

**TUGAS AKHIR - SF184801**

# **ANALISIS AERODINAMIS KERETA API DAN TINGKAT TEKANAN BUNYI MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS FLUENT**

**MOHAMMAD ARSYI RAMADHON**

**NRP 5001211074**

Dosen Pembimbing

**Dr. Suyatno, M.Si.**

**NIP 197606202002121004**

**Program Studi Sarjana**

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



**TUGAS AKHIR - SF184801**

**ANALISIS AERODINAMIS KERETA API DAN TINGKAT  
TEKANAN BUNYI MENGGUNAKAN SOFTWARE  
ANSYS FLUENT**

**MOHAMMAD ARSYI RAMADHON**

NRP 5001211074

Dosen Pembimbing

**Dr. Suyatno, M.Si.**

NIP 197606202002121004

**Program Studi Sarjana**

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



**FINAL PROJECT - SF184801**

# **ANALYSIS OF TRAIN AERODYNAMICS AND SOUND PRESSURE LEVELS USING ANSYS FLUENT SOFTWARE**

**MOHAMMAD ARSYI RAMADHON**

**NRP 5001211074**

Advisor

**Dr. Suyatno, M.Si.**

**NIP 197606202002121004**

**Study Program Physics**

Department of of Physics

Faculty of Science and Data Analytcs

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS AERODINAMIS KERETA API DAN TINGKAT TEKANAN BUNYI MENGUNAKAN SOFTWARE ANSYS FLUENT

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada

Program Studi S-1 Fisika

Departemen Fisika

Fakultas Sains dan Analitika Data

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **MOHAMMAD ARSYI RAMADHON**

NRP. 50012011074

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Suyatno, M.Si.

Pembimbing

(.....)

2. Dr. Ali Yunus Rohedi, M.T.

Penguji

(.....)

3. Drs. Bachtera Indarto, M.Si.

Penguji

(.....)



## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Mohammad Arsyi Ramadhon / 5001211074  
Program studi : S1-Fisika  
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Suyatno, M. Si. / 197606202002121004

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS AERODINAMIS KERETA API DAN TINGKAT TEKANAN BUNYI MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS FLUENT” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 24 Juli 2025

Mengetahui  
Dosen Pembimbing

  
Dr. Suyatno, M. Si.  
NIP. 197606202002121004

Mahasiswa

  
Mohammad Arsyi Ramadhon  
NIP. 5001211074

## ABSTRAK

### ANALISIS AERODINAMIS KERETA API DAN TINGKAT TEKANAN BUNYI MENGUNAKAN SOFTWARE ANSYS FLUENT

**Nama Mahasiswa / NRP** : **Mohammad Arsyi Ramadhon / 5001211074**  
**Departemen** : **Fisika FSAD - ITS**  
**Dosen Pembimbing** : **Dr. Suyatno, M.Si.**

#### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa aerodinamis dan karakteristik tekanan bunyi (*Sound Pressure Level*) pada kereta api menggunakan pendekatan numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) melalui perangkat lunak ANSYS Fluent. Studi ini mencakup empat tujuan utama: mengevaluasi distribusi tekanan pada kontur bodi kereta, menentukan nilai koefisien drag ( $C_d$ ) dan lift ( $C_l$ ), serta membandingkan hasil simulasi SPL dengan data eksperimental. Dua desain kereta dengan konfigurasi geometri yang berbeda digunakan untuk melihat pengaruh bentuk bodi terhadap performa aerodinamika dan akustik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa akumulasi tekanan tinggi di bagian frontal kereta dan tekanan rendah di bagian ekor menyebabkan peningkatan gaya hambat dan potensi instabilitas aliran. Desain kereta kedua dengan bentuk lebih streamline menunjukkan nilai  $C_d$  dan  $C_l$  yang lebih rendah, mengindikasikan efisiensi aerodinamis yang lebih baik. Selain itu, simulasi SPL menggunakan metode *Ffowcs Williams–Hawkings* menunjukkan korelasi signifikan antara daerah *wake turbulent* dengan peningkatan tekanan bunyi. Hasil simulasi SPL mendekati nilai eksperimen yang diukur secara langsung pada sisi bodi kereta, dengan deviasi yang wajar. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa desain geometrik kereta memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa aerodinamis dan tingkat tekanan bunyi. Temuan ini dapat dijadikan dasar dalam pengembangan desain kereta api yang efisien, stabil, dan ramah lingkungan dari segi akustik. Setelah dilakukan simulasi dan pengukuran, didapatkan hasil simulasi, menampilkan hasil kontur tekanan terbesar pada desain kereta api pertama sebesar 992 Pa pada kecepatan 120 km/jam. Sedangkan desain kereta api kedua memiliki tekanan terbesar sebesar 444 Pa. Koefisien hambat ( $C_d$ ) terbesar pada desain pertama sebesar 1,3, koefisien hambat desain kedua 0,5. Koefisien angkat ( $C_l$ ) desain pertama terbesar sebesar 0,024 koefisien angkat desain kedua 0,022. Pada simulasi, nilai SPL pada belakang kereta desain kedua sebesar 66 dB pada kecepatan 120 km/jam. Pada hasil pengukuran, nilai SPL pada samping kereta sebesar 107 dB pada kecepatan 118 km/jam. Perbedaan nilai SPL tersebut terjadi karena perbedaan desain kereta dan letak posisi mikrofon.

