



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR (KONVERSI ENERGI) - TM184835**

# **STUDI NUMERIK PENGARUH CROSSWIND TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA- SURABAYA**

**TIMOTHY WIBISONO**  
0211164000093

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

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





**TUGAS AKHIR (KONVERSI ENERGI) - TM184835**

**STUDI NUMERIK PENGARUH CROSSWIND  
TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA  
DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA-  
SURABAYA**

**TIMOTHY WIBISONO**  
0211164000093

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

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





**FINAL PROJECT (ENERGI CONVERSION) - TM184835**

**NUMERICAL STUDY OF JAKARTA-SURABAYA MEDIUM SPEED TRAIN DESIGN AERODYNAMIC PERFORMANCE SUBJECTED TO CROSSWIND**

**TIMOTHY WIBISONO**  
**0211164000093**

**Academic Supervisor:**  
**Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.**

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

**STUDI NUMERIK PENGARUH CROSSWIND  
TERHADAP PERFORMA AERODINAMIKA  
DESAIN KERETA SEMICEPAT JAKARTA-SURABAYA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

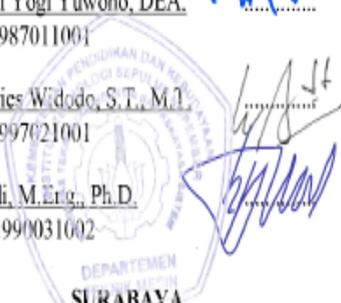
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Timothy Wibisono**  
NRP. 0211164000093

Disetujui oleh:

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



**AGUSTUS, 2020**

## **Studi Numerik Pengaruh *Crosswind* terhadap Performa Aerodinamika Desain Kereta Semicepat Jakarta Surabaya**

**Nama Mahasiswa : Timothy Wibisono**  
**NRP : 0211164000093**  
**Departemen : Teknik Mesin/ FTIRS-ITS**  
**Dosen Pembimbing: Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.**

### **ABSTRAK**

Transportasi merupakan salah satu sektor penting penunjang kehidupan manusia untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya untuk berkegiatan. Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang cukup diminati oleh penumpang di Indonesia. Meskipun demikian, moda transportasi kereta api masih jauh dari kondisi yang ideal karena waktu tempuhnya yang signifikan lebih lama apabila dibandingkan dengan pesawat. Waktu tempuh kereta api di Indonesia yang signifikan lebih lama daripada pesawat tersebut mendorong dilakukannya penyempurnaan pada kereta jarak jauh, terutama yang biasanya digunakan untuk melayani rute Jakarta – Surabaya. Untuk memenuhi kebutuhan moda transportasi umum yang lebih cepat, PT. Kereta Api Indonesia berencana membuat layanan kereta semicepat yang menghubungkan Kota Jakarta dan Kota Surabaya yang mampu melaju dengan kecepatan hingga 160 km/jam. Kereta yang melaju dengan kecepatan tinggi memiliki kemungkinan untuk terguling apabila terpapar oleh efek *crosswind* yaitu angin kencang dari samping, terutama bila melaju di rel dengan jenis *narrow gauge track* 1067mm. Oleh karena itu, pada penelitian ini efek *crosswind* akan diteliti pengaruhnya terhadap performa aerodinamika desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya.

Pada penelitian ini dilakukan studi numerik secara tiga dimensi terhadap model kereta semicepat Jakarta-Surabaya menggunakan *software ANSYS Fluent*. Model kereta semicepat Jakarta-Surabaya tersebut akan diteliti pada kecepatan tertingginya, yaitu 160 km/jam atau 44,44 m/s dengan variasi

kecepatan *crosswind* mulai dari  $u=0$  m/s hingga kecepatan angin tertinggi 20 m/s dengan variasi kenaikan 5 m/s. Kecepatan kereta ( $v$ ) yang tetap dan kecepatan angin ( $u$ ) yang bervariasi akan membentuk sudut datang angin  $\psi$  tertentu dengan kecepatan resultan  $V_{\infty}$  tertentu yang akan diteliti pengaruhnya dengan menggunakan model turbulensi *steady k- $\omega$  SST*. *Boundary condition* yang digunakan pada penelitian ini adalah *velocity inlet*, *pressure outlet*, *symmetry*, dan *moving wall* pada bagian *ground*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya *crosswind* pada kereta yang sedang melaju akan berdampak pada kecepatan dan tekanan aliran di sekitar kereta. Tanpa adanya *crosswind*, kecepatan dan tekanan aliran di bagian samping kanan dan kiri kereta akan tampak terdistribusi secara merata. Ketika *crosswind* terjadi, kecepatan pada bagian *leeward* kereta dan tekanan pada bagian *windward* kereta akan mengalami peningkatan sehingga muncul perbedaan tekanan di bagian *windward* dan *leeward* kereta. Perbedaan tekanan di bagian *windward* dan *leeward* kereta dapat menyebabkan timbulnya gaya lateral yang dialami oleh kereta dengan perbedaan tekanan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin ( $u$ ). Hal tersebut berakibat meningkatnya gaya lateral (*side force*) yang dialami kereta. Gaya lateral yang bekerja ke arah samping kereta menimbulkan momen yang memutar kereta di bagian *lee rail*. Dengan nilai koefisien momen yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Pada penelitian ini juga diketahui bahwa dengan meningkatnya kecepatan angin ( $u$ ) nilai koefisien *drag* kereta mengalami fluktuasi. Pada kecepatan 0-5 m/s nilai koefisien *drag* akan naik signifikan, sementara pada kecepatan 10-20 m/s nilai koefisien *drag* akan berangsur-angsur menurun.

**Kata kunci:** *Crosswind*, Kereta Semicepat, *Rolling Moment*., *Side Force*, Tekanan.

# **Numerical Study of Jakarta-Surabaya Medium Speed Train Design Aerodynamic Performance Subjected to Crosswind**

**Student Name** : Timothy Wibisono  
**NRP** : 0211164000093  
**Department** : Mechanical Engineering/ FTIRS-ITS  
**Academic Supervisor** : Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.

## **ABSTRACT**

*Transportation is one of the crucial industry to support human needs to move from one place to another. Train is one of those mode of transportations that receives highly favorable demand by Indonesians to help them transport within cities. Nevertheless, train in Indonesia is far from being good enough as a long-range transportation because of the longer time it took to transport between cities compared to airplane. This long traveling time is what encourages PT. KAI, as the national train operator, to improve its service, especially the one that serves Jakarta-Surabaya route. PT. KAI is planning to reduce the travelling time it took from Jakarta to Surabaya by creating a medium speed train - a faster train that operates with speed up to 160 km/h. This faster-running train is prone to be overturned when subjected to crosswind in open air, especially with the fact that this train will run on an existing track that is a narrow-gauge track 1067 mm. For that reason, this study is being conducted to investigate the aerodynamic performance of medium speed train design that operates between Jakarta and Surabaya subjected to crosswind.*

*A three-dimensional train geometry is being investigated in this study using a three-dimensional numerical scheme on ANSYS Fluent software. The train model is investigated on its highest operating speed, that is 160 km/h or 44,44 m/s with crosswind speed varying from  $u=0$  m/s up to 20 m/s with 5 m/s increment. The varying crosswind velocity will create varying velocity resultant that acts on train body with a certain yaw angle ( $\psi$ ). The impact of those varying velocity resultant and yaw angle on train will be*

*investigated by using steady  $k-\omega$  SST turbulence model. The boundary conditions of the numerical study are velocity inlet, pressure outlet, symmetry, and moving wall as the ground part of the domain.*

*The results of this numerical study show that crosswind with varying velocity and yaw angle will impact the flow field around the train. Without crosswind, the velocity and pressure contour around the train is distributed evenly. Crosswind acting on the train increases flow velocity on train leeward side and pressure on train windward side, hence creating pressure difference on train windward and leeward side. This pressure difference creates lateral force on train with its value increasing along the increasing of the wind speed ( $u$ ), thus creating a rolling moment on the leeward rail with its value also increasing along the increasing of the wind speed ( $u$ ). This study also shows that crosswind will impact the drag force acting on the train. The drag coefficient increases rapidly with wind speed varying from 0-5 m/s and slowly decays with wind speed higher than 10 m/s.*

***Keywords: Crosswind, Medium Speed Train, Pressure, Rolling Moment., Side Force.***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur yang sebesar-besarnya penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul : **“Studi Numerik Pengaruh *Crosswind* terhadap Performa Aerodinamika Desain Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya”**. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Tuhan yang Maha Esa atas segala tuntunannya kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Peter Susanto dan Ibu Aris Lestari, Ayah dan Bunda yang selalu sayang, sabar, merawat, mendidik, dan mendengarkan cerita-cerita penulis baik senang maupun sedih.
3. Ibu Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D. Selaku dosen pembimbing yang begitu luar biasa sabar membimbing penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
4. Bapak Dr. Bambang Arip Dwiyantoro, S.T, M.Sc.Eng. selaku dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
5. Bapak Prof. Dr. Triyogi Yuwono, DEA., Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., Selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin ITS. Terima kasih yang tidak terkira.
7. M-59. Angkatan penulis yang Uber Alles

8. Teman-teman seperjuangan dalam menyelesaikan tugas akhir, Lentera Ruh Insan, Aditiya Fajar Bekti, Quraisy Amri, yang sudah mengajari dan menjadi partner diskusi dalam mengerjakan tugas akhir tanpa rasa lelah.
9. Rekan-rekan Mesin Music Club, terima kasih pengalaman berorganisasi di MMC yang sangat-sangat berwarna.
10. Mahalli Ridho dan Reynald Sapetra. yang sudah menemani penulis mulai KP yang penuh tawa hingga nanti.
11. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Almamater tercinta, semoga kejayaan selalu menyertai.
12. Semua Ilmuwan yang menciptakan penemuan sehingga membantu mempermudah untuk menggali ilmu.

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

Surabaya, 14 Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

### HALAMAN PENGESAHAN

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR GRAFIK .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II DASAR TEORI.....	9
2.1 Efek <i>Crosswind</i> .....	9
2.2 Sudut Datang Angin ( <i>Yaw Angle</i> ) .....	10
2.3 <i>Boundary Layer</i> .....	11
2.4 Separasi Aliran .....	12
2.5 Gaya yang Bekerja pada Kereta Terkena <i>Crosswind</i> ..	13
2.6 Penelitian Terdahulu Mengenai <i>Crosswind</i> .....	15
2.6.1 <i>Full Scale Experiment</i> .....	16
2.6.2 <i>Computational Fluid Dynamics</i> .....	20

BAB III	METODOLOGI PENELITIAN .....	39
3.1	Variasi.....	39
3.2	Tahap <i>Pre-Processing</i> .....	40
3.2.1	Pembuatan Geometri dan <i>Meshing</i> .....	40
3.2.2	Domain Simulasi .....	44
3.2.3	Pembuatan <i>Mesh</i> .....	45
3.2.5	Parameter Pemodelan .....	48
3.4	Tahap <i>Post-Processing</i> .....	53
3.4.1	Perhitungan Koefisien <i>Drag</i> .....	54
3.4.2	Perhitungan Koefisien <i>Side Force</i> .....	55
3.4.3	Perhitungan Koefisien <i>Lee Rail Rolling Moment</i> .....	55
3.4.4	Perhitungan Koefisien Tekanan.....	56
3.4.5	Struktur <i>Vortex</i> di Sekitar Kereta .....	57
3.5	Diagram Alir.....	58
BAB IV	ANALISA DATA .....	61
4.1	Karakteristik Medan Aliran .....	61
4.1.1	Kontur Kecepatan .....	61
4.1.2	Kontur Koefisien Tekanan.....	72
4.1.3	Struktur Aliran di Sekitar Kereta.....	81
4.1.4	Komparasi Hasil Struktur Aliran dengan Penelitian Terdahulu.....	85
4.2	Koefisien <i>Drag Force</i> .....	91
4.3	Koefisien Tekanan di Permukaan Kereta .....	95
4.4	Koefisien <i>Side Force</i> .....	105

4.5	Koefisien <i>Lee Rail Rolling Moment</i> .....	108
BAB V KESIMPULAN .....		113
5.1	Kesimpulan.....	113
5.2	Rekomendasi .....	115
DAFTAR PUSTAKA.....		117
LAMPIRAN .....		119

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kecelakaan Akibat Efek <i>Crosswind</i> di Viaduk Owencarrow Irlandia 1925 (Baker, 2019).....	9
Gambar 2. 2 Sudut Datang Angin ( <i>Yaw Angle</i> ). (Gallagher, 2018) .....	10
Gambar 2. 3 <i>Boundary Layer</i> pada Aliran Melalui Plat Datar (Pritchard, et.al., 2012).....	11
Gambar 2. 4 Daerah <i>Wake</i> pada Aliran Melalui <i>Sphere</i> (Pritchard, et.al., 2012).....	12
Gambar 2. 5 Ilustrasi Gaya yang Bekerja pada Kereta yang Terkena <i>Crosswind</i> (Suzuki, M. et. al. 2003).....	13
Gambar 2. 6 Ilustrasi Lokasi Terjadinya <i>Lee Rail Rolling Moment</i> (Baker, 2003).....	15
Gambar 2. 7 Pengujian <i>Advanced Passenger Train</i> di Pendine, South Wales. (Cooper, 1980) .....	17
Gambar 2. 8 Pengujian <i>Full-scale</i> Kereta Inter-Reggio TRANSAERO. (Matschke dan Heine, 2002).....	19
Gambar 2. 9 Perbandingan <i>Lee Rail Rolling Moment</i> pada <i>Open Embankment</i> dan <i>Noise Barrier</i> (Matschke dan Heine, 2002)....	20
Gambar 2. 10 Domain Simulasi (Gallagher, 2018).....	21
Gambar 2. 11 Perbesaran <i>Mesh</i> untuk Simulasi Kereta. (Gallagher, 2018) .....	22
Gambar 2. 12 Hasil Simulasi <i>Crosswind</i> pada Model Kereta <i>British Rail Class 43</i> : (a) <i>Side Force Coefficient</i> (b) <i>Lift Force Coefficient</i> . (Gallagher, 2018).....	24
Gambar 2. 13 Hasil Simulasi di <i>Horizontal Cross Section</i> : (a) Kontur Kecepatan. (b) Kontur Tekanan. (Gallagher, 2018).....	24
Gambar 2. 14 Hasil Simulasi di <i>Vertical Cross Section</i> : (a) Kontur Kecepatan. (b) Kontur tekanan. (Gallagher, 2018) .....	25
Gambar 2. 15 Variasi Geometri Kereta: (a) Dimensi untuk Penambahan Jumlah Gerbong pada Model Uji. (b) Dimensi Dinding Penghalang <i>Crosswind</i> . (Niu, et.al., 2018).....	26

Gambar 2. 16 Bentuk Bodi Kereta Listrik Cepat CRH380A CSR Corporation Limited. (Niu, et.al., 2018).....	27
Gambar 2. 17 <i>Boundary Condition</i> dan Dimensi Domain Uji (Niu, et.al., 2018).....	27
Gambar 2. 18 <i>Mesh</i> di Sekitar Permukaan Kereta: (a) Tampilan <i>Mesh</i> secara Isometri, (b) Tampilan <i>Mesh</i> dari bagian Samping Kereta. (c) Tampilan <i>Mesh</i> dari Bagian Depan Kereta. (Niu, et.al., 2018).....	28
Gambar 2. 19 Medan Aliran di Sekitar Kereta Akibat <i>Crosswind</i> : (a) Struktur <i>Vortex</i> di Dekat Kereta. (b) Distribusi Kecepatan di Sekitar Kereta dengan Dinding Penghalang. (c) Distribusi Kecepatan di Sekitar Kereta tanpa Dinding Penghalang. (Niu, et.al., 2018).....	30
Gambar 2. 20 Struktur Aliran di Sekitar Kereta Ketika Terjadi <i>Crosswind</i> . (Niu, et.al., 2018).....	31
Gambar 2. 21 Koefisien Tekanan di Sepanjang Permukaan Samping Kereta: (a) <i>Windward</i> . (b) <i>Leeward</i> . (Niu et.al., 2018)	32
Gambar 2. 22 Domain Pengujian <i>Crosswind</i> Munoz-Paniagua, et. al. 2017: (a) Dimensi kereta berskala 1:10 dengan ukuran $L=3.552\text{m}$ dan $H=0.358\text{m}$ ; dan (b) Ukuran domain untuk pengujian <i>crosswind</i> . (Munoz-Paniagua, et. al., 2017).....	33
Gambar 2. 23 Struktur Aliran <i>Vortex</i> di Daerah <i>Wake</i> pada Beberapa Model Turbulensi: (a) $k - \omega$ SST. (b) $k - \omega$ SST dengan <i>curvature correction</i> . (c) EARSM. (d) SAS. (e) IDDES. (f) DES. (Munoz-Paniagua, et. al., 2017).....	38
Gambar 3. 1 Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya: (a) Tampak Isometri (b) Tampak Depan (c) Tampak Samping (d) <i>Bogie</i> Kereta .....	42
Gambar 3. 2 Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya: (a) Tampak Depan Model Kereta Jakarta-Surabaya. (b) Tampak Samping Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya.....	43

Gambar 3. 3 Domain Pengujian: (a) Tampak Atas. (b) Tampak Isometri.....	45
Gambar 3. 4 <i>Mesh</i> Kereta Semi Cepat Jakarta-Surabaya pada bagian (a)Permukaan Kereta (b) Potongan <i>Mesh</i> di <i>Midplane X</i> dan (c) Pandangan <i>Isometri Mesh</i> Balok di Sekitar Kereta.....	47
Gambar 3. 5 <i>Boundary Condition</i> .....	50
Gambar 3. 6 Ilustrasi Arah <i>Drag Force</i> dan <i>Side Force</i> pada Kereta yang Terkena <i>Crosswind</i> . .....	54
Gambar 3. 7 Lokasi Sumbu <i>Lee Rail Rolling Moment</i> dari Tampak Belakang Kereta .....	56
Gambar 3. 8 Lokasi Garis Pengambilan Koefisien Tekanan berdasarkan penelitian Niu 2018.....	57
Gambar 3. 9 Diagram Alir Penelitian.....	59
Gambar 4. 1 Lokasi <i>Plane X/H=0,18-4,2</i> untuk Pengambilan Kontur.....	62
Gambar 4. 2 Kontur Kecepatan Aliran <i>Dimensionless (V/V<math>\infty</math>)</i> pada <i>Plane X/H=0,18-0,4,52</i> .....	63
Gambar 4. 3 Kontur Kecepatan <i>Dimensionless (V/V<math>\infty</math>)</i> Kereta pada Bagian <i>Midplane</i> .....	66
Gambar 4. 4 Lokasi <i>Plane Horizontal Z/H=0,3</i> dan <i>0,8</i> .....	68
Gambar 4. 5 Kontur Kecepatan <i>Dimensionless (V/V<math>\infty</math>)</i> di <i>Plane z/H=0,3</i> .....	69
Gambar 4. 6 Kontur Kecepatan <i>Dimensionless (V/V<math>\infty</math>)</i> <i>Plane z/H=0,8</i> .....	71
Gambar 4. 7 Kontur Koefisien Tekanan di Sekitar Kereta pada <i>Plane X/H=0,18-4,52</i> .....	74
Gambar 4. 8 Kontur Koefisien Tekanan pada <i>Midplane</i> Kereta. ....	77
Gambar 4. 9 Kontur Koefisien Tekanan di <i>Plane z/H=0,3</i> . ....	78
Gambar 4. 10 Kontur Koefisien Tekanan di <i>Plane z/H=0,8</i> .....	80

Gambar 4. 11 Struktur Aliran di Sekitar Kereta pada Variasi Kecepatan: (a) Kecepatan  $u=5$  m/s. (b) Kecepatan  $u=10$  m/s. (c) Kecepatan  $u=15$  m/s. (d) Kecepatan  $u=20$  m/s.....82

Gambar 4. 12 *Vortex* di Belakang Kereta: (a) Variasi Kecepatan  $u=5$  m/s. (b) Variasi kecepatan  $u=10$  m/s. (c) Variasi kecepatan  $u=15$  m/s. (d) Variasi kecepatan  $u=20$  m/s.....85

Gambar 4. 13 Perbandingan Struktur Aliran di Sekitar Kereta pada Variasi Kecepatan Angin: (a)  $u=5$  m/s. (b)  $u=10$  m/s. (c)  $u=15$  m/s. (d)  $u=20$  m/s.....89

Gambar 4. 14 Zoom pada Bagian *Vortex* C: (a) Variasi Kecepatan Angin  $u=5$  m/s. (b) Variasi Kecepatan Angin  $u=20$  m/s .....90

Gambar 4. 15 Kurva Plot Nilai  $C_p$ : (a) Tampak Samping Kurva Plot Nilai  $C_p$ . (b) Zoom pada Bagian Titik Stagnasi.....96

Gambar 4. 16 Zoom Kontur Koefisien Tekanan di Bagian *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=15$  m/s. ....100

Gambar 4. 17 Zoom Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) di Bagian *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=15$  m/s. ....101

Gambar 4. 18 Zoom Kontur Koefisien Tekanan di Bagian *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=20$  m/s. ....103

Gambar 4. 19 Zoom Kontur Kecepatan *Dimensionless Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=20$  m/s .....104

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Nilai $C_S$ dan $C_L$ pada Dua Variasi <i>Mesh</i> (Gallagher, 2018) .....	23
Tabel 2. 2 Nilai Koefisien <i>Side Force</i> pada Setiap Pengujian (Munoz-Paniagua, et. al., 2017) .....	35
Tabel 2. 3 Perbandingan Waktu Komputasi Studi Numerik (Munoz-Paniagua, et. al., 2017) .....	36
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian .....	40
Tabel 3. 2 Ukuran Geometri Kereta .....	43
Tabel 3. 3 Variasi Jumlah <i>Cell Mesh</i> .....	48
Tabel 3. 4 Variasi Kecepatan <i>Inlet</i> dan <i>Yaw Angle</i> . .....	51
Tabel 3. 5 Nilai Parameter <i>Boundary Condition</i> .....	52
Tabel 4. 1 Nilai Koefisien <i>Drag Force</i> pada Kecepatan Angin 0-5 m/s .....	94

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GRAFIK

Grafik 4. 1 Koefisien <i>Drag Force</i> Kereta vs Kecepatan Angin $u$	93
Grafik 4. 2 Distribusi $C_p$ pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin $u=5$ m/s.....	97
Grafik 4. 3 Distribusi $C_p$ pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin $u=10$ m/s.....	98
Grafik 4. 4 Distribusi $C_p$ pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin $u=15$ m/s.....	99
Grafik 4. 5 Distribusi $C_p$ pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin $u=20$ m/s.....	102
Grafik 4. 6 Koefisien <i>Side Force</i> vs Kecepatan Angin $u$ .....	106
Grafik 4. 7 Koefisien <i>Side Force</i> vs <i>Yaw Angle (degree)</i> .....	107
Grafik 4. 8 Koefisien <i>Lee Rail Rolling Moment</i> vs Kecepatan Angin $u$ .....	109
Grafik 4. 9 Perbandingan Koefisien <i>Lee Rail Rolling Moment</i> vs <i>Yaw Angle (degree)</i> .....	110

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan salah satu sektor yang penting dalam kehidupan manusia. Hal ini erat kaitannya dengan kebutuhan manusia untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya dalam berkegiatan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, berbagai moda transportasi kemudian diciptakan dengan kapasitas penumpang yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan tanpa mengesampingkan faktor kenyamanan dan keamanan.

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang diciptakan untuk memenuhi kebutuhan transportasi massal manusia dengan jarak bervariasi, mulai dari jarak dekat (*commuter line*) hingga jarak yang jauh. Sebagai suatu moda transportasi, kereta api mulai beroperasi di Indonesia pada tahun 1864 di bawah pemerintahan Hindia Belanda. Sejak pertama kali dioperasikan pada tahun tersebut, perusahaan kereta api pemerintah, yang kini disebut PT. KAI, senantiasa memperbaiki kualitas keretanya hingga menjadi lebih baik. Perubahan tersebut disambut baik oleh para penumpang kereta api dengan meningkatnya rata-rata penumpang kereta api setiap tahunnya. Meskipun demikian, kereta api yang digunakan untuk transportasi jarak jauh di Indonesia masih jauh dari kondisi yang ideal. Salah satu penyebabnya adalah waktu tempuhnya yang signifikan lebih lama bila dibandingkan dengan moda transportasi jarak jauh lainnya, misalnya pesawat. Waktu tempuh kereta api yang lebih lama tersebut dapat disebabkan karena terbatasnya performa penggerak kereta akibat gaya hambat angin, dan infrastruktur rel kereta api yang masih kurang optimal.

Kecepatan kereta yang signifikan lebih rendah tersebut mendorong dilakukannya penyempurnaan pada kereta jarak jauh, terutama yang biasanya digunakan untuk melayani rute Jakarta-Surabaya. Oleh karena itu pemerintah Indonesia bekerja sama dengan *Japan Internasional Cooperation Agency*, berencana membuat sebuah penyempurnaan untuk kereta api jarak jauh

Jakarta-Surabaya dengan nama kereta api semicepat Jakarta-Surabaya. Kereta ini direncanakan dapat beroperasi hingga kecepatan maksimum 160km/jam. Hal tersebut dapat memangkas waktu tempuh perjalanan untuk rute Jakarta-Surabaya saat ini dari yang semula ditempuh selama 9 jam, menjadi 5,5 jam. Proses realisasi proyek kereta api semicepat ini tentunya memiliki kendala yang harus dihadapi. Kendala tersebut antara lain lebar jalur kereta dengan *narrow gauge* sebesar 1067mm, gaya hambat angin pada bodi kereta yang berdampak pada konsumsi bahan bakar, dampak dari efek *crosswind* pada kereta dengan bodi yang ringan, serta berbagai kendala lainnya yang berpotensi menimbulkan kecelakaan. Kendala-kendala tersebut perlu diteliti lebih lanjut agar dapat memastikan keamanan dan kenyamanan penggunaan kereta api semicepat Jakarta-Surabaya di kemudian hari.

**Baker 2019** telah menginvestigasi dampak dari efek *crosswind* pada sistem kereta. *Crosswind* merupakan hembusan angin kencang dari samping kereta dengan *yaw angle* tertentu. Terjadinya efek *crosswind* pada kereta dapat menyebabkan *overturning* sehingga kereta menjadi terguling keluar lintasan. Hal ini diperparah apabila rangkaian kereta sedang dalam kondisi tanpa muatan atau termasuk jenis *lightweight*.

Penelitian terkait performa aerodinamika kereta pada umumnya dilakukan dengan dua metode, yaitu pengujian fisik model dan perhitungan numerik. Pengujian fisik model meliputi penelitian dengan kereta skala besar di udara terbuka (*full scaled experiment*), serta penelitian dengan menggunakan model kereta (*scaled experiment*) baik secara statis maupun dinamis. Sementara itu penelitian dengan menggunakan analisa numerik dilakukan dengan menggunakan komputer untuk menghasilkan simulasi aliran fluida di sekitar kereta (*Computational Fluid Dynamics*).

Penelitian terkait fenomena *crosswind* pada kereta dengan menggunakan model fisik di udara terbuka telah dilakukan sebanyak tiga kali hingga tahun 2018. **Cooper 1980** telah melakukan eksperimen terhadap model kereta *Advanced Passenger Train* di daerah *Pendine, South Wales* dengan skala 1:5

yang dilakukan di udara terbuka. Penelitian tersebut dilakukan untuk mengetahui gaya dan momen yang bekerja, sehingga diperoleh hasil berupa *lee rail rolling moment*. *Lee rail rolling moment* adalah momen yang ditimbulkan oleh hembusan angin dari samping kereta yang dapat memutar bodi kereta di sepanjang sumbu Z. *Lee rail rolling moment* tersebut terbentuk akibat adanya daerah *wake* di bagian *lee* bodi kereta yang menimbulkan perbedaan tekanan di area datangnya *crosswind* (*windward*) dan di area belakang benda yang terkena *crosswind* (*leeward*). Pada penelitian yang dilakukan oleh **Cooper** tersebut diketahui bahwa *lee rail rolling moment* yang mengalami peningkatan seiring dengan bertambah besarnya *yaw angle* (sudut datang *crosswind*).

Selanjutnya, penelitian di udara terbuka dilakukan oleh **Matschke 2002** dengan menggunakan kereta *full-scale Inter-Reggio* yang diuji di Jerman. Pada penelitian tersebut diperoleh hasil berupa koefisien *lee rail rolling moment* yang mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan *yaw angle*. Pada penelitiannya, Matschke dan Heine juga mendapati bahwa pemasangan dinding penghalang angin di sekitar jalur kereta api dapat menurunkan beban yang diterima oleh kereta akibat efek *crosswind*.

Penelitian terbaru yang dilakukan di udara terbuka dilakukan oleh **Gallagher et. al. 2018** dengan menggunakan *Network Rail New Measurement Train* yang diuji di jalur utama kereta Britania Raya. Berdasarkan pengujian yang dilakukan tersebut, diperoleh koefisien *lee rail rolling moment* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *yaw angle* dan kecepatan *crosswind*, terutama ketika terjadi hembusan angin kencang secara tiba-tiba. Pada penelitian yang dilakukan di Inggris ini juga diketahui bahwa besarnya *yaw angle* di udara terbuka sangat jarang melebihi  $15^{\circ}$ .

Selain dengan penelitian model fisik kereta, penelitian fenomena *crosswind* pada kereta juga telah dilakukan dengan perhitungan numerik oleh **Gallagher et. al. 2018**. Pada penelitian tersebut dibuat model kereta yang terdiri dari dua buah geometri

berbentuk lokomotif di bagian depan dan belakang kereta yang terpisah oleh dua buah geometri gerbong kereta di antaranya. Selanjutnya, dilakukan diskretisasi terhadap domain uji hingga permukaan benda kerja sehingga simulasi aliran yang melaluinya dapat dilakukan dengan pendekatan DDES agar diperoleh hasil yang akurat. Simulasi aliran yang dilakukan mampu menunjukkan kontur tekanan di sekitar bodi kereta, sehingga diketahui bahwa terdapat area dengan tekanan yang rendah di bagian *lee* pada kereta yang mengalami efek *crosswind*. Tekanan yang lebih rendah tersebut menimbulkan gaya lateral pada kereta yang dapat memungkinkan terjadinya *overturning* atau tergulingnya kereta.

Gaya lateral tersebut kemudian diteliti lebih lanjut oleh **Niu, et. al. 2018**. Pada penelitian tersebut digunakan sebuah dinding penghalang (*windbreak wall*) pada model geometri kereta dengan konfigurasi mulai dari satu gerbong (1 *car*) hingga 4 gerbong (4 *cars*). Model tersebut kemudian diuji secara numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan dinding penghalang mampu meningkatkan performa aerodinamika kereta dalam menghadapi efek *crosswind*, khususnya dalam menurunkan gaya lateral yang timbul pada kereta. Meskipun demikian, keberadaan dinding penghalang tersebut diketahui memberi dampak yang signifikan terkait pengaruh panjang kereta terhadap performa aerodinamika di bagian *tail* kereta.

Penelitian yang dilakukan secara numerik pada umumnya menggunakan dengan metode IDDES berdasarkan model  $k - \omega SST$  yang telah diketahui mampu dengan baik menjelaskan fenomena aerodinamika pada kereta. Meskipun demikian, penggunaan IDDES membutuhkan kemampuan komputasi yang cukup besar. **Munoz-Paniagua, et. al. 2017** telah meneliti sejumlah model turbulensi pada kereta yang terkena *crosswind*. Berdasarkan penelitian yang telah ia lakukan, diketahui bahwa model *steady k -  $\omega SST$*  secara umum mampu juga menyelesaikan studi numerik kereta yang terkena *crosswind* dengan hasil pengujian yang sedikit lebih kecil (*underpredict*) dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu diketahui bahwa besarnya *lee rail rolling moment* yang terdapat pada kereta dipengaruhi oleh *yaw angle* yang terbentuk dari resultan kecepatan kereta dan kecepatan *crosswind*. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini untuk menganalisis performa aerodinamika desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya dan keamanan kereta tersebut dalam menghadapi efek *crosswind* pada kecepatan kereta 160km/jam (44.44 m/s) dengan 4 variasi kecepatan hembusan angin dari samping (*crosswind*) yaitu 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s dan 20 m/s. Kecepatan 160km/jam ditentukan berdasarkan kecepatan maksimum kereta api ketika dijalankan. Variasi pada kecepatan angin digunakan sebesar 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, hingga 20 m/s yang merupakan kecepatan tertinggi yang tercatat oleh BMKG pada tahun 2012 di stasiun pengamatan Juanda Surabaya. Variasi yang dilakukan pada kecepatan angin tersebut akan menghasilkan *yaw angle* tertentu yang akan diteliti pengaruhnya terhadap koefisien *lee rail rolling moment* dan keamanan kereta dari terjadinya *overturning*, terutama karena variasi lebar rel kereta dengan *narrow gauge* 1067 mm pada penelitian ini yang lebih sempit bila dibandingkan dengan *standard gauge* 1435 mm yang biasa digunakan pada kereta cepat di negara lain.

## 1.2 Perumusan Masalah

Kereta semi cepat Jakarta-Surabaya merupakan jenis kereta jarak jauh yang digunakan sebagai alat transportasi dari Kota Jakarta menuju Kota Surabaya dan sebaliknya. Kereta api yang melaju di udara terbuka memiliki kemungkinan untuk terpapar *crosswind*. *Crosswind* merupakan hembusan angin dari bagian samping kereta (*windward*) dengan sudut datang (*yaw angle*) tertentu yang mampu menimbulkan daerah *wake* di *leeward* kereta sehingga terjadi perbedaan tekanan di bagian *windward* dan *leeward*. Adanya perbedaan tekanan di kedua bagian tersebut mampu menimbulkan gaya lateral (*side force*) dan *lee rail rolling moment*, yaitu momen yang memutar kereta di bagian roda

sehingga dapat mengakibatkan kereta terguling (*overturn*) apabila nilainya terlalu besar.

Penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa nilai koefisien *side force* dan *lee rail rolling moment* dipengaruhi oleh kecepatan angin dan sudut datang *crosswind* (*yaw angle*) yang dibentuk oleh resultan kecepatan angin dan kecepatan kereta. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan diteliti dampak *crosswind* pada koefisien *side force* dan *lee rail rolling moment* desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya yang menggunakan *narrow gauge* 1067mm. Dengan variasi simulasi yang dilakukan pada kecepatan angin ( $u$ ), koefisien *lee rail rolling moment* yang terbesar pada kereta semicepat Jakarta-Surabaya diperkirakan akan terjadi pada variasi kecepatan angin 20 m/s dan kecepatan kereta 160 km/jam.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan diadakannya penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui karakteristik medan aliran di sekitar bodi desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya dalam bentuk kontur kecepatan, kontur tekanan, dan struktur *vortex* di area *wake* akibat *crosswind*.
2. Mengetahui pengaruh kecepatan angin ( $u$ ) terhadap koefisien *drag*
3. Mengetahui pengaruh kecepatan angin ( $u$ ) terhadap koefisien *side force*.
4. Mengetahui pengaruh kecepatan angin ( $u$ ) terhadap koefisien *lee rail rolling moment*.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Obyek yang diteliti adalah geometri desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya dengan konfigurasi 1 *car*.
2. Aliran fluida diasumsikan turbulen dan *incompressible*.
3. Kecepatan fluida pada *inlet* bersifat uniform dan *steady*.
4. Penelitian dilakukan pada kecepatan kereta tertinggi yaitu 160 km/jam dengan variasi kecepatan angin dari samping yaitu  $u=0$  m/s,  $u=5$  m/s,  $u=10$  m/s,  $u=15$  m/s, dan  $u=20$  m/s.

