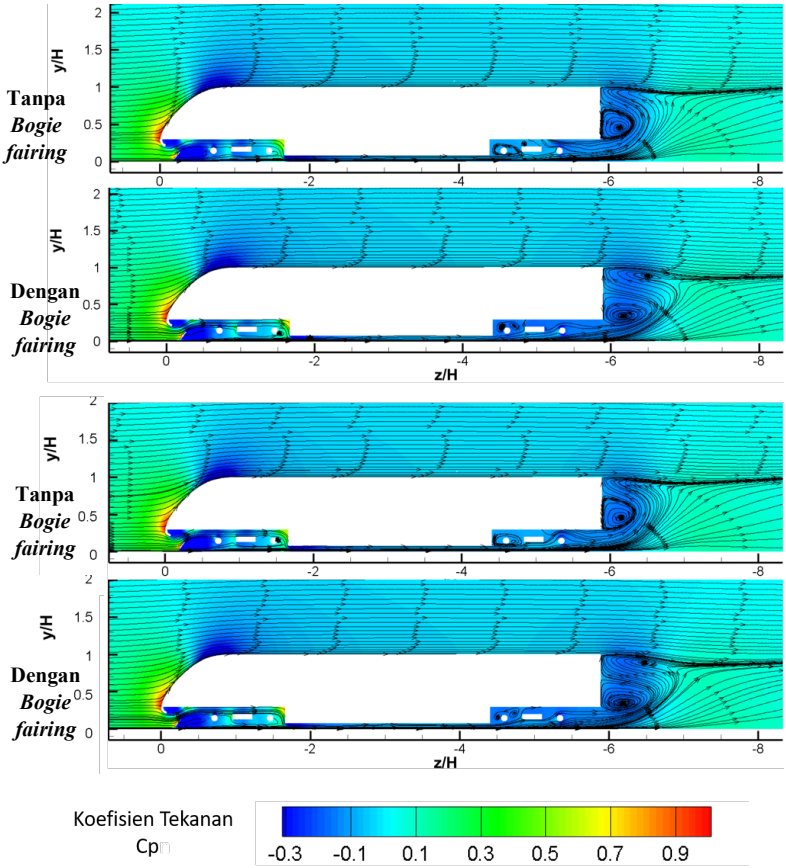
Gambar 4.1 menampilkan kontur dimensionless velocity (*u*/U) dan streamline aliran pada midspan kereta tanpa *bogie fairing* pada kecepatan aliran 33,33 m/s ($Re_H$ = 7,7 x $10^6$) dan 44,44 m/s ($Re_H$ = 1,03 x $10^7$). Di sisi depan kereta, aliran upstream mengalir dengan pola streamline sejajar. Ketika aliran menyentuh nose kereta, timbul titik stagnasi pada daerah dengan warna kontur biru tua pada permukaan nose kereta. Aliran udara akan mengalir menuju sisi atas kereta dan sisi bawah kereta (*underbody*).

Aliran yang terdefleksi ke sisi atas kereta mengalami percepatan seiring aliran mengalir dari titik stagnasi ke bagian atas *nose* kereta. Kecepatan tertinggi didapatkan di sekitar bagian atas *nose* kereta, ditandai dengan kontur aliran berwarna merah di sekitar daerah tersebut. Streamline aliran pada daerah atas *nose* kereta mengalami penyempitan, penyempitan streamline akan diikuti dengan peningkatan kecepatan aliran.

Aliran yang mengalir dari titik stagnasi menuju *underbody* kereta akan mengalami percepatan. Pada gambar 4.1 kereta tanpa *bogie fairing*, aliran di bagian midspan kereta mengalir ke sisi *underbody* kereta melalui celah antara *spoiler* kereta dengan *nose* kereta dan melalui celah antara spoiler dengan tanah. Kontur warna merah di sekitar celah tersebut menandakan bahwa terjadi peningkatan kecepatan aliran. Aliran akan menumbuk komponen bogie depan dan bogie endplate sehingga akan timbul zona dengan tekanan tinggi pada daerah tersebut. Hal ini akan berpengaruh terhadap nilai koefisien drag pada *underbody* kereta, karena koefisien drag kereta akan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan pada permukaan yang berhadapan dengan aliran. Daerah *wake* terbentuk pada bagian belakang spoiler dan bogie depan kereta, ditandai dengan warna biru tua pada kontur kecepatan aliran. Aliran akan mengalir melewati bagian bawah kereta menuju daerah bogie belakang. Daerah resirkulasi terbentuk di sekitar bogie frontplate belakang karena adanya perluasan penampang aliran secara mendadak yang menyebabkan aliran terseparasi. Berdasarkan streamline aliran di sekitar bogie belakang kereta, aliran yang mengalir dari bagian bawah kereta mengalir dan menumbuk roda belakang kereta lalu mengalir menuju zona *wake* yang terbentuk di bagian belakang kereta.




**Gambar 4.1** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) pada bagian midspan kereta




**Gambar 4.2** Kontur koefisien tekanan pada bagian midspan kereta

Pada bagian belakang kereta timbul zona *wake* yang memiliki kontur kecepatan berwarna biru. Zona *wake* muncul akibat adanya separasi aliran yang terjadi karena adanya perluasan penampang aliran sepanjang sumbu y secara mendadak pada sisi belakang kereta. Perluasan penampang aliran menyebabkan adanya *adverse pressure gradient* dan menyebabkan separasi

aliran terjadi. Pada daerah *wake* di belakang kereta, terbentuk sebuah vortex yang digambarkan dengan streamline aliran yang berputar pada zona *wake* di belakang kereta.

Pada gambar 4.1 kereta dengan *bogie fairing*, di sisi depan kereta, aliran upstream mengalir dengan pola streamline sejajar. Ketika aliran menyentuh nose kereta, timbul titik stagnasi pada daerah dengan warna kontur biru tua pada permukaan nose kereta. Aliran udara akan mengalir menuju sisi atas kereta dan sisi bawah kereta (*underbody*). Aliran yang terdefleksi ke sisi atas kereta mengalami percepatan seiring aliran mengalir dari titik stagnasi ke bagian atas *nose* kereta. Kecepatan tertinggi didapatkan di sekitar bagian atas *nose* kereta, ditandai dengan kontur aliran berwarna merah di sekitar daerah tersebut. Streamline aliran pada daerah atas *nose* kereta mengalami penyempitan, penyempitan streamline akan diikuti dengan peningkatan kecepatan aliran.

Aliran yang mengalir dari titik stagnasi menuju *underbody* kereta akan mengalami percepatan. Pada gambar 4.23 (b), aliran di aliran di bagian midspan kereta mengalir ke sisi *underbody* kereta melalui celah antara *spoiler* kereta dengan *nose* kereta dan melalui celah antara spoiler dengan tanah. Kontur warna merah di sekitar celah tersebut menandakan bahwa terjadi peningkatan kecepatan aliran. Aliran akan menumbuk komponen bogie depan dan bogie endplate sehingga akan timbul zona dengan tekanan tinggi pada daerah tersebut. Daerah dengan kecepatan rendah terbentuk pada bagian belakang spoiler dan bogie depan kereta, ditandai dengan warna biru tua pada kontur kecepatan aliran. Aliran akan mengalir melewati bagian bawah kereta menuju daerah bogie belakang. Daerah resirkulasi terbentuk di sekitar bogie frontplate belakang karena adanya perluasan penampang aliran secara mendadak yang menyebabkan aliran terseparasi. Berdasarkan streamline aliran di sekitar bogie belakang kereta, aliran yang mengalir dari bagian bawah kereta mengalir dan menumbuk roda belakang kereta lalu

mengalir menuju zona *wake* yang terbentuk di bagian belakang kereta.

Pada bagian belakang kereta timbul zona *wake* yang memiliki kontur kecepatan berwarna biru. Zona *wake* muncul akibat adanya separasi aliran yang terjadi karena adanya perluasan penampang aliran sepanjang sumbu y secara mendadak pada sisi belakang kereta. Perluasan penampang aliran menyebabkan adanya *adverse pressure gradient* dan menyebabkan separasi aliran terjadi. Pada daerah *wake* di belakang kereta, terbentuk dua buah vortex yang digambarkan dengan streamline aliran yang berputar pada zona *wake* di belakang kereta. Vortex utama dengan ukuran besar terbentuk di sekitar badan bawah kereta dan vortex kecil terbentuk di atas vortex utama yang letaknya lebih jauh dari permukaan belakang kereta.

Perbedaan pada kontur dimensionless velocity pada kereta tanpa *bogie fairing* dan kereta dengan *bogie fairing* terdapat pada aliran di sekitar bogie belakang kereta dan zona *wake* di belakang kereta. Pada kereta dengan *bogie fairing* aliran dari bagian bawah kereta mengalir menuju bogie belakang dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Hal ini diindikasikan dengan kontur kecepatan aliran berwarna hijau pada kereta dengan *bogie fairing*, sementara aliran yang lebih lambat pada kereta tanpa *bogie fairing* menunjukkan kontur aliran yang berwarna biru. Kecepatan aliran yang lebih tinggi pada daerah bogie belakang justru berdampak buruk terhadap performa aerodinamika kereta, karena dengan meningkatnya kecepatan aliran yang menumbuk bogie belakang kereta, maka terdapat peningkatan tekanan pada permukaan bogie sehingga meningkatkan gaya drag yang dialami bogie belakang.

Pada daerah *wake*, kereta dengan *bogie fairing* memiliki ukuran vortex utama yang lebih kecil secara vertikal dan lebih

panjang secara horizontal apabila dibandingkan dengan vortex utama pada kereta tanpa *bogie fairing*. Penambahan *bogie fairing* juga membentuk vortex kedua yang ukurannya lebih kecil. Vortex kecil ini terletak di bagian atas vortex utama, dengan jarak yang lebih jauh dari permukaan belakang kereta. Luasan daerah berkecepatan rendah yang diindikasin kontur kecepatan aliran berwarna biru lebih sedikit dengan penambahan *bogie fairing*, hal ini terjadi karena dengan adanya *bogie fairing*, aliran mengalir pada sisi underbody kereta terperangkap dan tidak mengalir ke sisi samping kereta. Aliran pada underbody akan mengalir ke daerah wake kereta dengan kecepatan yang lebih tinggi sehingga terdapat daerah dengan kontur kecepatan aliran berwarna biru yang lebih sedikit.

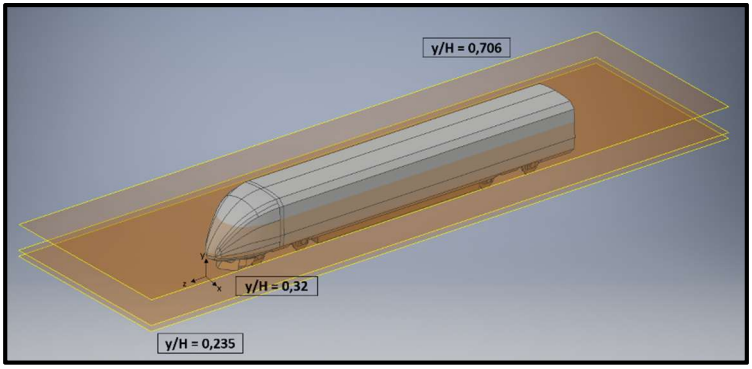
Apabila membandingkan kontur aliran pada kecepatan 33,33 m/s ($Re_H$ = 7,7 x $10^6$) dengan kecepatan aliran 44,44 m/s ($Re_H$ = 1,03 x $10^7$), tidak terlalu banyak perbedaan yang signifikan. Secara umum warna kontur dan pola streamline yang terbentuk pada dua variasi kecepatan tersebut relatif sama.

Gambar 4.2 menampilkan kontur koefisien tekanan pada bagian midspan kereta tanpa *bogie fairing* dan dengan *bogie fairing* pada kecepatan 33,33 m/s ($Re_H$ = 7,7 x $10^6$) dengan kecepatan aliran 44,44 m/s ($Re_H$ = 1,03 x $10^7$). Didapatkan bahwa pada kedua kasus, aliran yang memasuki celah antara spoiler dengan bagian bawah *nose* menghasilkan tekanan tinggi ketika menumbuk bogie endplate, diindikasikan dengan kontur koefisien tekanan berwarna kuning.

Warna merah di bagian bogie endplate pada kereta dengan *bogie fairing* menandakan bahwa bagian bogie endplate kereta dengan *bogie fairing* mengalami tekanan yang lebih tinggi daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Tekanan yang tinggi akan berdampak buruk karena meningkatkan pressure drag di bagian

bogie endplate. Pada daerah di sekitar bogie belakang, kereta tanpa *bogie fairing* pada gambar 4.2 memiliki koefisien tekanan yang lebih tinggi daripada kereta dengan *bogie fairing*, hal ini diindikasian dengan kontur koefisien tekanan berwarna biru muda pada daerah tersebut. Tekanan yang rendah dapat terjadi karena aliran udara yang melewati bagian bawah kereta dengan *bogie fairing* mengalir dengan lebih cepat daripada model kereta tanpa *bogie fairing* dan tidak adanya aliran yang mengalir dari sisi samping kereta. Variasi kecepatan memberikan kontur yang tidak terlalu berbeda, secara umum warna kontur koefisien tekanan dan pola streamline yang terbentuk pada dua variasi kecepatan relatif sama.

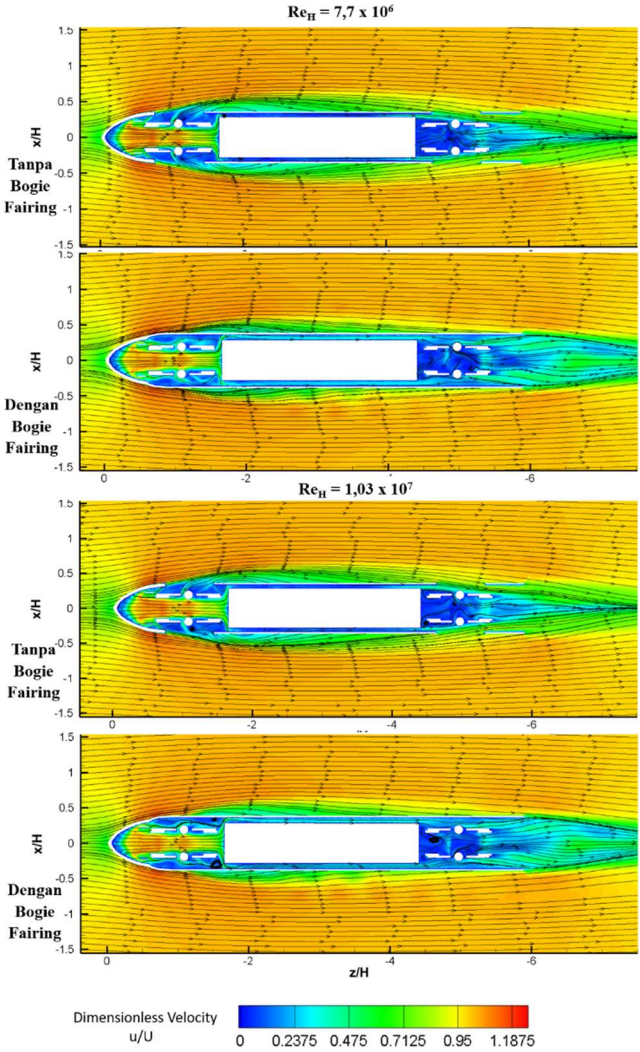
Selanjutnya akan dilakukan analisa kualitatif terhadap aliran di sekitar kereta pada tiga buah bidang horizontal seperti ditampilkan pada gambar 4.3, yaitu pada y/H = 0,235, y/H = 0,32, dan y/H = 0,706. Ketiga bidang tersebut mewakili aliran yang melewati bagian *underbody* kereta, aliran di sekitar titik stagnasi kereta, dan aliran pada bagian atas kereta.