5. Kereta dianalisis dalam keadaan diam dan *ground* bergerak.
6. Aksesoris kereta seperti jendela, pintu, *handle* pada pintu, tangga, celah *bogie*, serta *wheelset* kereta disederhanakan.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian yang dilakukan ini diharapkan dapat memberi manfaat, yaitu:

1. Memberikan informasi mengenai aerodinamika desain kereta semi cepat yang bisa digunakan sebagai rujukan pengembangan kereta semi cepat Jakarta Surabaya.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Efek *Crosswind*

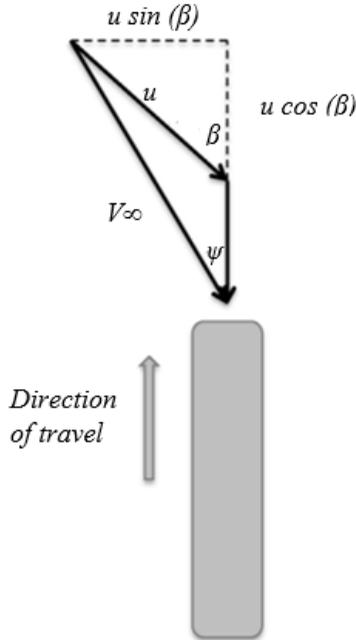
**Baker 2019** telah menginvestigasi dampak dari efek *crosswind* pada sistem kereta. *Crosswind* merupakan hembusan angin kencang dari samping kereta dengan *yaw angle* tertentu. Terjadinya efek *crosswind* pada kereta dapat menyebabkan *overturning* sehingga kereta menjadi terguling keluar lintasan. Hal ini diperparah apabila rangkaian kereta sedang dalam kondisi tanpa muatan atau termasuk jenis *lightweight*.



**Gambar 2. 1** Kecelakaan Akibat Efek *Crosswind* di Viaduk Owencarrow Irlandia 1925 (Baker, 2019)

Gambar 2.1 menunjukkan kereta yang terguling ketika melintasi Viaduk Owencarrow Irlandia pada tahun 1925. Kecelakaan tersebut dapat terjadi karena adanya efek *crosswind* pada kereta yang melaju.

## 2.2 Sudut Datang Angin (Yaw Angle)



**Gambar 2. 2** Sudut Datang Angin (Yaw Angle). (Gallagher, 2018)

Gambar 2.2 menunjukkan mengenai definisi sudut datang angin (*yaw angle*) yang mengenai kereta. Pada gambar tersebut terlihat bahwa  $u$  merupakan kecepatan angin (*wind speed*) dengan sudut  $\beta$  yang terbentuk dari antara arah gerak kereta berkecepatan  $v$  dan kecepatan angin  $u$ . Pada kondisi angin yang ekstrem, sudut absolut angin adalah sebesar  $90^0$ . Sementara itu,  $V_\infty$  adalah *effective wind speed* yang merupakan resultan kecepatan angin dan kecepatan kereta yang melaju. *Yaw angle*  $\psi$  merupakan sudut yang dibentuk antara resultan kecepatan angin dan kecepatan gerak kereta.

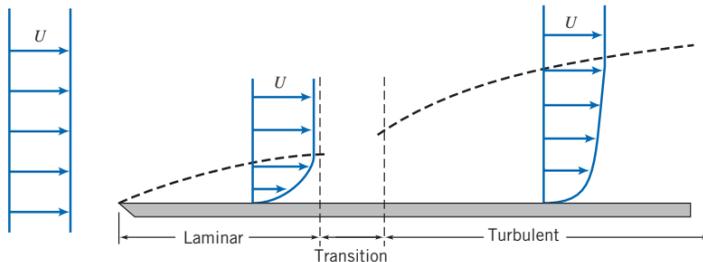
Besarnya nilai  $V_\infty$  dan  $\psi$  dapat diketahui dari persamaan berikut:

$$V_\infty^2 = (v + u \cdot \cos(\beta))^2 + (u \cdot \sin(\beta))^2 \quad 2.1$$

$$\tan(\psi) = \frac{u \cdot \sin(\beta)}{v + u \cdot \cos(\beta)} \quad 2.2$$

### 2.3 Boundary Layer

Kereta yang melaju di tengah hembusan angin akan memiliki *boundary layer* di sekitar permukaan bodinya. **Pritchard, et. al., 2012** menjelaskan bahwa *boundary layer* merupakan lapisan yang membatasi area pada aliran fluida yang secara signifikan dipengaruhi oleh gaya gesek sehingga membuat kecepatan aliran fluida mengalami penurunan hingga nilai 0 pada bagian yang dekat dengan permukaan.



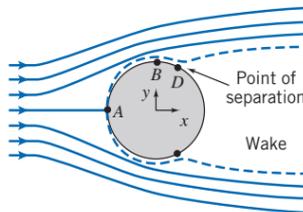
**Gambar 2.3** *Boundary Layer* pada Aliran Melalui Plat Datar (Pritchard, et.al., 2012)

Gambar 2.3 menunjukkan ilustrasi *boundary layer* yang terbentuk pada aliran melalui plat datar. Pada mulanya fluida mengalir dengan kecepatan uniform ( $U$ ). Kemudian, profil aliran fluida menjadi tidak uniform ketika mengalir di atas plat datar akibat adanya pengaruh tegangan geser. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa kecepatan fluida berangsur-angsur meningkat ketika semakin tinggi dari permukaan plat datar hingga pada akhirnya mencapai kondisi sama dengan kecepatan *freestream* ( $u=0,99U$ ).

Jarak antara permukaan plat datar dengan kecepatan 0 dan aliran fluida dengan kecepatan *freestream* tersebut kemudian disebut sebagai ketebalan lapisan batas (*boundary layer thickness*). Di dalam *boundary layer*, aliran terbagi menjadi dua jenis, yaitu aliran laminar yang terjadi pada aliran dengan *Reynold number* rendah, dan aliran turbulen yang terjadi pada aliran dengan *Reynold number* yang lebih tinggi. Aliran turbulen tersebut dapat menimbulkan ketidakstabilan sehingga *boundary layer* akan terdiri dari *turbulent eddy*. **Baker 2019** mengungkapkan bahwa pada penelitian terkait aerodinamika kereta, *boundary layer* yang terbentuk hampir selalu turbulen.

## 2.4 Separasi Aliran

*Boundary layer* yang terbentuk di sekitar benda padat dapat menimbulkan daerah *wake*. **Pritchard et.al., 2012** menjelaskan lebih lanjut bahwa daerah *wake* terbentuk ketika partikel fluida yang mengalir terdorong keluar dari lintasannya pada titik separasi aliran karena tidak mampu melawan *adverse pressure gradient*. *Adverse pressure gradient* merupakan gradien tekanan yang semakin meningkat searah dengan aliran. Area *wake* tersebut mengakibatkan terbentuknya suatu daerah yang memiliki tekanan relatif rendah.



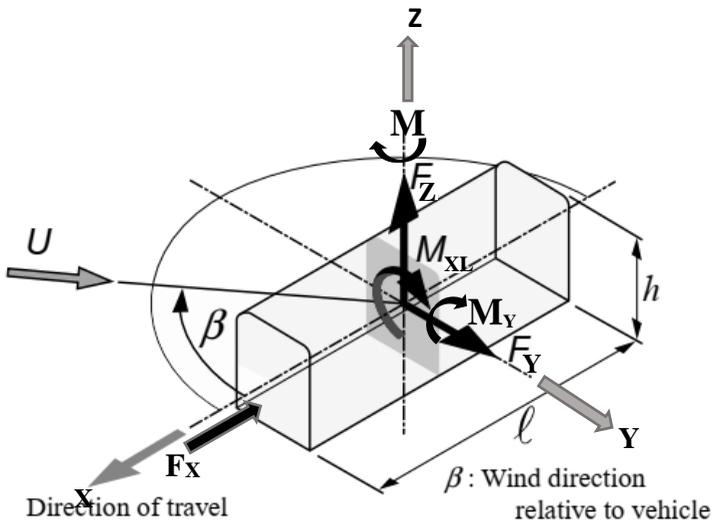
**Gambar 2. 4** Daerah *Wake* pada Aliran Melalui *Sphere*  
(Pritchard, et.al., 2012)

Gambar 2.4 menunjukkan terbentuknya daerah *wake* setelah aliran fluida mengalami separasi di titik separasi D. Daerah *wake*

yang terbentuk seperti pada gambar tersebut mengakibatkan adanya daerah dengan tekanan yang relatif lebih kecil.

## 2.5 Gaya yang Bekerja pada Kereta Terkena *Crosswind*

Ketika kereta terkena dampak *crosswind*, kereta akan mengalami 3 jenis gaya aerodinamik (*drag force*  $F_x$ , *side force*  $F_y$  dan *lift force*  $F_z$  di sepanjang sumbu  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) dan 3 momen aerodinamik (*rolling moment*  $M_x$  di sumbu  $x$ , *pitching moment* di sumbu  $y$ , dan *yawing moment* di sumbu  $z$ ) dengan titik pusat koordinat (origin) biasanya terletak di pusat rel kereta dan di bawah bodi kereta.



**Gambar 2. 5** Ilustrasi Gaya yang Bekerja pada Kereta yang Terkena *Crosswind* (Suzuki, M. et. al. 2003)

Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi gaya yang bekerja pada kereta ketika terkena efek *crosswind*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pada kereta yang melaju di udara terbuka, akan bekerja gaya *drag*  $F_x$ , *side force*  $F_y$ , gaya *lift*  $F_z$ , momen *rolling*  $M_x$ , momen *pitching*  $M_y$ , dan momen *yawing*  $M_z$ .

Koefisien gaya dan momen yang bekerja pada kereta tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$C_{F_x} = \frac{F_x}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad 2.3$$

$$C_{F_y} = \frac{F_y}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad 2.4$$

$$C_{F_z} = \frac{F_z}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad 2.5$$

$$C_{M_x} = \frac{M_x}{0.5\rho AhV_\infty^2} \quad 2.6$$

$$C_{M_y} = \frac{M_y}{0.5\rho AhV_\infty^2} \quad 2.7$$

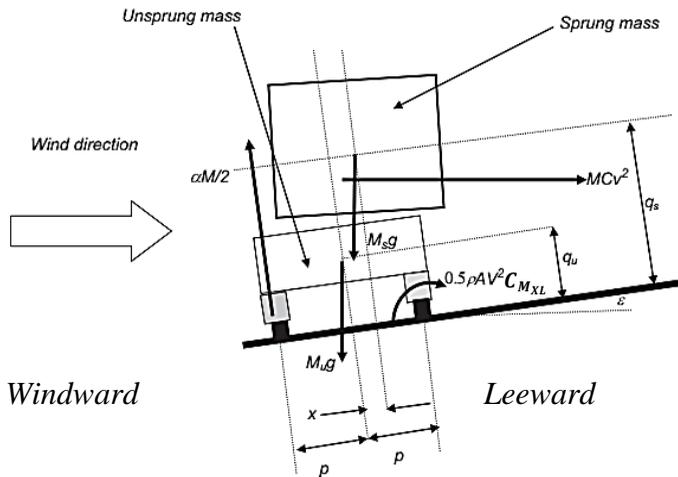
$$C_{M_z} = \frac{M_z}{0.5\rho AhV_\infty^2} \quad 2.8$$

Dengan  $\rho$  adalah massa jenis udara, A adalah luas permukaan referensi pada setiap gaya yang bekerja, h adalah tinggi kereta, dan V adalah kecepatan resultan dari kereta dan angin. Pada penelitian ini, luas permukaan referensi yang digunakan untuk perhitungan koefisien *drag* adalah luas proyeksi frontal area. Sementara itu, berdasarkan penelitian Liu, 2017 luas permukaan referensi yang digunakan untuk perhitungan koefisien *side force* adalah luas proyeksi bagian samping kereta.

Selain itu, terdapat koefisien tambahan yang juga relevan untuk menjelaskan mengenai kemungkinan terjadinya *overturning* pada kereta, yaitu *Lee Rail Rolling Moment* yang dapat dinyatakan sebagai:

$$C_{M_{XL}} = \frac{M_{XL}}{0.5\rho AhV_\infty^2} \quad 2.9$$

dengan  $M_{XL}$  adalah momen yang memutar kereta di sumbu X pada bagian *lee rail*,  $\rho$  adalah massa jenis udara, A adalah luas permukaan bagian samping kereta, h adalah tinggi gerbong kereta, dan V adalah resultan kecepatan aliran udara relatif terhadap kecepatan kereta.



**Gambar 2. 6** Ilustrasi Lokasi Terjadinya *Lee Rail Rolling Moment* (Baker, 2003)

Gambar 2.6 menunjukkan lokasi sumbu putar *lee rail rolling moment* yang ditunjukkan dengan persamaan  $0.5 \rho A h V_{\infty}^2 C_{M_{XL}}$ . Sumbu putar *lee rail rolling moment* berada di bagian roda kereta yang terjauh dari arah datangnya angin.

## 2.6 Penelitian Terdahulu Mengenai *Crosswind*

Di bidang aerodinamika kereta, penelitian-penelitian biasanya dilakukan dengan melakukan pengujian fisik model dan perhitungan numerik (*Computational Fluid Dynamics*). Pengujian fisik model meliputi pengujian model kereta (*Full Scale Testing*) di udara terbuka, pengujian statik model di *wind tunnel* (*scaled experiment*), dan pengujian dinamik atau *train rig* pada model.

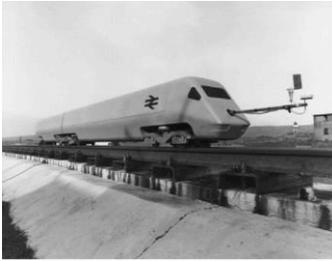
Sementara itu pengujian numerik meliputi pemodelan kereta dengan menggunakan komputer untuk menganalisis aliran pada kereta.

### **2.6.1 Full Scale Experiment**

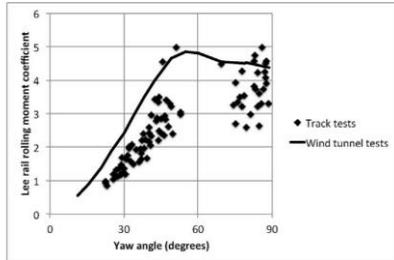
Pengujian kereta di bawah pengaruh *crosswind* pada udara terbuka belum banyak dilakukan. **Gallagher, 2018** menyatakan bahwa hal tersebut terjadi karena sulitnya eksperimen *full scale* di udara terbuka yang perlu menunggu kondisi cuaca yang tepat untuk mendukung pengujian. Hingga tahun 2018, terdapat tiga kali pengujian dengan kereta di udara terbuka untuk meneliti dampak *crosswind*.

#### **2.6.1.1 Penelitian Probabilitas Tergulingnya Kereta Akibat Angin Kencang oleh Cooper, 1980**

Pengujian pertama dilakukan pada model dengan skala 1/5 *Advanced Passenger Train* di daerah *Pendine, South Wales* (**Cooper, 1980**). Sejumlah alat ukur dipasang pada bodi model kereta tersebut dan kemudian dijalankan pada *test track*. Penelitian tersebut dilakukan untuk memperoleh gaya-gaya dan momen yang bekerja pada kereta dengan menggunakan alat ukur berupa *internal balances* di bagian dalam kereta dan *probe* yang dipasang pada bagian depan model seperti pada gambar 2.1.a. Dengan penelitian tersebut, diperoleh hasil berupa grafik koefisien *lee rail rolling moment* seperti yang tampak pada gambar 2.1.b. Hasil pengujian *full scale* tersebut juga dibandingkan dengan hasil pengujian *wind tunnel*.



(a) Eksperimen dengan skala 1/5 di Pendine, South Wales. (Sumber foto dari National Railway Museum)



(b) Koefisien *lee rail rolling moment* hasil pengujian Cooper 1980

**Gambar 2. 7** Pengujian *Advanced Passenger Train* di Pendine, South Wales. (Cooper, 1980)

Gambar 2.7 (a) menunjukkan konfigurasi model uji *crosswind* di udara terbuka yang di lakukan dengan menggunakan model kereta berskala 1:5 di *test track*. Sementara itu, gambar 2.8 (b) menunjukkan hasil pengujian yang diperoleh. Berdasarkan penelitian yang telah ia lakukan, diketahui bahwa koefisien *lee rail rolling moment* akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *yaw angle* dari  $0^0$  hingga  $50^0$ . Setelah melewati *yaw angle*  $50^0$ , koefisien *lee rail rolling moment* akan cenderung mengalami penurunan.

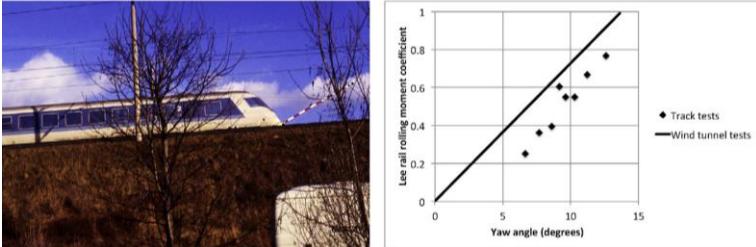
### 2.6.1.2 Penelitian Dampak Angin dari Samping terhadap Performa Aerodinamika Kereta oleh Matschke dan Heine 2002

Pengujian *full scaled* yang kedua dilakukan oleh **Matschke dan Heine 2002** dengan menggunakan *full-scale Inter-Reggio train* yang merupakan bagian dari proyek *TRANSAERO*. Pengujian tersebut dilakukan untuk memperoleh gaya-gaya yang bekerja pada kereta dan koefisien *rolling moment*, yang diukur dengan menggunakan alat ukur berupa *force transducers* di antara bodi kereta dan *bogie* untuk mengukur besarnya *lee rail rolling*

*moment*, akibat kondisi angin di sekitarnya. Besarnya kecepatan angin pada waktu pengujian dilakukan dapat diketahui dengan memasang alat ukur di bodi kereta yang diverifikasi dengan menggunakan anemometer di sekitar jalur kereta.

Untuk dapat memperoleh hasil tersebut, digunakan kereta Interregio dijalankan hingga kecepatan maksimum 200km/jam di sebuah jalur kereta uji yang menghubungkan antara Kota Hannover dan Wiirzburg di Jerman. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diketahui bahwa kecepatan angin lebih dari 15m/s sangat jarang terjadi di Jerman. Penelitian yang dilakukan di udara terbuka sangat bergantung pada kondisi cuaca saat itu.

Koefisien *Lee Rail Rolling Moment* untuk pengujian ini ditunjukkan pada gambar 2.9.b. Hasil pengujian *full scaled* tersebut juga dibandingkan dengan hasil yang diuji dengan menggunakan model kereta ICE-2 di *wind tunnel*. Model kereta pembanding, yaitu ICE-2 bukan merupakan model kereta yang identik. Hasil yang diperoleh dari pengujian *full-scale* sejauh ini menunjukkan nilai yang lebih rendah daripada pengujian di *wind tunnel* baik untuk pengujian di *Pendine* yang sebelumnya telah dilakukan oleh Cooper, 1980 maupun pengujian *TRANSAERO* oleh Matschke dan Heine, 2002. Pada pengujian *Pendine*, hal tersebut disebabkan oleh perbedaan kondisi *ground* model dengan kondisi yang sebenarnya. Sementara itu, ketidaksesuaian pada pengujian *TRANSAERO* dapat disebabkan oleh karena asumsi titik kerja gaya.



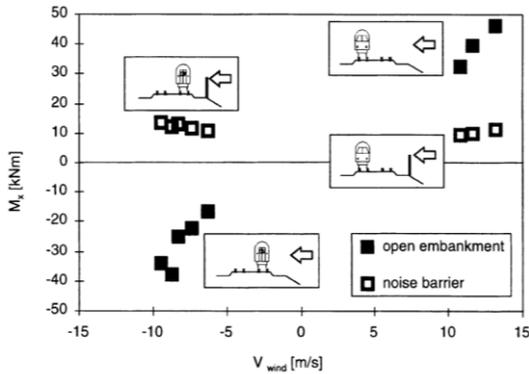
(a) *Eksperimen full-scale* TRANSAERO kereta Inter-Reggio

(b) Koefisien *lee rail rolling moment* dari pengujian Matschke dan Heine 2002.

**Gambar 2. 8** Pengujian *Full-scale* Kereta Inter-Reggio TRANSAERO. (Matschke dan Heine, 2002)

Gambar 2.8 (a) menunjukkan bentuk kereta yang diuji oleh Matschke pada tahun 2002. Sementara itu, gambar 2.8 (b) menunjukkan hasil pengujian yang diperoleh, yaitu berupa koefisien *lee rail rolling moment* yang mengalami peningkatan pada variasi *yaw angle* 0 hingga 15 derajat.

Selain meneliti dampak kecepatan angin terhadap *lee rail rolling moment*, penelitian Matschke dan Heine, 2002 juga memperjelas fakta bahwa penggunaan dinding penghalang angin di samping kereta berdampak pada kestabilan kereta. Hal ini terbukti dari nilai *lee rail rolling moment* yang lebih kecil ketika dinding penghalang terpasang.



**Gambar 2. 9** Perbandingan *Lee Rail Rolling Moment* pada *Open Embankment* dan *Noise Barrier* (Matschke dan Heine, 2002)

Gambar 2.9 menunjukkan perbandingan hasil *lee rail rolling moment* pada pengujian kereta di udara terbuka dan dengan penggunaan dinding penghalang (*Noise Barrier*). Pada gambar tersebut terlihat bahwa dengan penggunaan *noise barrier*, *lee rail rolling moment* akan menjadi lebih rendah.

### 2.6.2 *Computational Fluid Dynamics*

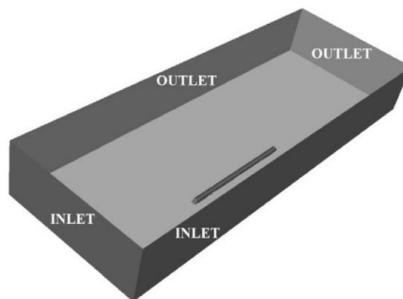
*Computational Fluid Dynamics*, atau CFD, adalah analisa yang dilakukan pada sebuah sistem yang meliputi fenomena aliran fluida, perpindahan panas, atau reaksi kimia dengan menggunakan simulasi di komputer. Metode ini dianggap cukup akurat sehingga sering digunakan untuk analisa aerodinamika pesawat,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

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

Domain komputasi tersebut kemudian dibagi menjadi elemen-elemen kecil untuk diselesaikan menggunakan suatu model turbulensi tertentu.

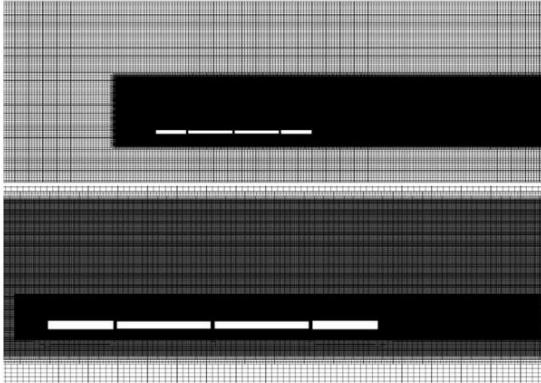
### 2.6.2.1 Penelitian dengan Metode CFD oleh Gallagher 2018

Sejumlah penelitian terkait dengan *crosswind* yang dilakukan dengan simulasi komputer telah dilakukan sebelumnya. Penelitian tersebut antara lain pernah dilakukan oleh **Gallagher 2018**. Pada penelitian tersebut, perhitungan CFD dilakukan pada model dengan rangkaian kereta yang terdiri dari 2 buah *power cars* (lokomotif) secara simetri di depan dan belakang dan 2 buah mark 3 *carriages* (gerbong) di antara kedua lokomotif tersebut. Tiga jenis perhitungan dilakukan pada model tersebut, antara lain simulasi aliran dengan *yaw angle*  $0^0$ , simulasi aliran *slipstream*, serta simulasi aliran *crosswind*. Analisa CFD yang dilakukan oleh Gallagher 2018 menggunakan pendekatan DDES. Hal tersebut membuat hasil yang diperolehnya cukup akurat. Domain yang digunakan ditunjukkan pada gambar 2.4. Panjang domain tersebut adalah  $44H$ , tinggi domain adalah  $9H$ , lebar domain  $24H$ ,  $6.5H$  di bagian *windward* dan  $17H$  di bagian *leeward*.



**Gambar 2. 10** Domain Simulasi (Gallagher, 2018)

Gambar 2.10 menunjukkan domain pada studi numerik yang dilakukan oleh Gallagher. Pada gambar tersebut tampak bahwa sisi depan domain dan sisi kanan domain kereta didefinisikan sebagai *inlet* (*velocity inlet*), bagian belakang kereta dan bagian kanan sebagai *outlet* (*pressure outlet*). Sementara itu bagian *ground* didefinisikan sebagai *slip moving wall* dengan kecepatan yang sama dengan kereta.



**Gambar 2. 11** Perbesaran *Mesh* untuk Simulasi Kereta.  
(Gallagher, 2018)

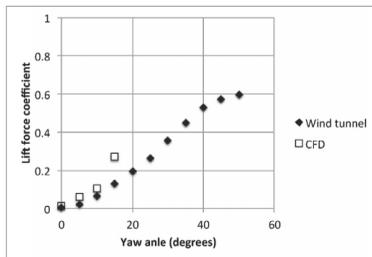
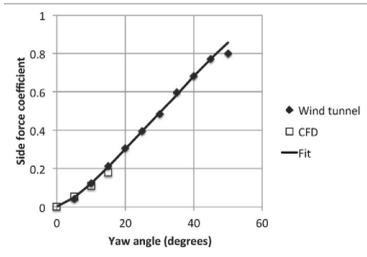
Gambar 2.11 menunjukkan *mesh* yang dibuat untuk menyelesaikan simulasi tersebut. Pada gambar tersebut terlihat bahwa bagian domain yang paling dekat dengan bodi kereta diatur dengan kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian domain yang paling jauh dari dinding kereta. Sebelum simulasi dengan menggunakan model tersebut dilakukan, *grid independency test* dilakukan terlebih dahulu terhadap dua variasi *mesh* yang ditunjukkan seperti pada tabel 2.1. *Grid independency test* merupakan sebuah pengujian yang dilakukan pada sebuah *mesh* yang sama dengan menggunakan variasi jumlah elemen untuk mengetahui selisih hasil yang dapat diperoleh dengan memperbanyak jumlah elemen perhitungan.

**Tabel 2. 1** Perbandingan Nilai  $C_S$  dan  $C_L$  pada Dua Variasi *Mesh* (Gallagher, 2018)

Jenis <i>Mesh</i>	$C_S$	$C_L$
Sedang (40,2 juta)	0.11	0.11
Halus (70 juta)	0.10	0.17

Tabel 2.1 menunjukkan perbandingan dua variasi *mesh*, yaitu sedang dengan jumlah elemen sebanyak 40,2 juta dan halus dengan jumlah elemen sebanyak 70 juta. Dengan selisih nilai koefisien  $C_S$  yang sangat kecil, dipilih *mesh* dengan jumlah elemen sebanyak 40,2 juta.

Perhitungan yang ia lakukan dalam penelitian tersebut menghasilkan nilai koefisien *side force*, koefisien gaya angkat (*lift force*) seperti yang tampak pada gambar 2.12 (a) dan 2.12 (b). Pada gambar tersebut terlihat bahwa *side force coefficient* dan *lift force coefficient* di bagian *lee* kereta mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *yaw angle*. Hasil penelitian dengan menggunakan simulasi tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil dari penelitian pada *wind tunnel* dan menunjukkan hasil yang cukup sesuai. Penelitian model di *wind tunnel* yang dilakukan oleh Gallagher 2018 dilakukan pada model dengan skala 1/25. Model tersebut diatur pada kemiringan *yaw angle* yang bervariasi mulai dari  $0^\circ$ - $50^\circ$  dengan kecepatan angin dari *wind tunnel* sebesar 13,2 m/s.

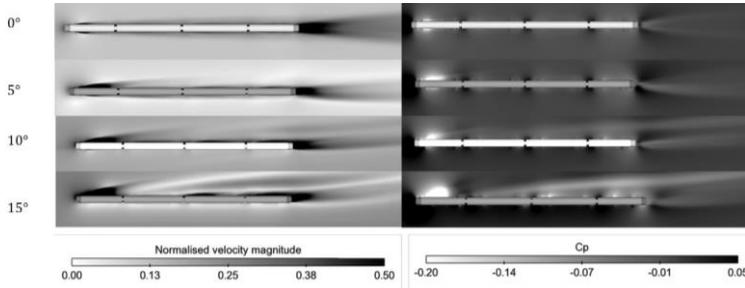


(a) Side Force Coefficient

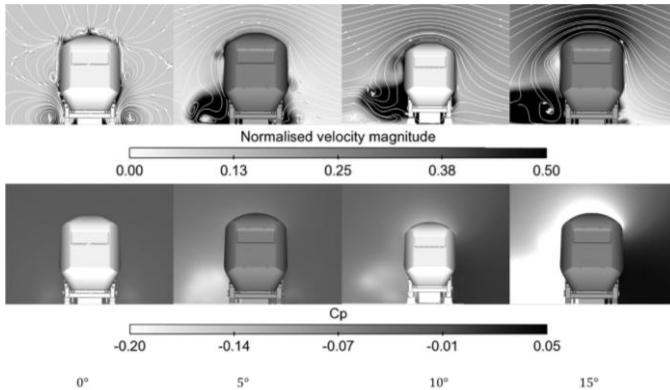
(b) Lift Force Coefficient

**Gambar 2. 12** Hasil Simulasi *Crosswind* pada Model Kereta *British Rail Class 43*: (a) *Side Force Coefficient* (b) *Lift Force Coefficient*. (Gallagher, 2018)

Simulasi aliran *crosswind* pada model dengan metode CFD juga mampu menunjukkan kontur tekanan di sepanjang bodi kereta seperti pada gambar berikut.



**Gambar 2. 13** Hasil Simulasi di *Horizontal Cross Section*: (a) Kontur Kecepatan. (b) Kontur Tekanan. (Gallagher, 2018)



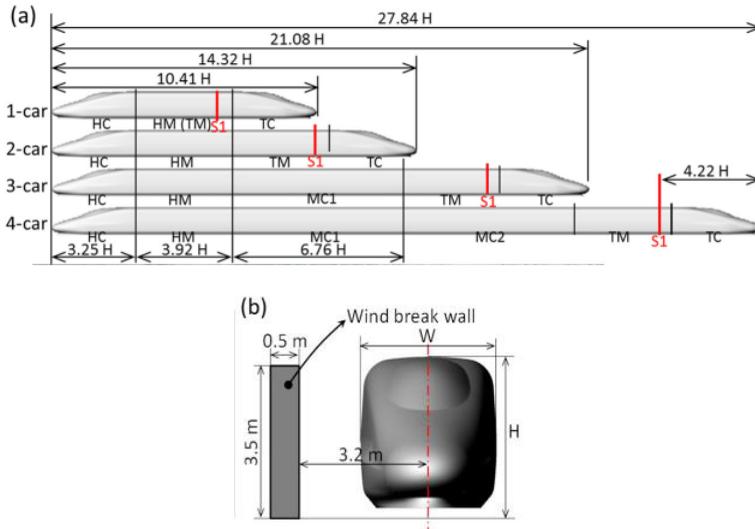
**Gambar 2. 14** Hasil Simulasi di *Vertical Cross Section*: (a) Kontur Kecepatan. (b) Kontur tekanan. (Gallagher, 2018)

Gambar 2.13 dan 2.14 masing-masing menunjukkan kontur tekanan, dan kontur kecepatan. Kontur tekanan pada gambar 2.14 yang ditunjukkan dari hasil simulasi dapat menunjukkan bahwa area *lee* di bagian *nose* kereta merupakan bagian yang bertekanan rendah ketika terjadi *crosswind* pada kereta.

### **2.6.2.2 Penelitian Pengaruh Penambahan Panjang Gerbong dan Penggunaan Dinding Penghalang Angin terhadap Performa Aerodinamika Kereta yang terkena *Crosswind* oleh Niu, et.al. 2018**

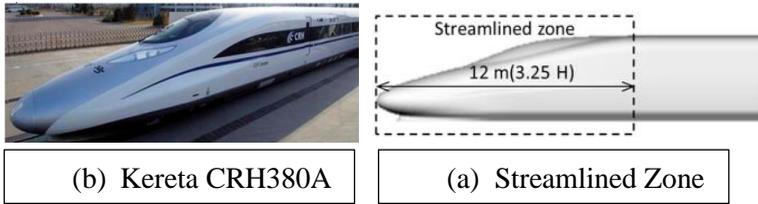
Pada penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, telah diketahui performa aerodinamika kereta yang melaju dengan pengaruh *crosswind*. Selanjutnya, **Niu 2018** meneliti lebih lanjut lagi performa aerodinamika tersebut dengan sejumlah variasi pada geometri kereta CRH380A. Variasi tersebut meliputi pertambahan jumlah gerbong mulai dari 1 gerbong (1 car) hingga 4 gerbong (4 cars). Selain itu, untuk meningkatkan performa aerodinamika kereta dalam menghadapi efek *crosswind*, ia juga meneliti pengaruh penggunaan dinding penghalang angin

(*windbreak wall*) terhadap peningkatan performa aerodinamika kereta, meliputi *rolling moment coefficient* dan koefisien *drag*. Variasi Geometri yang terdapat pada pengujian ini ditunjukkan seperti pada gambar berikut.



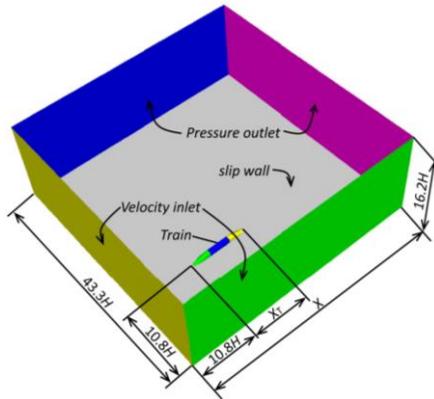
**Gambar 2.15** Variasi Geometri Kereta: (a) Dimensi untuk Penambahan Jumlah Gerbong pada Model Uji. (b) Dimensi Dinding Penghalang *Crosswind*. (Niu, et.al., 2018)

Gambar 2.15 (a) menunjukkan dimensi variasi panjang kereta, mulai dari 1 gerbong hingga 4 gerbong. Sementara itu, gambar 2.15 (b) menunjukkan dinding penghalang di dekat kereta dan dimensinya. Model kereta yang digunakan pada penelitian tersebut merupakan jenis CRH380A yang merupakan jenis kereta cepat elektrik yang dikembangkan oleh *CSR Corporation Limited, China Railway*. Bentuk bodi kereta CRH380A, berikut dengan *streamlined zone*, yang saat ini digunakan oleh *China Railway* ditunjukkan seperti pada gambar 2.16.



**Gambar 2. 16** Bentuk Bodi Kereta Listrik Cepat CRH380A CSR Corporation Limited. (Niu, et.al., 2018)

Penelitian tersebut dilakukan secara numerik dengan urutan pengerjaan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Pada tahap *pre-processing*, proses diskretisasi domain dilakukan dengan cara membuat *meshing* pada permukaan geometri kereta dan domain. Ukuran domain dan *boundary condition* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.17.

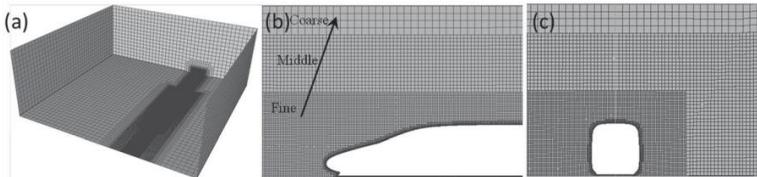


Value	1-car	2-car	3-car	4-car
$x_T$	10.41 H	14.32 H	21.08 H	27.84 H
$x$	43.24 H	54.05 H	64.86 H	75.78 H

**Gambar 2. 17** Boundary Condition dan Dimensi Domain Uji (Niu, et.al., 2018)

Gambar 2.17 menunjukkan *boundary condition* dan ukuran domain uji yang digunakan oleh Niu, et.al. 2018. Pada gambar tersebut terlihat bahwa permukaan domain di bagian depan dan sebelah kiri kereta didefinisikan sebagai *velocity inlet*. Selanjutnya, permukaan domain di bagian kanan kereta, atas kereta dan bagian belakang kereta didefinisikan sebagai *pressure outlet*. Untuk dapat membuat pergerakan relatif kereta terhadap dinding penghalang, domain di bagian *ground* didefinisikan sebagai *slip wall* dengan kecepatan *slip* diatur sama dengan kecepatan kereta.

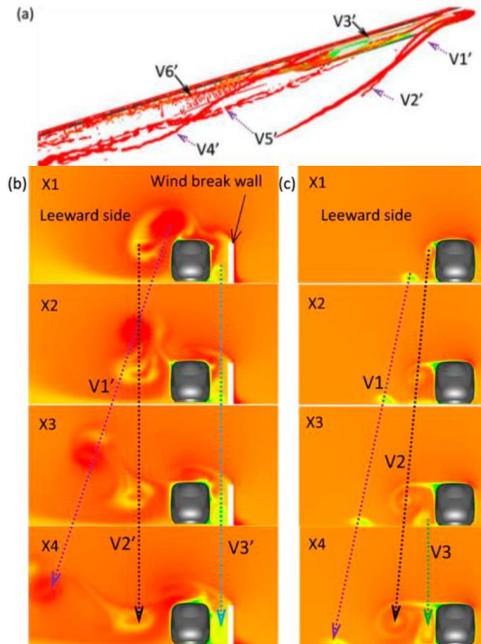
Pada tahap *pre-processing*, penelitian yang dilakukan Niu 2018 menggunakan *software OpenFOAM* untuk membuat *mesh* di sekitar kereta yang didominasi oleh bentuk *hexahedral*. Untuk memperoleh hasil yang lebih baik, domain uji memiliki tiga area dengan kerapatan *mesh* yang berbeda.



**Gambar 2. 18** Mesh di Sekitar Permukaan Kereta: (a) Tampilan Mesh secara Isometri, (b) Tampilan Mesh dari bagian Samping Kereta. (c) Tampilan Mesh dari Bagian Depan Kereta. (Niu, et.al., 2018)

Gambar 2.18 menunjukkan *mesh* di sekitar bodi kereta dengan kerapatan yang berbeda-beda. Kerapatan *mesh* tertinggi terdapat di bagian sekitar bodi kereta, hingga kemudian berangsur-angsur semakin renggang seperti yang terdapat pada gambar 2.17 (b). Pada gambar 2.17 (c) juga terlihat adanya area dengan *mesh* yang lebih rapat di daerah dekat dinding di bagian *lee side* kereta. Hal tersebut dilakukan untuk dapat memperoleh hasil yang baik di bagian *lee*, yaitu *lee rail rolling moment*. Pada bagian *lee*, kerapatan *mesh* yang lebih tinggi diatur dengan panjang sekitar dua kali dari bagian *wind*.

Untuk mengurangi jumlah mesh dan mengurangi beban komputasi, penelitian tersebut menggunakan *wall function*. Ketebalan *boundary layer* pertamanya sebesar 0.195mm. Kemudian digunakan teknik *adaptive mesh* melalui *software* Fluent 14.0 untuk memastikan rata-rata nilai  $y^+$  berkisar di nilai 10, sehingga memenuhi kriteria yang terdapat dari panduan penggunaan Fluent. Setelah optimasi jumlah mesh dilakukan menggunakan *wall function*, penelitian tersebut dilanjutkan dengan pengujian *grid independency* sehingga digunakan mesh dengan jumlah *cell* sebanyak 23 juta. Di *software ANSYS Fluent* 14.0, dilakukan *setting* kecepatan kereta pada *velocity inlet* sebesar 60 m/s, dan *input turbulence intensity* 1%. *Solver* yang digunakan merupakan *pressure based* dengan metode SIMPLE dan *transient*. Besarnya *time step size* diatur sebesar  $1 \times 10^{-4}$ , jumlah iterasi pada setiap *time step* diatur sebesar 30 dengan kriteria konvergensi adalah  $1 \times 10^{-4}$ .

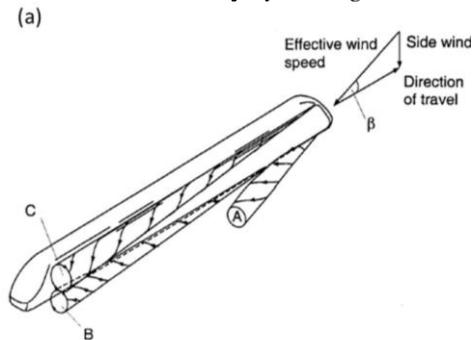


**Gambar 2. 19** Medan Aliran di Sekitar Kereta Akibat *Crosswind*:  
 (a) Struktur *Vortex* di Dekat Kereta. (b) Distribusi Kecepatan di Sekitar Kereta dengan Dinding Penghalang. (c) Distribusi Kecepatan di Sekitar Kereta tanpa Dinding Penghalang. (Niu, et.al., 2018)

Gambar 2.19 menunjukkan medan aliran di sekitar kereta akibat *crosswind*. Berdasarkan penelitian yang telah ia lakukan, diketahui bahwa penggunaan dinding penghalang (*windbreak wall*) dapat mengurangi jumlah *vortex shedding* yang terbentuk di bagian lee dan kemudian menarik *vortex shedding* tersebut menjauhi kereta dengan lebih cepat. Selain itu, penggunaan dinding penghalang juga menghasilkan *vortex* yang terdapat di antara bodi kereta dan dinding seperti yang tampak pada gambar 2.18(b). *Vortex* tersebut dapat berinteraksi dengan kereta, sehingga dapat menurunkan gaya lateral yang dialami kereta apabila

dijumlahkan dengan *vertex* di bagian *lee*. Gaya lateral kereta yang lebih rendah ini berarti menurunkan risiko terjadinya *overturning* pada kereta.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh **Cooper 1980** Kereta yang melaju dan diterpa oleh efek *crosswind* menunjukkan reaksi seperti halnya *slender body* yang diterpa angin, namun dengan tambahan efek *ground* dan aliran angin yang turbulen. Aliran di sekitar kereta dengan *yaw angle* hingga sekitar  $50^\circ$  didominasi oleh *lee side vortex* yang berkembang dari titik separasi aliran di bagian sudut atas daerah *lee*. Daerah *lee* merupakan daerah di belakang objek yang terkena hembusan angin. Sementara itu, aliran di bagian bawah bodi kereta dipengaruhi oleh separasi lokal di sekitar *bogie* kereta. Secara khusus, bagian *lee* di *nose* kereta dapat memiliki area separasi aliran yang bergantung terhadap bentuk *nose* dan besarnya *yaw angle*.

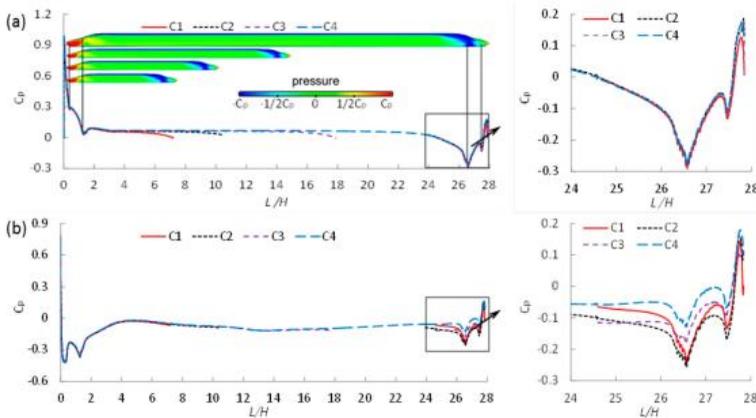


**Gambar 2. 20** Struktur Aliran di Sekitar Kereta Ketika Terjadi *Crosswind*. (Niu, et.al., 2018)

Gambar 2.20 (a) menunjukkan struktur aliran yang terbentuk di sekitar kereta ketika terjadi efek *crosswind*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa terbentuk tiga daerah *shedding vortex* di bagian *lee* kereta yang ditunjukkan oleh huruf A, B, dan C. *Vortex A* terlihat terbentuk dari bagian depan bawah di bagian *leeward nose* kereta. *Vortex B* terlihat terbentuk dari bagian

*underbody* kereta dan *vortex C* terbentuk di bagian *leeward* atap kereta.

Ketika kereta terkena *crosswind*, akan timbul perbedaan tekanan pada bagian *windward* dan *leeward* kereta dan timbul *vortex* pada bagian *leeward* kereta. Perubahan fenomena aliran dapat dijelaskan dengan melakukan plot koefisien tekanan di bagian permukaan bagian samping kereta seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.21.

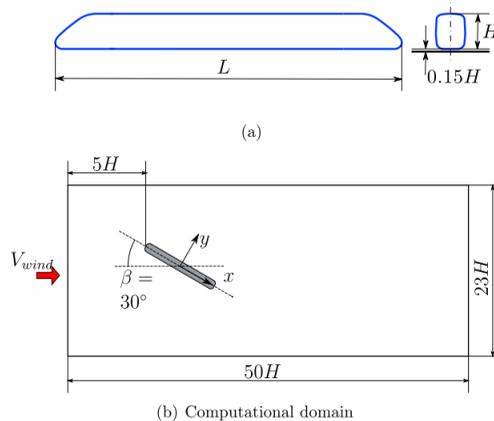


**Gambar 2. 21** Koefisien Tekanan di Sepanjang Permukaan Samping Kereta: (a) *Windward*. (b) *Leeward*. (Niu et.al., 2018)

Gambar 2.21 menunjukkan plot koefisien tekanan di sepanjang permukaan kereta bagian *windward* dan *leeward* kereta. Pada gambar tersebut terlihat bahwa bagian *leeward* kereta didominasi oleh koefisien tekanan permukaan yang negatif. Nilai koefisien tekanan di bagian tersebut tampak lebih rendah daripada nilai koefisien tekanan di permukaan bagian *windward*.

### 2.6.2.3 Penelitian Model Turbulensi RANS, SAS, IDDES untuk Simulasi Efek *Crosswind* pada Kereta oleh Munoz-Paniagua, et. al., 2017.

Studi numerik yang telah dilakukan untuk meneliti dampak *crosswind* pada kereta umumnya dilakukan menggunakan domain dengan *boundary condition* yang terdiri dari dua buah *inlet* pada sisi samping domain, serta dua buah *pressure outlet* pada sisi samping lainnya dari sebuah domain. Selain dengan menggunakan domain dengan pengaturan *boundary condition* seperti pada penelitian sebelumnya, studi numerik juga dapat dilakukan dengan menggunakan bentuk domain lainnya seperti yang dilakukan oleh Munoz-Paniagua, et. al., 2017.



**Gambar 2. 22** Domain Pengujian *Crosswind* Munoz-Paniagua, et. al. 2017: (a) Dimensi kereta berskala 1:10 dengan ukuran  $L=3.552\text{m}$  dan  $H=0.358\text{m}$ ; dan (b) Ukuran domain untuk pengujian *crosswind*. (Munoz-Paniagua, et. al., 2017)

Gambar 2.22 (a) menunjukkan dimensi kereta berskala 1:10 yang dipergunakan untuk menguji dampak *crosswind*. Sementara itu, gambar 2.22 (b) menunjukkan ukuran domain yang

dipergunakan pada pengujian tersebut. Domain tersebut hanya memiliki sebuah *velocity inlet* dan sebuah *pressure outlet* sehingga kecepatan yang masuk pada *velocity inlet* merupakan kecepatan resultan angin dan kecepatan kereta. *Yaw angle* pada penelitian tersebut kemudian dibentuk dengan memiringkan model kereta sebesar  $30^0$  mengikuti besarnya *yaw angle* dari *crosswind*. Sistem koordinat pada domain tersebut juga kemudian digeser sebesar  $30^0$  terhadap arah *free-stream* yang ditunjukkan oleh *Vwind* di sebelah kiri.

Pada penelitian tersebut, **Munoz-Paniagua, et. al., (2017)** melakukan pengujian terhadap model kereta *ICE 2 (class 808) Deutsche Bahn AG* berskala 1:10. Model kereta tersebut diuji pada *yaw angle* yang sama yaitu  $30^0$  dengan menggunakan sejumlah model turbulensi, yaitu EARSM, SAS IDDES, serta model turbulensi RANS yaitu  $k - \varepsilon$  dan  $k - \omega SST$  yang menggunakan *curvature correction* untuk mengetahui koefisien gaya aerodinamik, distribusi tekanan di permukaan kereta, struktur aliran di sekitar kereta, serta beban komputasi untuk menyelesaikan masing-masing model turbulensi. Data hasil pengujian numerik tersebut kemudian dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan pada *wind tunnel*.

Kemampuan kereta dalam menghadapi *crosswind* dapat dianalisis berdasarkan koefisien *side force*, *lift force*, atau *rolling moment*. Besarnya koefisien *side force* yang diperoleh studi numerik yang dilakukan oleh **Munoz-Paniagua, et. al., (2017)** ditunjukkan seperti pada tabel 2.2.

**Tabel 2. 2** Nilai Koefisien *Side Force* pada Setiap Pengujian (Munoz-Paniagua, et. al., 2017)

<i>Case</i>	Cs	Rms (Cs)
<i>Experiment</i>	3.72	-
LES	3.81	0.02
<i>k - ε realizable (+cc)</i>	3.61	-
<i>k - ω SST (+cc)</i>	3.63	-
EARSM	3.45	-
SAS	3.75	0.03
IDDES	3.80	0.05

Tabel 2.2 menunjukkan nilai koefisien side force dari studi numerik yang dibandingkan dengan eksperimen dan studi numerik LES terdahulu. Pada tabel tersebut diketahui bahwa besarnya koefisien *side force* yang diperoleh dari metode RANS selalu lebih rendah daripada hasil yang diperoleh dari data eksperimen, metode SAS paling mendekati hasil eksperimen, sementara IDDES menghasilkan nilai yang sedikit lebih besar daripada eksperimen. Perbedaan nilai koefisien *side force* dari hasil studi numerik terhadap eksperimen yang dilakukan mungkin terjadi akibat adanya penyederhanaan bagian-bagian kereta, seperti bogie atau komponen support model kereta yang digunakan untuk eksperimen.

Akurasi nilai koefisien gaya aerodinamik merupakan komponen yang penting untuk mengetahui performa aerodinamika kereta. Meskipun demikian, studi numerik juga harus memperhatikan kemampuan komputasi yang dimiliki untuk mampu menyelesaikan model tersebut. Berdasarkan 5 model turbulensi tersebut, diketahui lamanya waktu yang diperlukan oleh komputer untuk mencapai nilai konvergensi.

**Tabel 2. 3** Perbandingan Waktu Komputasi Studi Numerik  
(Munoz-Paniagua, et. al., 2017)

Model	Waktu Konvergen (s)	Jumlah Iterasi	Beban Relatif terhadap $k - \omega SST$
$k - \varepsilon$ realizable	13231	1492	0.82
$k - \varepsilon$ realizable (+cc)	11634	1302	0.72
$k - \omega SST$	16080	890	1.00
$k - \omega SST$ (+cc)	10015	902	0.62
EARSM	26127	2333	1.62
SAS	1220366	122000	75.89
IDDES	1629310	122000	101.33

Tabel 2.3 menunjukkan perbandingan waktu komputasi untuk setiap model serta beban relatif yang diperoleh dengan membandingkan lamanya waktu konvergensi terhadap model  $k - \omega SST$ . Studi numerik tersebut dilakukan dengan menggunakan komputer dengan processor Intel-Xeon E5645 2.40GHz dengan jumlah *core* sebanyak 64. Pada studi numerik tersebut, iterasi untuk model turbulensi RANS dilakukan hingga mencapai level *residual* di bawah  $1 \times 10^{-6}$ , sementara itu pada model *transient* digunakan *time step size* sebesar  $1 \times 10^{-4}$  dan 20 iterasi *per time step*. Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada tabel 2.3, diketahui bahwa penggunaan *curvature correction* untuk model turbulensi RANS mampu mempercepat tercapainya konvergensi.

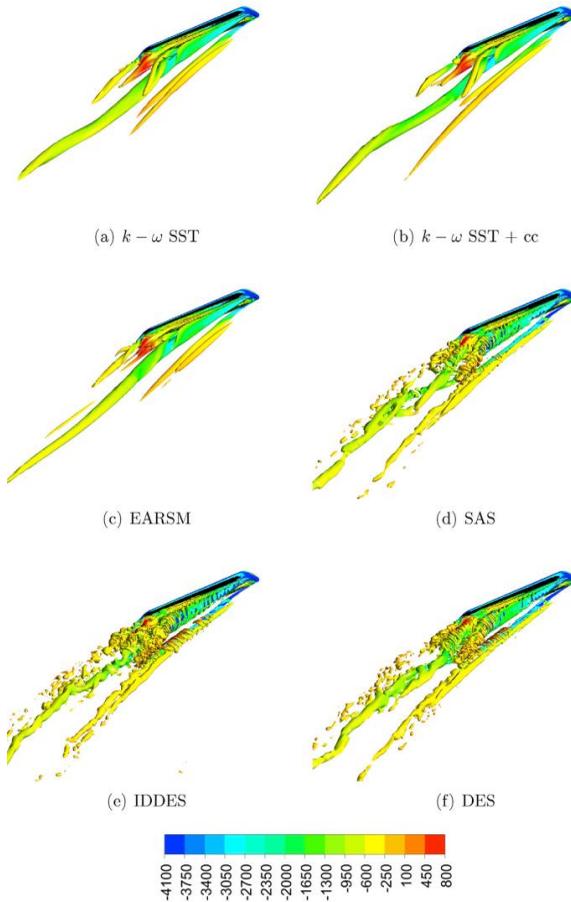
Pada penelitiannya terkait model turbulensi, Munoz-Paniagua juga menampilkan struktur aliran yaitu dengan membuat visualisasi vortex yang terbentuk di area wake kereta yang terkena crosswind. Vortex yang terbentuk di daerah wake ditampilkan dengan menggunakan *isosurface Q-criterion* yang merupakan *second invariant of velocity gradient tensor* dengan nilai  $Q=0,001$  dengan perumusan sebagai berikut:

$$Q = \frac{1}{2} (\|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2) \quad 2.10$$

dimana  $\Omega$  merupakan *rate-of-rotation tensor* dan  $S$  merupakan *rate-of-strain tensor* dengan *isosurface* yang diwarnai berdasarkan *colormap* koefisien tekanan.

Gambar 2.23 menunjukkan visualisasi struktur aliran yang terdapat *vortex* di daerah *wake*. Pada penelitiannya, Munoz-Paniagua membandingkan *vortex* yang terbentuk pada sejumlah variasi model turbulensi, antara lain  $k - \omega$  SST baik dengan penggunaan *curvature correction* maupun tanpa *curvature correction*, EARSM, SAS, IDDES, dan DES,

Pada gambar 2.23 tersebut terlihat bahwa visualisasi *vortex* dengan menggunakan model *unsteady* IDDES, DES, dan SAS tampak lebih detail. Hal tersebut dikarenakan model turbulensi *unsteady* tersebut memiliki kemampuan untuk memperoleh *instantaneous flow structure*. Sementara itu, model turbulensi  $k - \omega$  SST dan EARSM tampak menghasilkan struktur aliran yang lebih halus. Munoz-Paniagua di dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa hal tersebut mungkin terjadi karena kecenderungan model turbulensi RANS untuk mencari nilai rata-rata aliran dan meredam fluktuasi sehingga diperoleh hasil yang tampak seolah-olah memiliki intensitas *vortex* lebih rendah.



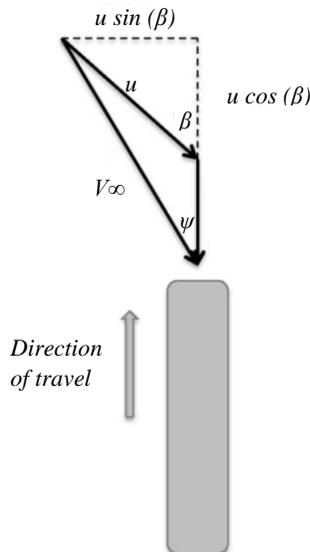
**Gambar 2. 23** Struktur Aliran *Vortex* di Daerah *Wake* pada Beberapa Model Turbulensi: (a)  $k - \omega$  SST. (b)  $k - \omega$  SST dengan *curvature correction*. (c) EARSM. (d) SAS. (e) IDDES. (f) DES. (Munoz-Paniagua, et. al., 2017)

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan *software* ANSYS melalui 3 tahapan penelitian. Tahap penelitian tersebut yaitu *pre processing*, *processing*, dan *post processing*.

### 3.1 Variasi

Model yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa geometri tiga dimensi dari desain kereta semi cepat Jakarta-Surabaya dengan menyederhanakan bentuk sejumlah komponennya, yaitu jendela, tangga, *handle* pintu, *wheelset*, dan celah *bogie*. Karakteristik desain bodi kereta ini dalam menghadapi efek *crosswind* dapat diketahui dengan mengatur variasi kecepatan angin  $u$  sehingga membentuk *yaw angle*  $\Psi$  dan kecepatan resultan  $V_\infty$  tertentu yang nilainya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2 berikut ini.



**Gambar 2.2** Sudut Datang Angin (*Yaw Angle*  $\psi$ ). (Gallagher, 2018)

$$V_{\infty}^2 = (v + u \cdot \cos(\beta))^2 + (u \cdot \sin(\beta))^2 \quad 2.1$$

$$\tan(\psi) = \frac{u \cdot \sin(\beta)}{v + u \cdot \cos(\beta)} \quad 2.2$$

*Yaw angle* yang terbentuk tersebut kemudian akan digunakan sebagai parameter untuk memiringkan geometri kereta relatif terhadap *inlet*. Parameter dan juga variasi untuk penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1 di bawah ini.

**Tabel 3. 1** Variasi Penelitian

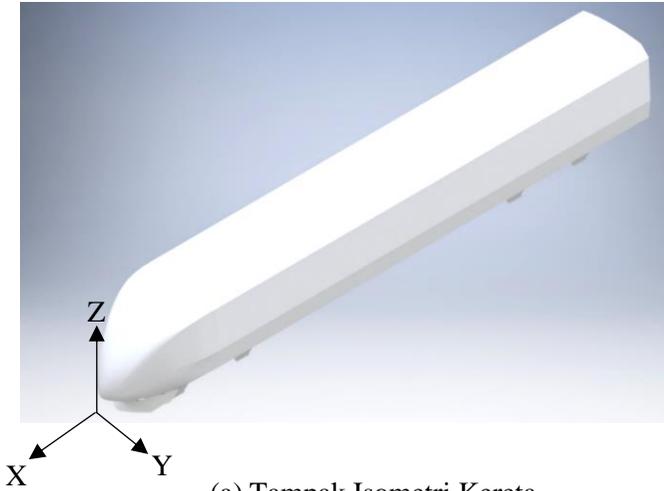
Parameter	Variasi
Kecepatan kereta (m/s)	44.44 m/s
Kecepatan angin dari samping (m/s)	0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, dan 20 m/s
<i>Yaw Angle</i> $\psi$ (derajat)	0°; 6,42°; 12,68°; 18,65°; dan 24,22°

### 3.2 Tahap *Pre-Processing*

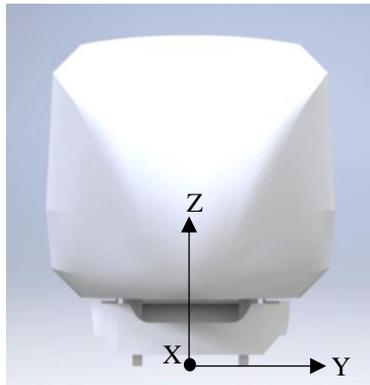
*Pre-processing* merupakan tahap persiapan untuk analisa aliran fluida secara numerik. Pada tahap ini, dilakukan pembuatan geometri benda yang akan diuji, pembuatan domain, pembuatan *mesh*, dan penentuan parameter yang akan digunakan.

#### 3.2.1 Pembuatan Geometri dan *Meshing*

Dalam tahap *pre-processing*, dibuat geometri tiga dimensi kereta semi cepat Jakarta-Surabaya dan domain yang akan digunakan pada simulasi. Model kereta yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada gambar 3.1.



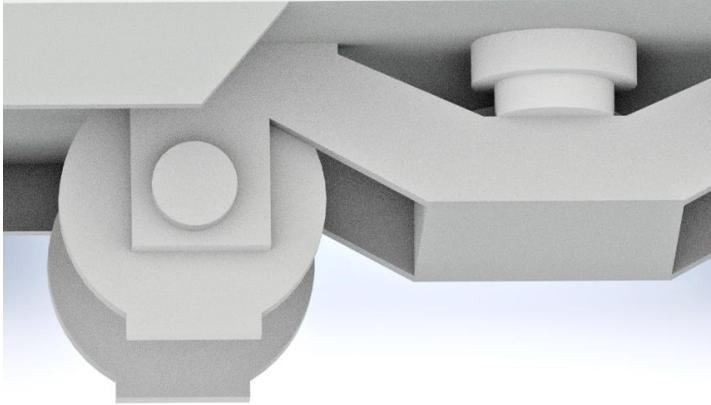
(a) Tampak Isometri Kereta



(b) Tampak Depan Kereta



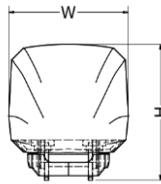
(c) Tampak Samping Kereta



(d) *Bogie Kereta*

**Gambar 3. 1** Model Kereta Semiccepat Jakarta-Surabaya: (a) Tampak Isometri  
(b) Tampak Depan (c) Tampak Samping (d) *Bogie Kereta*

Gambar 3.1 menunjukkan model kereta semicepat Jakarta-Surabaya. Pada gambar 3.1.a, tampak bahwa geometri yang digunakan untuk pengujian mengalami penyederhanaan pada bagian jendela, pintu, *handle* pintu, dan tangga naik. Sementara itu, pada gambar 3.1.d tampak penyederhanaan pada bagian *bogie* dengan menambahkan penyangga roda dan celah antara bagian bawah kereta dan *bogie* yang tersambung. Penyederhanaan tersebut dibuat dengan tujuan untuk mencegah terbentuknya *mesh tetrahedral* dengan kualitas yang buruk ketika dipaksa untuk mengisi celah yang terlalu sempit. Dimensi Kereta Semiccepat Jakarta-Surabaya ditunjukkan oleh gambar 3.3 dan tabel 3.2.



(a) Tampak Depan Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya



(b) Tampak Samping Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya.

**Gambar 3. 2** Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya: (a) Tampak Depan Model Kereta Jakarta-Surabaya. (b) Tampak Samping Model Kereta Semicepat Jakarta-Surabaya.

**Tabel 3. 2** Ukuran Geometri Kereta

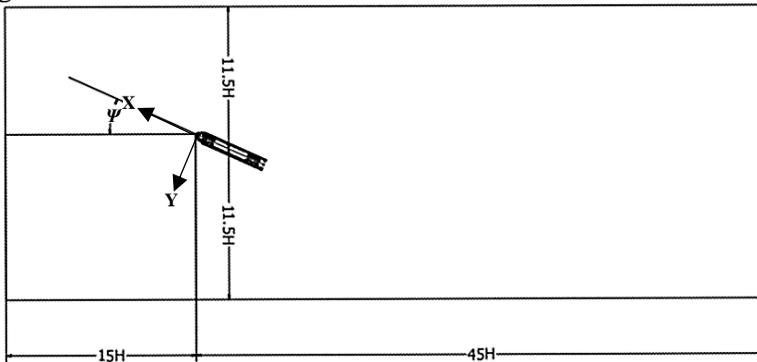
Bagian	Dimensi (mm)
Panjang (L)	20500
Lebar (W)	3000
Tinggi (H)	3400

Gambar 3.2 menunjukkan dimensi panjang (L), lebar (W), dan tinggi (H) kereta. Besarnya L, W, dan H secara berturut-turut yaitu 20.500mm, 3000mm, dan 3400mm seperti yang nilainya ditunjukkan pada tabel 3.2.

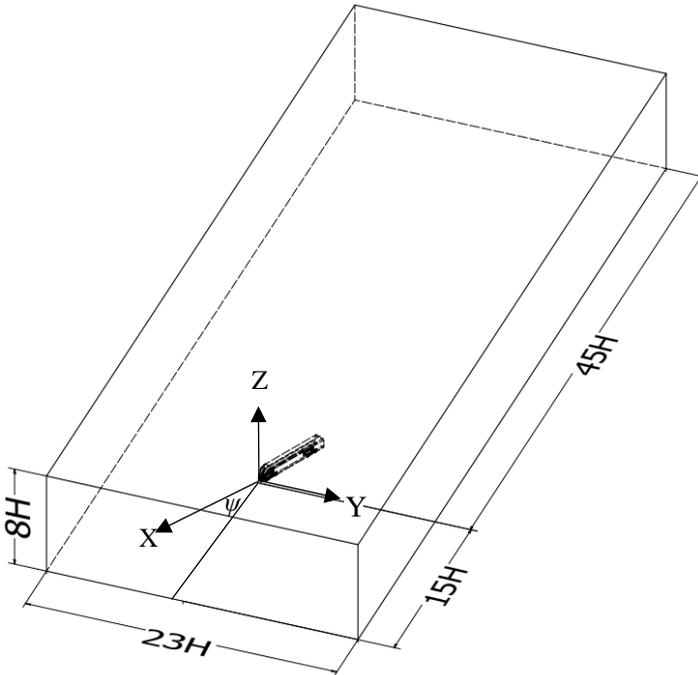
### 3.2.2 Domain Simulasi

Domain pada penelitian ini dibuat dengan menempatkan geometri kereta di dalam sebuah geometri balok yang besar. Simulasi adanya *crosswind* pada kereta kemudian dilakukan dengan menggeser kereta dengan besar sudut tertentu relatif terhadap *inlet*. Konfigurasi domain tersebut merujuk pada penelitian Munoz-Paniagua, et. al., 2017.

Di dalam domain terdapat balok berukuran kecil yang melingkupi geometri tiga dimensi kereta. Balok berukuran kecil yang melingkupi di sekitar kereta tersebut bertujuan untuk membatasi area yang akan menggunakan *hexahedral mesh* dari area yang menggunakan *tetrahedral* dan *prism mesh* di sekitar kereta. Ukuran domain pada simulasi ini ditunjukkan seperti pada gambar 3.3



(a) Tampak Atas Domain Pengujian



(b) Tampak Isometri Domain Pengujian

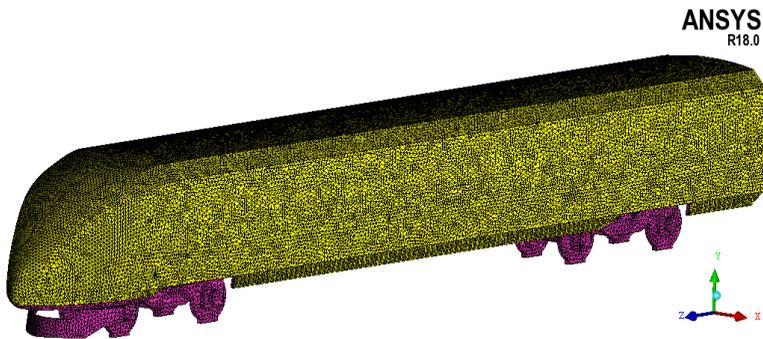
**Gambar 3.3** Domain Pengujian: (a) Tampak Atas. (b) Tampak Isometri

Gambar 3.3 menunjukkan tampak atas dari domain pengujian yang digunakan. Pada gambar tersebut tampak bahwa jarak dari *inlet* ke kereta adalah sejauh  $15H$ , jarak samping kereta ke dinding  $11,5H$ , dan panjang domain dari *inlet* ke *outlet* adalah  $60H$ . Tinggi domain adalah  $8H$ .

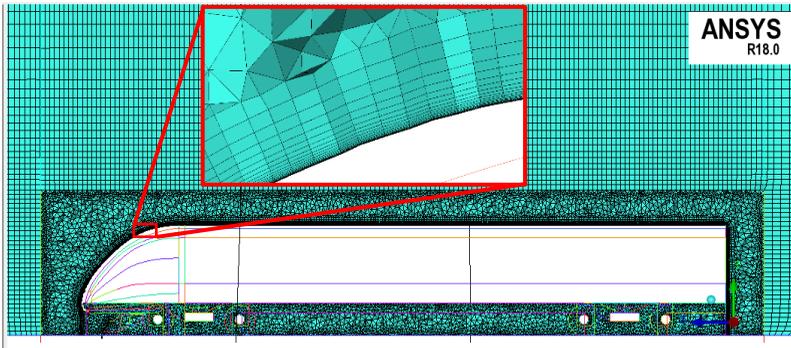
### 3.2.3 Pembuatan Mesh

Domain yang telah dibuat tersebut akan dibagi menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*). *Mesh* di sekitar bodi kereta hingga ke bagian balok kecil terdiri dari jenis *tetrahedral* dan *prism mesh*.

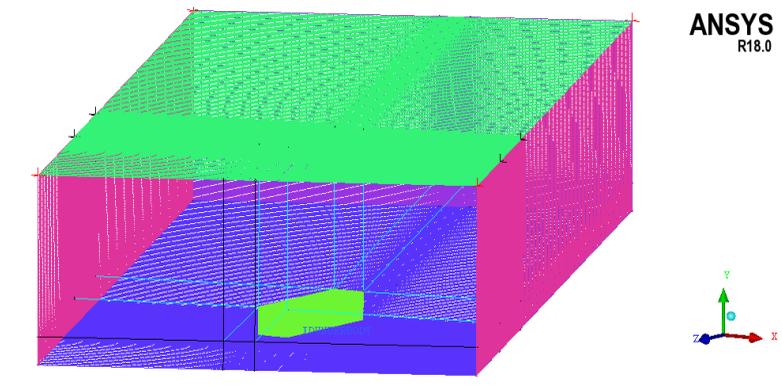
*Tetrahedral* dipergunakan di sekitar kereta karena terdapat komponen dengan bentuk yang rumit dan tidak memungkinkan penggunaan *hexahedral mesh*, seperti misalnya pada bagian *bogie* dan *cowcatcher*. Sementara itu, untuk mampu menangkap fenomena aliran dengan baik di bagian *boundary layer* permukaan kereta, digunakan *prism mesh* dengan jumlah 21 layer. *Prism mesh* tersebut mengembang di bagian atas kereta hingga bagian *fairing* dengan rasio 1, dan target  $y^+ 20$ . Penggunaan *tetrahedral* dan *prism mesh* akan meningkatkan jumlah *cell* pada volume yang sama jika dibandingkan dengan *hexahedral mesh*. Oleh karena itu, untuk mengurangi jumlah *cell* yang terdapat di dalam keseluruhan domain, digunakan *hexahedral mesh* di bagian luar balok yang melingkupi kereta. Pada penelitian ini digunakan *mesh* dengan minimum *orthogonal quality* 0,052 dan *skewness* maksimum sebesar 0,75. Kualitas tersebut telah memenuhi standar yang harus dipenuhi di ANSYS *Fluent*, yaitu maksimum *skewness* 0,94 dan minimum *orthogonal quality* sebesar 0,01. *Mesh* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 3.4.



a. *Mesh* di Permukaan Kereta



b. Potongan *Mesh* di *Midplane*



c. Pandangan Isometri *Mesh* Balok di Sekitar Kereta

**Gambar 3. 4** *Mesh* Kereta Semi Cepat Jakarta-Surabaya pada bagian (a)Permukaan Kereta (b) Potongan *Mesh* di *Midplane* X dan (c) Pandangan *Isometri Mesh* Balok di Sekitar Kereta.

Gambar 3.4.a menunjukkan *mesh* di permukaan kereta hingga bagian *underbody* yang seluruhnya dipenuhi oleh jenis *tri mesh* karena bentuk geometri yang kompleks. Dengan bentuk geometri yang kompleks tersebut, volume di sekitar kereta diisi dengan *tetrahedral mesh* dan *prism mesh* seperti yang tampak pada gambar 3.4.b. *Mesh tetrahedral* tersebut mengembang ke bagian

luar kereta hingga bagian balok berwarna hijau yang melingkupi kereta seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4.c.