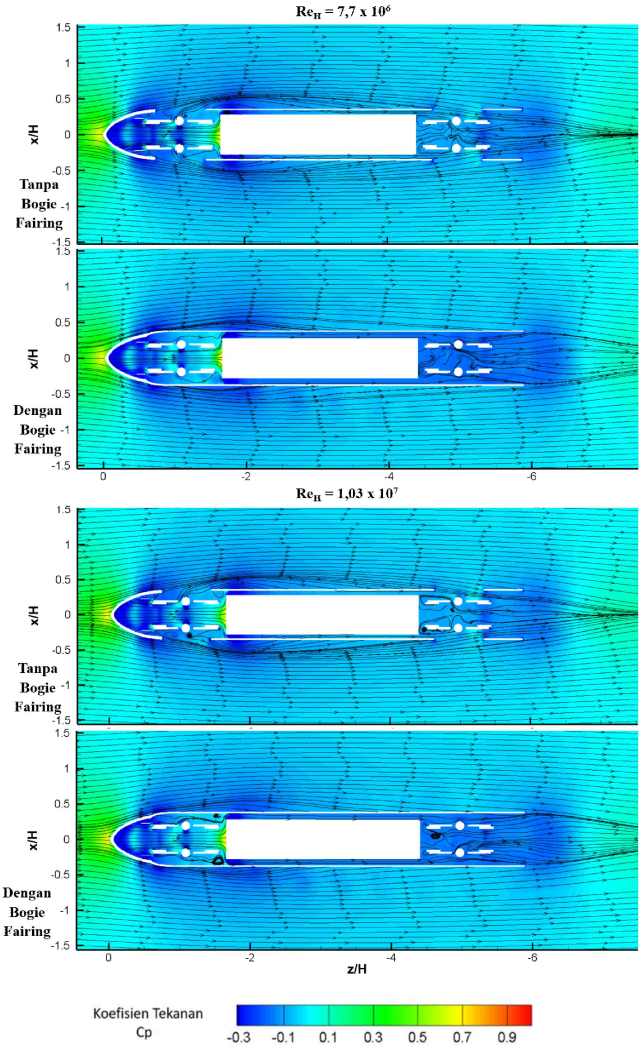

**Gambar 4.3** Lokasi pengambilan kontur aliran pada bidang horizontal.

Gambar 4.4 dan 4.5 menampilkan kontur dimensionless velocity kontur koefisien tekanan pada bidang horizontal dengan ketinggian y/H = 0,235.

Gambar 4.4 menyajikan kontur dimensionless velocity dan streamline aliran pada bidang horizontal setinggi y/H = 0,235 untuk menampilkan aliran di bagian *underbody* kereta. Dapat dilihat bahwa pada kereta tanpa *bogie fairing*, aliran pada sisi upstream dengan bentuk streamline sejajar mengalami percepatan setelah menumbuk *nose* kereta dan mengalir ke samping kereta. Aliran yang memasuki celah antara spoiler dengan *nose* mengalir hingga menumbuk bogie endplate, namun ada juga aliran yang mengalir ke luar, ke sisi samping kereta. Aliran ini mengalir di sisi samping kereta, hingga aliran mengalir kembali ke daerah bogie belakang dan menumbuk roda bogie bagian belakang. Fenomena ini berbeda dengan penelitian terdahulu, dimana pada penelitian terdahulu, aliran akan menumbuk bagian *bogie endplate* melalui sisi samping kereta. Perbedaan ini terjadi karena terdapat perbedaan antara desain spoiler kereta semicepat Jakarta – Surabaya dengan desain spoiler kereta cepat pada penelitian terdahulu, yaitu terdapat celah antara spoiler dengan bagian bawah *nose* pada kereta semicepat sedangkan pada kereta cepat, tidak terdapat celah antara spoiler dengan *nose* kereta sehingga spoiler menjadi satu bagian dengan *nose* kereta. Dengan adanya celah antara spoiler dengan bagian bawah *nose* kereta semicepat, aliran udara akan menumbuk permukaan bogie endplate secara langsung dari depan. Tanpa adanya *bogie fairing*, aliran yang memasuki celah antara *nose* dan spoiler dapat terdefleksi ke dua arah, yaitu, melewati bagian bawah kereta menuju ke bogie belakang dan melewati sisi samping kereta hingga menuju bogie belakang.




**Gambar 4.4** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) pada bagian *underbody* kereta pada ketinggian y/H = 0,235




**Gambar 4.5** Kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta pada ketinggian y/H = 0,235

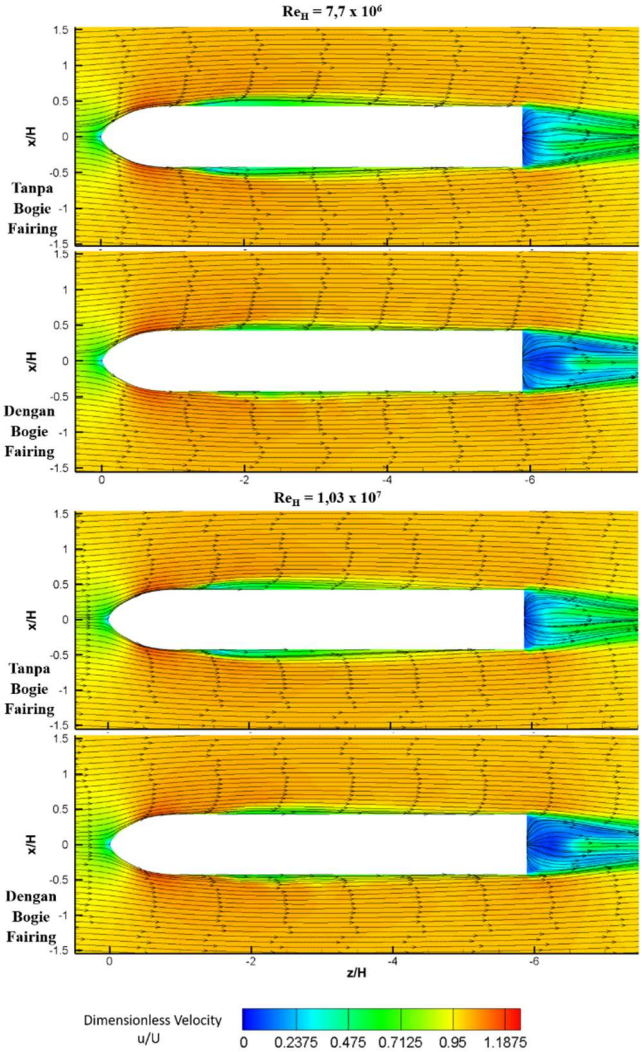
Pada gambar 4.4 kereta dengan *bogie fairing*, aliran pada sisi upstream dengan bentuk streamline sejajar mengalami percepatan setelah menumbuk titik stagnasi dan mengalir ke samping kereta. Perbedaan yang signifikan terlihat pada aliran mengalir menuju bogie depan yang melewati celah antara spoiler dengan *nose* kereta. Pada kereta dengan *bogie fairing*, tidak terdapat aliran yang mengalir ke sisi samping kereta, karena penambahan *bogie fairing* pada bagian depan kereta justru mengakibatkan terperangkapnya aliran pada underbody kereta sehingga aliran yang melewati celah antara spoiler dengan *nose* kereta menumbuk permukaan *bogie endplate* depan dengan kecepatan yang lebih tinggi dan timbul tekanan yang lebih tinggi pada permukaan tersebut. Setelah menumbuk bagian endplate, aliran mengalir ke bogie belakang dengan melewati bagian bawah kereta. Aliran di bagian bawah kereta akan mengalir dengan kecepatan yang lebih tinggi dan menumbuk komponen di bogie belakang kereta yang berakibat pada peningkatan gaya drag pada bagian *underbody*.

Gambar 4.5 menampilkan kontur koefisien tekanan pada bidang horizontal dengan ketinggian y/H = 0.235. Secara umum tidak terdapat perbedaan warna kontur yang signifikan pada bagian depan dan belakang kereta. Pada kedua kasus, terdapat zona berekanan tinggi di sekitar bogie endplate dan zona bertekanan rendah yang terbentuk di bagian belakang kereta. Perbedaan terdapat pada kontur tekanan di sekitar bogie belakang kereta, dimana kontur Cp berwarna biru tua lebih dominan pada kereta dengan *bogie fairing*. Zona bertekanan rendah ini dapat memperbesar perbedaan tekanan antara bogie endplate di bagian depan dan bogie frontplate di bagian belakang, sehingga akan timbul pressure drag yang besar.

Gambar 4.6 dan 4.7 menampilkan kontur dimensionless velocity dan koefisien tekanan pada bidang horizontal setinggi y/H = 0,32 yang sejajar dengan titik stagnasi pada *nose* kereta.

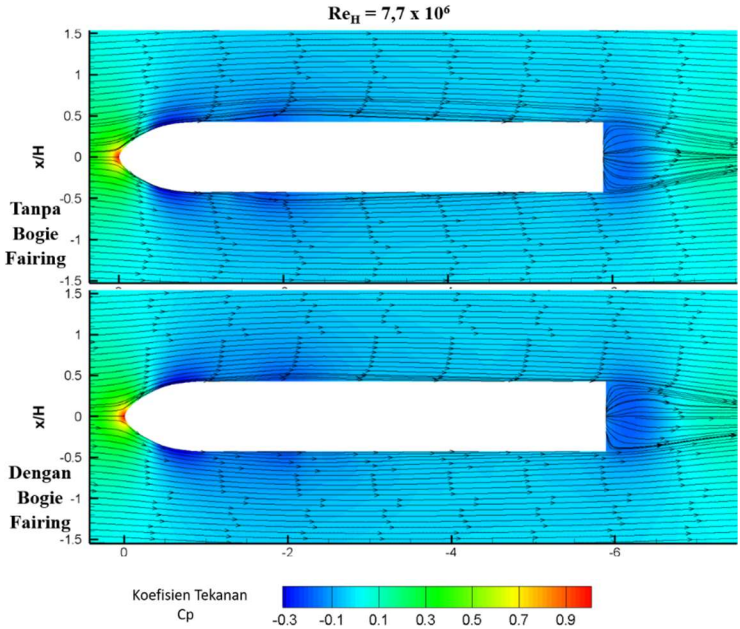
Gambar 4.6 menampilkan kontur dimensionless velocity pada bidang horizontal y/H = 0,32. Pada kedua kasus, aliran pada sisi upstream dengan streamline sejajar mengalir menuju kereta. Titik stagnasi terjadi pada bagian ujung *nose* kereta. Pada titik stagnasi, aliran mengalami perlambatan hingga kecepatan aliran adalah nol, diindikasikan dengan kontur aliran berwarna biru tua pada bagian *nose* kereta. Aliran yang mengalir ke sisi samping kereta akan mengalami percepatan sehingga kontur aliran berubah menjadi berwarna merah.

Pada gambar 4.6, perbedaan terlihat pada aliran yang mengalir di sisi samping kereta dan di bagian belakang kereta. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, penebalan *shear layer* terjadi lebih cepat daripada kereta dengan *bogie fairing*. Hal ini terlihat dari penebalan kontur dimensionless velocity dengan warna kuning dan hijau yang terjadi lebih awal pada kereta tanpa *bogie fairing*. Hal ini terjadi karena terdapat aliran pada bagian *underbody* kereta yang mengalir ke sisi samping kereta tanpa *bogie fairing*, sehingga timbul penebalan *shear layer* yang terjadi lebih awal dan lebih cepat pada daerah di sekitar titik stagnasi kereta. Pada bagian belakang kereta, daerah *wake* yang terjadi pada kereta dengan *bogie fairing* lebih lebar daripada kereta tanpa *bogie fairing*, hal ini diindikasikan dengan kontur berwarna biru yang lebih lebar di bagian belakang kereta. Secara umum, variasi kecepatan tidak memberikan perbedaan yang signifikan pada kontur aliran.

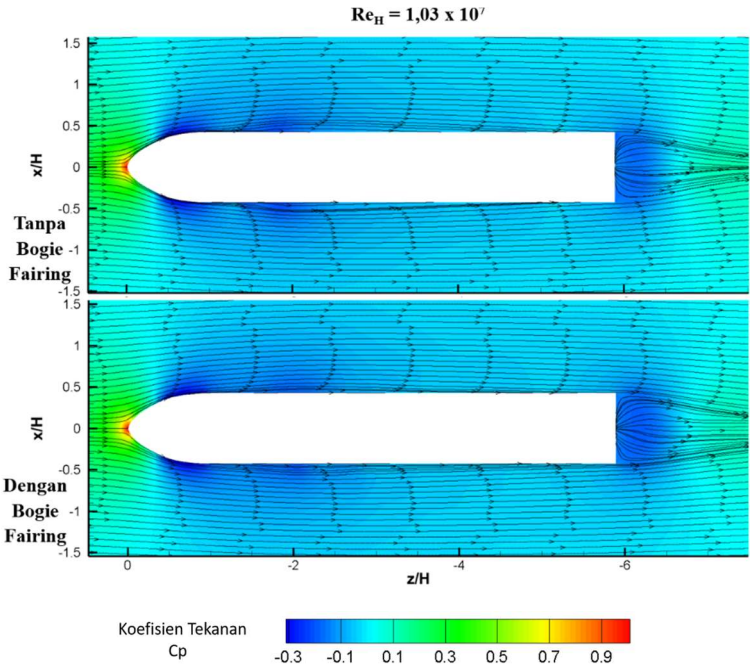



**Gambar 4.6** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) pada ketinggian y/H = 0,32

Gambar 4.7 di bawah menampilkan kontur koefisien tekanan aliran pada bidang horizontal y/H = 0,32. Titik stagnasi dimana nilai koefisien tekanan sebesar satu terlihat pada bagian ujung *nose* kereta, diindikasikan dengan kontur koefisien tekanan berwarna merah tua. Percepatan aliran yang terjadi di sisi samping kereta menimbulkan penurunan koefisien tekanan sehingga timbul zona berwarna biru tua di sisi samping *nose* kereta. Pada daerah di belakang kereta, terdapat zona dengan nilai koefisien tekanan rendah. Secara kualitatif tidak terlihat perbedaan yang signifikan pada kontur koefisien tekanan kereta tanpa *bogie fairing* maupun kereta dengan *bogie fairing* di semua variasi kecepatan.