### 3.2.4 Grid Independence Test

Pada tahap pembuatan *mesh*, dilakukan variasi jumlah *node hexahedral* dan ukuran elemen *tetrahedral*. Variasi tersebut dilakukan mulai dari ukuran yang kasar (*coarse*) pada *mesh* A, sedang (*medium*) pada *mesh* B, hingga halus (*fine*) pada *mesh* C seperti pada tabel 3.3.

**Tabel 3. 3** Variasi Jumlah *Cell Mesh*.

<i>Mesh</i>	Jumlah <i>Cell</i>	$Y^+$ Max	$C_D$	<i>Relative Error</i>
A	3,9 juta	18	0,330928	-
B	6,2 juta	18	0,3250	1,79%
C	7,6 juta	18	0,320737	1,31%

Tabel 3.3 menunjukkan sejumlah variasi *cell* pada domain. Pada setiap variasi ukuran *mesh* yang dibuat, besarnya koefisien *drag* ( $C_D$ ) dihitung dengan perhitungan menggunakan *software ANSYS Fluent*. Area referensi yang digunakan untuk menghitung  $C_D$  adalah proyeksi luas permukaan kereta ke arah sumbu X, yaitu sebesar 10.22m<sup>2</sup>. Panjang referensi yang digunakan untuk perhitungan  $C_D$  adalah tinggi kereta, yaitu sebesar 3,4m. Sementara itu, kecepatan referensi yang digunakan untuk perhitungan  $C_D$  adalah kecepatan resultan antara kecepatan angin dan kecepatan kereta seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Baker, 2019. Berdasarkan nilai *error* dari sejumlah  $C_D$  yang diperoleh, digunakan variasi *mesh* B dengan jumlah *cell* sebanyak 6,2 juta.

### 3.2.5 Parameter Pemodelan

#### 3.2.5.1 Models

*Models* merupakan tahap untuk menentukan pemodelan aliran (estimasi karakteristik aliran), penentuan model turbulen, penentuan besarnya konstanta, serta jenis *solver* yang digunakan.

Pada penelitian yang dilakukan ini, pemodelan yang digunakan adalah model turbulen *steady* RANS  $k - \omega$  SST dengan tambahan *curvature correction* di *solver* ANSYS *Fluent*. Pengaturan model turbulensi demikian dilakukan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Munoz-Paniagua, et. al. 2017. Pada penelitian tersebut, model turbulen *steady* RANS  $k - \omega$  SST diketahui mampu memberikan hasil yang cukup akurat dalam perhitungan *side force* dengan mempertimbangkan juga beban komputasi yang relatif lebih ringan untuk diselesaikan dengan kemampuan komputer yang terbatas. Penggunaan *curvature correction* pada model turbulen tersebut juga telah diketahui dapat mempercepat tercapainya konvergensi.

### **3.2.5.2 Materials**

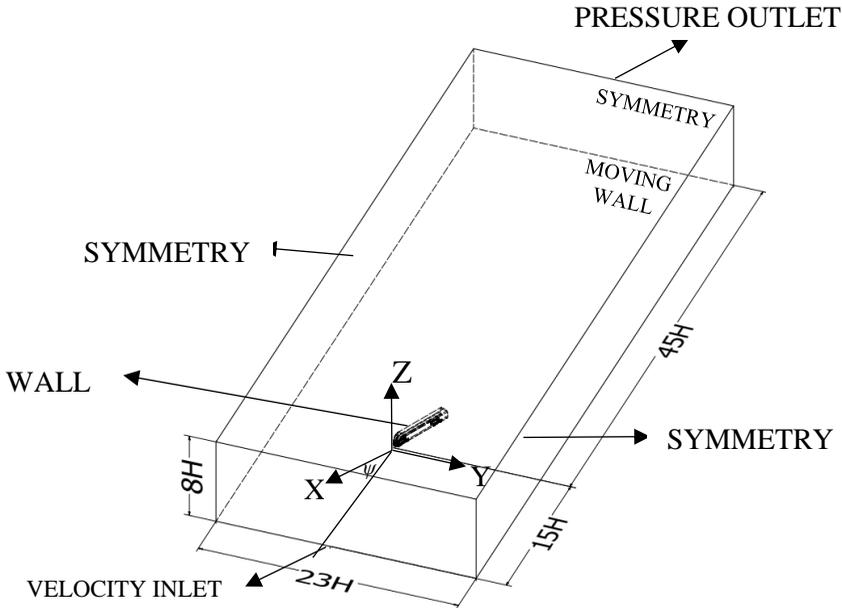
*Materials* merupakan pemilihan jenis material yang akan digunakan kemudian data sifatnya ditentukan. Pada penelitian yang dilakukan ini, digunakan fluida kerja udara dengan densitas sebesar  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , viskositas sebesar  $1.7894 \times 10^{-5}$ .

### **3.2.5.3 Operating Conditions**

*Operating conditions* merupakan kondisi operasi yang diperkirakan terjadi di model simulasi. Pada tahap ini, tekanan pada daerah operasi diatur sebesar 1 atm (101325 Pa).

### **3.2.5.4 Boundary Conditions**

*Boundary condition* merupakan kondisi batas pada aliran yang melewati benda uji. Pada penelitian yang dilakukan ini, ditetapkan kondisi batas yaitu *velocity inlet*, *pressure outlet*, *symmetry* dan *wall* seperti pada gambar 3.5.



**Gambar 3.5** *Boundary Condition*

Gambar 3.5 menunjukkan *boundary condition* pada penelitian ini. Pada gambar tersebut terlihat bahwa *boundary condition* untuk bodi kereta dan *bogie* adalah *wall*, bagian atas dan sisi samping domain adalah *symmetry*, bagian bawah adalah *moving wall*, bagian *inlet* adalah *velocity inlet*, sementara itu *boundary condition* untuk *outlet* ditetapkan sebagai *pressure outlet*.

Kecepatan fluida yang mengalir dari *velocity inlet* merupakan kecepatan resultan angin dan kecepatan kereta yang dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1.

$$V_{\infty}^2 = (v + u \cdot \cos(\beta))^2 + (u \cdot \sin(\beta))^2 \quad 2.1$$

Pada penelitian ini, kecepatan angin  $u$  diasumsikan datang dengan sudut  $\beta = 0^\circ$  atau ketika angin mengarah tegak lurus ke

bagian sisi samping kereta sehingga diperoleh 5 variasi kecepatan pada bagian *inlet* kereta seperti ditunjukkan oleh tabel 3.4.

*Yaw angle*  $\psi$  merupakan sudut yang dibentuk antara kecepatan resultan  $V_\infty$  dan kecepatan kereta  $v$ . Besarnya *yaw angle* yang akan digunakan untuk menggeser model geometri kereta di dalam domain ini diperoleh berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 2.2.

$$\tan(\psi) = \frac{u \cdot \sin(\beta)}{v + u \cdot \cos(\beta)} \quad 2.2$$

Besarnya kecepatan resultan ( $V_\infty$ ) dan *yaw angle* ( $\psi$ ) serta bilangan *Reynolds* aliran pada penelitian ini ditunjukkan seperti pada tabel 3.4 berikut ini.

**Tabel 3. 4** Variasi Kecepatan *Inlet* dan *Yaw Angle*.

NO	Kecepatan Kereta (m/s)	Kecepatan <i>Crosswind</i> (m/s)	Resultan Kecepatan (m/s)	<i>Yaw Angle</i> ( $\Psi$ ) (degree)	<i>ReH</i>
1	44,44	0	44,44	0	1,007x10 <sup>7</sup>
2		5	44,72	6,42	1,014x10 <sup>7</sup>
3		10	45,55	12,68	1,033x10 <sup>7</sup>
4		15	46,90	18,65	1,063x10 <sup>7</sup>
5		20	48,77	24,22	1,105x10 <sup>7</sup>

Tabel 3.4 menunjukkan variasi kecepatan *inlet* serta *yaw angle* ( $\Psi$ ) yang terbentuk dari resultan kecepatan angin dan kecepatan gerak kereta. Geometri 3 dimensi kereta yang terdapat di dalam domain tersebut kemudian akan digeser sesuai dengan variasi masing-masing sudut datang angin. Berdasarkan variasi kecepatan gerak kereta tersebut, diperoleh juga besarnya bilangan *Reynolds* aliran yang nilainya bervariasi mulai dari 1,007x10<sup>7</sup> hingga yang terbesar 1,105x10<sup>7</sup>. Panjang karakteristik yang digunakan pada penelitian mengacu pada penelitian-penelitian terdahulu, yaitu tinggi kereta H yang pada penelitian ini nilainya

adalah sebesar 3,4 m. Pada bagian *velocity inlet*, diatur juga nilai *turbulent intensity* sebesar 1% dan *length scale* sebesar 0,05 m. Variasi kecepatan *inlet* serta *yaw angle* yang terbentuk yang digunakan secara detail

Dengan demikian, nilai-nilai yang diatur pada *boundary conditions* dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3. 5** Nilai Parameter *Boundary Condition*

<i>Boundary Conditions</i>	Parameter
<i>Velocity Inlet</i>	Kecepatan: 44,44 m/s, 44,72 m/s, 45,55 m/s, 46,9 m/s, & 48,77 m/s <i>Turbulence Intensity</i> : 1% <i>Turbulence length scale</i> : 0,05 m
<i>Pressure Outlet</i>	<i>Pressure</i> : 0 Pa <i>Turbulence intensity</i> : 1% <i>Turbulence length scale</i> : 0,05 m
<i>Wall</i>	<i>Moving Wall</i> 44,44 m/s

*Turbulence intensity* yang digunakan pada penelitian ini tampak seperti pada tabel, yaitu sebesar 1% yang merujuk dari penelitian Niu, et. al. 2017. Sementara itu nilai *turbulence length scale* sebesar 0,05 m diperoleh berdasarkan perhitungan dari ANSYS *Fluent* manual yaitu *Turbulence Length Scale* =  $0,4 \times \text{boundary layer thickness}$ . *Boundary layer thickness* tersebut diukur di *midplane* bagian belakang kereta dan diperoleh nilai ketebalan *boundary layer* sebesar 0,125 m (12,5 cm).

### 3.2.5.5 Solution

*Solution* pada penelitian ini dilakukan dengan skema SIMPLE, dengan pengaturan *second order* untuk *pressure*, dan *second order upwind* untuk *momentum*, *turbulent kinetic energi*, dan *turbulent dissipation rate*.

### 3.2.5.6 Initialization

*Initialization* merupakan tahap penentuan nilai awal dari kondisi batas (*boundary conditions*) yang telah ditetapkan sebelumnya. Pada penelitian ini, digunakan *hybrid initialization*.

### 3.2.5.7 Monitor Residual

Pada studi numerik yang dilakukan, *monitor residual* perlu ditetapkan untuk mengatur kriteria konvergensi. Nilai *residual* yang semakin rendah menunjukkan *error* numerik yang juga rendah. Pada penelitian ini ditetapkan nilai konvergensi *residual* yaitu sebesar  $1 \times 10^{-3}$ . Nilai tersebut dipilih dengan mempertimbangkan bentuk geometri kereta yang cukup rumit sehingga pembuatan *mesh tetrahedral*, yang secara umum menghasilkan nilai yang lebih akurat, tidak memungkinkan untuk dilakukan.

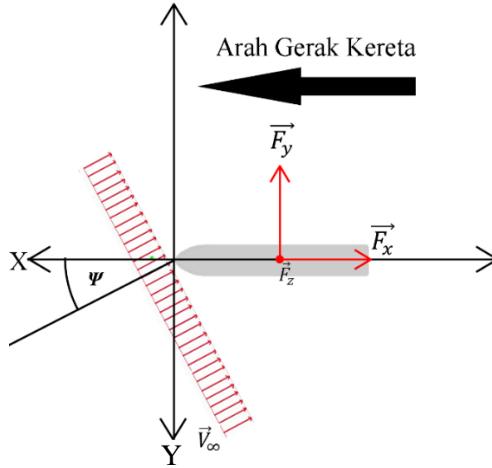
## 3.3 Tahap Processing

Pada tahap *processing*, parameter-parameter yang telah ditetapkan untuk domain simulasi akan diolah secara numerik dengan sejumlah iterasi. Proses perhitungan tersebut akan dilakukan hingga mencapai kriteria konvergensi yaitu  $1 \times 10^{-3}$ . Ketika kriteria konvergensi telah tercapai, perhitungan dianggap telah selesai dan siap untuk diolah pada tahap selanjutnya di *post processing*.

## 3.4 Tahap Post-Processing

Setelah perhitungan selesai dilakukan pada tahap *processing*, tahap selanjutnya adalah *post processing* yang dilakukan dengan menganalisis hasil yang diperoleh. Pada tahap ini, data yang didapatkan berupa kontur kecepatan, kontur tekanan, koefisien *drag*, koefisien *side force*, dan koefisien *rolling moment*. Berdasarkan gambar 3.3, geometri kereta digeser sesuai dengan *yaw angle* ( $\psi$ ) sehingga dari bagian *velocity inlet* akan mengalir

kecepatan resultan  $V_{\infty}$ . Adanya angin dengan kecepatan resultan tersebut kemudian akan menyebabkan bekerjanya gaya *drag*  $F_x$ , dan gaya lateral *side force*  $F_y$  yang arahnya ditunjukkan seperti pada ilustrasi gambar 3.6 berikut.



**Gambar 3. 6** Ilustrasi Arah *Drag Force* dan *Side Force* pada Kereta yang Terkena *Crosswind*.

Gambar 3.6 menunjukkan ilustrasi arah *drag force* dan *side force* pada kereta yang terkena *crosswind* dengan sudut  $\psi$ . Pada gambar tersebut terlihat bahwa ketika terjadi *crosswind*, kereta akan mengalami gaya *drag*  $F_x$  ke arah sumbu X negatif, dan gaya lateral (*side force*)  $F_y$  ke arah sumbu Y negatif.

### 3.4.1 Perhitungan Koefisien *Drag*

Koefisien *drag* merupakan koefisien gaya hambat kereta yang arahnya berlawanan dengan arah gerak kereta. Berdasarkan sistem koordinat domain yang ditunjukkan seperti pada gambar 3.3, gaya *drag* akan bekerja ke arah sumbu X negatif kereta. Pada penelitian ini, akan dihitung koefisien gaya *drag* dengan persamaan berikut.

$$C_{F_x} = \frac{F_x}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad 2.3$$

Pada persamaan tersebut,  $CF_x$  merupakan koefisien *drag*,  $F_x$  merupakan gaya *drag* dalam satuan Newton yang diperoleh dari simulasi,  $\rho$  adalah massa jenis udara yaitu sebesar  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $A$  adalah proyeksi luas permukaan frontal kereta ke arah sumbu X positif, yaitu sebesar  $10.22 \text{ m}^2$ , dan  $V$  adalah resultan kecepatan kereta dan kecepatan angin dalam satuan m/s.

### 3.4.2 Perhitungan Koefisien Side Force

Koefisien *side force* merupakan koefisien gaya samping yang dialami oleh kereta ketika terkena hembusan angin dari arah samping kereta. Berdasarkan konfigurasi geometri kereta dan sistem koordinat domain yang ditunjukkan seperti pada gambar 3.3, gaya lateral *side force* akan bekerja ke arah sumbu Y negatif kereta. Pada penelitian ini, akan dihitung koefisien *side force* dengan persamaan berikut.

$$C_{F_y} = \frac{F_y}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad 2.4$$

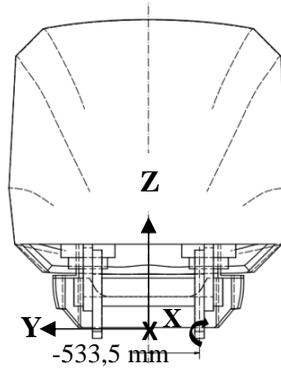
Pada persamaan tersebut,  $CF_y$  merupakan koefisien *drag*,  $F_y$  merupakan gaya lateral *side force* dalam satuan Newton yang diperoleh dari simulasi,  $\rho$  adalah massa jenis udara yaitu sebesar  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $A$  adalah proyeksi luas permukaan kereta bagian samping ke arah sumbu Y positif yaitu sebesar  $67,57 \text{ m}^2$ , dan  $V$  adalah resultan kecepatan kereta dan kecepatan angin dalam satuan m/s.

### 3.4.3 Perhitungan Koefisien Lee Rail Rolling Moment

*Lee rail rolling moment* merupakan momen yang bekerja memutar kereta di bagian roda yang terjauh dari arah datangnya angin (*leeward side*). Besarnya koefisien *lee rail rolling moment* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$C_{M_{XL}} = \frac{M_{XL}}{0.5\rho AhV_\infty^2} \quad 2.9$$

Pada persamaan tersebut,  $CM_{XL}$  merupakan koefisien *lee rail rolling moment*,  $M_{XL}$  merupakan *lee rail rolling moment* dengan sumbu putar di bagian roda kereta yang terjauh dari arah datangnya angin dan dinyatakan dalam satuan Nm yang diperoleh dari simulasi,  $\rho$  adalah massa jenis udara yaitu sebesar  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $A$  adalah proyeksi luas permukaan kereta bagian samping ke arah sumbu Y positif, yaitu sebesar  $67,57 \text{ m}^2$ ,  $h$  adalah tinggi kereta yaitu sebesar  $3.4 \text{ m}$ , dan  $V$  adalah resultan kecepatan kereta dan kecepatan angin dalam satuan m/s.



**Gambar 3. 7** Lokasi Sumbu *Lee Rail Rolling Moment* dari Tampak Belakang Kereta

Gambar 3.7 menunjukkan lokasi sumbu *Lee Rail Rolling Moment*. Pada Gambar tersebut tampak bahwa sumbu putar terdapat di koordinat  $(Y,Z) = (-533,5; 0) \text{ mm}$

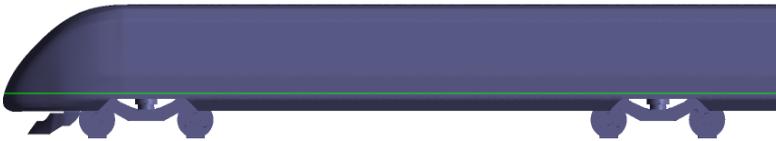
#### 3.4.4 Perhitungan Koefisien Tekanan

Pada penelitian ini, akan ditampilkan juga koefisien tekanan yang ada di permukaan kereta. Besarnya koefisien tekanan tersebut diperoleh berdasarkan persamaan 3.1 berikut ini.

$$C_p = \frac{(P - P_{ref})}{0,5 \rho V_{\infty}^2} \quad 3.1$$

Pada persamaan tersebut,  $C_p$  merupakan koefisien tekanan.  $P$  adalah tekanan statis di bagian permukaan kereta,  $P_{ref}$  adalah tekanan referensi,  $V_\infty^2$  adalah kecepatan resultan, dan  $\rho$  adalah massa jenis udara.

Koefisien tekanan di sepanjang permukaan bagian samping kereta akan diplot pada penelitian ini. Lokasi plot koefisien tekanan permukaan tersebut tampak seperti pada gambar 3.8 di bawah ini.



**Gambar 3.8** Lokasi Garis Pengambilan Koefisien Tekanan berdasarkan penelitian Niu 2018

Gambar 3.8 menunjukkan lokasi garis pengambilan koefisien tekanan. Garis tersebut terletak pada ketinggian  $Z/H=0,3$  sehingga melewati bagian permukaan depan kereta tempat terdapatnya titik stagnasi.

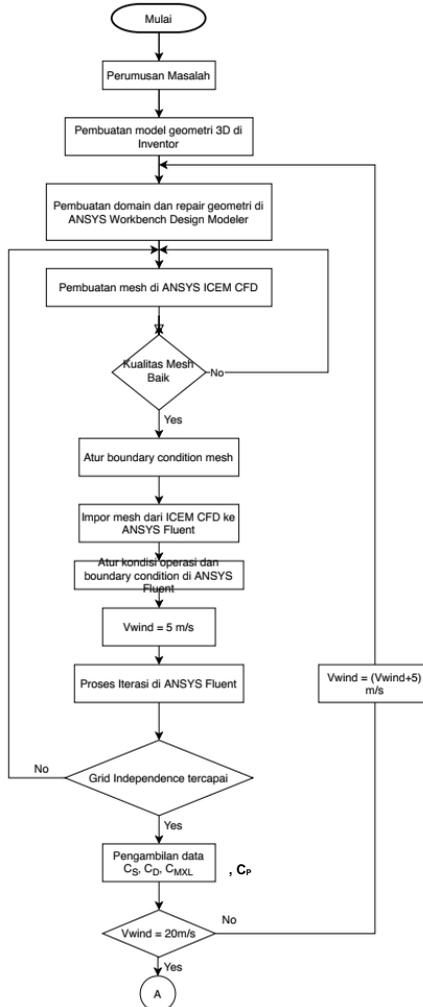
### 3.4.5 Struktur *Vortex* di Sekitar Kereta

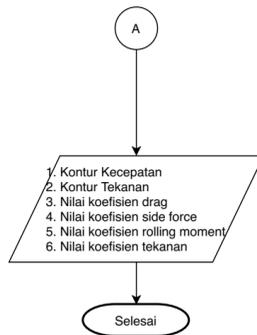
Pada penelitian ini akan ditampilkan struktur *vortex* yang terbentuk di daerah wake di sekitar kereta dengan menggunakan *Q-criterion*. Struktur *vortex* akan ditampilkan dengan menggunakan *isosurface Q-criterion* yang merupakan *second invariant of velocity gradient tensor* dengan nilai  $Q=0,001$  seperti yang telah dilakukan oleh Munoz-Paniagua, 2017 dengan perumusan seperti pada 2.10, dimana  $\Omega$  merupakan *rate-of-rotation tensor* dan  $S$  merupakan *rate-of-strain tensor* dengan *isosurface* yang diwarnai berdasarkan *colormap* koefisien tekanan.

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad 2.10$$

### 3.5 Diagram Alir

Gambar 3.9 berikut ini menunjukkan diagram alir penelitian ini. Diagram alir merupakan langkah-langkah yang dilakukan untuk mengerjakan studi numerik ini.





**Gambar 3.9** Diagram Alir Penelitian

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

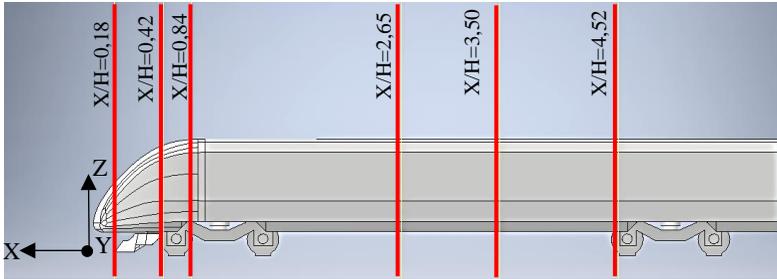
## BAB IV ANALISA DATA

Performa aerodinamika kereta yang terkena *crosswind* akan dijelaskan pada bab ini. Dengan menggunakan konfigurasi *mesh* yang telah ditetapkan sebelumnya, diperoleh hasil kualitatif berupa kontur kecepatan, kontur tekanan, dan struktur aliran di sekitar kereta. Selain itu, diperoleh juga hasil kuantitatif berupa koefisien *drag force*, koefisien tekanan, koefisien *side force*, dan koefisien *lee rail rolling moment* yang hasilnya akan ditampilkan di bab ini.

### 4.1 Karakteristik Medan Aliran

#### 4.1.1 Kontur Kecepatan

Pada penelitian ini, diatur kecepatan kereta ( $v$ ) sebesar 44,44 m/s dengan variasi 4 kecepatan angin ( $u$ ), yaitu mulai 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, dan 20 m/s. Dengan kecepatan relatif kereta terhadap *ground* dan kecepatan angin *crosswind*, akan terbentuk resultan kecepatan yang akan digunakan sebagai kecepatan pada bagian *inlet* domain. Pada sub bab ini akan dibahas kontur kecepatan *dimensionless* (*dimensionless velocity*) yang menunjukkan besarnya kecepatan dalam bilangan tidak berdimensi. Bilangan tersebut dapat diperoleh dengan membandingkan nilai kecepatan di satu titik dengan nilai kecepatan referensi yaitu kecepatan *inlet* yang merupakan resultan antara kereta dan kecepatan angin. Penggunaan *dimensionless velocity* tersebut dilakukan dengan tujuan untuk melihat perbedaan pada kontur kecepatan di sekitar kereta yang terjadi akibat variasi kecepatan angin dari samping. Pada penelitian ini, akan diamati kontur kecepatan kereta pada bagian *midplane*, *plane* dengan posisi  $X/H=0,18$  hingga  $X/H=4,52$  seperti yang tampak pada gambar 4.1; serta *plane* horizontal dengan ketinggian  $Z/H=0,3$  dan  $Z/H=0,8$ .



**Gambar 4. 1** Lokasi *Plane*  $X/H=0,18-4,2$  untuk Pengambilan Kontur

Kontur kecepatan di sekitar kereta pada *plane*  $X/H=0,18$ ;  $0,07$ ;  $0,14$ ;  $0,44$ ;  $0,58$ ; dan  $0,75$  yang masing-masing dilengkapi dengan *streamline* aliran ditunjukkan seperti pada gambar 4.2. Pada gambar tersebut, kontur yang ditampilkan terdapat pada *plane* yang dilihat dari tampak depan kereta, sehingga aliran terlihat datang menuju kereta dari arah sebelah kanan. *Streamline* aliran pada masing-masing *plane* diatur dengan komponen  $u$  adalah  $y$  *velocity component* dan komponen  $v$  adalah  $z$  *velocity component*. *Plane*  $X/H=0,18$ , yang memotong di bagian dekat *nose* kereta, menunjukkan bahwa ketika kereta terkena *crosswind*, area *underbody* kereta akan memiliki kecepatan yang sangat rendah. Kecepatan yang rendah tersebut diakibatkan karena aliran fluida yang menabrak bodi bagian luar kereta sebelum akhirnya mengalir menuju ke bagian *underbody* kereta. Hal tersebut dapat dikonfirmasi dari *streamline* yang menunjukkan aliran di bagian *underbody* kereta yang sebelumnya telah melewati sekeliling bodi kereta.

Leeward Windward  
 $V_\infty$



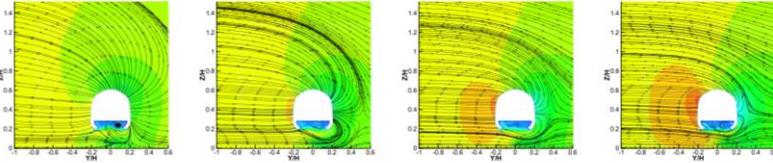
$u=5$  m/s

$u=10$  m/s

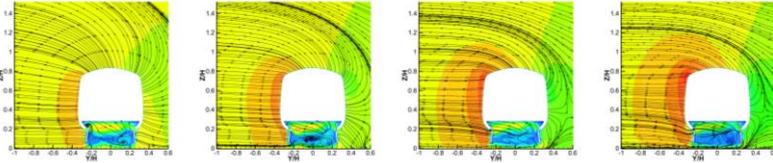
$u=15$  m/s

$u=20$  m/s

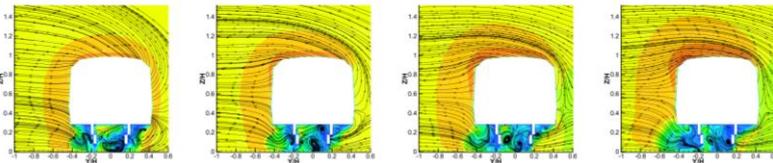
$x/H=0,18$



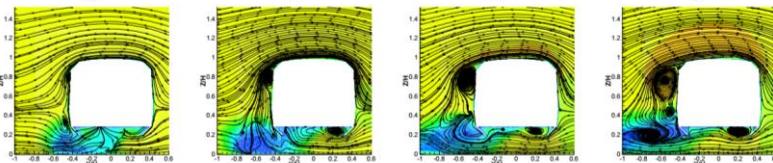
$x/H=0,42$



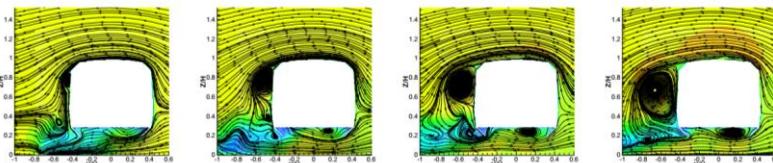
$x/H=2,65$



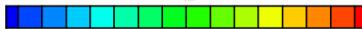
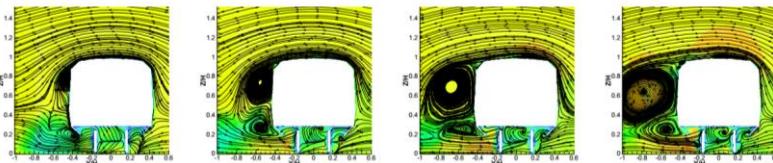
$x/H=0,84$



$x/H=3,50$



$x/H=4,52$



normalized-velocity-magnitude: 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4

**Gambar 4. 2** Kontur Kecepatan Aliran *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ )  
pada Plane  $X/H=0,18-0,4,52$

Berdasarkan kontur kecepatan pada *plane*  $X/H=0,18$  pada bagian *windward nose* kereta (*upstream* dari aliran *crosswind*) tampak terjadi penurunan kecepatan aliran fluida. Kecepatan aliran fluida yang paling rendah di bagian *plane*  $X/H=0,18$  diketahui terdapat pada variasi kecepatan *crosswind* 20 m/s. Penurunan kecepatan partikel fluida hingga nilai yang rendah untuk variasi kecepatan 20 m/s tersebut dapat terjadi karena adanya partikel yang telah menumbuk bagian *nose* kereta di bagian *stagnation point*, sehingga dapat diketahui bahwa adanya efek *crosswind* dengan kecepatan angin yang lebih tinggi akan menggeser titik stagnasi di kereta dari yang semula berada di bagian ujung *nose* (*nose tip*) menjadi semakin ke bagian belakang akibat adanya *yaw angle* yang terbentuk dari kecepatan kereta dan kecepatan angin. Sebaliknya, kecepatan aliran pada bagian *leeward* mengalami peningkatan yang ditunjukkan dengan kontur berwarna kuning hingga merah. Kecepatan tertinggi pada bagian *leeward* terdapat pada variasi kecepatan 20 m/s.

Pada posisi  $X/H=0,42$  tampak bahwa aliran fluida di bagian *underbody* kereta juga memiliki kecepatan paling rendah. Seperti halnya yang terjadi pada posisi  $X/H=0,18$ , kecepatan yang rendah ini dapat terjadi akibat aliran fluida yang telah terlebih dahulu menabrak bagian bodi dan *bogie* kereta. Pada bagian *windward*, luas kontur berwarna hijau terlihat semakin sempit dibandingkan dengan yang terdapat di posisi  $X/H=0,18$ . Hal tersebut merupakan indikasi adanya peningkatan kecepatan di bagian *windward* dibandingkan dengan yang terdapat di posisi  $X/H=0,18$ . Hal yang serupa juga terjadi pada bagian *leeward* kereta. Berdasarkan gambar 4.2, terlihat bahwa kontur berwarna kuning hingga merah di bagian *leeward plane*  $X/H=0,42$  mengalami perluasan yang juga berarti terjadi peningkatan kecepatan di bagian tersebut dengan nilai yang tertinggi berada pada variasi kecepatan angin 20 m/s.

Pada posisi  $X/H=0,84$  tampak area dengan kecepatan rendah di bagian *underbody* kereta mulai mengalami pergeseran ke arah bagian *leeward* kereta. Hal tersebut dapat terjadi akibat adanya *yaw angle* angin yang bergerak menuju kereta dengan sudut tertentu. Sementara itu, aliran dengan kecepatan yang tinggi pada bagian *leeward* tampak mulai meluas hingga ke bagian atas kereta dengan nilai tertinggi dari 4 variasi tersebut terjadi pada variasi kecepatan *crosswind* 20 m/s yang ditunjukkan dengan kontur yang mulai berwarna kemerahan.

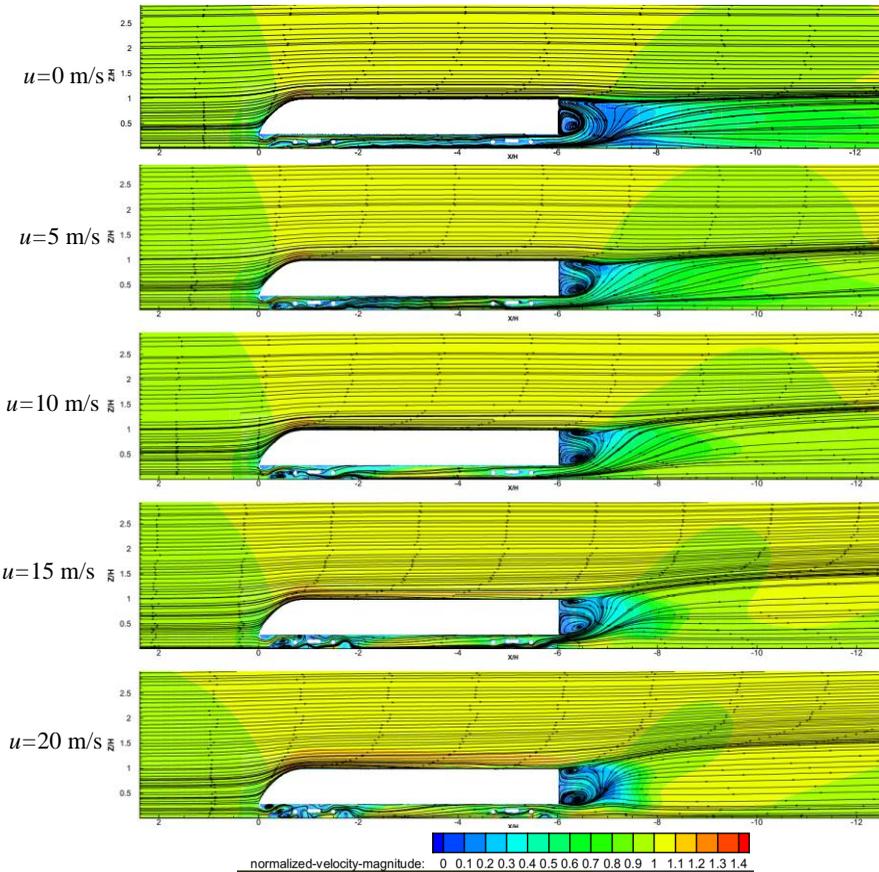
Selanjutnya, pada posisi *plane*  $X/H=2,65$  tampak bahwa area dengan kecepatan sangat rendah telah bergeser sepenuhnya ke bagian *leeward* kereta. Pada area dengan kecepatan rendah tersebut, tampak mulai timbul pusaran aliran (*vortex*) akibat adanya daerah *wake* di bagian *leeward* atas kereta. Pada *plane*  $X/H=2,65$  terlihat bahwa *vortex* serupa juga tampak mulai terbentuk pada bagian *underbody* kereta dengan pusaran yang semakin besar seiring dengan peningkatan kecepatan angin *crosswind*.

Pada posisi *plane*  $X/H=3,50$  tampak bahwa pusaran *vortex* yang sebelumnya terbentuk di bagian *leeward* dan *underbody* kereta mengalami peningkatan intensitas sehingga diameternya terlihat lebih besar sampai ke *plane*  $X/H=4,52$ . Pada posisi *plane* paling belakang ini tampak bahwa *vortex* yang sebelumnya terbentuk di bagian *underbody* kereta telah bergeser ke bagian *leeward* kereta.

Aliran di sekitar kereta ketika terjadi *crosswind* juga dapat divisualisasikan dengan menggunakan *midplane* seperti pada gambar 4.3. *Midplane* yang terletak di posisi  $y/H=0$  tersebut dapat menunjukkan daerah *wake* di bagian belakang kereta yang terbentuk serta kontur kecepatan di bagian depan, atas, dan bawah kereta.

Pada gambar 4.3 terlihat kontur kecepatan kereta pada bagian *midplane* dengan variasi kecepatan angin mulai dari 0 m/s

hingga 20 m/s berikut dengan *streamline* aliran. Komponen yang digunakan dalam pengaturan *streamline* adalah *x velocity component* sebagai komponen *u* dan *z velocity component* sebagai komponen *v*.



**Gambar 4.3** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) Kereta pada Bagian *Midplane*

Pada setiap variasi kecepatan angin, terlihat bahwa daerah di bagian depan *nose* kereta mengalami penurunan kecepatan. Hal ini dapat terlihat dari warna hijau yang pekat pada posisi yang semakin mendekati *nose* kereta. Penurunan kecepatan tersebut dapat terjadi akibat adanya titik stagnasi di bagian *nose* kereta dimana partikel fluida menabrak dinding terdepan dari kereta sehingga kecepatan partikelnya mengalami perlambatan.

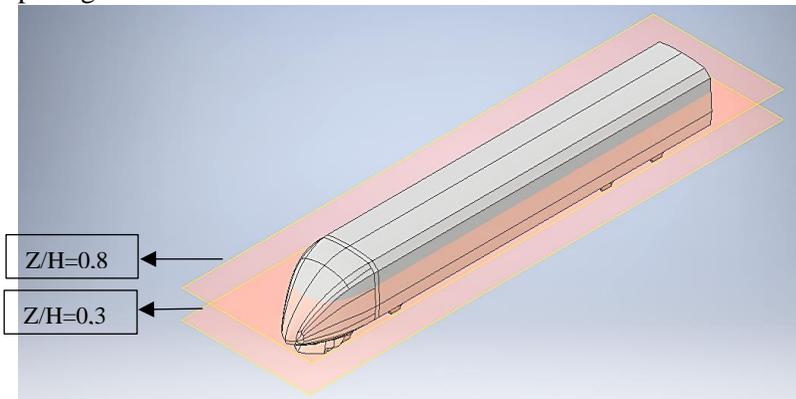
Setelah melalui bagian *nose* kereta, terlihat bahwa kecepatan di bagian atap kereta mengalami peningkatan. Berdasarkan gambar 4.3, terlihat bahwa peningkatan kecepatan tertinggi terjadi pada variasi kecepatan angin 20 m/s yang ditandai dengan area kontur berwarna oranye yang lebih pekat dan lebih luas dibandingkan dengan variasi kecepatan angin lainnya.

Aliran fluida yang mengalir ke arah kereta akan terpecah ke 2 arah, yaitu ke arah atap (*roof*) dari kereta dan ke arah bawah (*underbody*) kereta sebelum kembali bertemu di bagian belakang kereta. Berbeda dengan aliran yang mengalir menuju ke atap kereta, aliran yang mengalir menuju ke bagian bawah kereta akan cenderung mengalami penurunan kecepatan terlihat dari kontur yang berwarna biru muda hingga biru tua terutama di bagian belakang komponen *cowcatcher* dan *bogie* yang merupakan daerah *wake*. Selain terdapat area dengan kecepatan yang rendah, pada bagian *underbody* juga timbul olakan aliran dengan intensitas yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan variasi kecepatan angin. Pada variasi kecepatan angin 20 m/s terlihat jelas pada *streamline* terdapat olakan aliran dengan bentuk pusaran di bagian belakang *cowcatcher*.

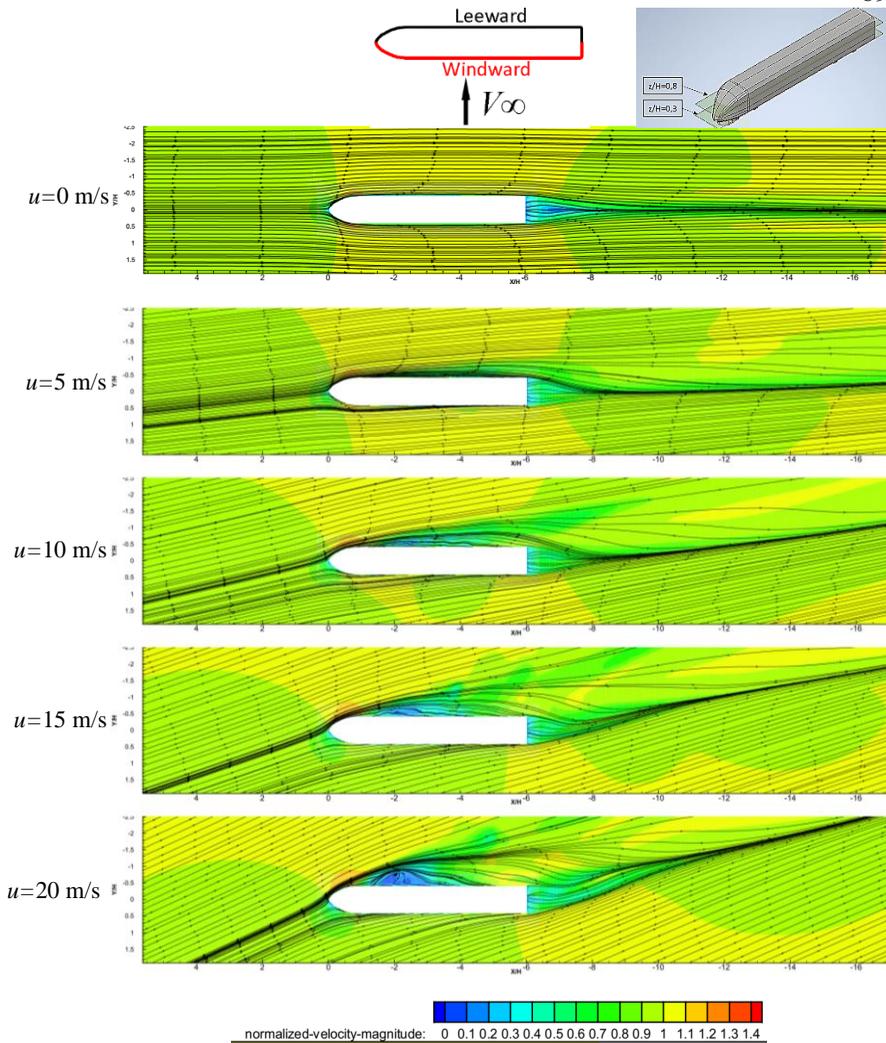
Setelah mengalir melalui sepanjang bodi kereta, aliran fluida dari bagian atap dan bagian *underbody* kereta kembali bertemu di bagian belakang kereta. Pada bagian belakang tersebut, diketahui terdapat daerah *wake*, yaitu daerah dengan resirkulasi aliran yang timbul akibat separasi aliran. Pada gambar 4.3, area berkecepatan yang rendah di bagian belakang kereta ditandai dengan kontur

berwarna biru. Berdasarkan gambar 4.3 tersebut, juga terlihat bahwa area berwarna biru di bagian belakang kereta semakin sempit seiring dengan peningkatan kecepatan angin. Adanya *crosswind* pada kereta juga diketahui menimbulkan *vortex* kedua di bagian belakang kereta yang ditunjukkan dengan adanya dua pusaran *vortex* di bagian belakang kereta tidak seperti yang tampak pada kondisi tanpa *crosswind* (kecepatan angin  $u=0$  m/s).

Untuk memperjelas visualisasi aliran di sekitar kereta, plot kontur kecepatan *dimensionless* juga dibuat pada *plane* horizontal dengan posisi  $z/H=0,3$  dan  $z/H=0,8$  yang lokasinya tampak seperti pada gambar 4.4.



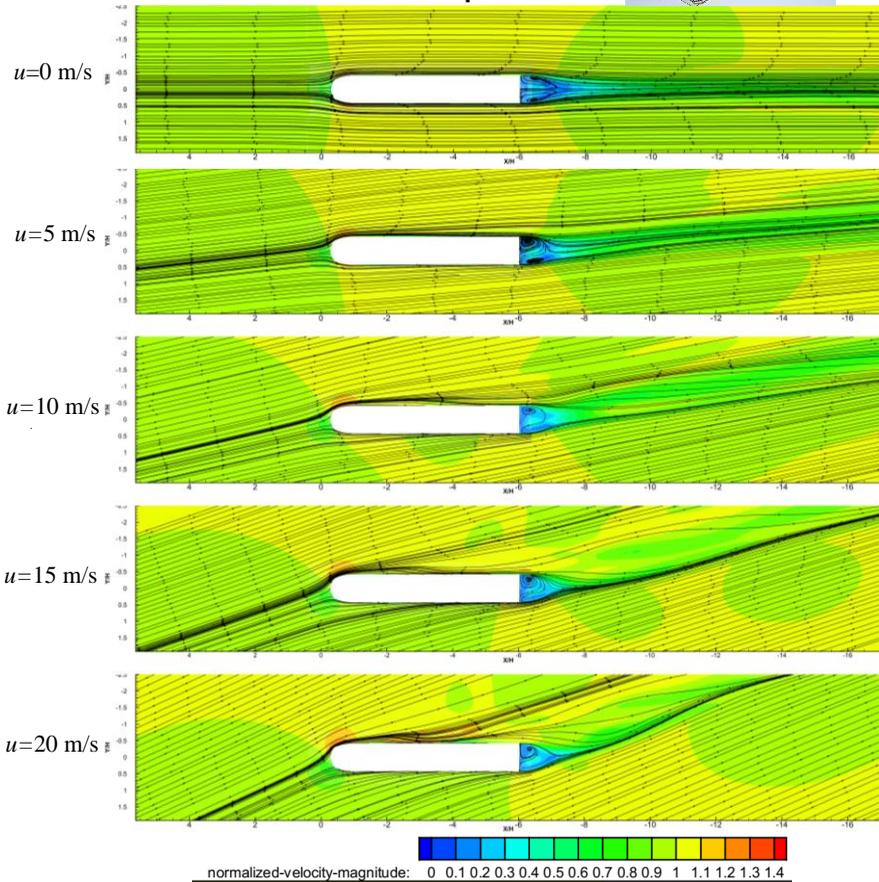
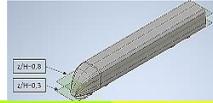
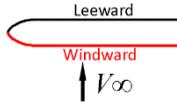
**Gambar 4. 4** Lokasi Plane Horizontal  $Z/H=0,3$  dan  $0,8$



**Gambar 4. 5** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) di *Plane*  $z/H=0,3$ .

Gambar 4.5 menunjukkan kontur *dimensionless velocity* pada *plane* horizontal dengan ketinggian  $z/H=0,3$ . Pada gambar tersebut terlihat bahwa seiring dengan bertambahnya kecepatan

angin, *yaw angle* angin akan bertambah sehingga arah aliran yang menuju ke kereta dan meninggalkan kereta akan semakin miring. Kemiringan arah aliran tersebut kemudian mengakibatkan timbulnya area dengan kecepatan rendah di bagian *leeward* kereta. Hal tersebut terlihat dari timbulnya area dengan kontur berwarna biru yang semakin luas seiring dengan bertambahnya kecepatan angin.



**Gambar 4. 6** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_{\infty}$ ) Plane  $z/H=0,8$

Gambar 4.6 menunjukkan kontur *dimensionless velocity* pada *plane*  $z/H=0,8$ . Pada *plane* dengan ketinggian  $0,8H$  dari *ground* tersebut visualisasi daerah *wake* di bagian belakang kereta dapat terlihat dengan lebih jelas. Pada variasi kecepatan angin di atas 10 m/s terlihat area dengan kontur berwarna biru di belakang kereta semakin sempit.

#### 4.1.2 Kontur Koefisien Tekanan

Kecepatan relatif kereta terhadap *ground* dan kecepatan angin akan menghasilkan suatu resultan kecepatan aliran fluida. Berdasarkan hasil yang diperoleh sebelumnya, diketahui bahwa di bagian *leeward* kereta (*downstream aliran*) dan bagian belakang kereta yang terkena *crosswind* akan terbentuk daerah *wake* dan *vortex*. Daerah *wake* merupakan bagian dari medan aliran dengan tekanan rendah yang terbentuk akibat adanya separasi aliran. Pada sub bab ini akan dibahas mengenai kontur koefisien tekanan yang terbentuk di sekitar kereta yang disebabkan oleh variasi kecepatan angin.

Koefisien tekanan merupakan bilangan tak berdimensi dihitung berdasarkan perbandingan dari selisih tekanan statis dan tekanan referensi dengan tekanan dinamis seperti pada persamaan 3.1

$$C_p = \frac{(P - P_{ref})}{0,5 \rho V_{\infty}^2} \quad 3.1$$

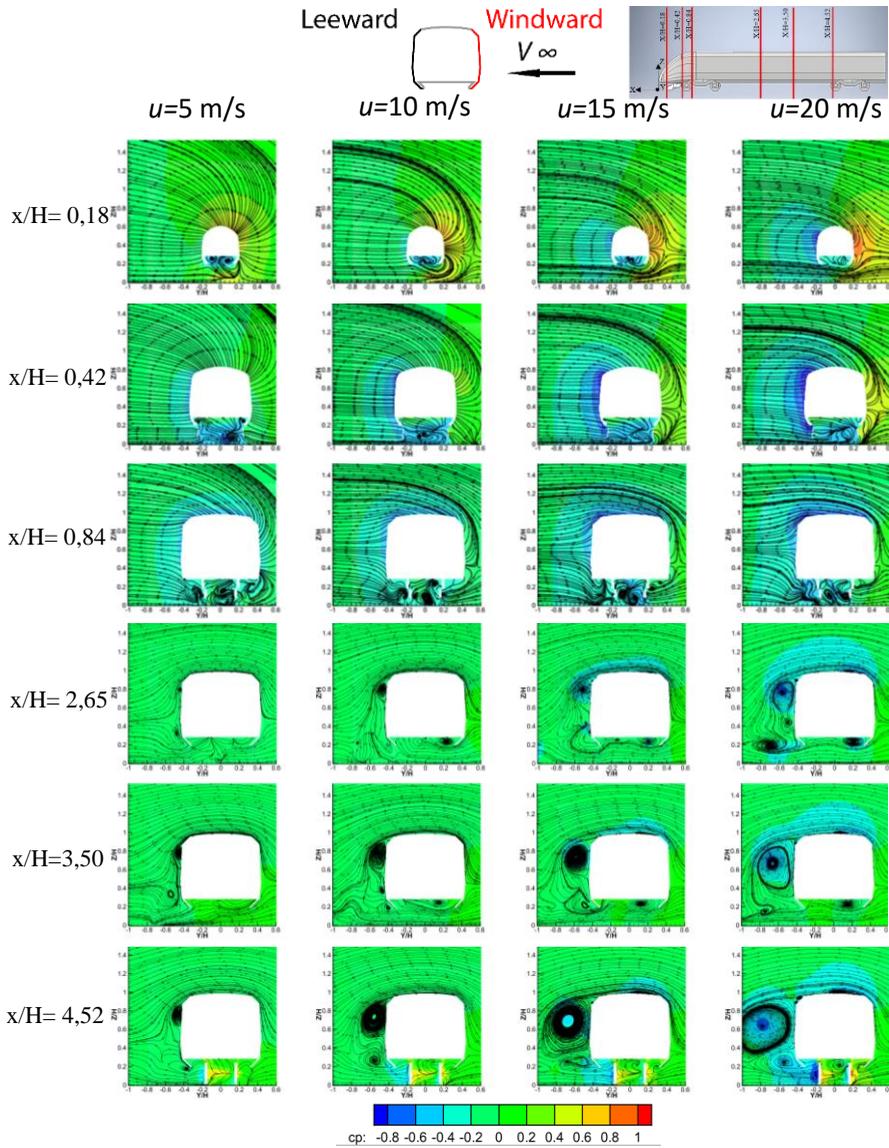
Besarnya koefisien tekanan mampu menunjukkan terjadinya kenaikan atau penurunan tekanan di sekitar kereta. Pada kasus kereta yang melaju di tengah *crosswind*, perbedaan tekanan di bagian *windward* kereta (*upstream*) dan *leeward* kereta (*downstream*) yang cukup tinggi akan meningkatkan *side force* dan *lee rail rolling moment* yang berdampak pada keamanan kereta terhadap kecelakaan terguling keluar dari lintasan.

Gambar 4.7 menunjukkan kontur koefisien tekanan di sekitar kereta pada *plane*  $X/H=0,18$ ;  $X/H=0,42$ ;  $X/H=0,84$ ;  $X/H=2,65$ ;  $X/H=3,50$ ;  $X/H=4,52$ . Pada gambar tersebut, kontur yang ditampilkan pada *plane* dilihat dari tampak depan kereta. *Streamline* aliran pada masing-masing *plane* diatur dengan komponen  $u$  adalah  $y$  *velocity component* dan komponen  $v$  adalah  $z$  *velocity component* Pada *plane*  $X/H=0,18$  tampak kontur koefisien tekanan di bagian dekat ujung *nose* (*nose tip*) kereta. Tekanan yang relatif lebih tinggi terlihat pada bagian *windward*

*nose* kereta, dengan nilai yang tertinggi terdapat pada variasi kecepatan *crosswind* 20 m/s. Hal ini kembali menegaskan terjadinya pergeseran titik stagnasi tekanan kereta dari yang semula berada di bagian ujung *nose* (*nose tip*) menjauh semakin ke belakang.

Pada *plane*  $X/H=0,18$  terlihat adanya perbedaan nilai koefisien tekanan di bagian *windward* dan *leeward* kereta. Perbedaan tersebut dapat dilihat dari kontur berwarna hijau hingga kuning di bagian *windward* kereta dan kontur berwarna biru di bagian *leeward* kereta. Perbedaan yang cukup signifikan terlihat pada variasi kecepatan angin 20 m/s yang ditandai dengan adanya kontur berwarna kuning hingga oranye di bagian *windward* dan area dengan kontur berwarna biru di bagian *leeward* kereta.

Selanjutnya pada *plane*  $X/H=0,42$  terlihat kontur berwarna biru dengan nilai koefisien tekanan yang lebih rendah semakin luas di bagian *leeward* kereta seiring dengan peningkatan variasi kecepatan angin. Sementara itu, di bagian *windward* kereta koefisien tekanan tampak mengalami penurunan tidak terdapatnya lagi area dengan kontur berwarna kuning dan oranye. Pada *plane*  $X/H=0,42$  ini juga terlihat bahwa selain di bagian *leeward*, area *underbody* kereta juga memiliki nilai koefisien tekanan yang cukup rendah dengan kontur berwarna biru.



**Gambar 4. 7** Kontur Koefisien Tekanan di Sekitar Kereta pada  $Plane X/H=0,18-4,52$

Pada *plane*  $X/H=0,84$ , di bagian atap kereta tampak area dengan koefisien tekanan yang rendah mulai bergeser dari bagian *leeward* menuju ke bagian atap. Area dengan koefisien tekanan yang rendah tersebut terlihat semakin meluas seiring dengan bertambah besarnya kecepatan angin. Sementara itu, pada bagian *underbody* kereta mulai timbul olakan aliran dengan intensitas yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin.

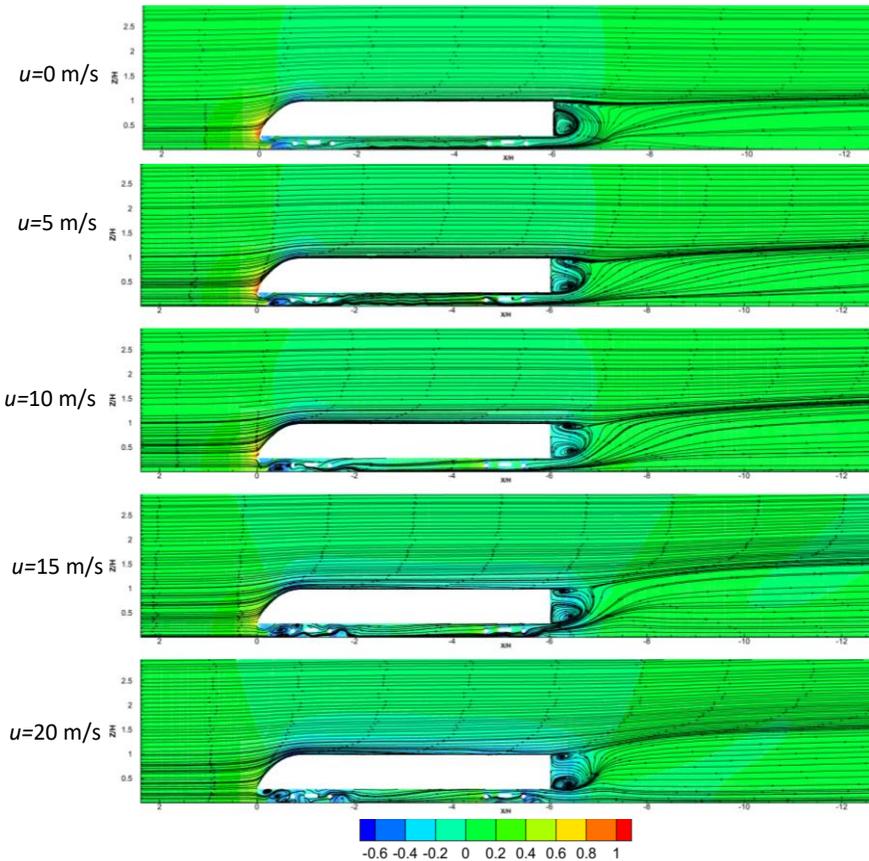
Koefisien tekanan di sekitar kereta pada posisi selanjutnya, yaitu  $X/H=2,65$  terlihat didominasi oleh koefisien tekanan yang rendah dengan kontur berwarna hijau. Pada variasi kecepatan  $u=15$  m/s dan 20 m/s tampak bahwa bagian atap kereta memiliki kontur tekanan yang lebih rendah lagi dengan ditunjukkan kontur berwarna biru.

Pada *plane*  $X/H=2,65$  terlihat terbentuknya *vortex* pada bagian *underbody* kereta dan *leeward* kereta. Di bagian *leeward*, terdapat dua *vortex* yang terbentuk, yaitu di bagian dekat atap kereta dan di bagian dekat *underbody* kereta. Pusaran *vortex* tersebut terlihat semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin hingga pada *plane*  $X/H=3,50$ .

Selanjutnya pada *plane*  $X/H=4,52$ , terlihat terdapat dua *vortex* yang sebelumnya telah terbentuk di *plane*  $X/H=2,65$ . Pada *plane* tersebut juga tampak kontur koefisien tekanan di sekitar *bogie* kereta mengalami peningkatan di bagian *upstream* yang ditunjukkan dengan area berwarna kuning. Sementara itu, di bagian *downstream bogie* terdapat area dengan tekanan rendah yang terlihat berwarna biru.

Seperti halnya pada kontur kecepatan, tekanan di bagian depan, atas, bawah, dan belakang kereta juga dapat divisualisasikan dengan menggunakan *plane* yang terletak di posisi  $y/H=0$ . Pada gambar 4.8 terlihat kontur tekanan di sekitar kereta dengan menggunakan *midplane*.

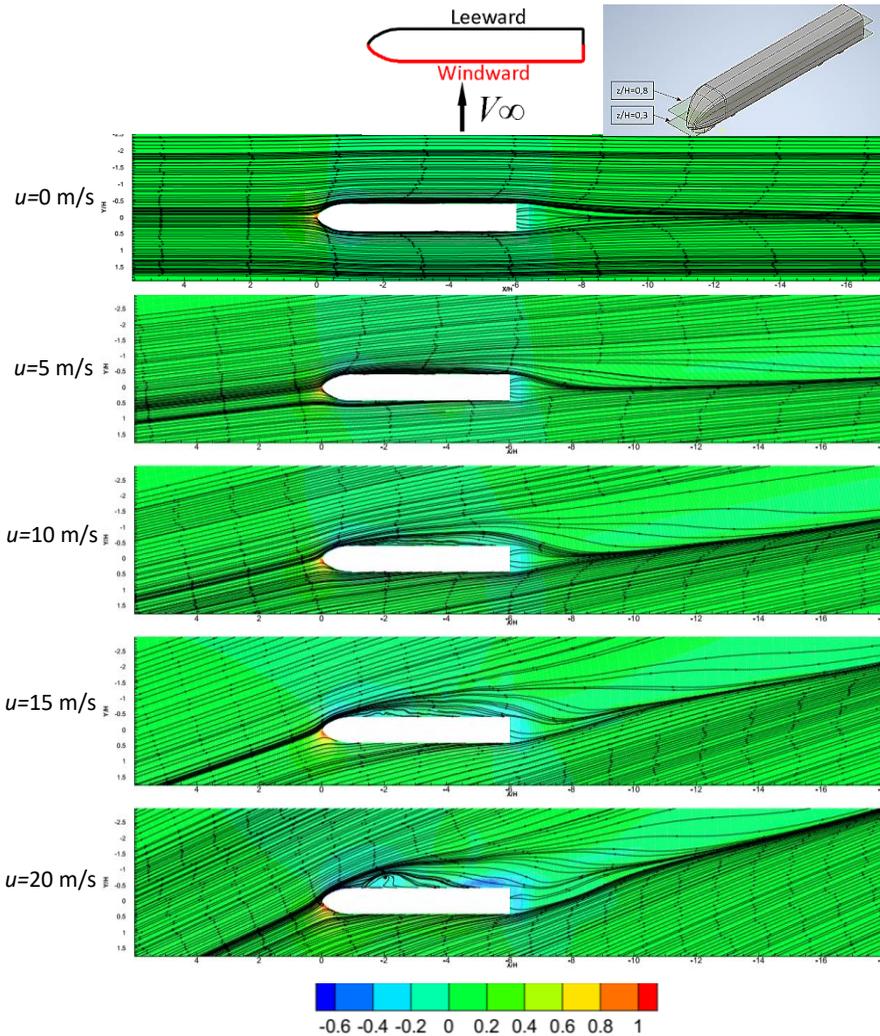
Gambar 4.8 menunjukkan kontur koefisien tekanan pada *midplane* kereta. Pada gambar tersebut terlihat bahwa area di bagian depan kereta memiliki koefisien tekanan yang lebih tinggi daripada bagian belakang kereta. Di bagian depan kereta, area dengan koefisien tekanan yang tertinggi terletak di bagian ujung *nose* kereta (*nose tip*). Hal tersebut terlihat dari area dengan kontur berwarna kuning hingga merah di bagian ujung *nose*.



**Gambar 4. 8** Kontur Koefisien Tekanan pada *Midplane* Kereta.

Berdasarkan gambar 4.8, dapat dilihat bahwa dengan variasi kecepatan angin yang meningkat, kontur koefisien tekanan di bagian ujung *nose* menunjukkan area kontur berwarna merah terlihat semakin sempit. Hal tersebut mengindikasikan adanya pergeseran lokasi tekanan stagnasi dari bagian ujung *nose* ke bagian belakang akibat *yaw angle* angin. Penurunan nilai koefisien tekanan di bagian ujung *nose* tersebut memungkinkan selisih

tekanan yang lebih rendah antara bagian depan dan bagian belakang kereta.

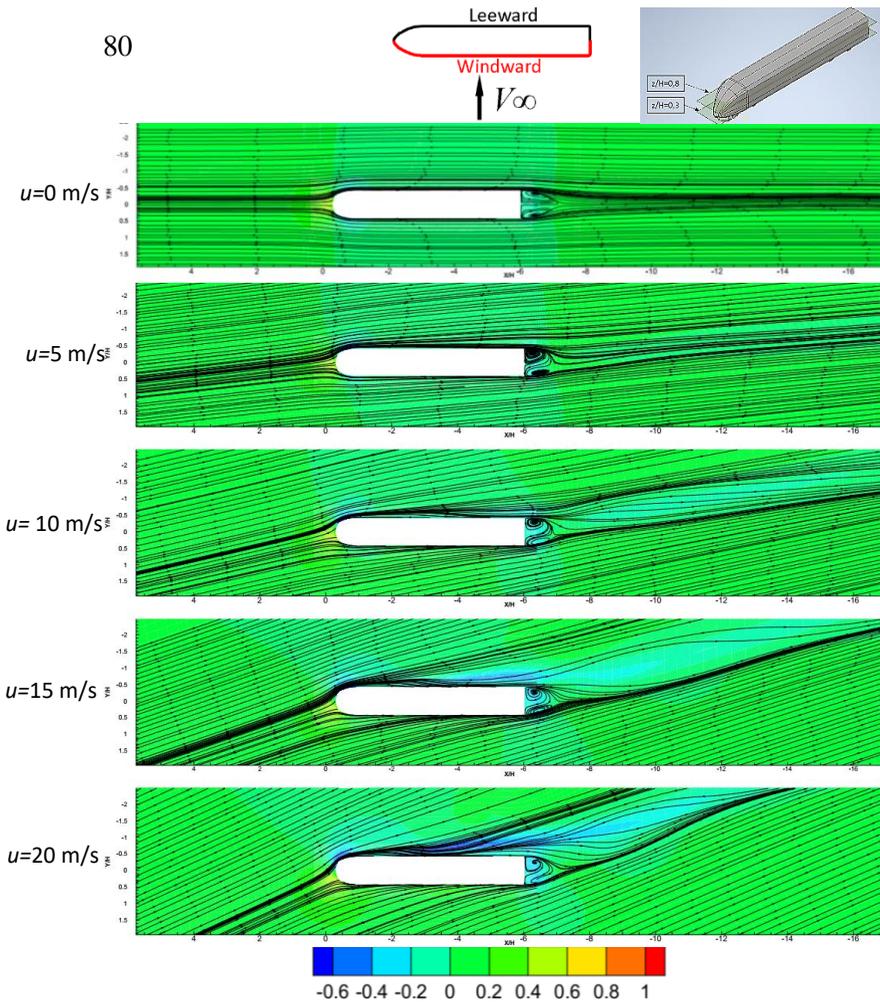


Gambar 4. 9 Kontur Koefisien Tekanan di  $Plane z/H=0,3$ .

Gambar 4.9 menunjukkan kontur koefisien tekanan di *plane*  $z/H=0,3$  dan *streamline* alirannya. *Streamline* diatur dengan  $x$  *velocity component* sebagai komponen  $u$  dan  $y$  *velocity component* sebagai komponen  $v$ . Pada gambar tersebut terlihat bahwa di bagian depan kereta terdapat area dengan area kontur berwarna kuning hingga merah yang mengindikasikan koefisien tekanan yang tinggi. Nilai yang tinggi pada kontur tersebut mengalami pergeseran dari yang semula berada di ujung *nose* kereta (*nose tip*) untuk kecepatan angin 0 m/s hingga semakin ke belakang akibat adanya *yaw angle* angin.

Selain pergeseran titik stagnasi, kontur tekanan di *plane*  $z/H=0,3$  juga menunjukkan adanya area dengan tekanan rendah di bagian *leeward* kereta. Pada kondisi tanpa ada *crosswind* (kecepatan angin *crosswind* 0 m/s) tampak nilai koefisien tekanan terdistribusi secara merata di bagian *windward* dan *leeward* kereta yang ditandai dengan warna biru muda. Sementara itu, ketika kereta melaju di tengah *crosswind* dengan kecepatan yang lebih tinggi, seperti misalnya 20 m/s, tampak bagian *leeward* kereta berwarna biru, dan bagian *windward* berwarna hijau. Hal tersebut menunjukkan adanya tekanan yang lebih tinggi di bagian *windward* daripada tekanan di bagian *leeward*.

Untuk memperjelas kontur tekanan di bagian *windward* dan *leeward* kereta pada sub bab ini akan ditampilkan juga kontur koefisien tekanan pada *plane* dengan ketinggian  $z/H=0,8$  seperti yang tampak pada gambar 4.8.



**Gambar 4. 10** Kontur Koefisien Tekanan di *Plane*  $z/H=0,8$

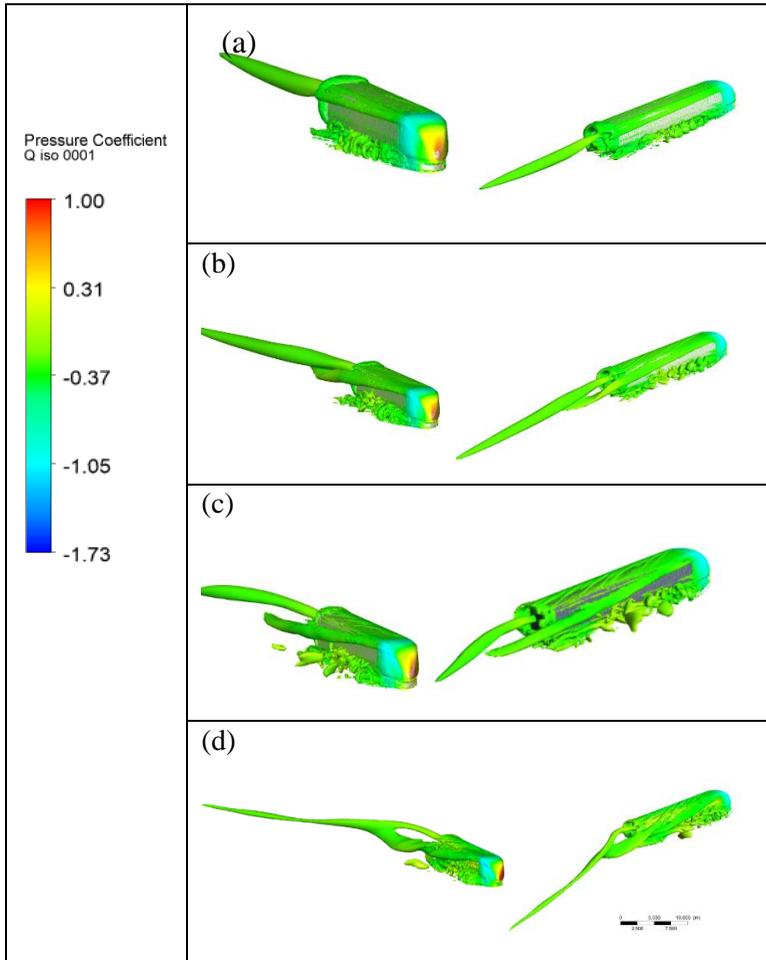
Gambar 4.10 menunjukkan kontur koefisien tekanan di *plane*  $z/H=0,8$ . Seperti pada gambar 4.9 sebelumnya, gambar 4.10 ini juga menunjukkan hal yang serupa, yaitu pada kondisi tanpa *crosswind* koefisien tekanan di bagian *windward* dan *leeward* terdistribusi secara merata. Sementara itu, ketika kereta melaju di tengah *crosswind* akan timbul perbedaan tekanan pada bagian *windward* dan *leeward* kereta dengan tekanan yang semakin rendah timbul di bagian *leeward* pada variasi kecepatan *crosswind*

yang lebih tinggi. Tekanan di bagian *leeward* yang semakin rendah tersebut terlihat dengan adanya kontur berwarna biru muda yang terlihat lebih luas pada variasi kecepatan angin yang lebih tinggi.

#### 4.1.3 Struktur Aliran di Sekitar Kereta

Pada penelitian ini struktur aliran di area *wake* kereta yang terbentuk akibat adanya efek *crosswind* akan dijelaskan lebih lanjut. *Q-criterion* akan digunakan pada sub bab ini untuk mengidentifikasi struktur aliran yang terbentuk di daerah *wake*. Struktur aliran akan ditampilkan dengan menggunakan *isosurface Q-criterion* yang merupakan *second invariant of velocity gradient tensor* dengan nilai  $Q=0,001$  seperti yang telah dilakukan oleh Munoz-Paniagua, et. al., 2017 dengan perumusan seperti pada 2.10, dimana  $\Omega$  merupakan *rate-of-rotation tensor* dan  $S$  merupakan *rate-of-strain tensor* dengan *isosurface* yang diwarnai berdasarkan *colormap* koefisien tekanan.

$$Q = \frac{1}{2} (\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad 2.10$$

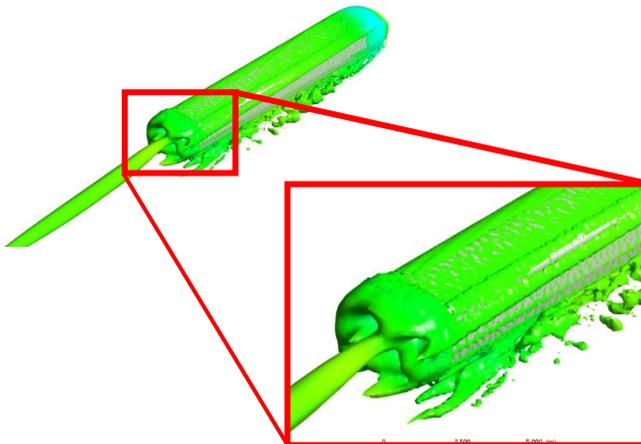


**Gambar 4. 11** Struktur Aliran di Sekitar Kereta pada Variasi Kecepatan: (a) Kecepatan  $u=5$  m/s. (b) Kecepatan  $u=10$  m/s. (c) Kecepatan  $u= 15$  m/s. (d) Kecepatan  $u=20$  m/s.