**Gambar 4.7** Kontur koefisien tekanan pada ketinggian y/H = 0,32 (berlanjut)

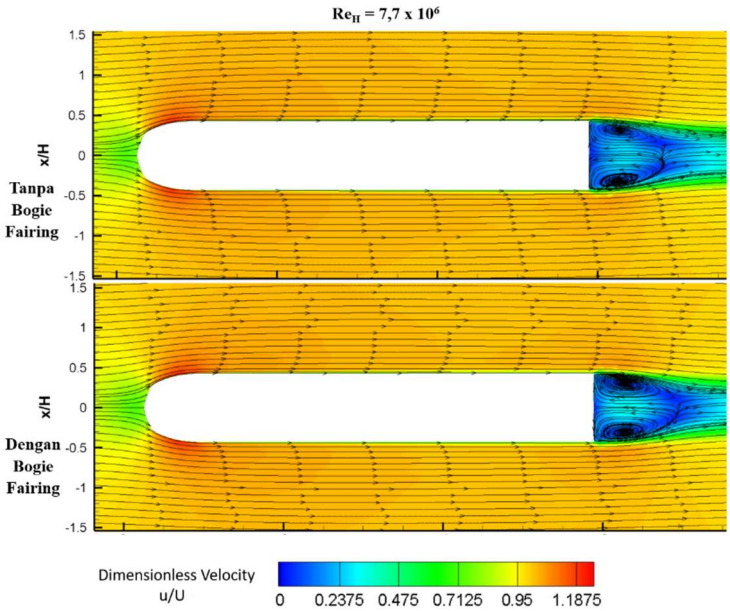



**Gambar 4.7** Kontur koefisien tekanan pada ketinggian y/H = 0,32 (lanjutan)

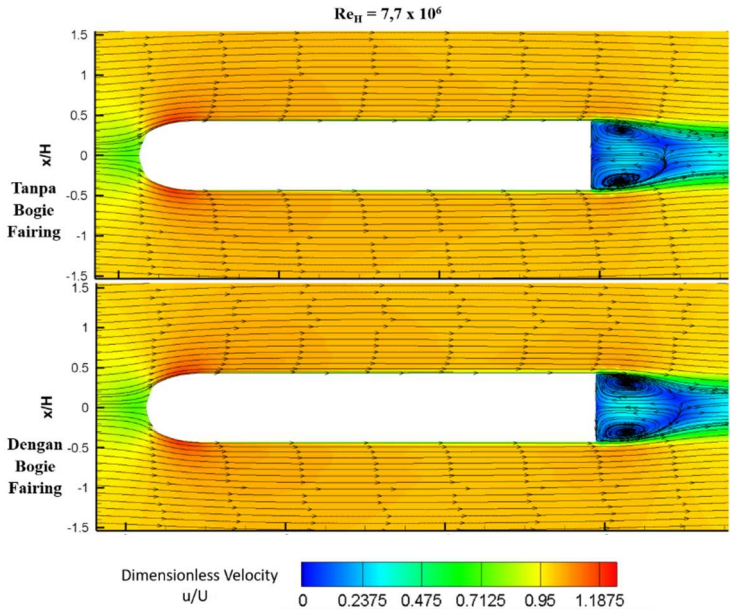
Gambar 4.8 dan gambar 4.9 di bawah menampilkan kontur dimensionless velocity dan koefisien tekanan pada bidang horizontal setinggi y/H = 0,706.

Gambar 4.8 menampilkan kontur kecepatan aliran pada bidang horizontal dengan ketinggian y/H = 0,7. Pada kedua kasus, aliran freestream mengalami perlambatan ketika membentur permukaan kereta, hal ini dapat dilihat pada kontur kecepatan berwarna hijau di sisi depan kereta. Aliran yang mengalir di sisi samping nose kereta mengalami peningkatan kecepatan dan terus

mengalir di sisi samping kereta. Aliran terseparasi pada bagian belakang kereta akibat adanya perluasan daerah aliran pada sumbu x secara mendadak dan membentuk daerah *wake* yang terjadi di belakang kereta. Pada kedua kasus, terdapat dua vortex yang terbentuk di bagian *wake* kereta, ditandai dengan streamline yang berputar di daerah belakang kereta dengan ukuran yang relatif sama, baik pada kereta tanpa *bogie fairing* maupun kereta dengan *bogie fairing*. Secara umum variasi kecepatan aliran tidak berpengaruh terhadap fenomena aliran yang terjadi terbukti pada warna kontur dimensionless velocity dan pola streamline yang tidak terlalu berbeda.

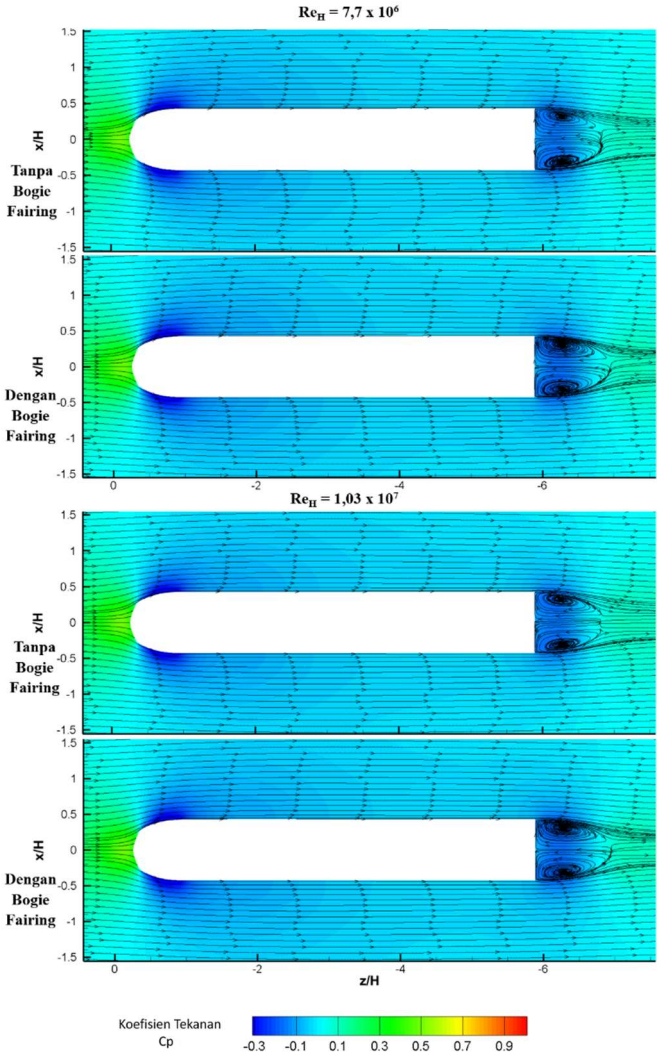



**Gambar 4.8** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) kereta pada ketinggian y/H = 0,706 (berlanjut)



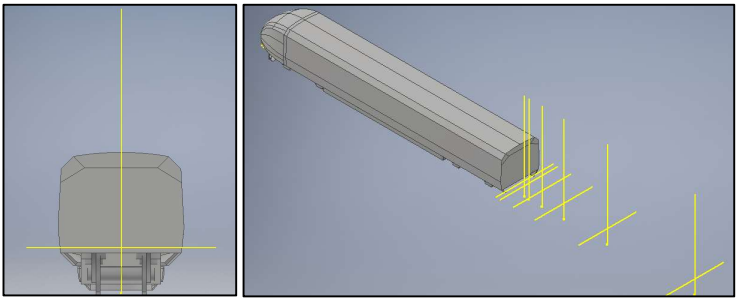

**Gambar 4.8** Kontur dimensionless velocity (*u*/U) kereta pada ketinggian y/H = 0,706 (lanjutan)

Gambar 4.9 menampilkan kontur koefisien tekanan pada bidang horizontal pada ketinggian y/H = 0,706. Kontur koefisien yang tekanan warna hijau terdapat pada bagian depan kereta dimana terjadi perlambatan aliran. Ketika aliran mengalami percepatan di sisi samping kereta, terjadi penurunan tekanan sehingga kontur tekanan berubah menjadi warna biru tua. Seiring aliran mengalir di permukaan samping kereta, terjadi peningkatan tekanan statik karena adanya penurunan kecepatan aliran akibat efek viskositas. Di bagian belakang kereta terdapat daerah *wake* yang ditandai dengan dua buah vortex dengan kontur tekanan berwarna biru tua, yang mengindikasikan adanya daerah dengan tekanan rendah di bagian belakang kereta.



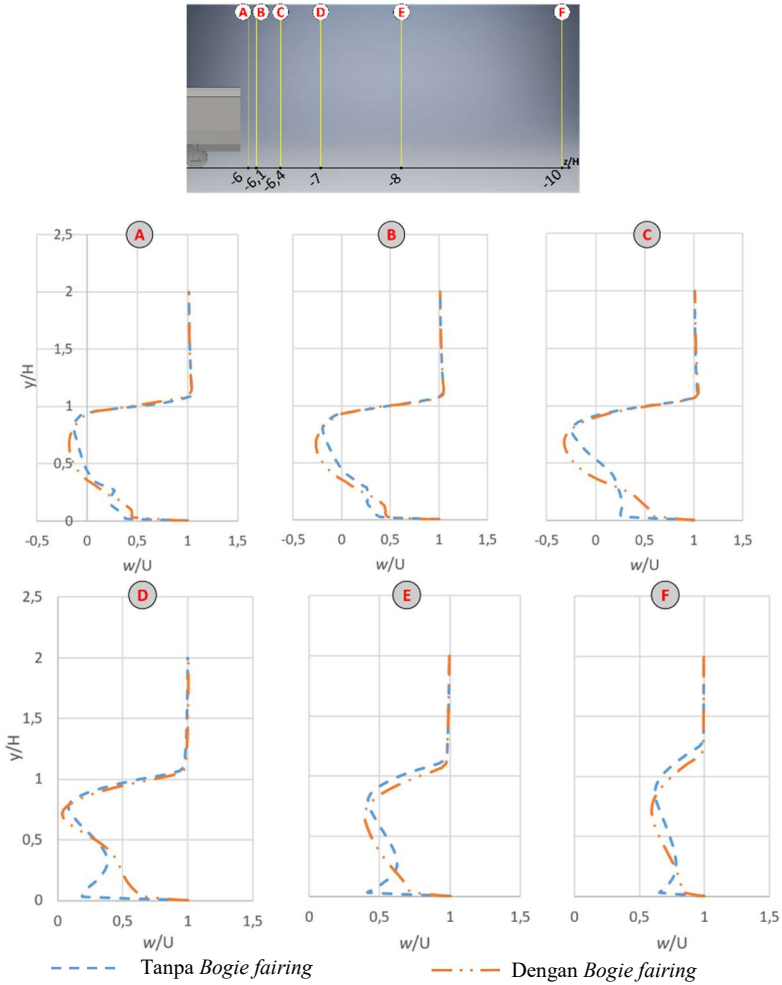

**Gambar 4.9** Kontur koefisien tekanan kereta pada ketinggian y/H = 0,706

Selanjutnya akan dilakukan analisa kuantitatif untuk menganalisis ukuran *wake* yang terbentuk di bagian belakang kerea. Analisis kuantitatif dilakukan dengan cara membuat grafik distribusi *dimensionless* z *velocity* (*w*/U) sepanjang garis pengambilan sampel profil kecepatan *wake*. Pengambilan sampel profil kecepatan dilakukan pada garis vertikal dan horizontal di daerah *wake* kereta. Garis vertikal diletakkan pada midspan dan garis horizontal diletakkan pada ketinggian y/H = 0,32. Lokasi pengambilan profil kecepatan ini merujuk pada penelitian wang et al (2019).

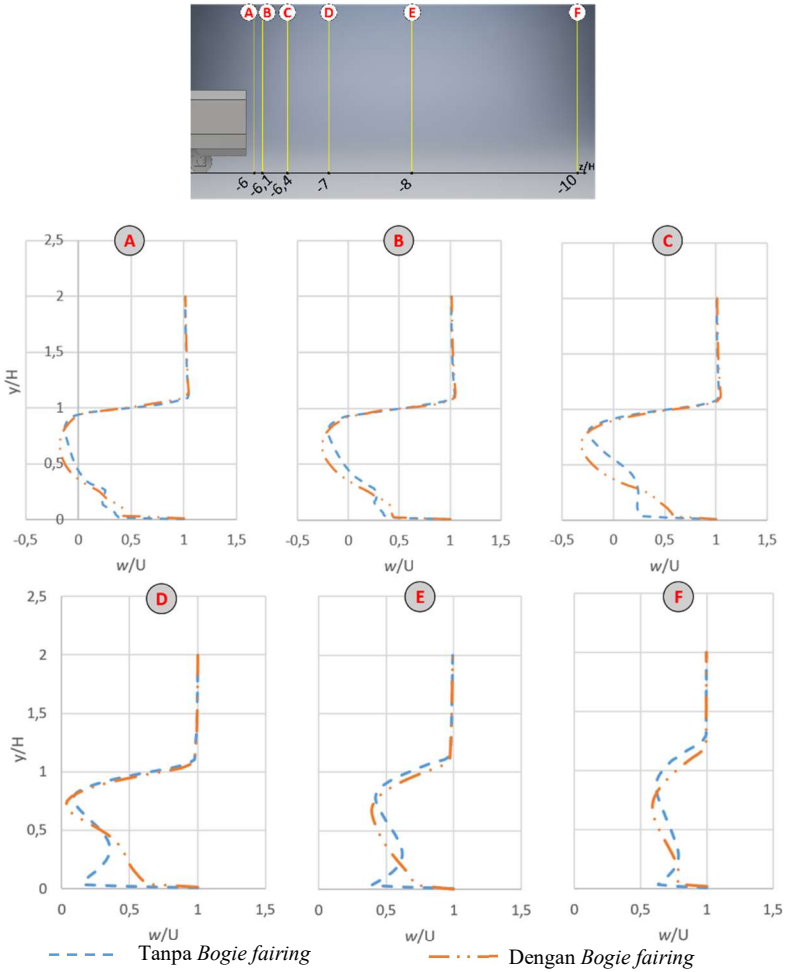


**Gambar 4.10** Garis pengambilan profil kecepatan pada daerah *wake*

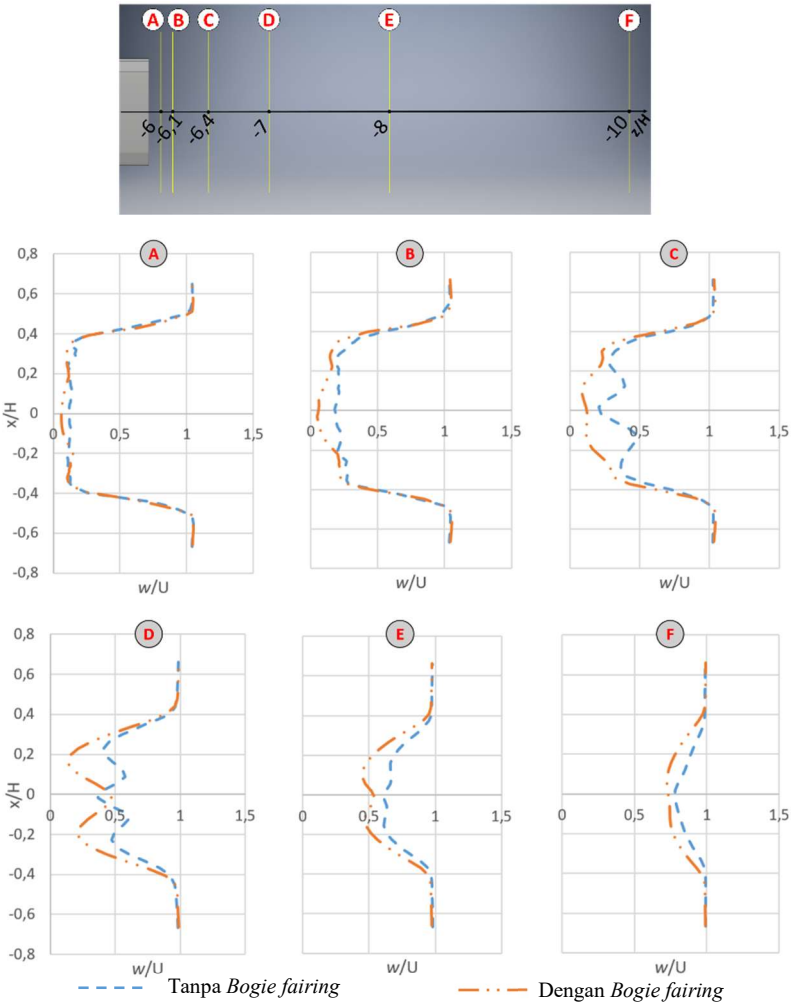
Gambar 4.11 dan 4.12 di bawah menyajikan grafik profil kecepatan daerah *wake* di sepanjang garis vetikal di belakang kereta. Gambar 4.13 dan 4.14 menampilkan grafik distribusi distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) di sepanjang garis horizontal di belakang kereta.