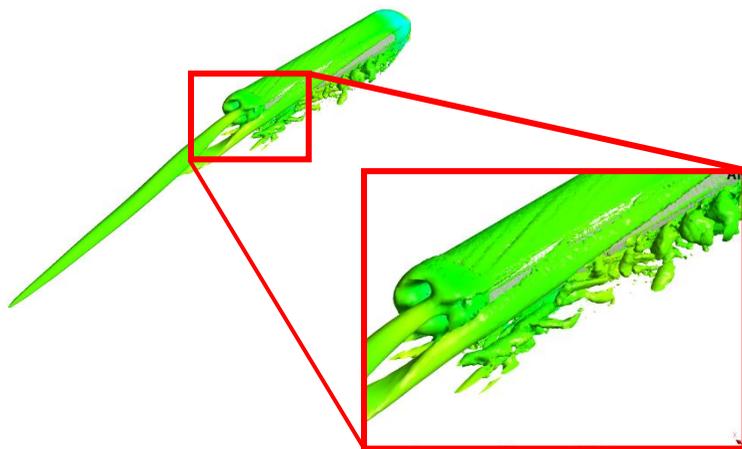
Gambar 4.11 menunjukkan struktur aliran di sekitar kereta pada variasi kecepatan angin *crosswind* 5 m/s hingga 20 m/s. Berdasarkan gambar 4.11, terlihat bahwa arah *vortex* yang terbentuk tampak dipengaruhi oleh kecepatan angin *crosswind*. Pada variasi kecepatan angin 20 m/s terlihat bahwa *vortex* yang terbentuk dari bagian *leeward* kereta mengalami pergeseran sesuai dengan sudut datang angin. Kemiringan *vortex* yang terbentuk tampak jelas ketika dibandingkan dengan *vortex* yang terbentuk pada variasi kecepatan *crosswind* 5 m/s.

Pada variasi kecepatan angin 15 m/s dan 20 m/s juga tampak bahwa *vortex* yang terbentuk di bagian *leeward* kereta terlepas dari bagian bodi kereta seperti tampak pada gambar 4.12.(c) dan 4.12.(d)

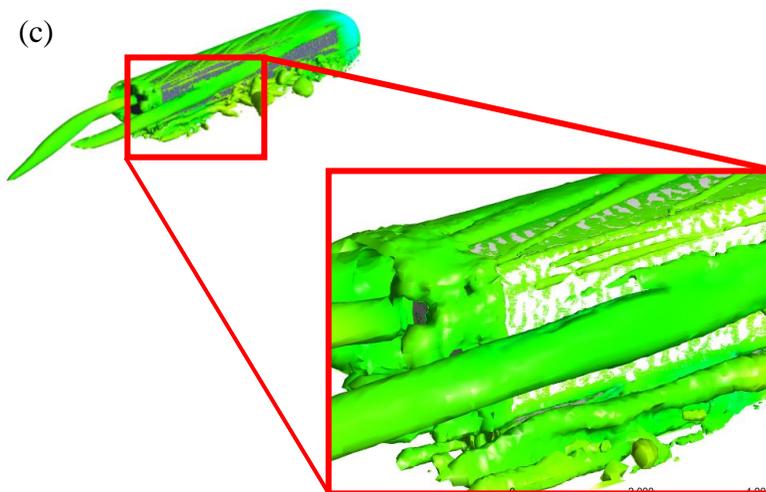
(a)

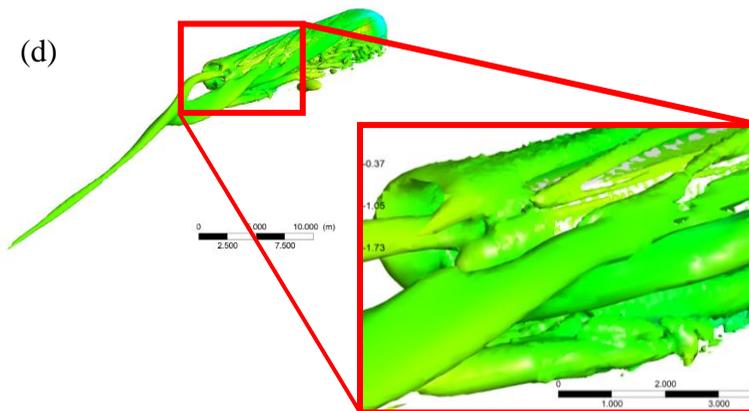


(b)



(c)





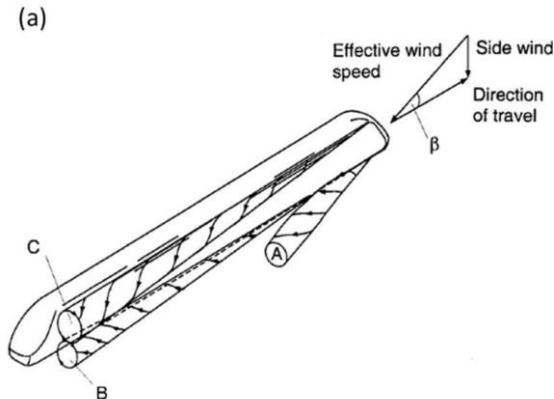
**Gambar 4. 12** *Vortex* di Belakang Kereta: (a) Variasi Kecepatan  $u=5$  m/s. (b) Variasi kecepatan  $u=10$  m/s. (c) Variasi kecepatan  $u=15$  m/s. (d) Variasi kecepatan  $u=20$  m/s.

Gambar 4.12 menunjukkan *zoom vortex* yang terbentuk pada bagian *leeward* untuk variasi kecepatan 15 m/s dan 20 m/s dibandingkan dengan variasi kecepatan 5 m/s dan 10 m/s. Pada gambar tersebut tampak bahwa dengan variasi kecepatan yang rendah *vortex* yang terbentuk masih menempel pada bagian *lee side roof*. Sementara itu, ketika kecepatan angin mengalami peningkatan, di bagian belakang kereta *vortex* telah terlepas sepenuhnya dari bodi kereta.

#### 4.1.4 Komparasi Hasil Struktur Aliran dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai struktur aliran di sekitar kereta yang terkena *crosswind* pernah dilakukan sebelumnya oleh Niu, et.al., 2018 dan Munoz-Paniagua, et. al., 2017. Pada penelitian tersebut Niu melakukan pengujian pada *yaw angle* sebesar  $15^\circ$ , kecepatan kereta 57,955 m/s, atau sekitar 208,6 km/h, dan kecepatan angin

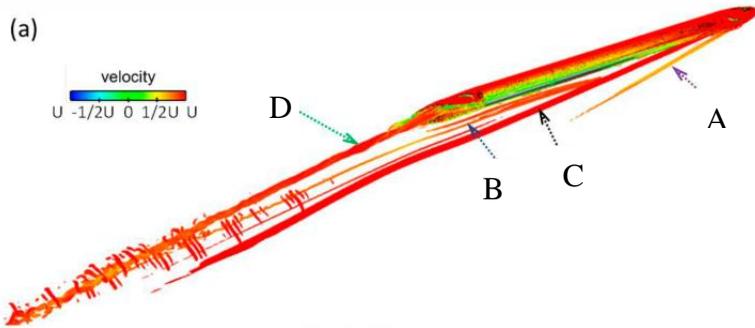
15,53 m/s sehingga diperoleh kecepatan resultan kereta dan angin sebesar 60 m/s. Model turbulensi yang ia gunakan adalah *unsteady* IDDES berbasis  $k - \omega$  SST dengan *time step size*  $1 \times 10^{-4}$  dan 30 *iterations per time step*. Di dalam penelitiannya, Niu, 2018 memaparkan bahwa kereta yang terkena *crosswind* umumnya memiliki 3 jenis *vortex* yang terbentuk di daerah *wake* tampak seperti pada gambar 2.20. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Munoz-Paniagua ditunjukkan seperti pada gambar 2.23. Penelitian tersebut dilakukan pada *yaw angle*  $30^\circ$  dan kecepatan angin 60 m/s dengan model turbulensi  $k - \omega$  SST.



**Gambar 2. 20** Struktur Aliran di Sekitar Kereta Ketika Terjadi *Crosswind* (Niu, et. al., 2018)

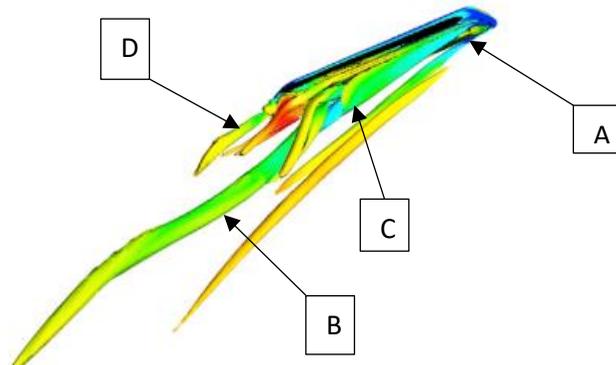
Gambar 2.20 menunjukkan penelitian Niu 2018 mengenai struktur aliran yang terbentuk di sekitar kereta ketika terjadi *crosswind*. Pada gambar tersebut, terlihat bahwa terdapat vortex yang terbagi menjadi 3 bagian berdasarkan lokasinya. *Vortex* yang pertama merupakan *vortex* yang terbentuk dari bagian *lee side roof* kereta (bagian ujung atap kereta), *Vortex* kedua adalah *vortex* yang terbentuk dari bagian *lee side nose* kereta, serta jenis *vortex* terakhir merupakan *vortex* yang terbentuk dari *underbody* bagian

depan kereta. Hasil visualisasi *vortex* yang diperoleh oleh Niu ditunjukkan seperti pada gambar 2.21.



**Gambar 2.21** Plot *Instantaneous Flow Structure* Kereta pada *Isosurface*  $Q=50000$ . (Niu, et. al., 2018)

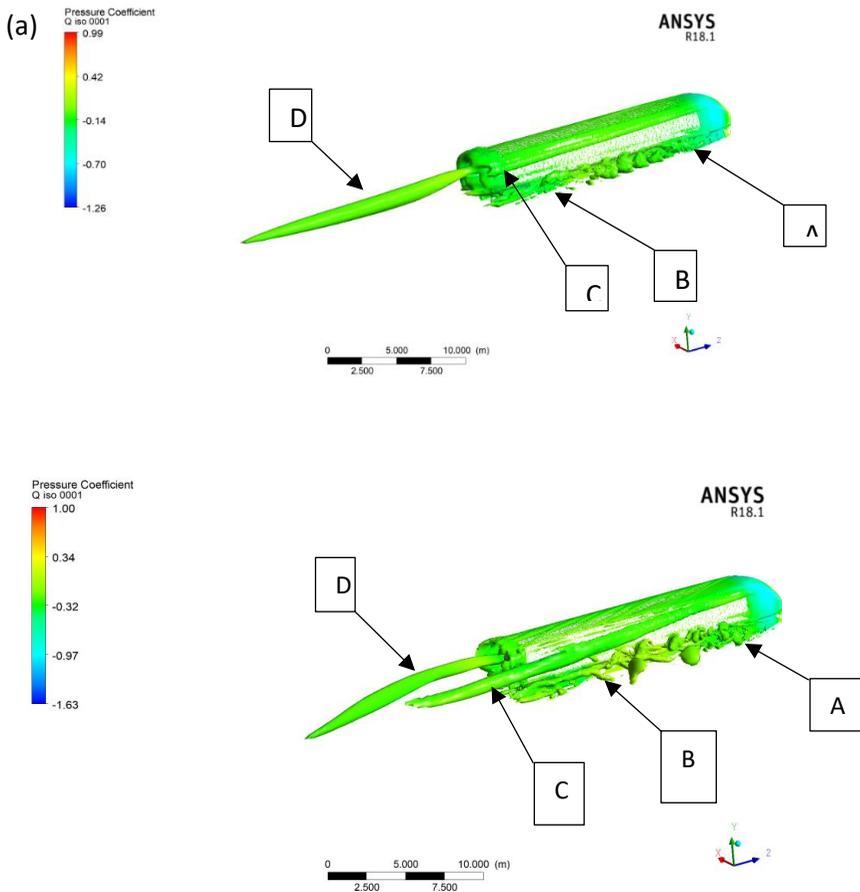
Gambar 2.21 menunjukkan visualisasi *vortex* pada penelitian Niu, et. al., 2018. Pada gambar tersebut terlihat bahwa terdapat *vortex* A yang berasal dari bagian *leeward nose* kereta, *vortex* B yang berasal dari *underbody* bagian depan kereta, dan *vortex* C yang berasal dari bagian *leeward roof* kereta. Terdapat tambahan sebuah *vortex* D pada gambar tersebut yang diketahui berasal dari bagian belakang kereta.

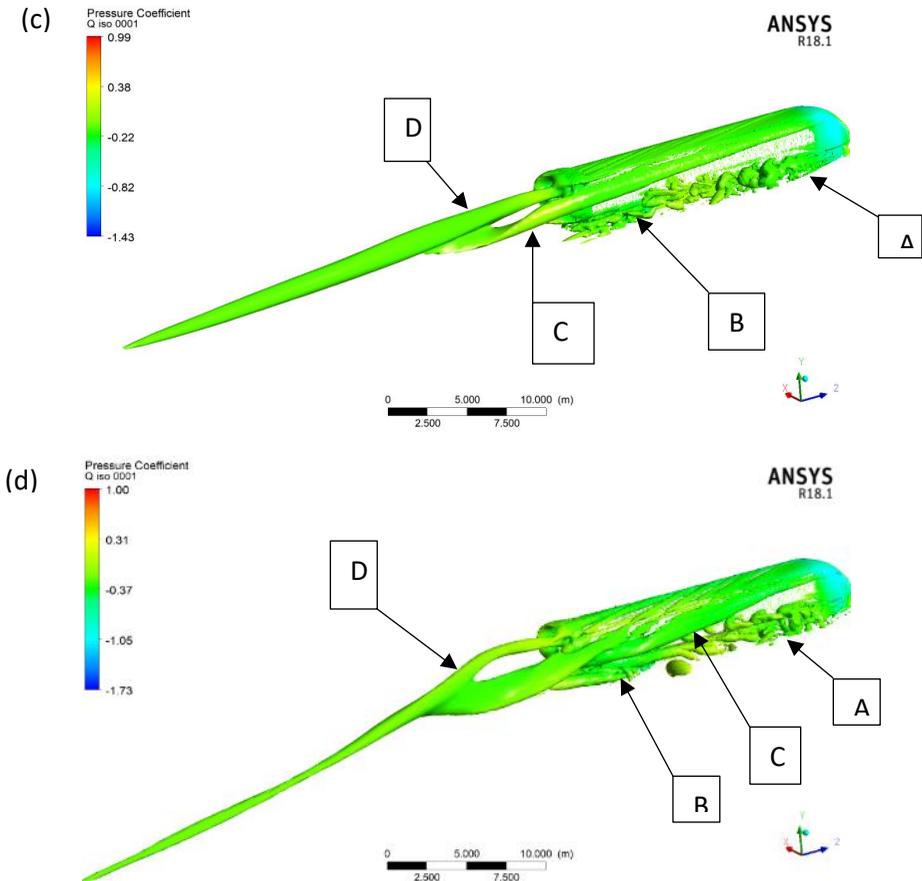


**Gambar 2.23** Struktur Aliran *Vortex* di Daerah *Wake isosurface*  $Q=0,001$  (Munoz-Paniagua, et. al., 2017)

Gambar 2.24 menunjukkan struktur aliran *vortex* di daerah *wake* pada penelitian Munoz-Paniagua, et. al., 2017. Pada penelitian yang ia lakukan, terdapat 4 jenis *vortex* yang lokasi terbentuknya juga sama dengan yang diperoleh Niu, et. al, 2018.

Pada penelitian ini, dilakukan juga visualisasi *vortex* aliran pada variasi kecepatan angin 5 m/s hingga 20 m/s. Dengan menggunakan *isosurface Q-criterion*=0,001 diperoleh hasil seperti yang tampak pada gambar 4.13 berikut ini.

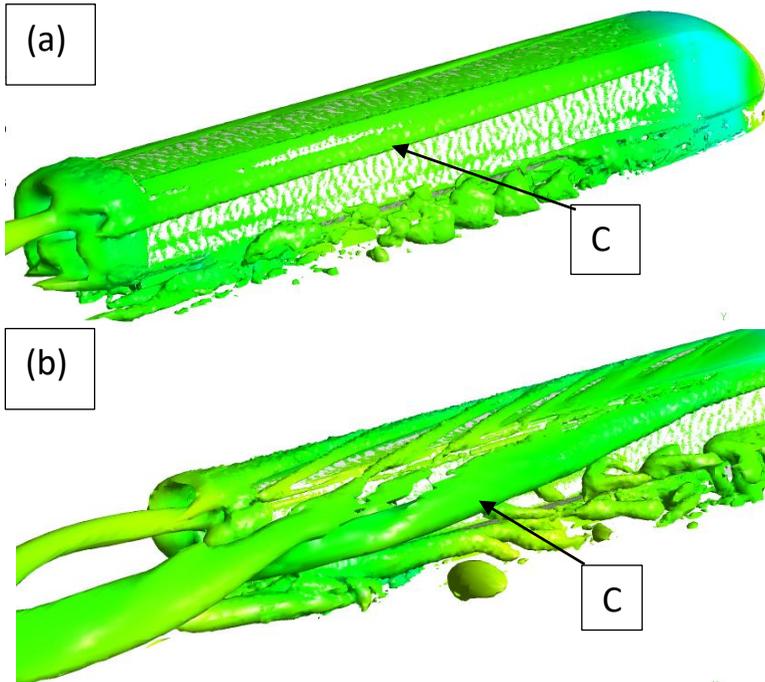




**Gambar 4.13** Perbandingan Struktur Aliran di Sekitar Kereta pada Variasi Kecepatan Angin: (a)  $u=5$  m/s. (b)  $u=10$  m/s. (c)  $u=15$  m/s. (d)  $u=20$  m/s.

Gambar 4.13 merupakan struktur aliran di sekitar kereta pada penelitian ini dengan berbagai variasi kecepatan angin. Pada penelitian ini juga diperoleh masing-masing 4 jenis *vortex* seperti halnya penelitian terdahulu. *Vortex* tersebut antara lain merupakan *vortex* A, B, C, dan D seperti yang ditunjukkan pada masing-

masing gambar. Berdasarkan gambar 4.13 dapat terlihat bahwa pada variasi kecepatan aliran yang semakin tinggi *vortex* yang terbentuk memiliki area yang lebih luas. Bertambahnya luas *vortex* tersebut terlihat jelas pada *vortex* C yang terbentuk dari bagian *leeward* atap kereta seperti pada gambar 4.14. Selain itu, penambahan kecepatan angin mengakibatkan *vortex* C dan *vortex* D tampak semakin miring karena adanya *yaw angle* angin yang semakin besar



**Gambar 4.14** Zoom pada Bagian *Vortex* C: (a) Variasi Kecepatan Angin  $u=5$  m/s.

(b) Variasi Kecepatan Angin  $u=20$  m/s

Gambar 4.14 menunjukkan perbesaran gambar pada bagian *vortex* C. Pada variasi kecepatan angin  $u=20$  m/s, *vortex* C terlihat memiliki ukuran yang lebih besar bila dibandingkan

dengan *vortex* C yang terdapat pada variasi kecepatan angin  $u=5$  m/s seperti yang tampak pada gambar 4.12..

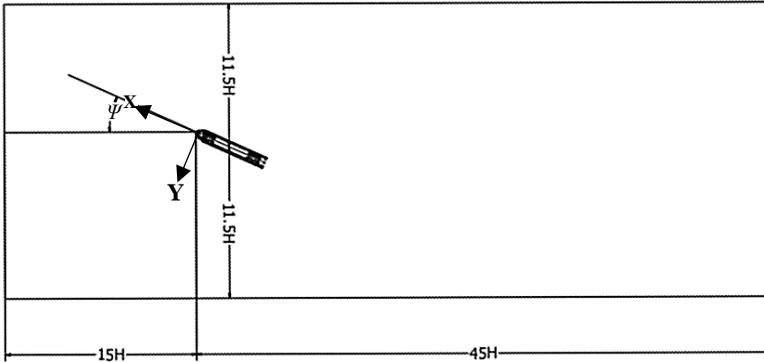
Berbeda dengan hasil visualisasi struktur aliran yang dilakukan pada penelitian Niu, et. al., 2018, *vortex* yang diperoleh pada penelitian ini (gambar 4.14) cenderung lebih halus. Hal tersebut disebabkan karena model turbulensi pada simulasi ini adalah *steady k -  $\omega$  SST*, sehingga seolah tampak intensitas *vortex* yang lebih rendah dan halus daripada hasil penelitian yang pernah dilakukan oleh Niu, et. al., 2018 dengan menggunakan model turbulensi *IDDES* berbasis *k -  $\omega$  SST*.

Terbentuknya visualisasi *vortex* yang lebih halus ini juga telah dikonfirmasi oleh Munoz-Paniagua, et. al., 2017. Pada penelitiannya, Munoz-Paniagua membandingkan model turbulensi *k -  $\omega$  SST* dengan sejumlah model *unsteady* seperti *IDDES*, *SAS*, dan *DES* untuk mengetahui perbedaan akurasi model-model turbulensi tersebut. Pada penelitiannya, Munoz-Paniagua mengungkapkan bahwa model turbulensi *IDDES* dan *DES* mampu menghasilkan struktur aliran yang lebih detail daripada model turbulensi *steady k -  $\omega$  SST* karena kecenderungan model turbulensi *RANS* meredam ketidakstabilan pada aliran untuk memperoleh rata-rata aliran. Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, hasil visualisasi *vortex* yang tampak lebih halus pada seperti pada penelitian ini merupakan hal yang wajar terjadi pada model turbulensi *RANS*.

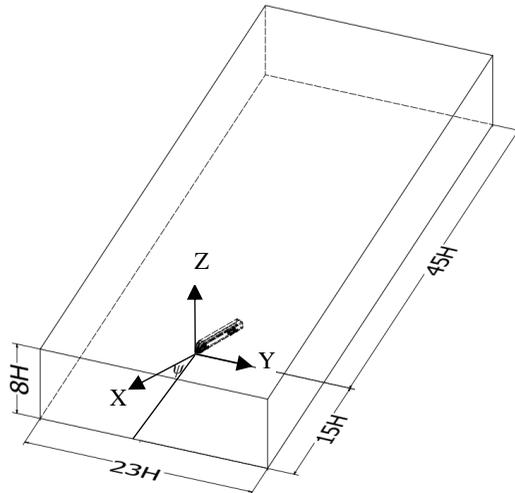
## 4.2 Koefisien *Drag Force*

*Drag force* merupakan gaya hambat yang timbul akibat pergerakan benda melalui fluida dengan arah gaya sejajar dengan arah gerak benda. Pada penelitian ini, digunakan geometri kereta yang dimiringkan sesuai *yaw angle* angin dengan *ground* diatur sebagai *moving wall* ke arah sumbu x negatif untuk mensimulasikan adanya *crosswind* pada kereta yang melaju. Luas area referensi untuk perhitungan nilai koefisien *drag* ini adalah luas proyeksi *frontal area* ke arah sumbu x positif kereta yaitu sebesar

10,22 m<sup>2</sup>. Gaya *drag* pada model simulasi ini bekerja ke arah sumbu x negatif dengan titik pusat sumbu terletak di bagian depan kereta seperti pada gambar 3.3.



(a) Tampak Atas Domain Pengujian

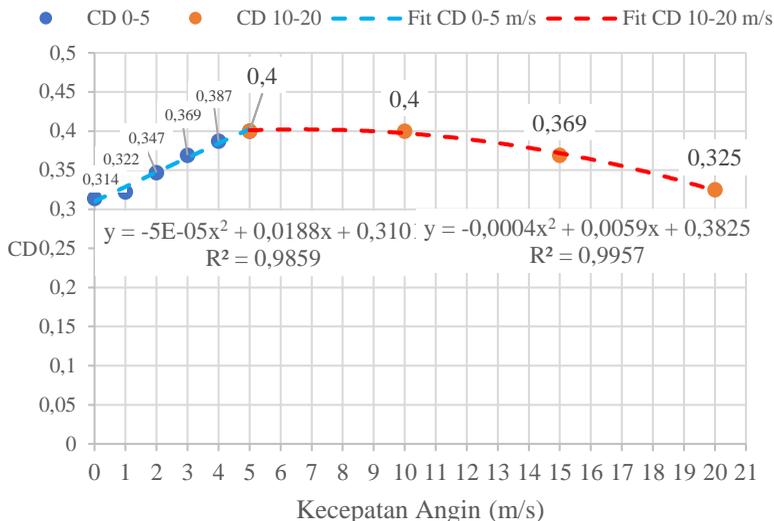


(b) Tampak Isometri Domain Pengujian

**Gambar 3.3** Domain Pengujian: (a) Tampak Atas. (b) Tampak Isometri

Pada penelitian ini digunakan variasi kecepatan angin mulai dari 0 m/s hingga 20 m/s dengan kecepatan kereta tetap, yaitu

sebesar 44,44 m/s. Dengan variasi tersebut, diperoleh hasil berupa koefisien *drag* yang nilainya ditunjukkan seperti pada grafik di bawah ini.



**Grafik 4. 1** Koefisien *Drag Force* Kereta vs Kecepatan Angin  $u$

Grafik 4.1 menunjukkan koefisien *drag force* pada kereta dengan variasi kecepatan angin *crosswind* mulai dari 0 m/s hingga 20 m/s. Pada sub bab ini, ditambahkan variasi kecepatan *crosswind* 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, dan 4 m/s untuk melihat perkembangan peningkatan koefisien *drag* pada kereta. Berdasarkan penambahan variasi kecepatan yang rendah, diketahui bahwa terjadi peningkatan koefisien *drag* dengan sangat signifikan di antara variasi kecepatan 0 m/s hingga 5 m/s sebelum akhirnya mengalami penurunan pada variasi kecepatan 10 m/s hingga 20 m/s.

**Tabel 4. 1** Nilai Koefisien *Drag Force* pada Kecepatan Angin 0-5 m/s

Kecepatan Angin (m/s)	$C_D$	Peningkatan $C_D$
0	0,314	-
1	0,322	2,548%
2	0,347	7,764%
3	0,369	6,340%
4	0,387	4,878%
5	0,4	3,359%

Tabel 4.1 menunjukkan nilai koefisien *drag force* pada variasi kecepatan angin 0 m/s hingga 5 m/s dan persentase peningkatan koefisien *drag force* yang dibandingkan dengan nilai sebelumnya. Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa adanya angin *crosswind* dengan kecepatan 1 m/s dapat meningkatkan nilai koefisien *drag force* sebesar 2,548% dibandingkan dengan tidak adanya *crosswind*. Pada variasi kecepatan *crosswind* 0 hingga 5 m/s terlihat bahwa peningkatan nilai koefisien *drag* yang tertinggi terdapat pada variasi kecepatan angin *crosswind* 2 m/s yang menunjukkan peningkatan sebesar 7,764% dari nilai sebelumnya 0,322 menjadi 0,347.

Nilai koefisien *drag force* tersebut mengalami peningkatan hingga mencapai nilai maksimumnya di variasi kecepatan 5 m/s dan 10 m/s. Setelah mencapai nilai koefisien *drag force* maksimum, nilai koefisien *drag force* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kecepatan *crosswind* mulai dari 10 m/s hingga 20 m/s. Penurunan nilai koefisien *drag force* untuk variasi kecepatan 10 m/s hingga 20 m/s tersebut dapat dikonfirmasi melalui kontur koefisien tekanan pada gambar 4.9 dan 4.10, yaitu bahwa pada variasi kecepatan *crosswind* yang semakin meningkat di atas 10 m/s area dengan tekanan rendah di bagian *leeward*

semakin luas sementara area dengan tekanan rendah di belakang kereta semakin sempit. Hal tersebut berakibat pada perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang kereta menjadi lebih rendah sehingga gaya *drag* yang ditimbulkan pun mengalami penurunan. Hal serupa juga dapat dijelaskan berdasarkan kontur kecepatan *dimensionless* yang sebelumnya telah ditampilkan, dimana pada variasi kecepatan angin *crosswind* di atas 10 m/s, area *wake* yang terbentuk di bagian *leeward* kereta semakin luas dan area *wake* belakang kereta akan semakin sempit bila dibandingkan dengan variasi kecepatan *crosswind* 5 m/s.

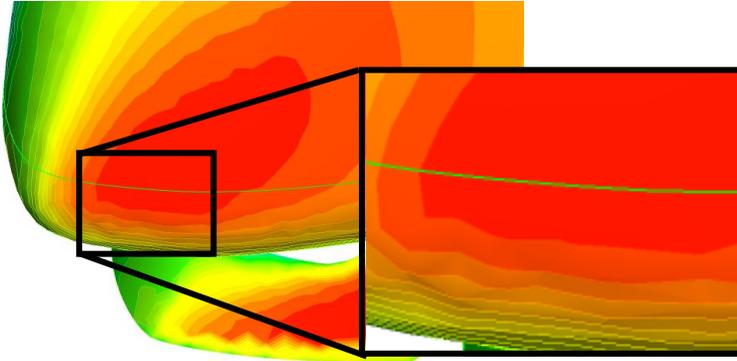
### 4.3 Koefisien Tekanan di Permukaan Kereta

Pada sub bab 4.1.2, kontur koefisien tekanan di sekitar kereta telah menunjukkan bahwa adanya *crosswind* akan menimbulkan perbedaan tekanan di bagian *windward* kereta (*upstream* aliran) dan bagian *leeward* kereta (*downstream* aliran). Besarnya koefisien tekanan yang terdapat di bagian permukaan kereta akan dijelaskan pada sub bab ini.

Gambar 4.15 menunjukkan lokasi kurva tempat pengambilan data koefisien tekanan di permukaan kereta. Koefisien tekanan tersebut akan diambil pada garis yang terdapat di sepanjang pada permukaan kereta dengan lokasi di  $z/H=0,3$  tempat terdapatnya titik stagnasi. Pada bab ini, kurva di permukaan kereta akan dibagi menjadi 2 bagian, yaitu kurva bagian *windward* dan kurva bagian *leeward* yang dipisahkan oleh titik tengah kereta, sehingga perbedaan pada kedua sisi dapat terlihat dengan jelas seperti pada grafik 4.2 hingga 4.5



(a) Tampak Samping Kurva Plot Nilai  $C_p$

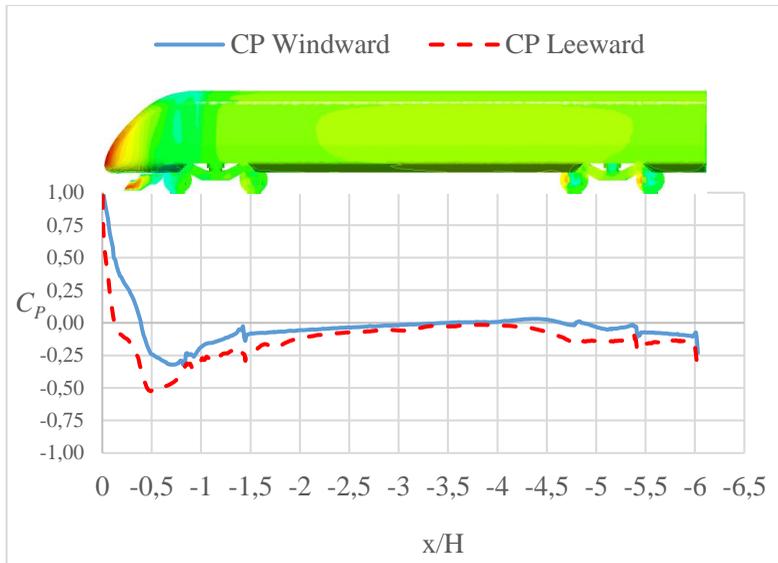


(b) Zoom pada Bagian Titik Stagnasi

**Gambar 4. 15** Kurva Plot Nilai  $C_p$ : (a) Tampak Samping Kurva Plot Nilai  $C_p$ . (b) Zoom pada Bagian Titik Stagnasi.

Gambar 4.15 (a) menunjukkan lokasi kurva untuk plot nilai koefisien tekanan. Garis tersebut tampak melewati area dengan warna merah tempat terdapatnya titik stagnasi pada kereta sehingga nilai koefisien tekanan di sepanjang permukaan samping kereta dapat diplot seperti yang tampak pada grafik 4.2 hingga 4.5 di bawah ini.

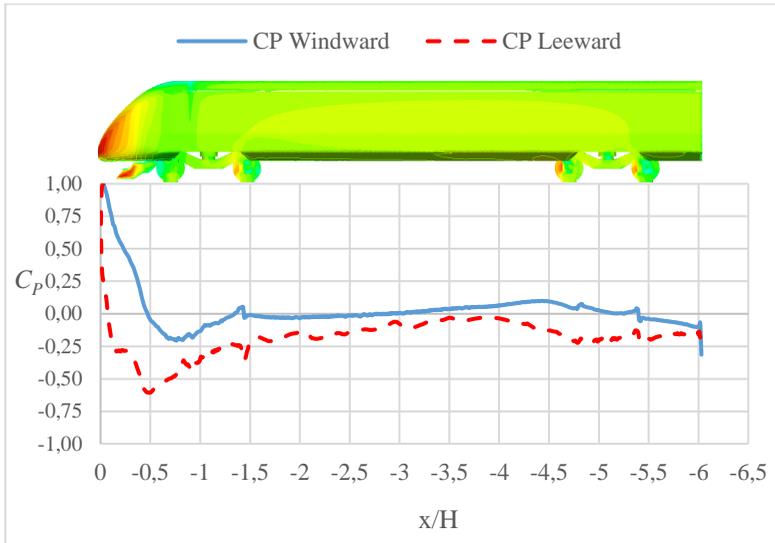
Grafik 4.2 menunjukkan distribusi koefisien tekanan di permukaan kereta pada variasi kecepatan angin *crosswind* 5 m/s. Garis berwarna biru menunjukkan koefisien tekanan pada bagian *windward* (*upstream* aliran) dan garis putus-putus berwarna merah menunjukkan koefisien tekanan permukaan pada bagian *leeward* (*downstream* aliran).



**Grafik 4. 2** Distribusi  $C_P$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=5$  m/s

Pada grafik tersebut terlihat bahwa pada posisi yang mendekati  $x/H=0$ , koefisien tekanan di permukaan kereta memiliki nilai yang paling tinggi. Hal ini disebabkan karena pada bagian tersebut terdapat titik stagnasi, yaitu titik partikel fluida menabrak bodi kereta bagian depan sehingga partikelnya memiliki kecepatan yang rendah. Setelah melalui bagian titik stagnasi tersebut, koefisien tekanan pada permukaan kereta mengalami penurunan hingga nilai  $C_P=-0,5$  pada bagian *leeward* dan nilai  $C_P$  di kisaran  $-0,3$  pada bagian *windward* di posisi sekitar  $x/H=0,75$ . Grafik 4.2 menunjukkan bahwa penurunan koefisien tekanan di bagian depan tersebut mengakibatkan bagian *windward* dan *leeward* kereta memiliki koefisien tekanan yang negatif, dengan nilai pada bagian *leeward* yang lebih rendah daripada bagian *windward*. Penurunan

tekanan tersebut berlangsung hingga kemudian mengalami peningkatan kembali sejak posisi  $x/H=0,8$ .