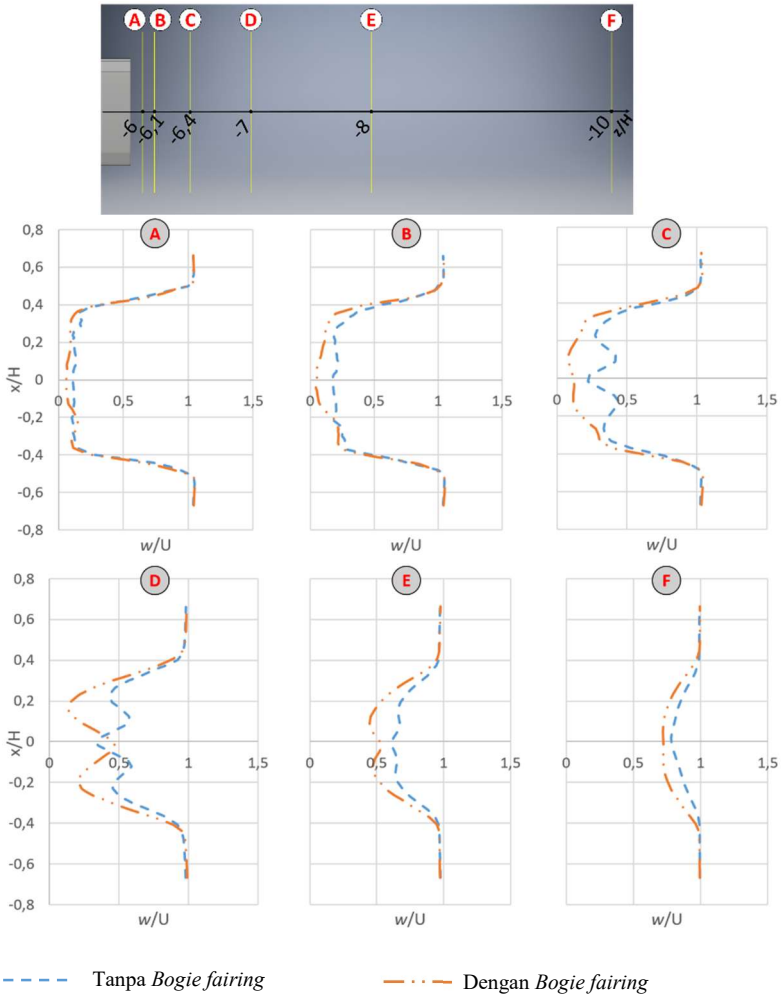

**Gambar 4.11** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) di sepanjang garis vertikal di belakang kereta pada kecepatan 33,33 m/s.




**Gambar 4.12** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) di sepanjang garis vertikal di belakang kereta pada kecepatan 44,44 m/s.




**Gambar 4.13** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) pada garis horizontal di ketingguan y/H = 0,32 pada kecepatan 33,33 m/s.




**Gambar 4.14** Grafik distribusi dimensionless z velocity (*w*/U) pada garis horizontal di ketingguan y/H = 0,32 pada kecepatan 44,44 m/s.

Dengan membandingkan gambar 4.11 dengan 4.11 dan gambar 4.13 dengan 4.14, variasi kecepatan 33,33 m/s dan 44,44 m/s tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap aliran pada daerah *wake* kereta. Hal ini dibuktikan dari tren distribusi kecepatan pada garis vertikal maupun horizontal yang sama pada kedua variasi kecepatan.

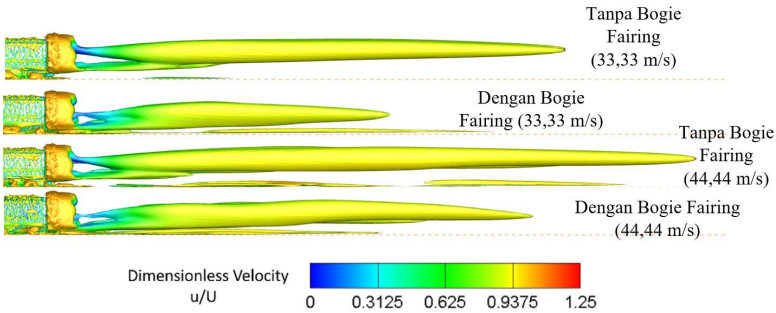
Melihat profil kecepatan vertikal dan horizontal pada z/H = - 5,99 (garis A), secara vertikal terdapat perbedaan distribusi kecepatan antara kereta tanpa *bogie fairing* dengan kereta dengan *bogie fairing*. Penambahan *bogie fairing* menyebabkan daerah *wake* yang terbentuk di dekat bagian belakang kereta lebih besar, terbukti dari distribusi kecepatan negatif yang lebih banyak di antara y/H = 0,2 hingga y/H = 0,8. Penambahan *bogie fairing* menyebabkan distribusi kecepatan yang lebih tinggi di sekitar daerah belakang *underbody* kereta yaitu pada ketinggian y/H = 0 hingga y/H = 0,2 yang diakibatkan oleh kecepatan aliran yang lebih tinggi di *underbody* kereta. Tidak ada perbedaan signifikan pada profil kecepatan di atas atap kereta atau y/H = 1. Pada profil kecepatan horizontal, penambahan *bogie fairing* menyebabkan kecepatan aliran diantara x/H = -0, 2 hingga x/H = 0,2 lebih rendah daripada kereta tanpa *bogie fairing* yang mengindikasikan daerah *wake* yang sedikit lebih lebar di dekat kereta.

Distribusi kecepatan vertikal aliran di bidang z/H = -6,09 (garis B) dan z/H = -6,39 (garis C) memiliki tren yang sama dengan distribusi kecepatan di bidang z/H = - 5,99 (garis A) dimana terdapat daearah dengan distribusi kecepatan *w*/U negatif yang lebih luas dengan penambahan *bogie fairing*. Secara horizontal, perbedaan kecepatan aliran semakin besar, dimana penambahan *bogie fairing* menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih kecil daripada kereta tanpa *bogie fairing* yang menandakan ukuran *wake* yang lebih lebar.

Pada bidang z/H = -6,89 (garis D), penambahan *bogie fairing* menyebabkan distribusi kecepatan pada ketinggian y/H = 0 hingga y/H = 0,5 lebih besar daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Dsitribusi kecepatan yang lebih rendah daripada kereta tanpa *bogie fairing* terjadi pada ketinggian y/H = 0,5 hingga y/H = 0,85. Pada distribusi kecepatan horizontal, penambahan *bogie fairing* menyebabkan distribusi kecepatan di bagian tengah lebih tinggi daripada kereta tanpa *bogie fairing*, sementara di sisi kiri dan kanan lebih rendah daripada kereta tanpa *bogie fairing*.

Tren distribusi kecepatan pada bidang z/H = -7,89 (garis E) dan z/H = -9,89 (garis F) menunjukkan profil yang cukup mirip. Pada bidang z/H = -7,89 terlihat bahwa dengan penambahan *bogie fairing*, kecepatan alirah di antara y/H = 0 hingga y/H = 0,25 lebih besar daripada kereta tanpa *bogie fairing*, sedangkan pada ketinggian y/H = 0,25 hingga y/H = 0,8, distribusi kecepatan kereta dengan *bogie fairing* lebih rendah daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Berdasarkan grafik vertikal E dan F, penambahan *bogie fairing* mengakibatkan adanya peningkatan kecepatan yang lebih besar di daerah di atas kereta, dibuktikan dengan distribusi kecepatan yang lebih besar di atas y/H = 0,8. Secara horizontal, penambahan *bogie fairing* menyebabkan distribusi kecepatan yang lebih rendah daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Seiring aliran mengalir hingga jarak z/H = -9,89, terdapat peningkatan kecepatan aliran namun didapatkan profil kecepatan dengan tren yang cukup mirip.

Ukuran wake yang tebentuk masih perlu diperjelas lagi, sehingga dilakukan visualisasi vortex yang terbentuk di sekitar kereta dengan memvisualisasikan kontur kecepatan pada isosurface Q criterion. Q criterion digunakan untuk memvisualisasikan daerah dimana terdapat vortex pada aliran. Gambar 4.15 menampilkan kontur kecepatan pada isosurface Q criterion = 1.




**Gambar 4.15** Kontur dimensionless velocity pada isosurface Q criterion = 1

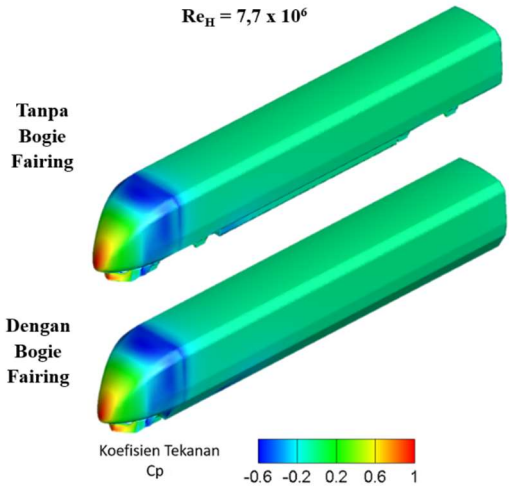
Berdasarkan gambar 4.15, didapatkan bahwa pada kereta dengan *bogie fairing* terbentuk vortex yang lebih besar pada sekitar underbody kereta dan vortex yang lebih kecil di permukaan belakang kereta, namun secara umum ukuran wake yang terbentuk pada kereta dengan *bogie fairing* lebih kecil kareta ukuran vortex yang terbentuk jauh lebih pendek dari kereta tanpa *bogie fairing*.

## 4.2 Analisis Cp pada Permukaan Kereta

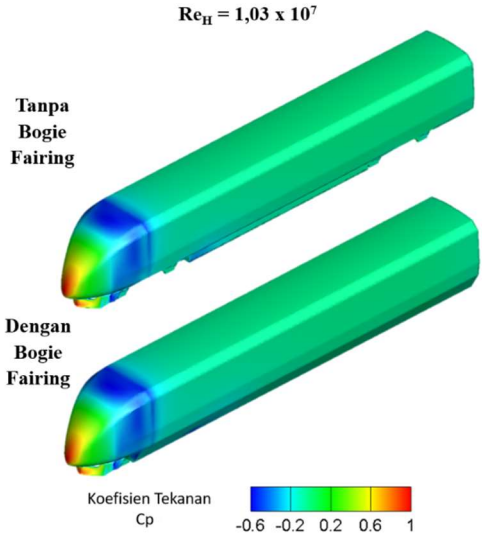
Pada subbab ini akan dilakukan analisis koefisien tekanan pada permukaan atas kereta, bagian *underbody* kereta, dan bagian samping kereta untuk mengetahui pengaruh penggunaan *bogie fairing* terhadap distribusi koefisien tekanan pada permukaan kereta. Gambar 4.16 menampilkan kontur koefisien tekanan pada permukaan atas kereta dan gambar 4.17, gambar 4.18, dan gambar 4.19 menampilkan kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta.

Berdasarkan gambar 4.12, pada semua kasus terdapat zona berwarna merah terang pada bagian *nose* kereta. Bagian ini merupakan leading edge *nose* kereta, dimana terjadi titik stagnasi pada daerah tersebut. Nilai koefisien tekanan pada titik stagnasi

adalah sebesar satu. Seiring aliran mengalir dari titik stagnasi menuju bagian atas dan samping kereta, aliran mengalami peningkatan kecepatan. Berdasarkan persamaan Bernoulli, untuk sebuah aliran yang berada pada streamline yang sama, aliran yang memiliki kecepatan tinggi akan menimbulkan tekanan statik yang rendah dan sebaliknya. Fenomena ini sudah sesuai dengan teori tersebut, karena seiring aliran mengalir menuju sisi atas dan sisi samping *nose*, terdapat penurun koefisien tekanan pada permukaan kereta, ditandai dengan perubahan warna kontur menjadi hijau dan biru. Koefisien tekanan terendah dicapai ketika aliran udara memiliki kecepatan tertinggi, yaitu pada bagian sambungan atara *nose* kereta dengan badan kereta, ditandai dengan kontur berwarna biru tua. Perubahan kecepatan aliran menunjukkan tren yang sama, dibuktikan dengan distribusi kontur Cp yang sama.



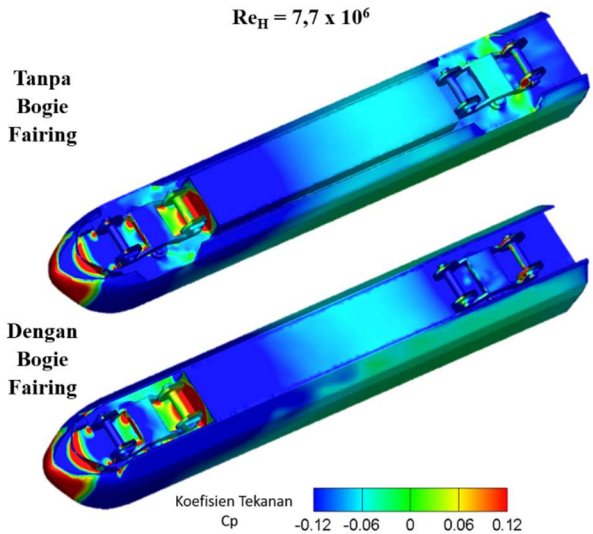

**Gambar 4.16** Kontur koefisien tekanan pada permukaan luar kereta (berlanjut)



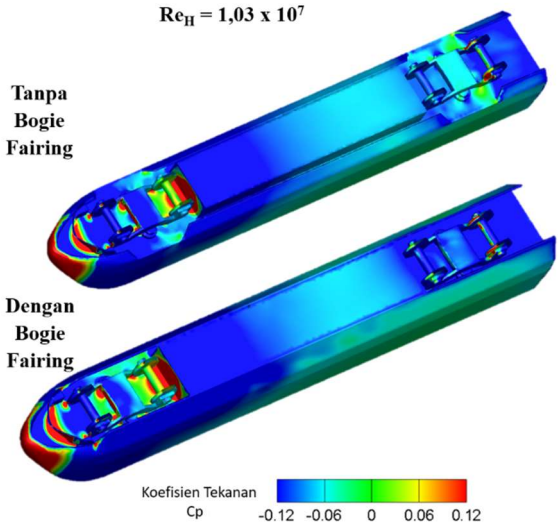

**Gambar 4.16** Kontur koefisien tekanan pada permukaan luar kereta (lanjutan)

Gambar 4.17 hingga 4.19 menyajikan kontur koefisien tekanan pada sisi *underbody* kereta pada masing masing kasus. Dapat dilihat bahwa, pada kedua kasus terdapat zona bertekanan tinggi pada bagian permukaan bogie endplate di sisi depan, diindikasikan dengan kontur koefisien tekanan berwarna merah tua di belakang bogie depan. Warna merah dan kuning pada bogie endplate kereta dengan *bogie fairing* sedikit lebih luas daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Hal ini justru berdampak buruk terhadap performa aerodinamika kereta karena nilai drag yang ditimbulkan bagian *underbody* kereta justru meningkat apabila terdapat nilai koefisien tekanan yang tinggi pada permukaan yang berhadapan dengan aliran. Apabila melihat kontur koefisien tekanan pada bogie belakang, penambahan *bogie fairing* dapat mengurangi tekanan pada bogie belakang kereta akibat dari tumbukan aliran yang mengalir dari sisi samping kereta, dilihat dari warna kontur

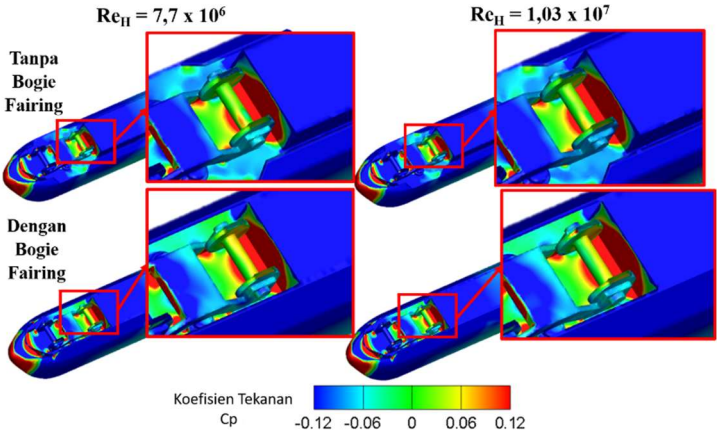
hijau yang berkurang di samping roda belakang, namun pada kereta dengan *bogie fairing* terdapat penambahan banyak zona dengan warna dominan merah di sisi depan roda. Hal ini berdampak buruk karena meningkatkan koefisien drag kereta. Apabila dikaitkan dengan kontur kecepatan aliran pada midspan kereta, kontur berwarna merah ini terjadi karena kecepatan aliran *underbody* yang mengalir di sekitar bogie belakang pada kereta dengan penambahan *bogie fairing* lebih tinggi daripada kereta tanpa *bogie fairing*, sehingga timbul tekanan yang lebih tinggi ketika aliran menumbuk bogie belakang.