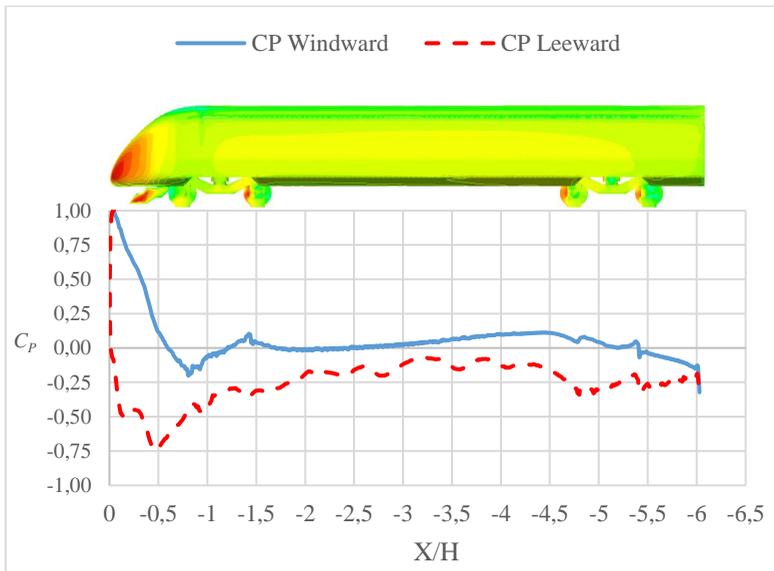


**Grafik 4. 3** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=10$  m/s

Grafik 4.3 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada bagian samping kereta untuk variasi kecepatan angin 10 m/s. Kontur koefisien tekanan di permukaan kereta, yang terdapat di grafik tersebut, menunjukkan area berwarna kuning hingga merah yang lebih luas di bagian *windward* daripada area yang terdapat pada kontur dengan variasi kecepatan 5 m/s sebelumnya. Pergeseran titik stagnasi mungkin terjadi karena adanya *yaw angle* angin yang meningkat sehingga nilai  $C_p=1$  yang posisinya tidak persis di  $x/H=0$ .

Dibandingkan dengan variasi kecepatan angin 5 m/s, perbedaan distribusi  $C_p$  pada variasi kecepatan angin 10 m/s terletak pada selisih nilai  $C_p$  di bagian *windward* dan *leeward* yang

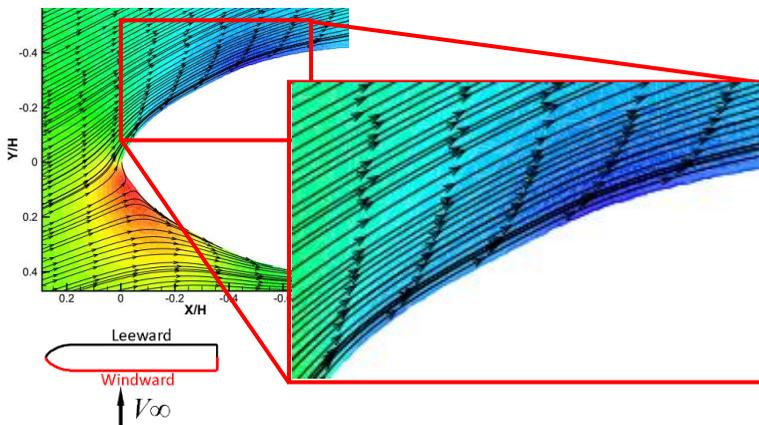
lebih besar. Selisih nilai  $C_p$  antara bagian *windward* dan *leeward* yang lebih besar dapat terjadi karena secara umum nilai  $C_p$  di bagian *windward* untuk variasi kecepatan 10 m/s lebih tinggi daripada  $C_p$  di bagian *windward* untuk variasi kecepatan 5 m/s sebelumnya. Sementara itu, nilai  $C_p$  di bagian *leeward* untuk variasi kecepatan 10 m/s lebih rendah daripada nilai  $C_p$  *leeward* untuk variasi kecepatan 5 m/s. Hal tersebut terlihat dari nilai terendah  $C_p$  di bagian *windward* dan *leeward* secara berturut-turut yaitu sekitar -0,24 dan -0,55 yang berbeda dari nilai terendah pada variasi kecepatan angin 5 m/s. Selain itu, selisih  $C_p$  *windward* dan *leeward* yang lebih besar juga dapat terlihat dari lebih besarnya area yang terbentuk di antara garis  $C_p$  pada bagian *windward* dan *leeward* di grafik dengan variasi kecepatan angin 10 m/s.



**Grafik 4. 4** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=15$  m/s

Grafik 4.4 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada bagian samping kereta untuk variasi kecepatan angin 15 m/s. Pada variasi kecepatan angin 15 m/s, selisih nilai koefisien tekanan pada bagian *windward* dan *leeward* semakin besar seperti yang juga terjadi pada variasi kecepatan lebih rendah. Selisih yang lebih besar tersebut dapat terlihat dari area antara kedua garis yang lebih luas. Selain itu, diketahui juga bahwa nilai terendah  $C_P$  *windward* lebih tinggi dan nilai terendah  $C_P$  *leeward* lebih rendah yaitu secara berturut-turut adalah -0,2 dan -0.75.

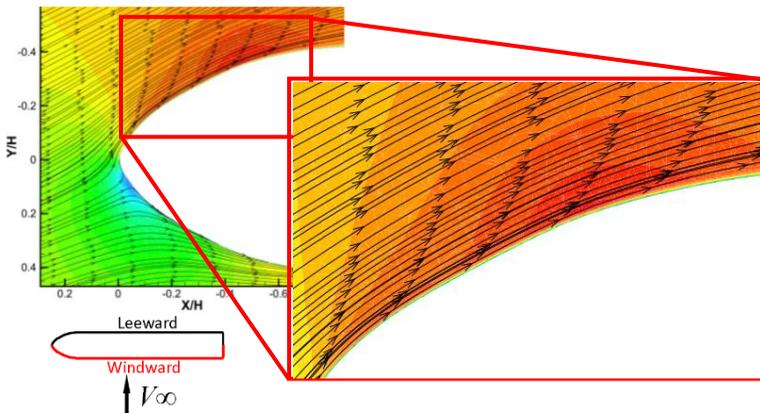
Plot koefisien tekanan di bagian *leeward* kereta menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan di posisi sekitar  $X/H=-0,3$  pada grafik yang sebelumnya memiliki tren penurunan koefisien tekanan. Untuk memperjelas kondisi medan aliran pada bagian tersebut, dilakukan plot kontur koefisien tekanan seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut.



**Gambar 4. 16** Zoom Kontur Koefisien Tekanan di Bagian *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=15$  m/s.

Gambar 4.16 menunjukkan *zoom* kontur koefisien tekanan di bagian *leeward* kereta. Pada gambar tersebut terlihat terdapat

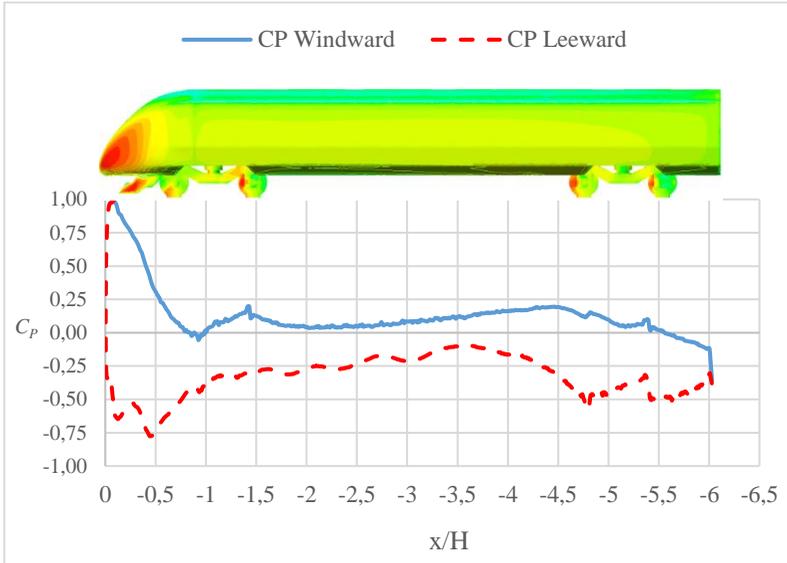
dua area dengan warna biru tua yang berlokasi di posisi sekitar  $X/H=-0,1$  sampai  $-0,2$ ; dan pada posisi sekitar  $X/H=-0,4$  sampai  $-0,50$  di bagian *leeward nose*. *Streamline* pada bagian bertekanan rendah tersebut tidak menunjukkan adanya aliran yang berputar. Hal ini menjadi indikasi bahwa dua titik bertekanan rendah yang terbentuk bukan merupakan *bubble separation*. Kondisi aliran di bagian tersebut kemudian diperjelas dengan menampilkan kontur kecepatan *dimensionless* seperti pada gambar 4.17 berikut ini.



**Gambar 4. 17** Zoom Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) di Bagian *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=15$  m/s.

Gambar 4.17 menunjukkan *zoom* kontur kecepatan *dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) pada bagian *leeward* kereta pada variasi kecepatan angin  $u=15$  m/s. Pada bagian tersebut terlihat adanya area dengan kontur berwarna merah terang yang lebih pekat pada posisi yang sama dengan lokasi terjadinya penurunan tekanan. Kontur dengan warna merah yang pekat tersebut menunjukkan bahwa penurunan tekanan yang sebelumnya ditampilkan terjadi karena adanya peningkatan kecepatan aliran akibat profil *nose* kereta dan bukan merupakan daerah *wake*. Tidak terdapatnya daerah *wake* di bagian *leeward nose* kereta ini menjelaskan bahwa

daerah bertekanan rendah di bagian *leeward nose* tersebut merupakan daerah tempat terjadinya akselerasi aliran akibat profil *nose* kereta dan bukan merupakan *bubble separation*.

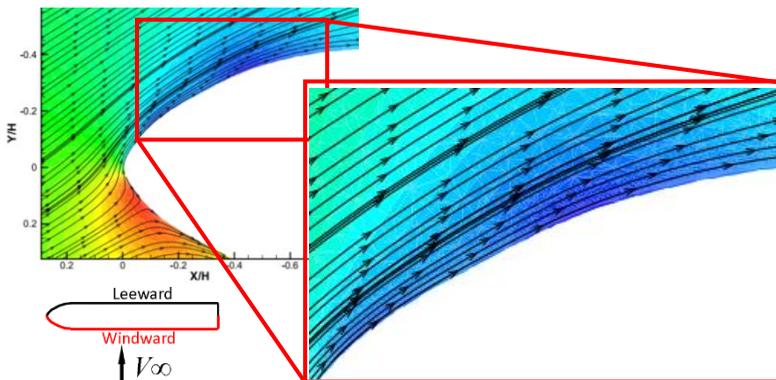


**Grafik 4. 5** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=20$  m/s

Grafik 4.5 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada bagian samping kereta untuk variasi kecepatan angin 20 m/s. Pada variasi kecepatan angin yang tertinggi, yaitu 20 m/s tampak dengan lebih jelas bahwa posisi titik stagnasi di bagian *nose* kereta telah mengalami pergeseran, dari yang seharusnya berada di  $x/H=0$  kini berada di posisi  $x/H=0,08$  seperti pada grafik dan dikonfirmasi dengan kontur dengan area berwarna kuning hingga merah yang terlihat lebih luas daripada variasi sebelumnya dengan kecepatan angin yang lebih rendah.

Selisih koefisien tekanan di bagian *windward* dan *leeward* kereta juga tampak lebih besar dengan area yang dibatasi kedua garis plot  $C_p$  di bagian *windward* dan *leeward* yang lebih besar. Selain itu, diketahui juga terjadi peningkatan nilai terendah  $C_p$  di bagian *windward* dan penurunan nilai  $C_p$  terendah di bagian *leeward* yang secara berturut-turut nilainya yaitu  $-0,02$  dan  $-0,8$ .

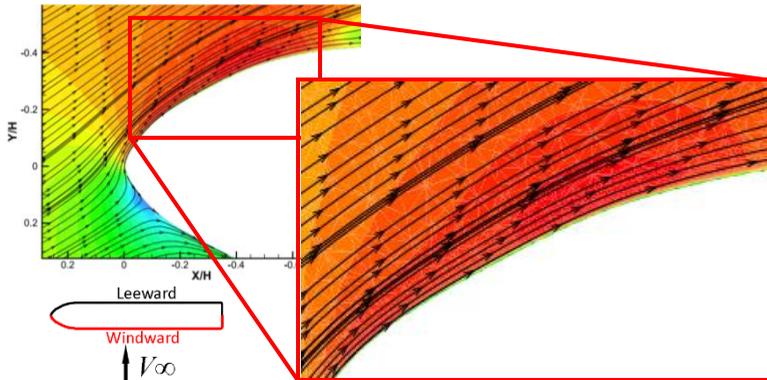
Seperti halnya pada variasi kecepatan angin yang lebih rendah, plot koefisien tekanan di bagian *leeward* kereta menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan di posisi sekitar  $X/H=-0,25$  pada grafik yang sebelumnya memiliki tren penurunan koefisien tekanan. Untuk memperjelas kondisi medan aliran pada bagian tersebut, dilakukan plot kontur koefisien tekanan seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut.



**Gambar 4. 18** Zoom Kontur Koefisien Tekanan di Bagian *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=20$  m/s.

Gambar 4.18 menunjukkan *zoom* kontur koefisien tekanan di bagian *leeward* kereta. Pada gambar tersebut terlihat terdapat dua area bertekanan rendah dengan warna biru tua yang berlokasi di posisi sekitar  $X/H=-0,1$  sampai  $-0,2$ ; dan pada posisi sekitar  $X/H=-0,35$  sampai  $-0,55$  di bagian *leeward nose*. *Streamline* pada bagian bertekanan rendah tersebut tidak menunjukkan adanya

aliran yang berputar. Hal ini menjadi indikasi bahwa dua titik bertekanan rendah yang terbentuk bukan merupakan *bubble separation*. Visualisasi pada bagian tersebut kemudian diperjelas dengan kontur kecepatan *dimensionless* seperti pada gambar 4.19 berikut ini.



**Gambar 4. 19** Zoom Kontur Kecepatan *Dimensionless* *Leeward* Kereta Kecepatan Angin  $u=20$  m/s

Gambar 4.19 menunjukkan *zoom* kontur kecepatan *dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) pada bagian *leeward* kereta pada variasi kecepatan angin  $u=20$  m/s. Pada bagian tersebut terlihat adanya area dengan kontur berwarna merah terang yang lebih pekat pada posisi yang sama dengan lokasi terjadinya penurunan tekanan. Hal tersebut menegaskan bahwa penurunan tekanan yang sebelumnya ditampilkan dapat terjadi karena adanya peningkatan kecepatan akibat profil *nose* kereta dan bukan merupakan daerah *wake*. Tidak terdapatnya daerah *wake* di bagian *leeward* *nose* kereta ini menjelaskan bahwa daerah bertekanan rendah di bagian *leeward* *nose* tersebut merupakan daerah tempat terjadinya akselerasi aliran akibat profil *nose* kereta dan bukan merupakan *bubble separation*.

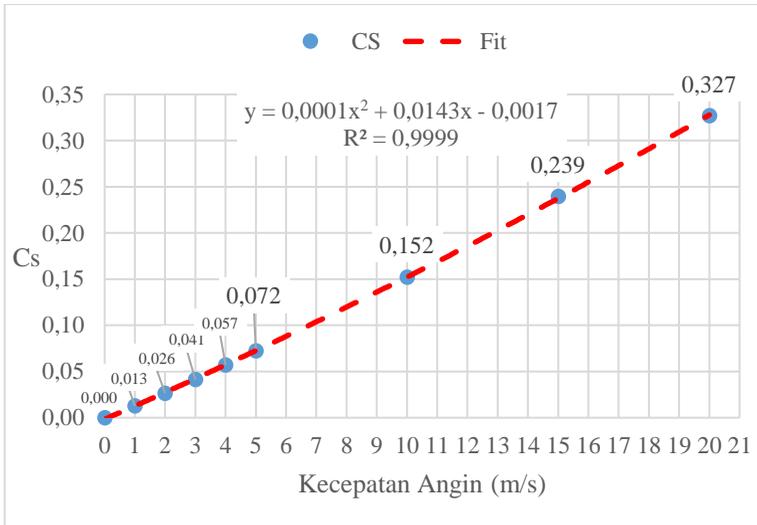
#### 4.4 Koefisien *Side Force*

*Side force* merupakan gaya samping yang dialami kereta akibat adanya *crosswind* dengan sudut datang tertentu. Terjadinya *side force* pada kereta, dapat terjadi akibat adanya perbedaan tekanan di bagian *wind* kereta (*upstream*) dan *lee* kereta (*downstream*) yang menyebabkan gaya ke arah lateral kereta. Pada penelitian ini, koefisien *side force* pada kereta akan bekerja ke arah sumbu Y negatif berdasarkan konfigurasi domain dan sistem koordinat yang digunakan seperti pada gambar 3.3. Besarnya koefisien *side force* tersebut dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.4 sebagai berikut.

$$C_{F_y} = \frac{F_y}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad 2.4$$

Luas area referensi yang digunakan pada persamaan tersebut merupakan proyeksi luas kereta ke arah lateral (ke arah sumbu Y), yaitu sebesar 67,57 m<sup>2</sup>. Sementara itu, kecepatan referensi  $V_\infty$  yang digunakan adalah merupakan kecepatan resultan dari kecepatan kereta  $v$  dan kecepatan angin  $u$  yang diperoleh berdasarkan persamaan 2.1.

Pada sub bab ini, akan dibahas mengenai pengaruh kecepatan angin terhadap koefisien *side force* yang dialami oleh kereta. Besarnya koefisien *side force* pada penelitian ini ditunjukkan seperti pada grafik 4.6.



**Grafik 4. 6** Koefisien *Side Force* vs Kecepatan Angin  $u$

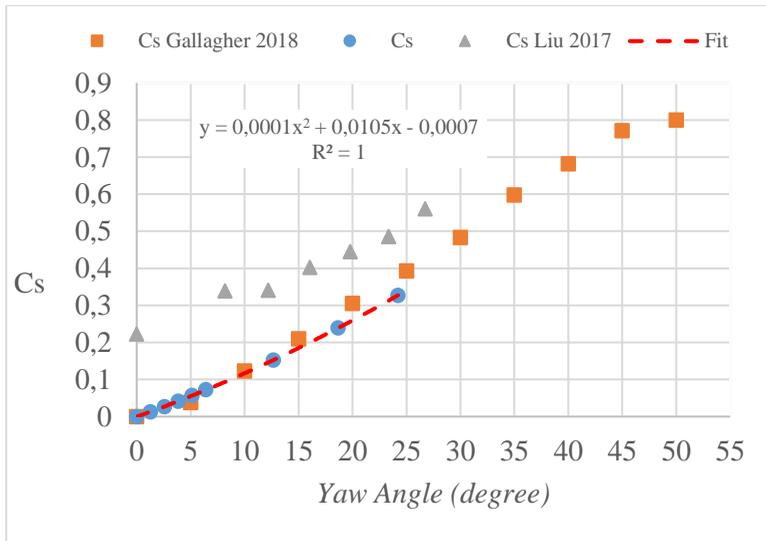
Grafik 4.6 menunjukkan koefisien *side force* vs kecepatan angin. Pada grafik tersebut terlihat bahwa nilai koefisien *side force* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin *crosswind*. Nilai koefisien *side force* terendah terdapat pada variasi kecepatan angin 0 m/s, yaitu sebesar 0. Sementara itu, nilai koefisien *side force* terbesar pada penelitian ini diperoleh pada variasi kecepatan angin tertinggi 20 m/s, yaitu sebesar 0,327.

Penelitian mengenai koefisien *side force* pada kereta pernah dilakukan oleh Liu, 2017. Penelitian tersebut dilakukan dengan membuat variasi kecepatan angin 0 hingga 60 m/s pada kecepatan kereta yang tetap sebesar 250 km/h atau 69,4 m/s. Pada penelitiannya, diperoleh hasil berupa koefisien *side force* yang mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin.

Selain itu, penelitian mengenai *crosswind* pada kereta juga pernah dilakukan oleh Gallagher, 2018 dengan menggunakan model kereta berukuran 1/25 pada *wind tunnel*. Pada penelitiannya,

Gallagher, 2018 melakukan pengujian pada kecepatan 13,2 m/s dan bilangan Reynold sebesar  $1,4 \times 10^5$ . Variasi dilakukan dengan mengatur kemiringan model kereta di *wind tunnel* sebesar  $0^\circ$  hingga  $50^\circ$  dengan penambahan sudut pada setiap pengujian sebesar  $5^\circ$ .

Adanya *crosswind* pada kereta akan menimbulkan sudut datang angin tertentu akibat resultan dari kecepatan kereta dan kecepatan angin. Hasil yang telah diperoleh Liu, 2017 dan Gallagher, 2018 dapat dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada penelitian ini dengan membuat plot koefisien *side force* terhadap *yaw angle* angin seperti yang terdapat pada grafik 4.7.



**Grafik 4. 7** Koefisien *Side Force* vs *Yaw Angle (degree)*

Grafik 4.7 menunjukkan plot koefisien *side force* terhadap *yaw angle* pada penelitian Liu, 2017, Gallagher, 2018, dan penelitian ini. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa koefisien *side force* pada penelitian ini mengalami peningkatan

seiring dengan bertambahnya *yaw angle* seperti pada penelitian-penelitian terdahulu. Koefisien *side force* yang dibandingkan secara bersebelahan menunjukkan bahwa peningkatan yang terjadi pada variasi tersebut memiliki gradien yang kurang lebih sama.

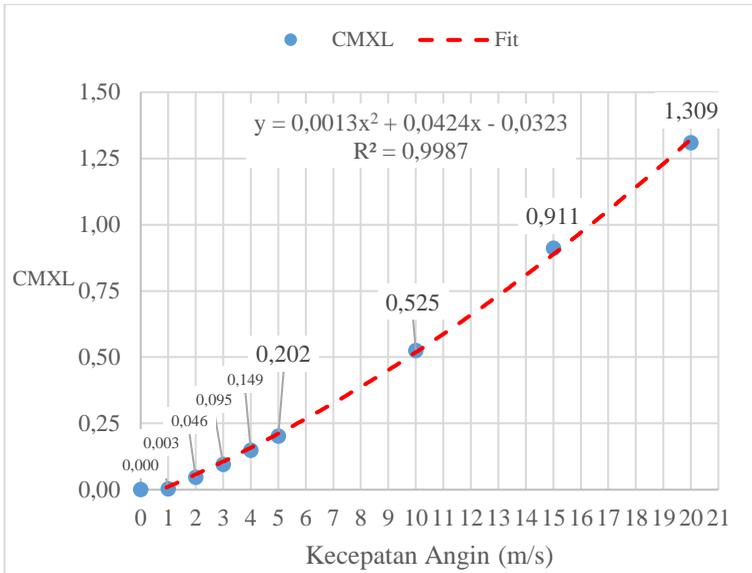
Peningkatan koefisien *side force* pada penelitian ini dapat diketahui juga berdasarkan grafik 4.2 hingga grafik 4.5. Grafik distribusi  $C_p$  di bagian *windward* dan *leeward* pada variasi kecepatan 5 m/s hingga 20 m/s tersebut menunjukkan bahwa perbedaan koefisien tekanan di bagian samping kereta semakin besar pada setiap peningkatan kecepatan angin *crosswind*, sehingga menimbulkan peningkatan pada gaya lateral yang dialami oleh kereta.

#### 4.5 Koefisien *Lee Rail Rolling Moment*

Kecenderungan kereta untuk mengalami kecelakaan terguling keluar dari lintasan dapat diketahui berdasarkan koefisien *lee rail rolling moment*. *Lee rail rolling moment* merupakan momen yang memutar kereta dengan sumbu putar di bagian *lee* roda kereta. Momen tersebut timbul karena adanya *side force* atau gaya samping yang bekerja pada arah lateral kereta ketika melaju di tengah *crosswind*. Koefisien *lee rail rolling moment* pada penelitian ini diperoleh dengan perumusan seperti pada persamaan 2.8.

$$C_{M_{XL}} = \frac{M_{XL}}{0.5\rho AhV_{\infty}^2} \quad 2.8$$

Pada sub bab ini, akan dibahas pengaruh kecepatan angin terhadap koefisien *lee rail rolling moment* yang dialami kereta ( $C_{M_{XL}}$ ) seperti yang terdapat pada grafik 4.8.

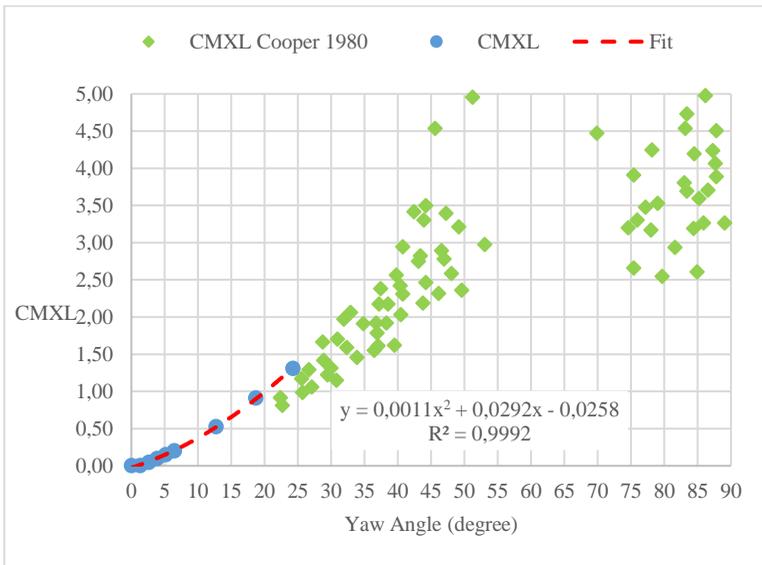


**Grafik 4. 8** Koefisien *Lee Rail Rolling Moment* vs Kecepatan Angin  $u$

Grafik 4.8 menunjukkan koefisien *lee rail rolling moment* vs kecepatan angin. Pada grafik tersebut terlihat bahwa koefisien *lee rail rolling moment* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin *crosswind*. Nilai terendah koefisien *lee rail rolling moment* adalah 0 pada variasi kecepatan 0 m/s. Sementara itu, nilai koefisien *lee rail rolling moment* tertinggi adalah 1,309 pada variasi kecepatan angin 20 m/s.

Momen merupakan hasil perkalian antara gaya dan jaraknya ke sumbu putar. Ketika kereta melaju di tengah efek *crosswind*, gaya lateral berupa *side force* akan bekerja pada kereta akibat perbedaan tekanan di bagian *windward* dan *leeward*. Pada sub bab sebelumnya telah diketahui bahwa koefisien *side force* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, akibatnya koefisien *lee rail rolling moment* yang bekerja pada kereta juga mengalami peningkatan pada variasi tersebut.

Penelitian mengenai koefisien *lee rail rolling moment* pada kereta yang terkena efek *crosswind* telah dilakukan sebelumnya oleh Cooper, 1980. Pada penelitian tersebut, Cooper melakukan pengujian pada model kereta dengan skala 1/5 di kondisi udara terbuka luar ruangan. Kereta tersebut dijalankan dengan kecepatan 55,9 m/s pada sejumlah kecepatan angin yang bervariasi di udara terbuka. Berdasarkan penelitian Cooper 1980, diketahui bahwa koefisien *lee rail rolling moment* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *yaw angle* yang terjadi akibat resultan kecepatan kereta dan kecepatan *crosswind*. Hasil tersebut dapat dibandingkan dengan penelitian ini dengan cara membuat plot koefisien *lee rail rolling moment* terhadap *yaw angle* seperti yang tampak pada grafik 4.9.



**Grafik 4. 9** Perbandingan Koefisien *Lee Rail Rolling Moment* vs *Yaw Angle (degree)*

Grafik 4.9 menunjukkan plot koefisien *lee rail rolling moment* terhadap *yaw angle* pada penelitian Cooper 1980 dan pada penelitian ini. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa nilai koefisien *lee rail rolling moment* pada penelitian ini dan pada penelitian yang dilakukan oleh Cooper mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya *yaw angle*.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V KESIMPULAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari simulasi *crosswind* pada kereta dengan variasi kecepatan angin 0 m/s hingga 20 m/s adalah:

1. Adanya fenomena *crosswind* pada kereta yang sedang melaju akan berdampak pada medan aliran di sekitar kereta.
  - a. Kontur aliran di sekitar kereta menunjukkan bahwa tanpa adanya *crosswind*, kecepatan dan tekanan aliran di bagian samping kiri dan kanan kereta tampak terdistribusi secara merata. Ketika fenomena *crosswind* terjadi, kecepatan pada bagian *leeward* kereta (*downstream* aliran) akan mengalami peningkatan dan tekanan di bagian *windward* kereta (*upstream* aliran) juga mengalami peningkatan.
  - b. Struktur aliran di daerah *wake* sekitar kereta yang terkena *crosswind* terlihat dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin. Dengan menggunakan *Q-criterion* pada *isosurface*  $Q=0,001$  terlihat struktur *vortex* yang terbentuk di bagian *leeward* kereta semakin tinggi intensitasnya dan area *vortex* semakin luas dengan meningkatnya kecepatan angin  $u$ . Pada variasi kecepatan angin 20 m/s struktur *vortex* yang terbentuk tampak memiliki luasan yang cukup besar dibandingkan dengan *vortex* yang terbentuk pada variasi kecepatan yang lebih rendah. Pada penelitian ini *vortex* yang terbentuk pada kereta yang terkena *crosswind* terbagi menjadi 3 berdasarkan lokasinya. *Vortex* pertama terbentuk di bagian *leeward* atap kereta, *vortex* kedua terbentuk di bagian *leeward nose* kereta, dan *vortex* ketiga terlihat terbentuk di bagian *underbody* bagian depan kereta.

2. Fenomena *crosswind* pada kereta yang sedang melaju akan memberi dampak pada koefisien *drag* yang dialami kereta. Pada penelitian ini terlihat kereta akan mengalami peningkatan koefisien *drag* yang signifikan pada variasi kecepatan angin 0 m/s hingga 5 m/s. Sementara itu pada variasi kecepatan angin 10 m/s hingga 20 m/s koefisien *drag* kereta mengalami penurunan yang dapat disebabkan karena bergesernya area *wake* yang semula berada di bagian belakang kereta menuju ke bagian *leeward* kereta. Pergeseran area *wake* tersebut menyebabkan area *wake* di belakang kereta lebih sempit, sehingga perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang kereta juga menjadi berkurang
3. Berdasarkan variasi kecepatan angin 0 m/s hingga 20 m/s, diketahui bahwa nilai koefisien *side force* yang dialami kereta mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Hal tersebut disebabkan karena timbulnya perbedaan tekanan di bagian *windward* dan *leeward* kereta yang semakin besar pada variasi kecepatan angin yang lebih tinggi. Pada penelitian ini koefisien tekanan di sekitar kereta diamati dengan melihat konturnya pada *plane*  $X/H=0,18$  hingga *plane*  $X/H=4,52$  dan dengan melakukan plot koefisien tekanan di permukaan bagian samping kereta. Kontur koefisien tekanan pada bagian *windward* dan *leeward* kereta di setiap *plane* tampak tidak simetris dengan koefisien yang lebih besar tampak terdapat di bagian *windward*. Plot nilai koefisien tekanan di permukaan yang kereta yang dilakukan pada penelitian ini juga menunjukkan hasil yang serupa, yaitu tekanan pada bagian *windward* kereta secara umum lebih besar daripada bagian *leeward* kereta. Tekanan yang tidak simetri pada bagian *windward* dan *leeward* tersebut menimbulkan adanya peningkatan gaya lateral yang dialami kereta.

4. Koefisien *lee rail rolling moment* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Peningkatan pada koefisien momen tersebut dapat terjadi akibat adanya peningkatan gaya lateral yang dialami kereta. Momen merupakan hasil perkalian antara gaya yang bekerja dan jarak gaya tersebut ke sumbu putarnya. Kereta yang terkena efek *crosswind* akan mengalami gaya lateral yang dikenal dengan istilah *side force*. Peningkatan pada koefisien *side force* kemudian berakibat pada peningkatan koefisien *lee rail rolling moment* yaitu momen yang memutar kereta dengan sumbu terletak di bagian *lee side* roda kereta.

## 5.2 Rekomendasi

Rekomendasi yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Diperlukan penelitian dengan metode eksperimen untuk validasi.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan model turbulensi yang lebih akurat, seperti misalnya *unsteady* DES atau *unsteady* IDDES berbasis  $k - \omega SST$ .
3. Diperlukan penelitian mengenai dampak *crosswind* pada kereta secara lebih lanjut dengan menggunakan standar keamanan EN14067-6 agar dapat diketahui tingkat keamanan kereta dan kecepatan kritis angin pada desain kereta semicepat Jakarta-Surabaya.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Baker, Chris. 2003. *A Framework For The Consideration Of The Effects Of Crosswinds On Trains*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics Vol. 123, pp. 130-142.
- Baker, Chris et al. 2019. *Train Aerodynamics – Fundamentals and Applications*. United Kingdom: Butterworth – Heinemann.
- Cooper, R.K. 1980. *The Probability of Trains Overturning in High Winds*. United Kingdom: Railway Technical Centre.
- Gallagher, M. et al. 2018. *Trains in Crosswinds – Comparison of full-scale on-train measurements, physical model tests and CFD Calculations*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics Vol 175, pp. 428-444.
- Liu, T., et. al. 2017. *A CFD analysis of the Aerodynamics of a High-speed Train Passing Through Windbreak Transition Under Crosswind*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 12:1 137-151.
- Matschke, G. dan Heine, C. 2002. *Full Scale Tests on Side Wind Effects on Trains – Evaluation of Aerodynamic Coefficients and Efficiency of Wind Breaking Devices*. Germany: Deutsche Bahn AG, Research and Technology Centre.
- Munoz-Paniagua, J., et. al. 2017. *Evaluation of RANS, SAS, IDDES Models For The Simulation of The Flow Around A High-Speed Train Subjected to Crosswind*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics Vol 171, pp. 50-66.
- Niu J., et. al. 2018. *Numerical Investigation Effects of The Aerodynamic Characteristics of High-Speed Trains of Different Lengths Under Crosswind With or Without*

*Windbreaks*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 12:2 195-151.

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

Suzuki, Minoru. et. al. 2003. *Aerodynamic Characteristics Of Train/ Vehicles Under Cross Winds*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 91 pp. 209-218.

Versteeg, H. K., dan Malalaskera, W. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. USA: John Wiley & Son, Inc.

## LAMPIRAN

### 1. Perhitungan P referensi

Kontur koefisien tekanan yang ditampilkan pada penelitian ini dibuat berdasarkan persamaan 3.1, yaitu

$$C_p = \frac{(P - P_{ref})}{0,5 \rho V^2} \quad 3.1$$

Dimana  $\rho$  adalah massa jenis udara sebesar 1,225 kg/m<sup>3</sup>,  $V_\infty$  adalah kecepatan resultan kereta ( $v$ ) dan kecepatan angin ( $u$ ), dan  $P_{ref}$  merupakan tekanan referensi yang nilainya dihitung berdasarkan nilai tekanan maksimum yang diperoleh pada satu model simulasi. Berikut ini adalah contoh perhitungan tekanan referensi untuk variasi kecepatan angin  $u=20$  m/s dan *yaw angle* ( $\Psi$ ) =24,22°.