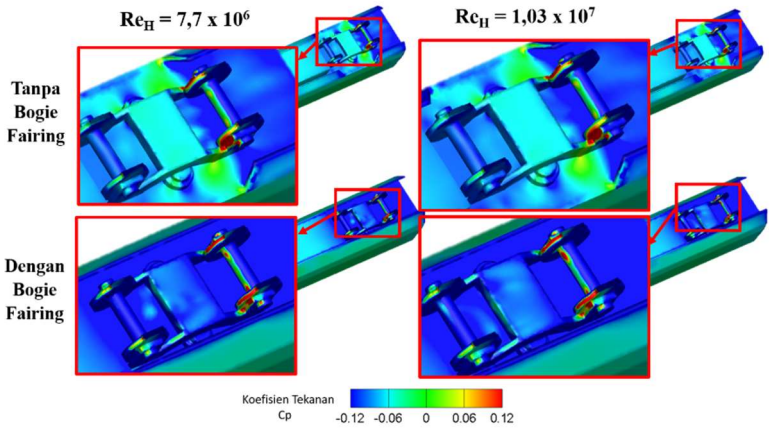

**Gambar 4.17** Kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta (berlanjut)




**Gambar 4.17** Kontur koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta (lanjutan)




**Gambar 4.18** Kontur koefisien tekanan pada bogie endplate

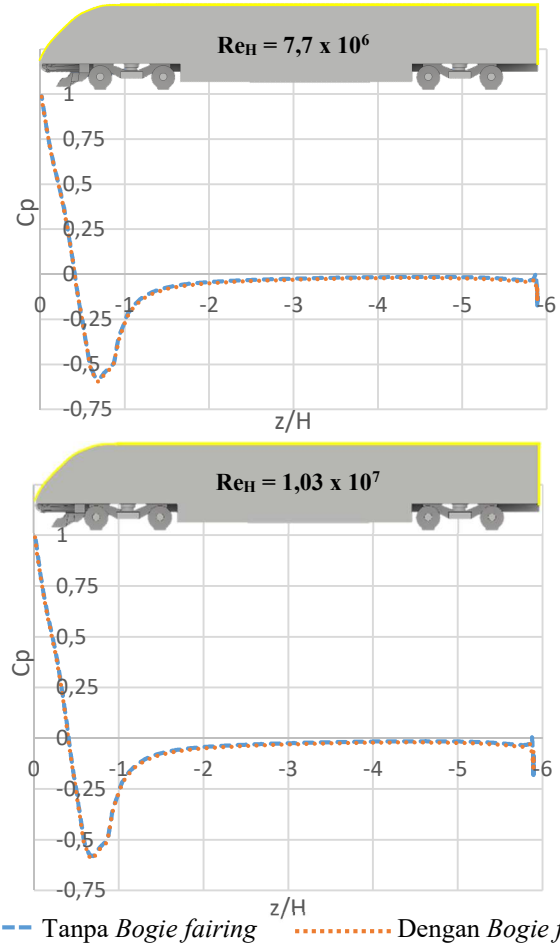



**Gambar 4.19** Kontur koefisien tekanan pada bogie belakang.

Selanjutnya dilakukan analisis kuantitatif nilai Cp pada permukaan kereta. Analisis kuantitatif dilakukan dengan membuat grafik koefisien tekanan di sisi atas, sisi bawah, dan sisi samping kereta. Pada sisi atas dan bawah, pengambilan data dilakukan pada midspan kereta, sedangkan pada bagian samping, pengambilan data dilakukan pada ketinggian y/H = 0,32 yaitu sejajar dengan titik stagnasi kereta. Gambar 4.20 menampilkan grafik distribusi koefisien tekanan pada bagian atas kereta semicepat.

Pada gambar 4.20, nilai koefisien tekanan sebesar satu merupakan titik stagnasi pada nose kereta. Seiring aliran mengalir menuju sisi atas kereta, aliran mengalami peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan, dibuktikan degan gradien garis yang turun hingga nilai negatif setelah aliran melewati titik stagnasi. Distribusi Cp menunjukkan tren yang sama pada semua kasus, di mana nilai Cp paling kecil didapat pada daerah sambungan antara *nose* dengan badan kereta. Pada kereta tanpa *bogie fairing* didapatkan nilai

minimum Cp sebesar -0,58 dan spade kereta dengan *bogie fairing* didapatkan nilai minimum Cp sebesar -0,59.




**Gambar 4.20** Grafik distribusi Cp pada bagian midspan atas kereta

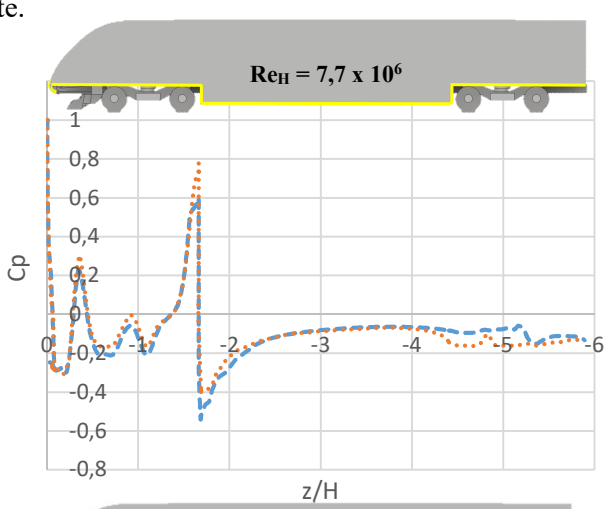
Setelah melewati puncak nose kereta, aliran mengalami penurunan kecepatan aliran sehingga koefisien tekanan berangsur

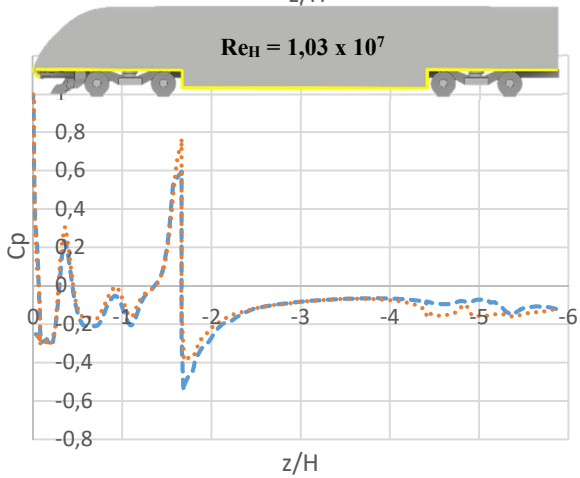
angsur naik hingga mendekatai nilai nol. Aliran terus mengalir pada bagian atas kereta hingga ke bagian belakang kereta, terdapat sedikit penurunan tekanan yang terjadi karena adanya percepatan lokal aliran di daerah belakang kereta, mendekati dearah wake. Selanjutnya terjadi peningkanan koefisien tekanan dilanjutkan oleh penurunan koefisien tekanan secara tajam dimana pada daerah ini terdapat indikasi adanya separasi aliran. Pada kedua kasus tidak terdapat perbedaan distribusi tekanan yang signifikan pada bagian atas kereta. Hal ini menandakan bahwa aliran pada bagian atas kereta tidak dipengaruhi oleh penggunaan *bogie fairing*.

Data kuantitatif untuk analisa koefisien tekanan pada bagian *underbody* kereta ditampilkan dalam bentuk grafik distribusi Cp di bagian midspan permukan *underbody* kereta semicepat seperti pada gambar 4.21 di bawah.

Berdasarkan gambar 4.21, titik stagnasi diindikasikan dengan koefisien tekanan bernilai satu. Seiring aliran mengalir dari titik stagnasi, terdapat penurunan tekanan. Aliran mengalir hingga menumbuk permukaan bogie endplate depan. Garis grafik Cp pada bagian *bogie endplate* depan dapat dilihat pada garis vertikal di sekitar z/H = -1,6. Didapatkan bahwa nilai Cp pada kereta dengan *bogie fairing* lebih besar daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, didapatkan nilai Cp permukaan endplate maksimum sekitar 0,6 dan Cp minimum sekitar -0,5. Pada kereta dengan *bogie fairing* didapatkan nilai Cp permukaan endplate maksimum sekitar 0,7 dan Cp minimum sekitar -0,35. Tekanan tinggi pada permukaan *bogie endplate* berdampak buruk karena dapat memperbesar gaya drag yang dialami kereta. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui kontur kecepatan pada bidang y = 0,235 H yang sebelumnya telah dibahas, di mana didapatkan bahwa aliran memasuki bogie depan melalui celah antara spoiler dengan *nose* pada kereta dengan *bogie fairing* terperangkap pada bagian bawah kereta, hal ini mengakibatkan seluruh aliran menghantam

permukaan bogie endplate dengan kecepatan yang lebih tinggi sehingga timbul tekanan yang lebih tinggi pada permukaan bogie endplate.



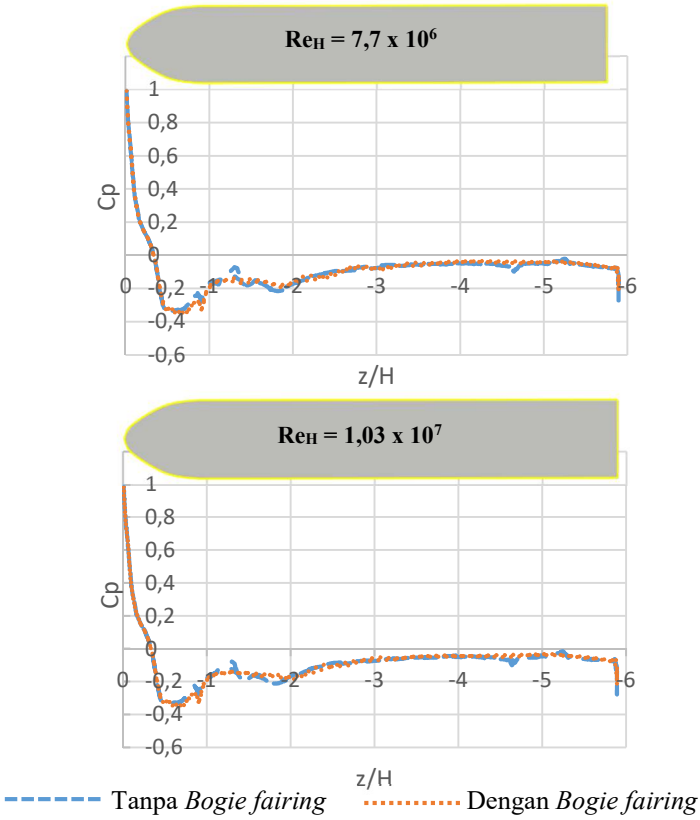

Tanpa *Bogie fairing* Dengan *Bogie fairing*

**Gambar 4.21** Grafik distribusi Cp pada bagian midspan *underbody* kereta

Bagian yang perlu dibahas selanjutnya adalah bogie frontplate yang terletak di depan bogie belakang kereta. Pada grafik, lokasi permukaan ini diindikasikan pada bagian grafik Cp yang turun secara mendadak di sekitar z/H = -4,4. Dapat dilihat bahwa nilai Cp pada permukaan bogie frontplate di kereta dengan *bogie fairing* lebih rendah daripada kereta tanpa *bogie fairing*, sehingga mengakibatkan drag yang lebih besar. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, didapatkan nilai Cp minimum pada permukaan frontplate sekitar -0,09. Pada kereta dengan *bogie fairing* didapatkan nilai Cp minimum pada permukaan frontplate sekitar -0,15. Nilai Cp yang lebih rendah ini dapat terjadi karena penambahan *bogie fairing* menghalangi aliran dari samping untuk daerah bogie belakang dan aliran pada yang melewati bagian *underbody* dengan lebih cepat menyebabkan zona resirkulasi dengan tekanan yang lebih rendah pada bagian belakang bogie frontplate. Tren yang sama terlihat pada kedua variasi kecepatan.

Melalui pembahasan Cp pada bagian *underbody*, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *bogie fairing* sangat berpengaruh terhadap aliran *underbody* kereta, di mana pengaruh yang ditimbulkan dapat meningkatkan koefisien drag kereta karena terjadi perbedaan tekanan yang lebih besar antara bogie endplate dengan bogie frontplate. Berdasarkan analisis yang dilakukan, *bogie fairing* tidak memberikan pengaruh positif terhadap desain gerbong depan kereta semicepat Jakarta – Surabaya saat ini, dimana terdapat celah antara spoiler dengan bagian bawah *nose* kereta yang mengakibatkan penambahan *bogie fairing* di bogie depan kereta justru memperburuk performa aerodinamika, karena aliran yang memasuki celah antara spoiler dengan bagian bawah *nose* menghantam permukaan bogie endplate dengan lebih kuat dan memaksa aliran untuk mengalir ke daerah bogie belakang dengan kecepatan yang lebih tinggi.

Gambar 4.16 menampilkan grafik distribusi koefisien tekanan di sisi samping kereta pada ketinggian y/H = 0,32 atau sejajar dengan titik stagnasi kereta.



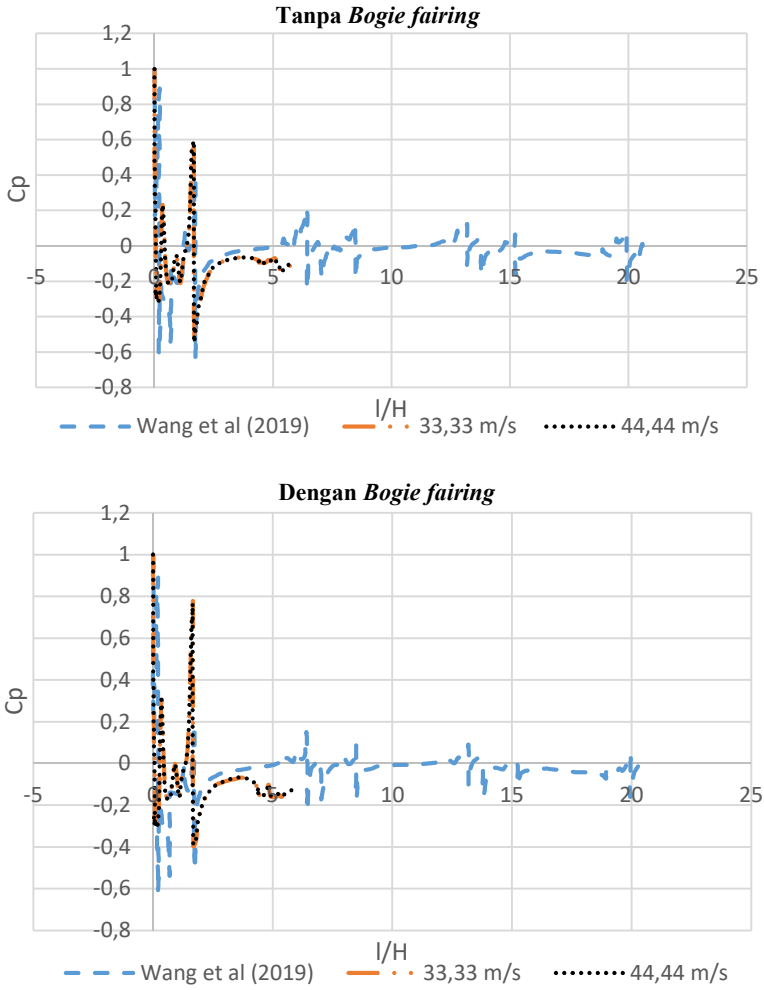

**Gambar 4.22** Grafik distribusi koefisien tekanan di sisi samping kereta pada ketinggian y/H = 0,32

Berdasarkan gambar 4.22, nilai koefisien tekanan sebesar satu menandakan titik stagnasi kereta. Tekanan statik menurun seiring aliran mengalir pada sisi samping nose kereta dan kembali meningkat ketika aliran mengalir di samping badan kereta. Hal ini terjadi karena terdapat peningkatan kecepatan aliran pada sisi

samping nose dan penurunan kecepatan aliran ketika aliran mengalir di samping badan kereta. Berdasarkan grafik, penambahan *bogie fairing* menyebabkan tekanan pada daerah sambungan nose dengan badan kereta menurun, ini mengindikasikan bahwa terdapat aliran yang lebih cepat di daerah tersebut. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, terdapat fluktuasi Cp di daerah sekitar bogie yaitu pada z/H = -0,7 hingga z/H = -1,5 dan z/H = -4,7 hingga z/H = -5,5. Pada permukaan belakang kereta, didapatkan bahwa koefisien tekanan kereta dengan *bogie fairing* sedikit lebih tinggi, yakni dengan nilai minimum sebesar -0,21 pada kereta dengan *bogie fairing* dan -0,27 pada kereta tanpa *bogie fairing.*

Selanjutnya akan dilakukan komparasi koefisien tekanan pada midspan underbody kereta dengan penelitian yang dilakukan Wang et al (2019). Gambar 4.23 di bawah menunjukkan garis pengambilan data koefisien tekanan pada penelitian Wang et al (2019) dan kereta semicepat Jakarta – Surabaya. Komparasi koefisien tekanan pada underbody kereta ditampilkan pada gambar 4.24

**Gambar 4.23** Garis pengambilan koefisien tekanan

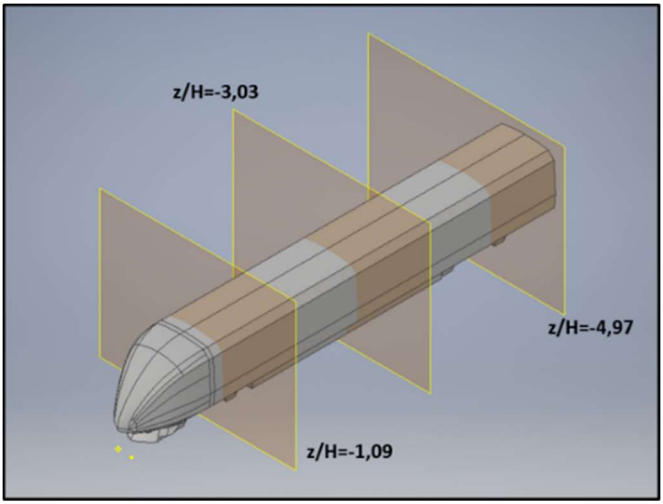



**Gambar 4.24** Komparasi koefisien tekanan underbody kereta

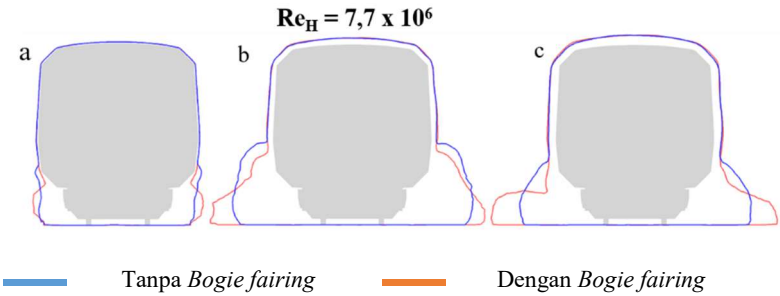
Berdasarkan grafik distribusi koefisien tekanan, terdapat perbedaan fluktuasi Cp pada bagian depan kereta. Hal ini diakibatkan karena perbedaan geometri kereta yang digunakan, dimana kereta pada penelitian Wang et al (2019) memiliki desain spoiler yang menyatu dengan nose kereta. Terdapat daerah bertekanan tinggi pada daerah bogie endplate dimana nilai peak Cp pada penelitian ini lebih tinggi daripada Wang et al (2019). Hal tersebut terjadi karena aliran memasuki daerah *underbody* kereta melalui celah antara spoiler dengan nose sehingga aliran memiliki kecepatan yang lebih tinggi dan menghasilkan tekanan yang lebih tinggi ketika menumbuk bogie endplate. Penambahan *bogie fairing* menyebabkan peningkatan peak Cp karena terperangkapnya aliran pada sisi underbody kereta sehingga aliran akan dipaksa mengalir dengan kecepatan lebih tinggi dan timbul tekanan tinggi ketika aliran menumbuk bogie endplate.

## 4.3 Analisis *Shear Layer* dan *Boundary Layer*

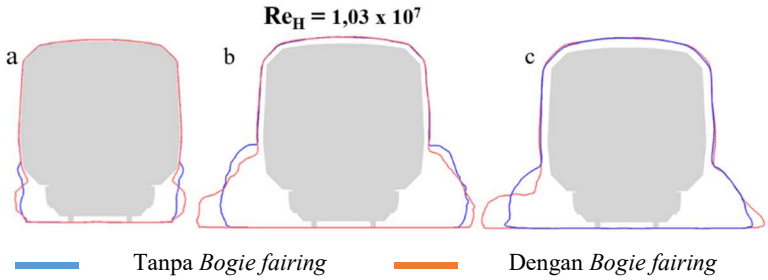
Pada subbab ini akan dilakukan analisa terhadap fenomena *shear layer* dan *boundary layer* yang terbentuk di sekitar kereta dengan manyajikan kontur isoline $u$/U = 0,99, grafik profil kecepatan *boundary layer*, grafik ketebalan batas *shear layer*. Gambar 4.25 menampilkan lokasi pengambilan kontur isoline pada bidang yang memotong badan kereta searah sumbu x. Gambar 4.26 menampilkan kontur isoline yang diambil dengan membuat iso-surface dengan nilai 99% $U_{freestream}$. Gambar 4.27 adalah kontur isoline yang diambil pada ketinggian yang sejajar dengan titik stagnasi, yaitu pada y/H = 0,32.



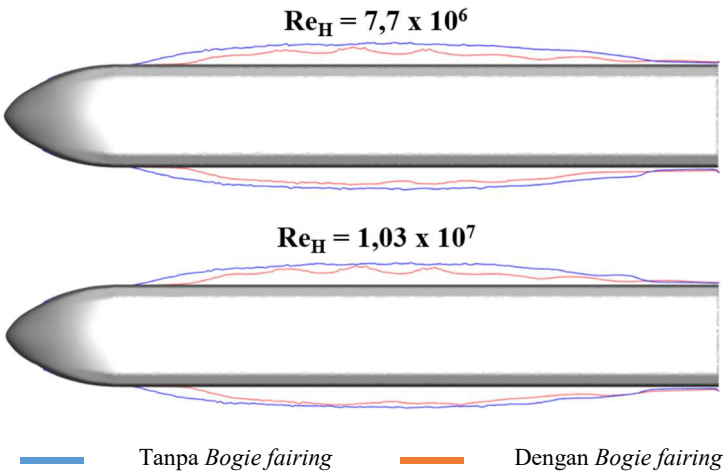

**Gambar 4.25** Lokasi pengambilan kontur isoline *u*/U = 0,99 yang memotong badan kereta searah sumbu x




**Gambar 4.26** Kontur isoline *u*/U = 0,99 pada bidang yang memotong badan kereta pada (a) z/H = -1,09 (b) z/H = - 3,03 (c) z/H = -4,97 (Berlanjut)




**Gambar 4.26** Kontur isoline *u*/U = 0,99 pada bidang yang memotong badan kereta pada (a) z/H = -1,09 (b) z/H = - 3,03 (c) z/H = -4,97 (lanjutan)




**Gambar 4.27** Kontur isoline *u*/U = 0,99 pada ketinggian y/H = 0,32

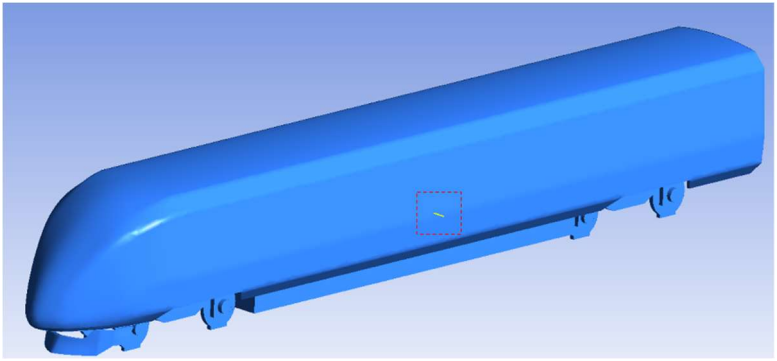
Berdasarkan gambar 4.26, penambahan *bogie fairing* tidak tidak berpengaruh terhadap ketebalan *boundary layer* yang terbentuk di bagian atas kereta, terbukti dari kontur garis berwarna biru dan oranye yang saling berimpitan pada bagian atap kereta.

Penambahan *bogie fairing* juga tidak terlalu berpengaruh terhadap ketebalan *boundary layer* yang terbentuk di sisi samping atas kereta. Perbedaan yang signifikan terlihat pada bagian sisi samping bawah, dimana terlihat bahwa penambahan *bogie fairing* memperbesar ketebalan batas *shear layer* pada daerah di dekat *underbody* dan memperkecil ketebalan batas *shear layer* pada daerah di atasnya. Penebalan pada daerah di dekat *underbody* terjadi karena penambahan *bogie fairing* memperbesar lebar permukaan di bagian bawah kereta, yang menyebabkan aliran terdefleksi lebih jauh ke sisi samping kereta. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, tidak terdapat permukaan yang berada di dekat tanah, sehingga kontur isoline yang terbentuk lebih tipis.

Gambar 4.27 menampilkan kontur isoline $u$/U = 0,99 pada ketinggian y/H = 0,32 atau sejajar dengan titik stagnasi kereta. Pada ketinggian ini, terlihat bahwa penambahan *bogie fairing* mampu memperkecil ketebalan daerah *shear layer* yang terbentuk. Penebalan daerah *shear layer* pada kereta dengan penambahan *bogie fairing* terjadi dengan lebih lambat daripada kereta tanpa *bogie fairing*. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, terjadi peningkatan ketebalan batas *shear layer* yang lebih cepat karena terdapat aliran udara yang mengalir keluar dari daerah bogie depan, sehingga terbentuk *shear layer* yang lebih tebal di sisi samping kereta. Secara umum, terjadi peningkatan ketebalan *shear layer* seiring aliran mengalir menuju bagian tengah kereta, kemudian dilanjutkan dengan penipisan ketebalan *shear layer* seiring aliran mengalir ke bagian belakang kereta.

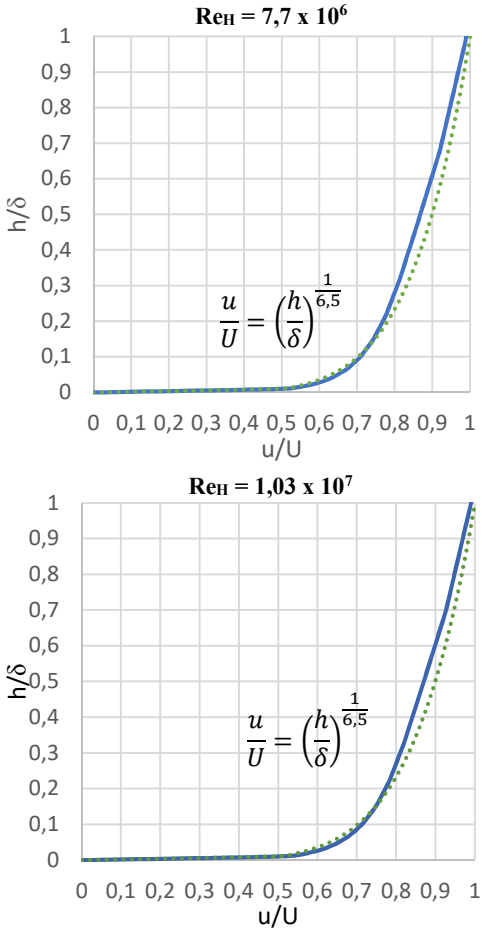
Analisa kuantitatif dilakukan dengan menampilkan grafik profil kecepatan *boundary layer* dan grafik ketebalan batas *shear layer*. Pengambilan grafik profil kecepatan *boundary layer* dilakukan pada permukaan samping kereta tanpa *bogie fairing*, di ketinggian y/H = 0,5 pada bidang z/H = -3,03 seperti pada gambar 4.28. Pertimbangan untuk mengambil data pada daerah tersebut

karena berdasarkan kontur isoline u/U = 0,99, ketebalan *boundary layer* antara kereta tanpa *bogie fairing* dan kereta dengan *bogie fairing* cukup mirip, sehingga dengan mengambil sampel profil kecepatan pada daerah tersebut, jenis *boundary layer* yang terbentuk pada seluruh permukaan kereta dapat dijustifikasi sebagai *laminar boundary layer* atau *turbulent boundary layer*. Grafik ketebalan batas *shear layer* diambil pada ketinggian y/H = 0,32 dengan jumlah sampel sebanyak lima titik. Pengambilan grafik ketebalan batas *shear layer* pada ketinggian y/H = 0,32 mengacu pada penelitian Wang et al (2019) yang menampilkan isoline pada ketinggian sejajar dengan titik stagnasi.