Diketahui:

$$P \text{ maksimum} = 1453,754 \text{ Pa.}$$

$$\rho \text{ udara} = 1,225 \text{ kg/m}^3$$

Asumsi:

$$C_p \text{ maksimum} = 1$$

Penyelesaian:

Dengan memasukkan nilai  $P = P$  maksimum = 1453,754 Pa dan asumsi  $C_p$  maksimum=1 ke persamaan 3.1 maka

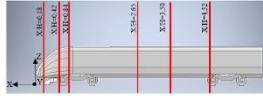
$$1 = \frac{(1453,754 - P_{ref})}{0,5 * 1,225 * 48,773^2}$$
$$P_{ref} = -3,26439 \text{ Pa}$$

Dengan cara yang sama, nilai tekanan referensi pada setiap variasi simulasi dapat diperoleh dan hasilnya ditunjukkan pada tabel 1 berikut

**Tabel 1** Tekanan Referensi

Kecepatan Kereta $v$ (m/s)	Kecepatan angin $u$ (m/s)	Kecepatan resultan $V_{\infty}$ (m/s)	<i>Yaw Angle</i> $\psi$ ( <i>degree</i> )	$P$ maksimum (Pa)	$P$ referensi (Pa)
44,44	0	44,44	0	1200	-9,635
44,44	1	44.45	1.28	1200.155	-10.024
44,45	2	44.48	2.576	1198.404	-13.409
44,46	3	44.54	3.86	1207.063	-8.022
44,47	4	44.61	5.14	1220.849	1.942
44,48	5	44.72	6.419	1214.573	-10.353
44,49	10	45.551	12.681	1254.375	-16.497
44,50	15	46.903	18.651	1349.151	1.718
44,51	20	48.773	24.22	1453.754	-3.264

2. Kontur Kecepatan



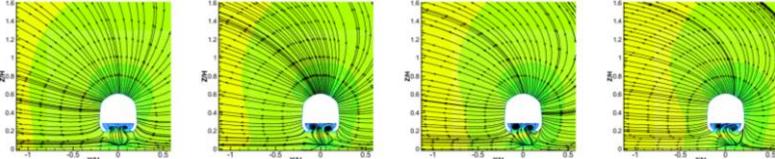
$u=5 \text{ m/s}$

$u=10 \text{ m/s}$

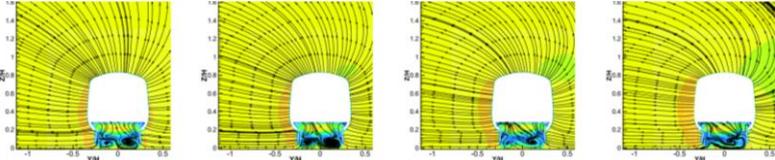
$u=15 \text{ m/s}$

$u=20 \text{ m/s}$

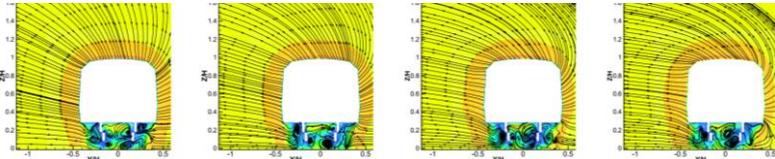
$x/H=0,18$



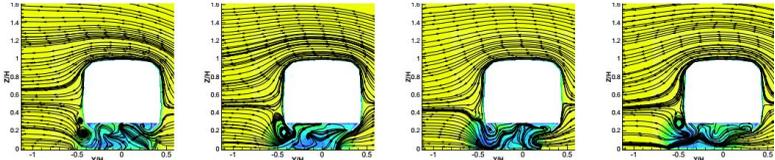
$x/H=0,42$



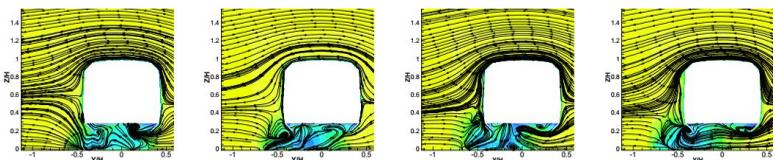
$x/H=0,84$



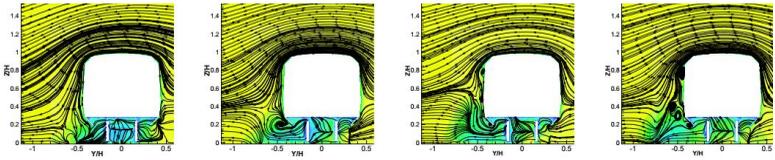
$x/H=2,65$



$x/H=3,50$

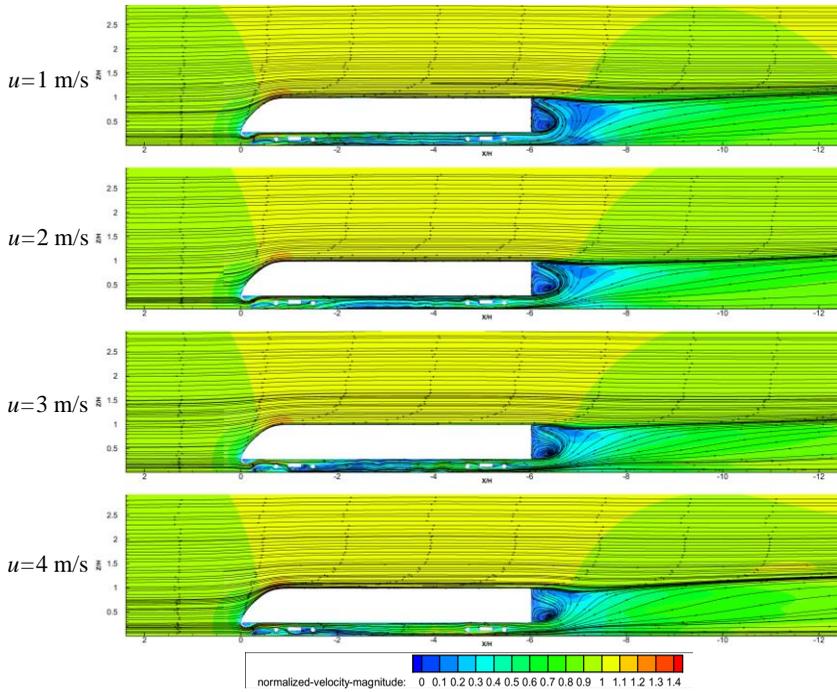


$x/H=4,52$

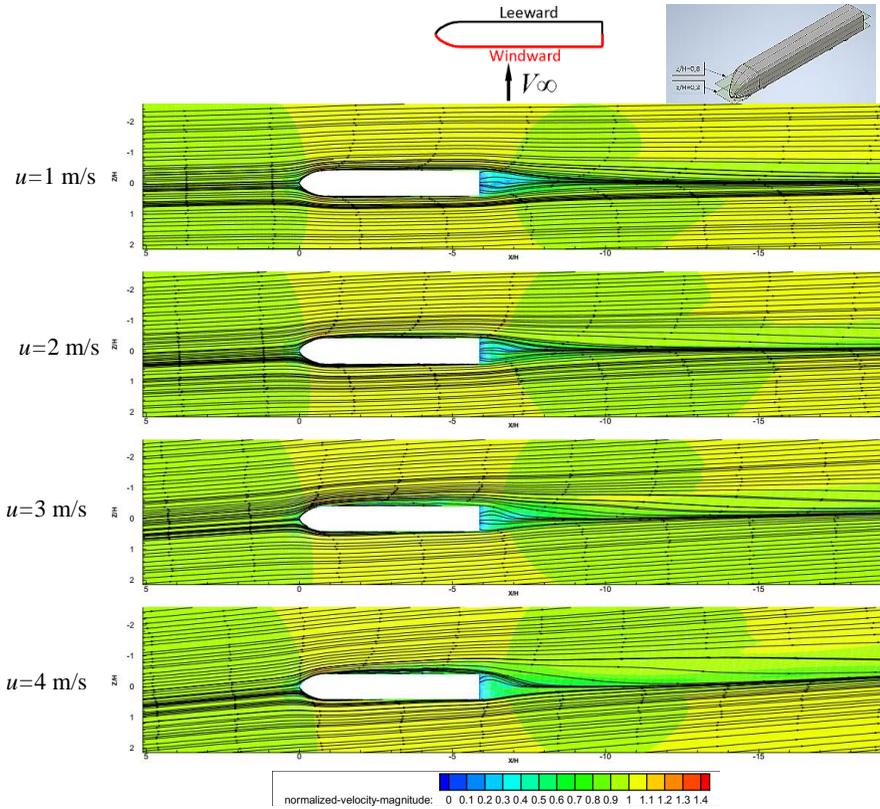


normalized-velocity-magnitude: 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4

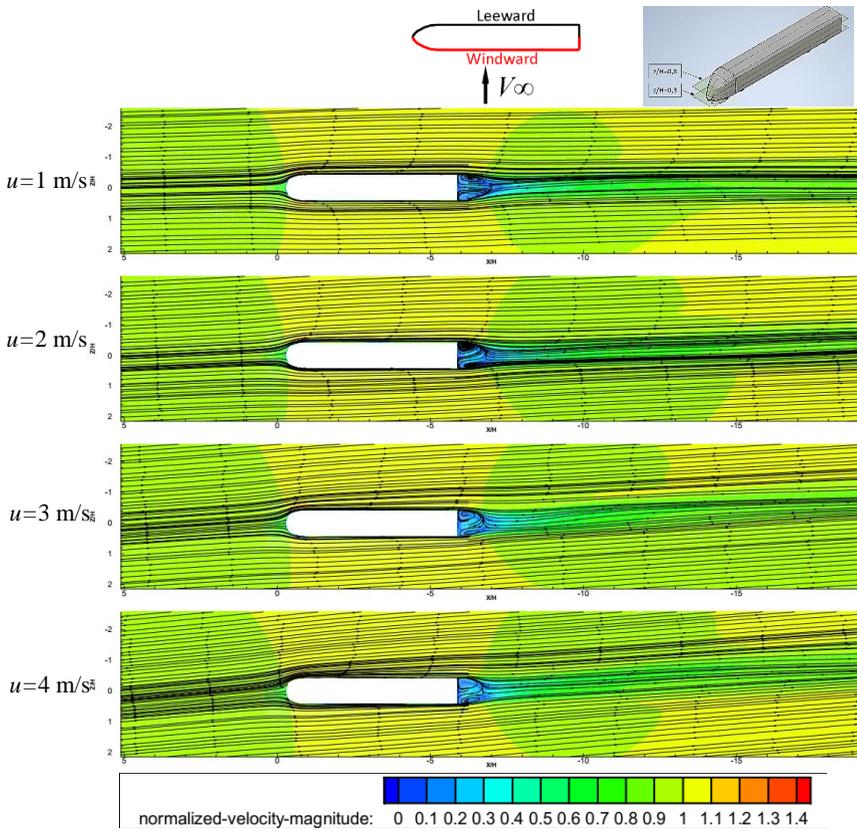
**Gambar 1.** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) pada Beberapa Plane Variasi Kecepatan Angin  $u=1 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$



**Gambar 2.** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) pada Midplane Variasi Kecepatan Angin  $u=1$  m/s – 4 m/s

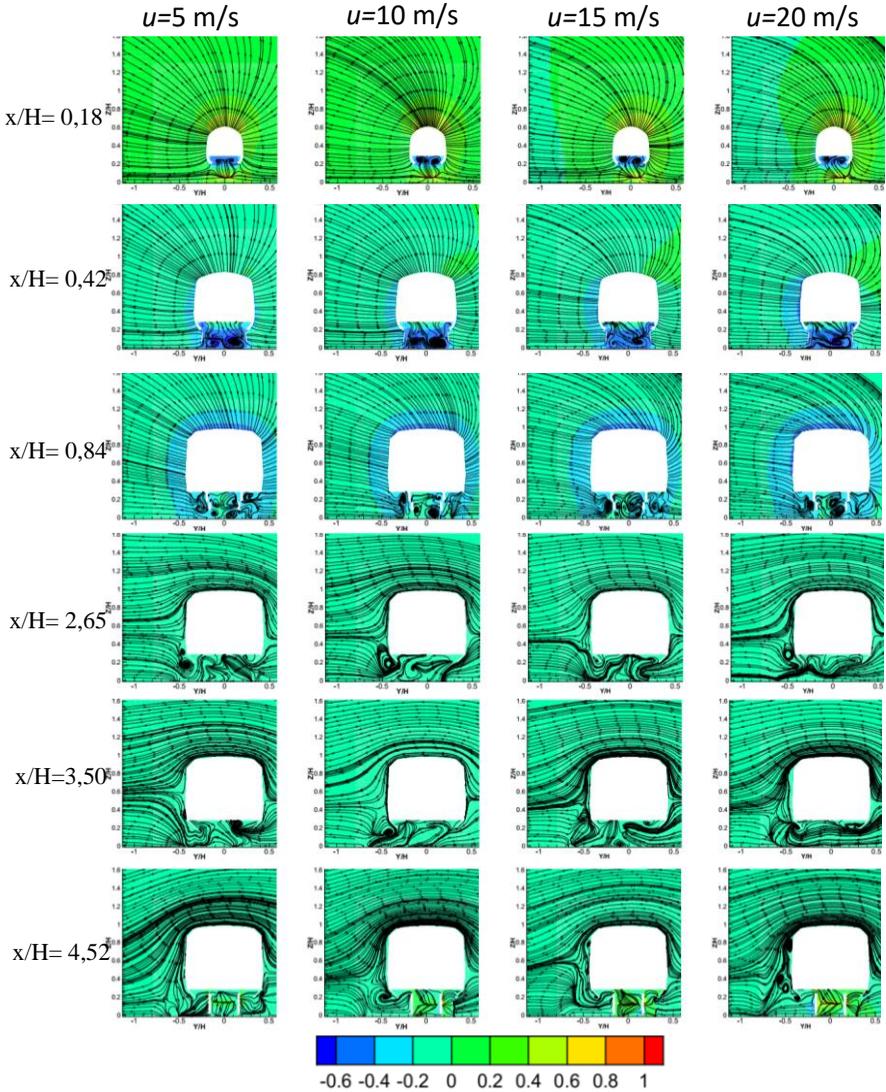
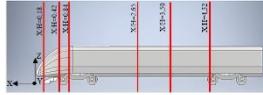


**Gambar 3.** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) pada Plane  $z/H=0,3$  Variasi Kecepatan Angin  $u=1 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$

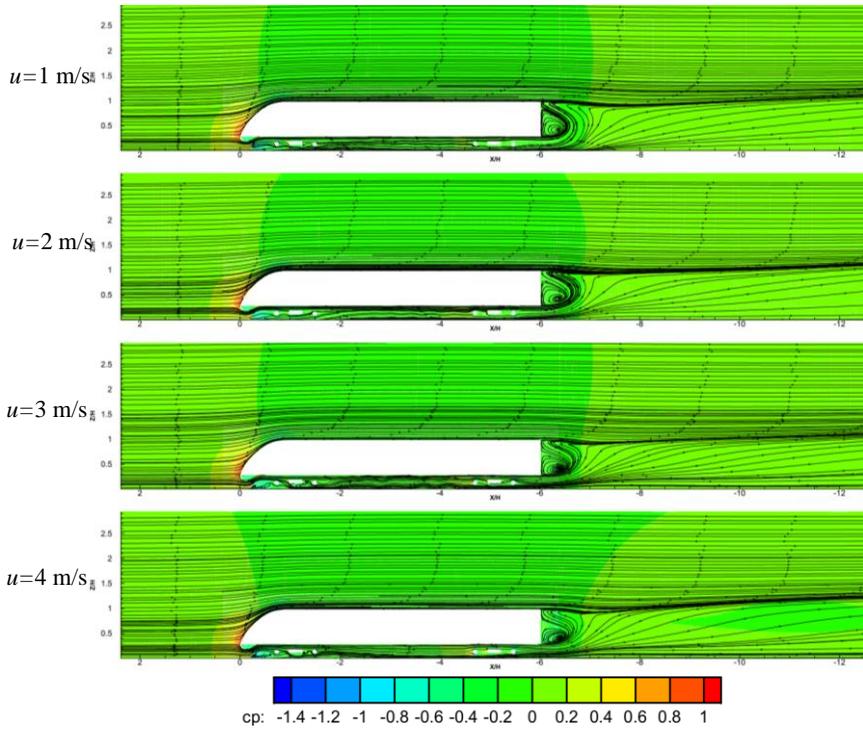


**Gambar 4.** Kontur Kecepatan *Dimensionless* ( $V/V_\infty$ ) pada Plane  $z/H=0,8$  Variasi Kecepatan Angin  $u=1$  m/s – 4 m/s

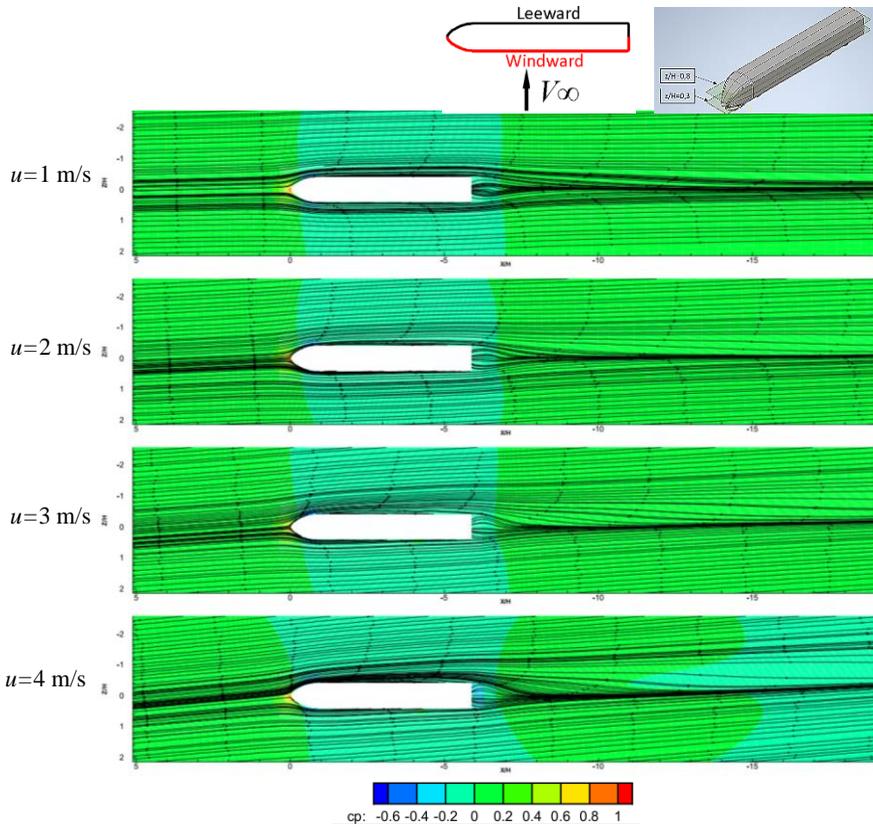
### 3. Kontur Tekanan



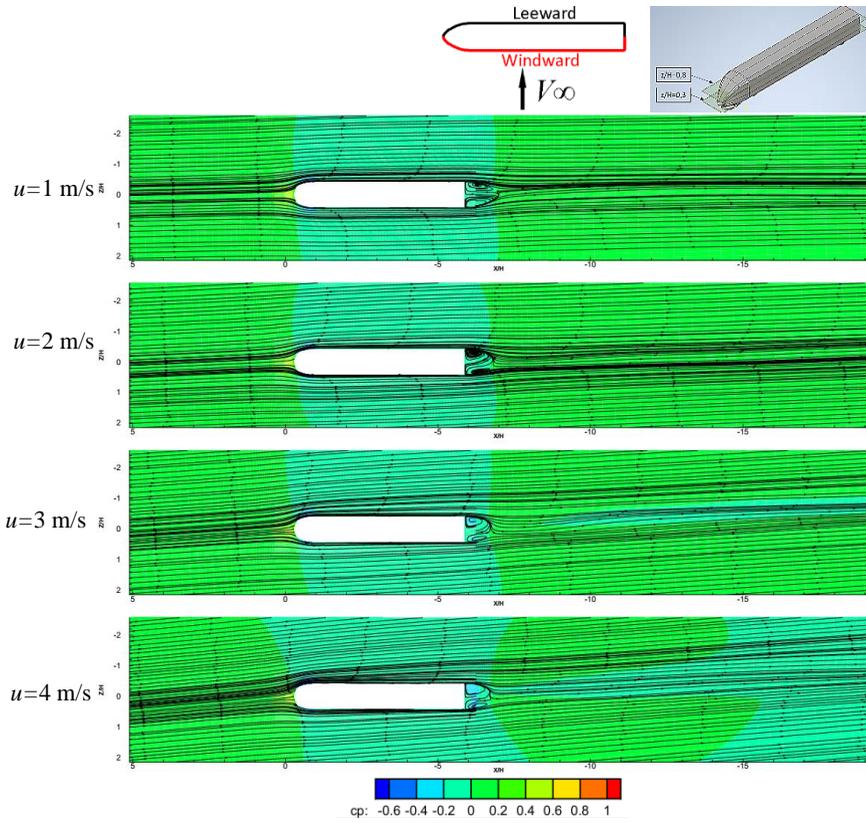
**Gambar 5.** Kontur Tekanan pada Beberapa Plane Variasi Kecepatan Angin  $u=1 \text{ m/s} - 4 \text{ m/s}$



**Gambar 6.** Kontur Tekanan pada *Midplane* Variasi Kecepatan Angin  $u=1$  m/s – 4 m/s



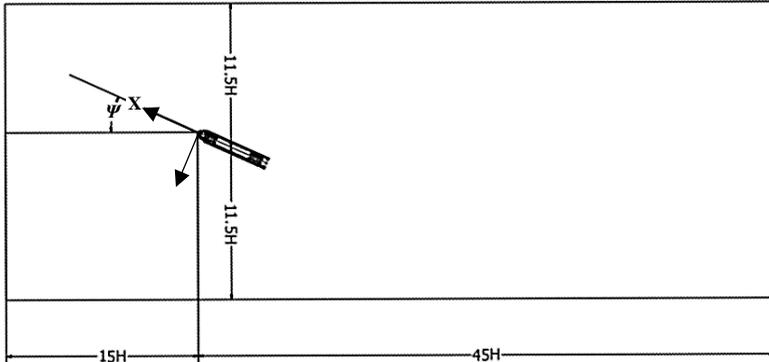
**Gambar 7.** Kontur Tekanan pada *Plane*  $z/H=0,3$  Variasi Kecepatan Angin  $u=1$  m/s – 4 m/s



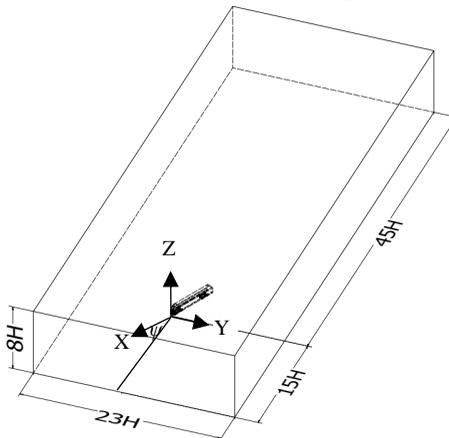
**Gambar 8.** Kontur Tekanan pada *Plane*  $z/H=0,8$  Variasi Kecepatan Angin  $u=1$  m/s – 4 m/s

#### 4. Koefisien *Drag* pada Berbagai Variasi Kecepatan

Koefisien *drag* merupakan gaya hambat yang bekerja pada benda yang bergerak di dalam fluida yang arahnya berlawanan arah gerak benda. Pada penelitian ini, koefisien *drag* bekerja ke arah sumbu X negatif seperti yang tampak pada gambar 3.3 berikut ini.



(a) Domain Pengujian Tampak Atas



(b) Tampak Isometri Domain Pengujian

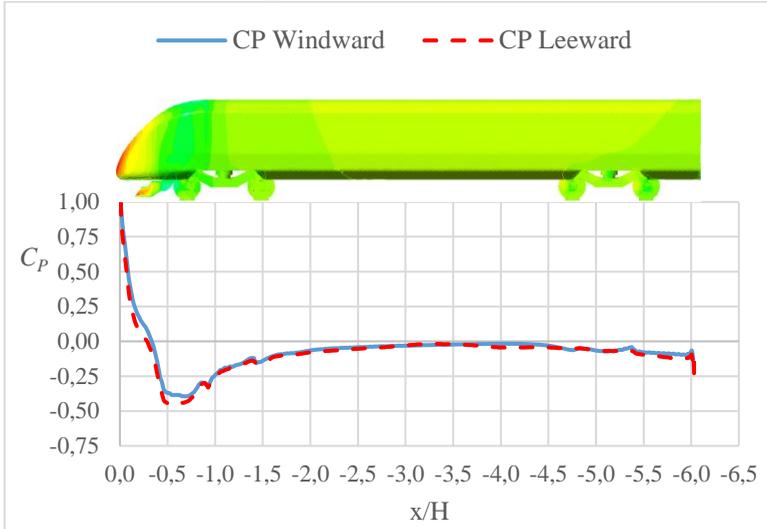
Gambar 3.3 (a) Domain Pengujian: (a) Tampak Atas. (b) Tampak Isometri

Gaya *drag* yang bekerja pada kereta yang sedang melaju akan terbagi menjadi dua jenis, yaitu *pressure drag* dan *viscous drag*. *Pressure drag* merupakan gaya *drag* yang terjadi akibat adanya perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang kereta. Sementara itu, *viscous drag* atau *skin friction* merupakan gaya *drag* yang terjadi akibat gaya gesek fluida dengan permukaan kereta. Pada penelitian ini, kontribusi gaya *drag* akibat *pressure* dan akibat *skin friction* tersebut ditunjukkan seperti pada tabel 2 berikut ini.

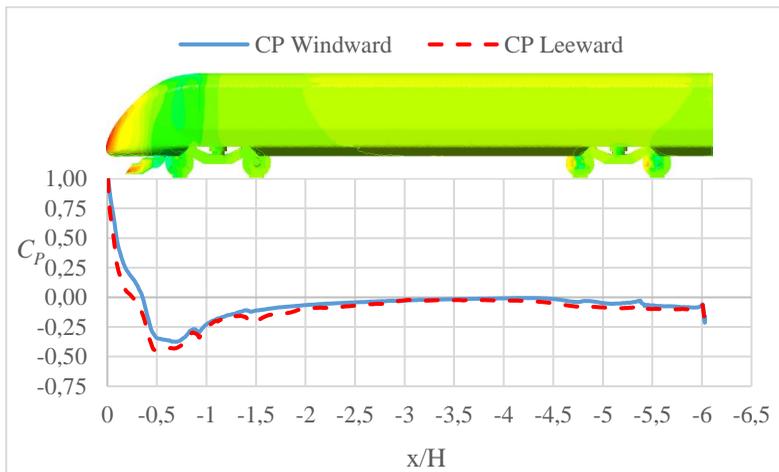
**Tabel 2.** Koefisien *Drag* pada Variasi Kecepatan  $u=0-20$  m/s

Kecepatan angin $u$ (m/s)	Kecepatan Resultan $V_{\infty}$ (m/s)	<i>Yaw Angle</i> (degree)	$C_D$				$C_D$ Total
			<i>Viscous</i>		<i>Pressure</i>		
			<i>Upper</i>	<i>Underbody</i>	<i>Upper</i>	<i>Underbody</i>	
0	44.44	0	0.033	0.009	0.136	0.136	0.314
1	44.45	1.28	0.033	0.009	0.136	0.144	0.322
2	44.48	2.58	0.033	0.010	0.140	0.164	0.347
3	44.54	3.86	0.034	0.010	0.141	0.183	0.369
4	44.61	5.14	0.034	0.010	0.146	0.198	0.387
5	44.72	6.42	0.034	0.010	0.152	0.204	0.400
10	45.55	12.68	0.035	0.011	0.149	0.206	0.400
15	46.90	18.65	0.036	0.012	0.112	0.209	0.369
20	48.77	24.22	0.035	0.012	0.073	0.205	0.325

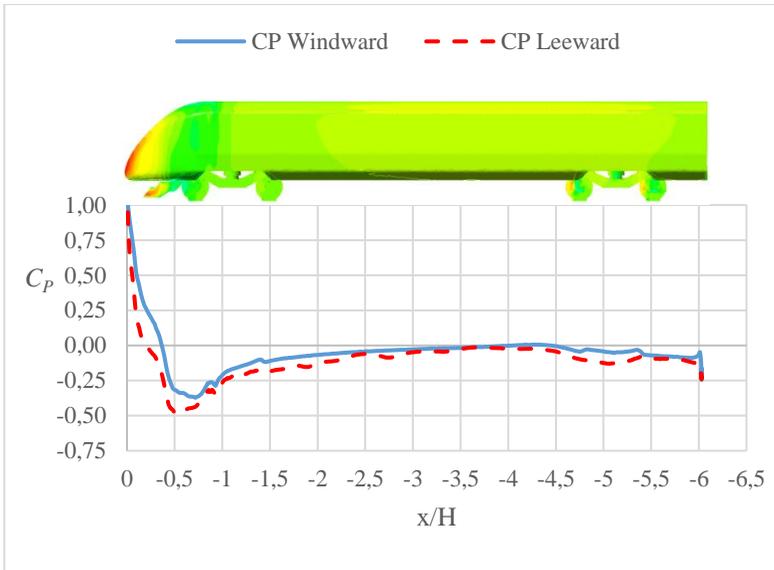
## 5. Koefisien Tekanan pada Permukaan



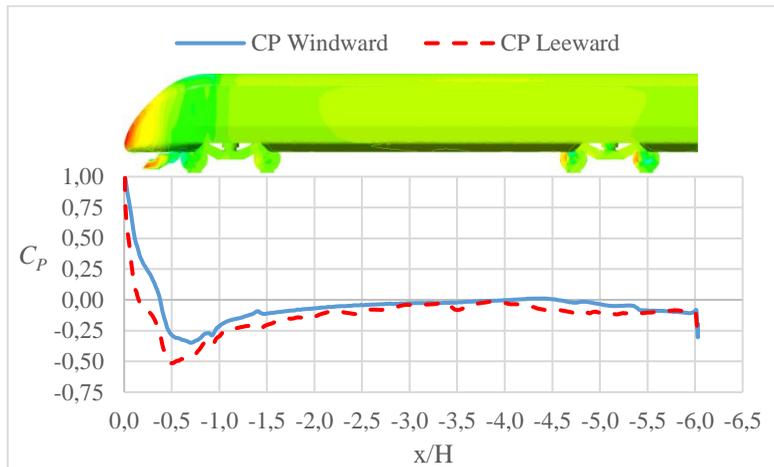
**Grafik 1.** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=1$  m/s



**Grafik 2.** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=2$  m/s



**Graphik 3.** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=3$  m/s



**Graphik 4.** Distribusi  $C_p$  pada Bagian Samping Kereta Variasi Kecepatan Angin  $u=4$  m/s

#### 6. Koefisien *Side Force* pada Berbagai Variasi Kecepatan

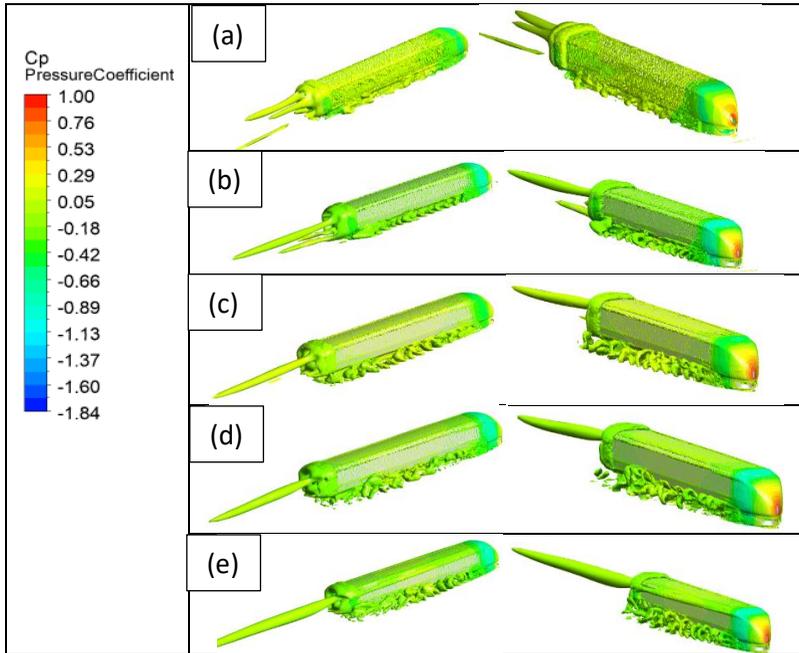
*Side force* merupakan gaya lateral pada kereta yang terjadi akibat adanya angin yang datang dengan sudut tertentu menuju kereta. Pada penelitian ini, *side force* didefinisikan dengan arah ke sumbu Y negatif berdasarkan konfigurasi domain dan sistem koordinat yang digunakan seperti pada gambar 3.3.

Berdasarkan plot kontur koefisien tekanan di sekitar kereta dan plot koefisien tekanan di permukaan bagian samping kereta, diketahui bahwa adanya *crosswind* dapat mengakibatkan tekanan di sisi samping kereta menjadi tidak terdistribusi secara merata. Tekanan pada bagian *windward* (*upstream* aliran) cenderung lebih tinggi daripada tekanan di bagian *leeward* (*downstream* aliran). Adanya perbedaan tekanan tersebut kemudian mengakibatkan timbulnya gaya lateral atau *side force*. Hal tersebut terlihat dari tabel 3 berikut ini. Pada tabel berikut ini terlihat bahwa, kontribusi tekanan di sekitar kereta berkontribusi lebih besar daripada *viscous* atau *skin friction* terhadap koefisien *side force* yang terjadi pada kereta.

**Tabel 3.** Koefisien *Side Force* pada Variasi Kecepatan  
 $u=0-20$  m/s

Kecepatan angin $u$ (m/s)	Kecepatan Resultan $V_{\infty}$ (m/s)	<i>Yaw Angle</i> (degree)	$C_s$				$C_s$ Total
			<i>Viscous</i>		<i>Pressure</i>		
			<i>Upper</i>	<i>Underbody</i>	<i>Upper</i>	<i>Underbody</i>	
0	44.44	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	44.45	1.28	0.000	0.000	0.010	0.003	0.013
2	44.48	2.58	0.000	0.000	0.021	0.005	0.026
3	44.54	3.86	0.000	0.000	0.032	0.010	0.041
4	44.61	5.14	0.000	0.000	0.043	0.014	0.057
5	44.72	6.42	0.000	0.000	0.054	0.019	0.073
10	45.55	12.68	0.001	0.000	0.118	0.033	0.152
15	46.9	18.65	0.001	0.000	0.188	0.051	0.239
20	48.77	24.22	0.001	0.000	0.258	0.068	0.327

## 7. Struktur Aliran



**Gambar 9.** Struktur Aliran di Sekitar Kereta pada Variasi Kecepatan:

- (a) Kecepatan  $u=0$  m/s. (b) Kecepatan  $u=1$  m/s. (c) Kecepatan  $u=2$  m/s. (d) Kecepatan  $u=3$  m/s. (e) Kecepatan  $u=4$  m/s.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



**Timothy Wibisono** lahir di Bekasi, 13 Juli 1998, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Peter Susanto dan Aris Lestari. Penulis mengawali pendidikan formal di TK Marsudirini, Kota Bekasi dan melanjutkan pendidikan SD Marsudirini, Kota Bekasi pada tahun 2004-2010. Pendidikan menengah penulis diambil di SMP Marsudirini, Kota Bekasi pada tahun 2010-2013 dan dilanjutkan ke SMA Marsudirini, Kota Bekasi pada tahun 2013-2016. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan perguruan tinggi pada tahun 2016 di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Pada masa perkuliahan, penulis aktif di organisasi Mesin Music Club yaitu sebagai staff divisi event periode 2017-2018, dan staff ahli divisi HRD periode 2018-2019. Pengalaman menyenangkan dan menantang telah dilalui pada saat berorganisasi di MMC maupun saat berkegiatan di Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida sebagai asisten praktikum. Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak orang. Untuk informasi dan kepentingan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui alamat surat elektronik: [timothy.wibisono@hotmail.com](mailto:timothy.wibisono@hotmail.com).