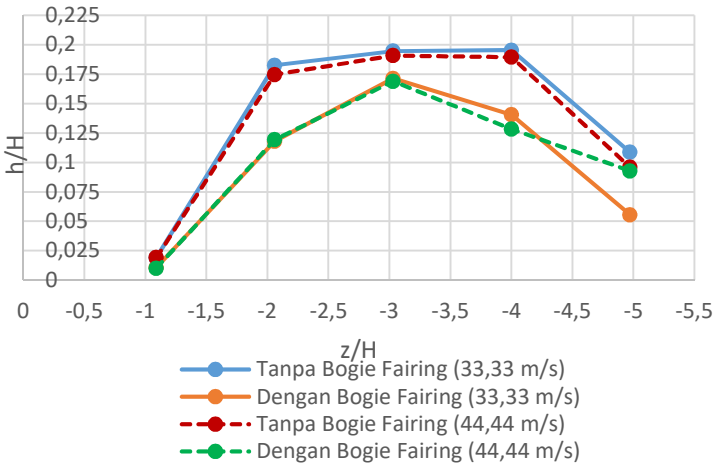


**Gambar 4.28** Lokasi garis pengambilan sampel profil kecepatan pada ketinggian y/H = 0,5 pada bidang z/H = -3,03

Gambar 4.29 menampilkan grafik profil kecepatan pada *boundary layer*. Gambar 4.30 menampilkan grafik ketebalan batas shear layer yang diambil pada lima titik di ketinggian 0,32H.




**Gambar 4.29** Grafik sampel profil kecepatan pada *boundary layer* pada ketinggian y/H = 0,5 di bidang z/H = -3,03




**Gambar 4.30** Grafik ketebalan batas *shear layer* pada ketinggian y/H = 0,32

Gambar 4.29 menunjukkan sampel profil kecepatan di dekat permukaan kereta pada kecepatan 33,33 m/s ($Re_H$ = 7,7 x $10^6$) dan kecepatan 44,44 m/s ($Re_H$ = 1,03 x $10^7$). Variabel h adalah ketinggian yang dihitung dari permukaan kereta dan variabel δ adalah *boundary layer thickness* yang nilainya diambil pada titik yang memiliki nilai 99% kecepatan freestream (U). Dari pengukuran yang dilakukan didapatkan nilai δ pada $Re_H$ = 7,7 x $10^6$ sebesar 0,092 m dan pada $Re_H$ = 1,03 x $10^7$ sebesar 0,09 m. Profil kecepatan tersebut akan didekati dengan persamaan *power law*, kemudian dilakukan penghitungan *shape factor* (*H*) untuk menentukan jenis *boundary layer* yang terbentuk. Persamaan profil kecepatan dalam bentuk *power law* dan *shape factor* telah ditunjukkan pada persamaan 2.3 dan 2.8 sebagai berikut.

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{h}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (h < \delta) \qquad (2.3)$$

$$H = \frac{n+2}{n} \tag{2.8}$$

Dimana pada kasus aliran pada permukaan kereta, variabel yang digunakan adalah sebagai berikut

$u$ = Kecepatan lokal aliran pada ketinggian h (m/s)

U = Kecepatan aliran *freestream* (m/s)

$h$ = Ketinggian dihitung dari permukaan kereta (m)

$H$ = shape factor

Pada umumnya *turbulent boundary layer* memiliki nilai $H$ sebesar 1,3 pada *zero pressure gradient* hingga 2,5 pada titik separasi. Dari pendekatan yang telah dilakukan pada gambar 4.29, didapatkan nilai n sekitar 6,5 untuk kedua sampel, berdasarkan hal tersebut dihitung nilai $H$. Didapatkan nilai $H$ sebesar 1,307 sehingga *boundary layer* yang terbentuk adalah *turbulent boundary layer*.

Gambar 4.30 menampilkan grafik ketebalan batas *shear layer* pada lima titik sampel di bidang z/H = 0,32. Nilai h adalah jarak titik $u$/U = 0,99 terhadap permukaan kereta. Berdasarkan grafik tersebut, ketebalan shear layer pada kereta tanpa *bogie fairing* meningkat hingga jarak di sekitar z/H = -4 kemudian turun ketika aliran mengalir ke sisi belakang kereta yaitu di sekitar z/H = -5. Terjadi penipisan *shear layer* ketika kecepatan aliran meningkat. Pada kereta dengan *bogie fairing*, penurunan ketebalan batas *shear layer* terjadi lebih awal, yatu dimulai pada z/H = -3,03. Peningkatan kecepatan menyebabkan adanya penipisan pada z/H = -4 dan penebalan *shear layer* pada z/H = -5. Penipisian daerah shear layer pada belakang kereta terjadi karena terdapat interaksi aliran yang terhempas di sisi samping kereta, sehingga daerah shear layer semakin kecil seiring menuju bagian balakang karena aliran

yang terhempas mendapatkan energy kinetik dari aliran freestream dan meningkatkan kecepatannya. Hal ini menjadikan titik di mana nilai *u*/U = 0,99 semakin dekat dengan kereta setelah aliran melewati bagian tengah kereta. Berdasarkan grafik, secara umum penambahan *bogie fairing* dapat mempertipis ketebalan *shear layer* yang terbentuk di ketinggian y/H = 0,32. Ketebalan *boundary layer* dan daerah shear layer berpengaruh terhadap *viscous drag* yang dialami kereta, di mana umumnya penipisan *boundary layer* thickness menyebabkan menurunnya *viscous* drag. Evaluasi lebih detail terhadap *viscous drag* akan dibahas pada subbab selanjutnya.

## 4.4 Analisis Koefisien Drag

Gaya drag yang dialami kereta dievaluasi dengan menyajikan parameter *dimensionless*, yaitu koefisien drag. Besar koefisien drag yang dialami oleh kereta dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara freestream dan densitas udara yang mengalir. Persamaan koefisien drag sesuai dengan persamaan 2.3, yaitu sebagai berikut

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}.\rho.U^2.A} \tag{2.3}$$

Di mana pada penelitian ini, variabel dalam persamaan tersebut adalah :

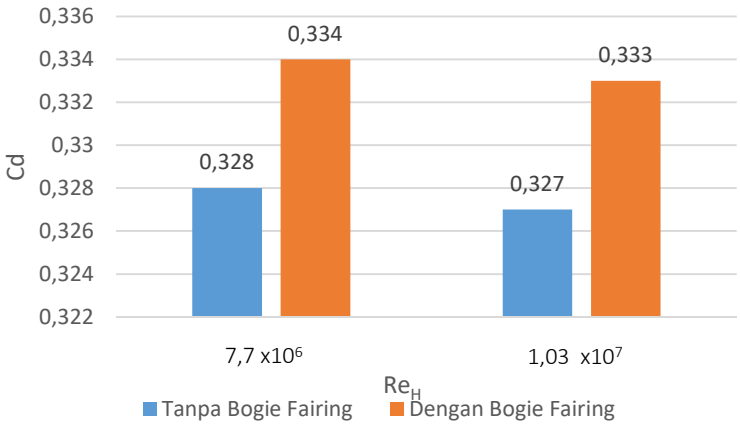
A : Proyeksi luas permukaan kereta tegak lurus terhadap arah aliran ($m^2$)

$F_D$ : Gaya *Drag* (Newton)

$\rho$ : Massa jenis fluida (kg/m$^3$)

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

Dari simulasi yang telah dilakukan, didapatkan koefisien drag desain kereta semicepat. Gambar 4.31 menampilkan grafik koefisien drag terhadap Reynolds number aliran. Nilai $Re_H$ sebesar 7,7 x $10^6$ didapatkan pada kecepatan freestream sebesar 33,33 m/s dan $Re_H$ sebesar 1,03 x $10^7$ didapatkan pada kecepatan freestream sebesar 44,44 m/s. Nilai koefisien drag dari kereta tanpa *bogie fairing* pada $Re_H$ sebesar 7,7 x $10^6$ adalah sebesar 0,328 dan pada $Re_H$ sebesar 1,03 x $10^7$ sebesar 0,327. Didapatkan bahwa nilai koefisien drag yang tertinggi terdapat pada kereta dengan *bogie fairing* dengan nilai koefisien drag sebesar 0,334 pada $Re_H$ sebesar 7,7 x $10^6$ dan 0,333 pada $Re_H$ sebesar 1,03 x $10^7$. Hal ini bertolak belakang dengan penelitian terdahulu yang telah dilakukan pada kereta cepat, di mana penggunaan *bogie fairing* dapat menurunkan koefisien drag kereta. Penggunaan *bogie fairing* pada kereta semicepat meningkatkan koefisien drag sebesar 1.83 % pada kedua variasi kecepatan.



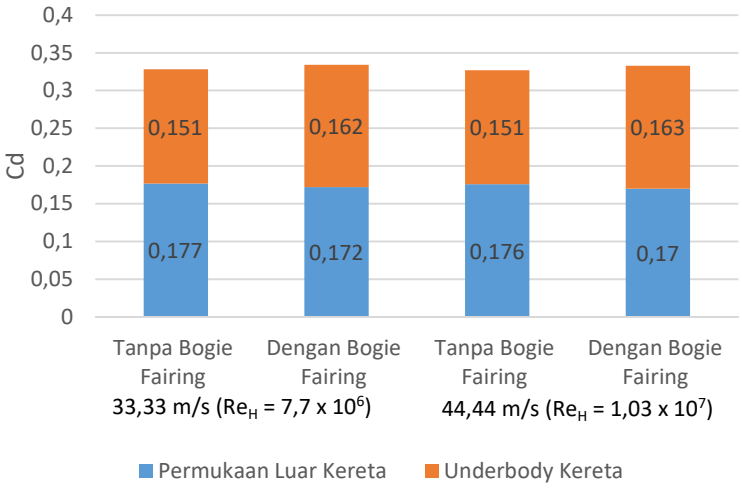

**Gambar 4.31** Grafik koefisien drag terhadap $Re_H$.

Gambar 4.32 menampilkan kontribusi permukaan luar kereta dan bagian *underbody* kereta, seperti spoiler, bogie, dan

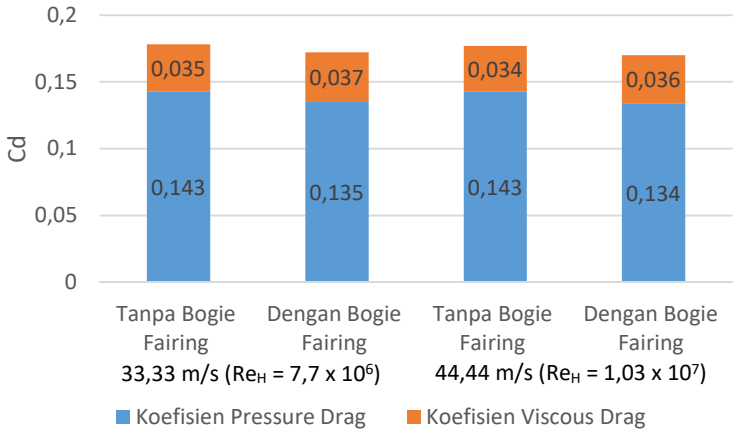
permukaan *underbody*, terhadap nilai total koefisien drag desain kereta semi cepat. Pada kecepatan aliran sebesar 33,33 m/s ($Re_H$ = 7,7 x $10^6$) bagian *underbody* kereta tanpa *bogie fairing* berkontribusi sebesar 46% dari total gaya drag yang dialami kereta, sedangkan bagian *underbody* kereta dengan *bogie fairing* berkontribusi sebesar 48,5% dari gaya drag yang dialami kereta. Pada kecepatan aliran sebesar 44,44 m/s ($Re_H$ = 1,03 x $10^7$), bagian *underbody* kereta tanpa *bogie fairing* berkontribusi sebesar 46,2% dari total gaya drag yang dialami kereta, sedangkan bagian *underbody* kereta dengan *bogie fairing* berkontribusi sebesar 48,9% dari gaya drag yang dialami kereta. Hal ini menandakan bahwa bagian *underbody* kereta mengakibatkan hampir separuh dari gaya drag kereta *single car* dan terjadi peningkatan koefisien drag underbody kereta ketika penambahan *bogie fairing* dilakukan. Adanya peningkatan gaya drag dari bagian *underbody* kereta disebabkan oleh peningkatan tekanan pada bagian bogie endplate, penurunan tekanan pada bogie frontplate, dan tekanan akibat tumbukan dari aliran yang melewati bogie belakang yang lebih besar seperti yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Berdasarkan grafik, terdapat penurunan koefisien drag pada yang dialami permukaan atas kereta pada kereta dengan *bogie fairing*.

Untuk menganalisa gaya drag yang dialami permukaan luar kereta, maka dibuat grafik jumlah koefisien pressure drag dan viscous drag. Gambar 4.33 menampilkan kontribusi pressure drag dan viscous drag terhadap total gaya drag yang dialami oleh kereta.

Berdasarkan gambar 4.33, penambahan *bogie fairing* mengakibatkan penurunan pressure drag dan mengakibatkan peningkatan viscous drag yang dialami kereta. Penurunan pressure drag sebesar 5,6% terjadi pada $Re_H$ = 7,7 x $10^6$ dan penurunan pressure drag sebesar 6,3 % terjadi pada $Re_H$ = 1.03 x $10^7$. Peningkatan viscous drag sebesar 5,7 % terjadi pada $Re_H$ = 7,7 x $10^6$ dan peningkatan sebesar 5,9% terjadi pada $Re_H$ = 1.03 x $10^7$.




**Gambar 4.32** Distribusi koefisien drag kereta




**Gambar 4.33** Koefisien *pressure drag* dan *viscous drag* pada permukaan atas kereta

Secara umum, viscous drag tidak berkontribusi terlalu besar pada koefisien drag ayng dialami permukaan luar kereta. Hal ini dimungkinkan karena penelitian ini hanya menggunakan lokomotif depan saja. Pada kereta tanpa *bogie fairing*, viscous drag mencakup sekitar 19,7% gaya drag permukaan atas kereta pada $Re_H = 7{,}7 \times 10^6$ dan 19,2% gaya drag permukaan atas kereta pada $Re_H = 1{,}03 \times 10^7$. Pada kereta dengan *bogie fairing*, viscous drag mencakup sekitar 21,5% gaya drag permukaan atas kereta pada $Re_H = 7{,}7 \times 10^6$ dan 21,2% gaya drag permukaan atas kereta pada $Re_H = 1{,}03 \times 10^7$. Penambahan *bogie fairing* meningkatkan koefisien viscous drag sebesar 5,7% pada kecepatan 33,33 m/s dan peningkatan sebesar 8,8% pada kecepatan 44,44 m/s. Peningkatan viscous drag dapat terjadi karena adanya perluasan permukaan yang dialiri oleh udara dengan penambahan *bogie fairing*.

# BAB V
# PENUTUP

## 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terhadap desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya tanpa *bogie fairing* dan desain kereta semicepat Jakarta – Surabaya dengan *bogie fairing*, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan *bogie fairing* tidak meningkatkan performa aerodinamika pada kereta *single car*. Terjadi kenaikan koefisien drag (Cd) sebesar 1,83% dibandingkan kereta tanpa *bogie fairing*. Pada kereta tanpa *bogie fairing* didapatkan koefisien drag sebesar 0,328 pada pada $Re_H$ = 7,7 x $10^6$ dan sebesar dan 0,327 pada $Re_H$ = 1.03 x $10^7$. Pada kereta dengan *bogie fairing* terjadi kenaikan koefisien drag sebesar 1,83% menjadi 0,334 pada $Re_H$ = 7,7 x $10^6$ dan 0,333 pada $Re_H$ = 1.03 x $10^7$.
2. Penambahan *bogie fairing* menyebabkan munculnya *vortex* kedua di atas *vortex* utama pada daerah *wake* kereta dan memperkecil ukuran *wake* yang terbentuk di belakang kereta.
3. Penambahan *bogie fairing* menyebabkan peningkatan kecepatan aliran yang melewati bagian *underbody* kereta yang berakibat pada peningkatan koefisien drag (Cd) *underbody* kereta.
4. Penambahan *bogie fairing* menyebabkan penipisan *shear layer* di sekitar ketinggian y/H = 0,32 namun mempertebal *shear layer* yang terbentuk di sekitar *underbody* kereta.

## 5.2 Saran

Berikut merupakan beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian berikutnya.

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh komponen pada *underbody* kereta terhadap aerodinamika kereta karena bagian *underbody* kereta menyumbang hampir separuh dari gaya drag yang dialami kereta.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut terhadap desain spoiler kereta, karena berdasarkan penelitian yang dilakukan desain spoiler yang tidak menjadi satu dengan *nose* menyebabkan aliran menumbuk permukaan *bogie endplate* secara langsung dan menyebabkan adanya aliran yang mengalir ke sisi samping kereta yang dapat mempertebal *boundary layer thickness* di badan samping kereta.
3. Diperlukan penelitian pengaruh penggunaan *bogie fairing* pada model kereta dengan jumlah gerbong lebih dari satu.

# DAFTAR PUSTAKA


Wang, J., Gao, G., Li, X., Liang, X. dan Zhang ,J., Apr. 2019. "Effect of Bogie fairings on the Flow Behaviours and Aerodynamic Peformance of a High – Speed Train". **Vehicle System Dynamics** Vol. 58: 890 – 910.

Zhang, J., Wang, J. Wang, Q. Xiong, X. dan Gao, G., Apr 2018. "A Study of the Influence of Bogie Cut Outs' Angles on the Aerodynamic Performance of a High Speed Train". **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics** Vol. 175: 153 – 168.

Kwak, M. Lee, Y., Lee, J., Cho, J., Kim, K., dan Lee, D., 2012. "Experimental Study on Aerodynamic Drag Characteristics by Train Underody Shape Variation". **AIAA Applied Aerodynamics Conference**, New Orleans: 25 – 28 Juni 2012.

Mancini, G. Malfatti, A., Violi, A.G., Matschke, G., 2001. "Effects of Experimental *Bogie fairing*s on the Aerodynamic Drag of the ETR 500 High Speed Train". **Proceedings of the World Congress on Railway Research**, Koln: 25 – 29 November 2001.

Ido, A., Kondo, Y., Matsumura, T., Suzuki, M., Maeda, T., 2001. "Wind Tunnel Tests to Reduce Aerodynamic Drag of Trains by Smoothing the Under-floor Construction". **Quarterly Report of RTRI** Vol. 42: 84 – 97.

Baker, Chris et al. 2019. **Train Aerodynamics**. United Kingdom: Butterworth – Heinemann.

Pritchard, Philip J. 2011. **Fox and McDonald's Introduction of fluid mechanics: Eighth edition.** USA: John Wiley & Son, Inc.

Douglas, John F. et al. 2005. **Fluid Mechanics Fifth Edition**. England: Pearson Education Limited.

# LAMPIRAN

## 1. Perhitungan Tekanan Referensi ($P_{ref}$)

Hasil simulasi mengalami *floating* pada nilai tekanan statiknya sehingga untuk menyamakan nilai koefisien tekanan pada semua kasus, diperlukan pernghitungan tekanan referensi ($P_{ref}$). Penhitungan tekanan referensi mengikuti persamaan berikut

$$Cp = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

Dimana P adalah nilai tekanan static maksimum yang didapatkan dari hasil simulasi. Berikut merupakan contoh perhitungan tekanan referensu untuk kereta tanpa *bogie fairing* pada kecepatan aliran 33,33 m/s

Diketahui:

P = 668,336 Pa

ρ = 1,225 kg/m$^3$

Asumsi: Cp = 1

$$1 = \frac{668{,}336 - P_{ref}}{\frac{1}{2} * 1{,}225 * 33{,}33^2}$$

$$P_{ref} = -12{,}083$$

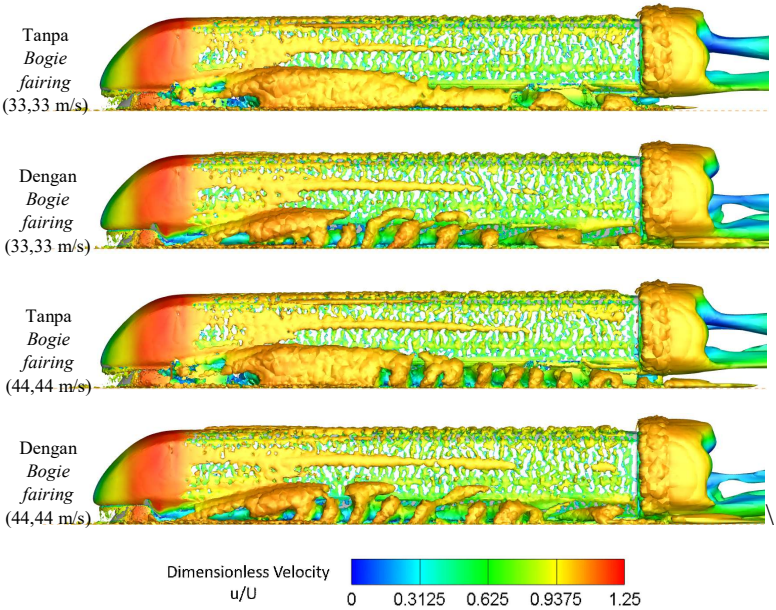
Dilakukan perhitungan tekanan referensi untuk semua kasus yang ditampilkan pada tabel berikut.

**Tabel A** Nilai Tekanan Referensi

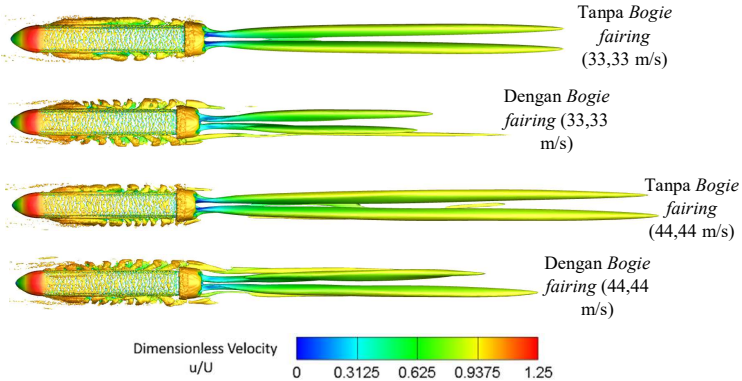
| No | Variasi | | Tekanan Maksimum P (Pa) | Tekanan Referensi $P_{ref}$ (Pa) |
|---|---|---|---|---|
| | Model Kereta | Kecepatan (m/s) | | |
| 1 | Tanpa *Bogie fairing* | 33,33 | 668,336 | -12,083 |
| 2 | | 44,44 | 1188,117 | -21,5176 |
| 3 | Dengan *Bogie fairing* | 33,33 | 672,2 | -8,219 |
| 4 | | 44,44 | 1195,142 | -14,4926 |

## 2. Struktur Aliran di Sekeliling Kereta

Berikut merupakan struktur aliran di sekeliling kereta yang didapatkan dengan membuat kontur kecepatan pada iso surface Q criterion sebesar satu. Iso surface Q dapat memvisualisasikan vortex yang terbentuk pada aliran di sekeliling kereta. Berikut merupakan visualisasi vortex pada nilai Q criterion = 1.

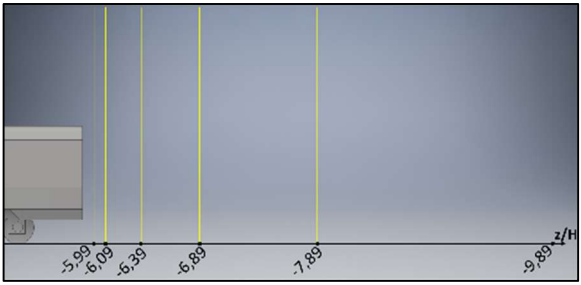



**Gambar A** Kontur dimensionless velocity pada iso surface Q criterion = 1 tampak samping

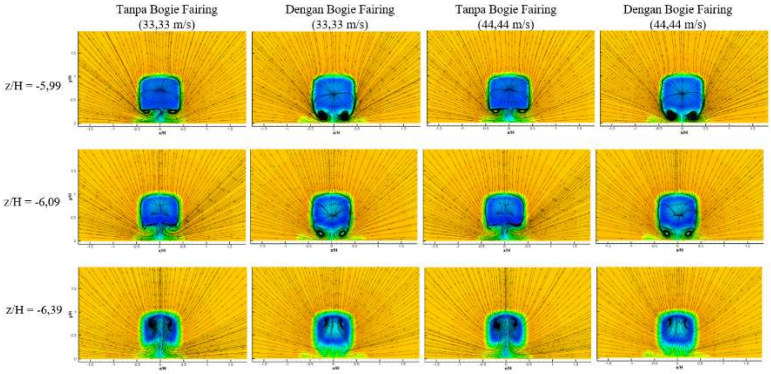


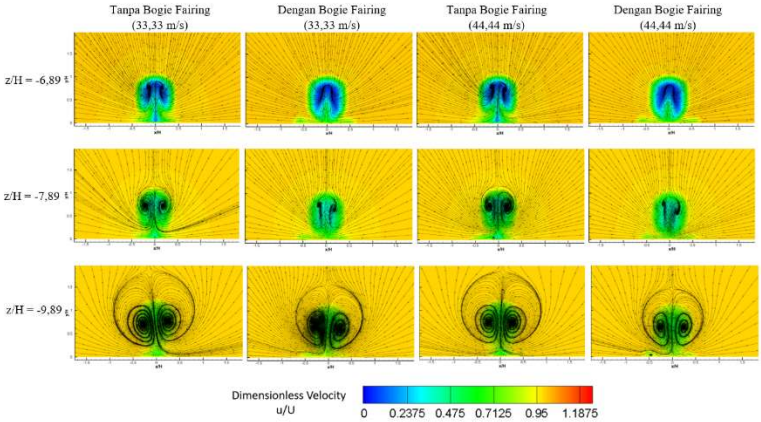

**Gambar B** Kontur dimensionless velocity pada iso surface Q criterion = 1 tampak atas

## 3. Kontur Kecepatan Aliran pada Daerah Wake




**Gambar D** Kontur Dimensionless Velocity pada Daerah Wake (berlanjut)

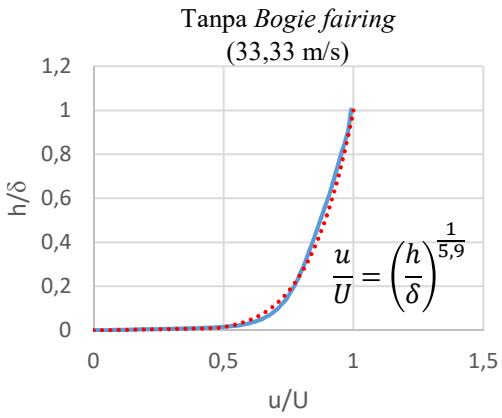


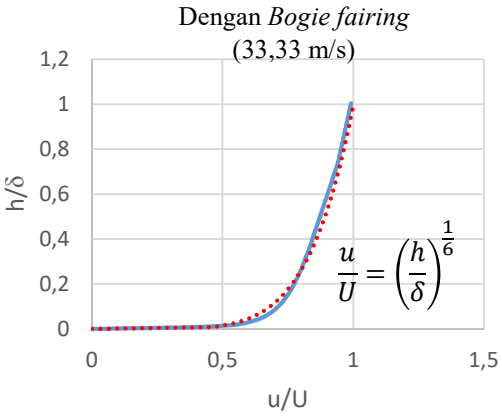



**Gambar D** Kontur Dimensionless Velocity pada Daerah Wake (lanjutan)

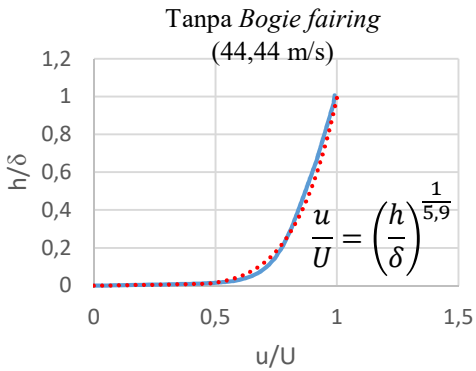
## 4. Profil Kecepatan Boundary Layer pada ketinggian y/H = 0,53 dengan jarak -3,08H dari Ujung Nose Kereta

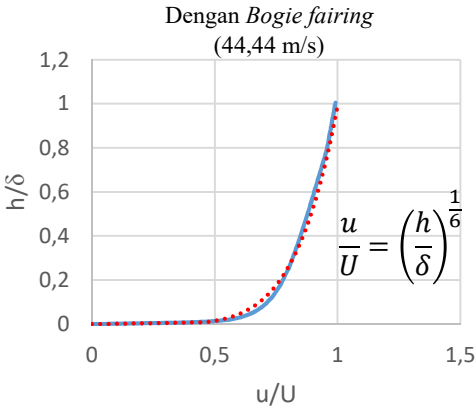
Untuk mengetahui pengaruh *bogie fairing* terhadap profil boundary layer yang terbentuk di permukaan kereta, maka dilakukan pendekatan dengan power law velocity profile. Didapatkan bahwa pada semua kasus nilai *n* mendekati 6 sehingga dapat disimpulkan *bogie fairing* tidak merubah profil turbulent boundary layer pada permukaan kereta.




**Gambar E** Profil Kecepatan Boundary Layer pada ketinggian y/H = 0,53 dengan jarak -3,08H dari Ujung Nose Kereta (berlanjut)




**Gambar E** Profil Kecepatan Boundary Layer pada ketinggian y/H = 0,53 dengan jarak -3,08H dari Ujung Nose Kereta (lanjutan)

*“Halaman ini sengaja dikosongkan.”*

# BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Malang, 26 Juni 1998. Merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Pembina, SD Dharma Wanita UB, SMP Negeri 1 Malang, dan SMA Negeri 3 Malang. Pada tahun 2016 penulis diterima di departemen S1 Teknik Mesin FTIRS ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP. 02111640000057. Konversi energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis dengan Laboratorium Mekanika dan Mesin – Mesin Fluida sebagai laboratoriumnya.

Selama duduk di bangku kuliah, penulis sempat aktif dalam organisasi dan kepanitiaan di lingkup departemen S1 Teknik Mesin ITS. Penulis aktif sebagai anggota staff divisi inventaris Mesin Music Club pada tahun 2017 -2018, kepala divisi inventaris Mesin Music Club 2018 – 2019, dan anggota ITS Team Sapuangin 2019 – 2020 sebagai anggota divisi vehicle dynamics.