**Kata kunci:** Aerodinamis, Bernoulli, Tingkat Tekanan Bunyi, Turbulensi.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF TRAIN AERODYNAMICS AND SOUND PRESSURE LEVELS USING ANSYS FLUENT SOFTWARE

**Student Name / NRP** : **Mohammad Arsyi Ramadhon / 5001211074**  
**Department** : **Fisika FSAD - ITS**  
**Advisor** : **Dr. Suyatno, M. Si.**

#### Abstract

This study aims to analyze the aerodynamic performance and sound pressure characteristics (SPR) of a train using a numerical approach based on Computational Fluid Dynamics (CFD) through ANSYS Fluent software. This study covers four main objectives: evaluating the pressure distribution on the train body contour, determining the drag ( $C_d$ ) and lift ( $C_l$ ) coefficients, and comparing the SPR simulation results with experimental data. Two train designs with different geometric configurations are used to observe the effect of body shape on aerodynamic and acoustic performance. The simulation results show that the accumulation of high pressure in the frontal part of the train and low pressure in the tail causes an increase in drag and potential flow instability. The second train design with a more streamlined shape shows lower  $C_d$  and  $C_l$  values, indicating better aerodynamic efficiency. In addition, SPR simulation using the Ffowcs Williams–Hawkings method shows a significant correlation between the turbulent wake region and the increase in sound pressure. The SPR simulation results are close to the experimental values measured directly on the side of the train body, with a reasonable deviation. Overall, this study shows that the geometric design of the train has a significant influence on aerodynamic performance and sound pressure levels. These findings can be used as a basis for developing efficient, stable, and environmentally friendly train designs in terms of acoustics. After simulations and measurements, the simulation results were obtained, showing the results of the largest pressure contour in the first train design of 992 Pa at a speed of 120 km/h. While the second train design has the largest pressure of 444 Pa. The largest drag coefficient ( $C_d$ ) in the first design is 1.3, the second design drag coefficient is 0.5. The largest lift coefficient ( $C_l$ ) of the first design is 0.024, the second design lift coefficient is 0.022. In the simulation, the SPL value at the rear of the second design train is 66 dB at a speed of 120 km/h. In the measurement results, the SPL value at the side of the train is 107 dB at a speed of 118 km/h. The difference in SPL values occurs due to differences in train design and microphone position.

**Keywords:** *Aerodynamic, Bernoulli, Sound Pressure Level, Turbulence.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisis Aerodinamis Kereta Api dan Tingkat Tekanan Bunyi Menggunakan Software Ansys Fluent”. Penulisan tugas akhir ini menjadi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak inspirasi, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Suyatno, M. Si. selaku dosen pembimbing penelitian tugas akhir ini yang selalu memberikan wawasan dan semangat untuk peneliti sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik dan tepat waktu.
2. Keluarga besar, terutama kedua orang tua dan saudara, yang telah memberikan doa, materi, serta dukungan yang selalu menyertai setiap langkah penulis. Jika tanpanya, penulis tidak dapat mencapai titik ini.
3. Teman-teman tim kerja praktek INKA, Myra Rizki Ardelia, Siska Yulinda Chesara, dan Aisya Dyah Habsari atas kebersamaan, kerja sama dan dukungannya.
4. Teman-teman penghuni akustik terutama, Mas Mehdi Almahdani, Mas Naufal, Mas Yusron, Nabaha Putri Deswanti, Nico Firman, Khofifah Izzatur, Wahyu Satria, Puput Indira, dan Nesya Azzahra yang telah memberikan saya izin untuk menempati lab akustik sebagai tempat penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
5. Teman-teman dekat seperti Ahmad Andi, Hudan Firdaus, Jona Maruli yang telah membantu penulis dalam melewati masa-masa kuliah dengan penuh cerita.
6. Teman-teman Gluon (Fisika 2021) yang telah menjadi rumah dan keluarga bagi saya selama menjalani perkuliahan di Fisika ITS.
7. Semua pihak yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari atas keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki, oleh karena itu penulis akan menerima kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 24 Juli 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL .....	ix
BAB 1        PENDAHULUAN .....	1
1.1      Latar Belakang.....	1
1.2      Rumusan Masalah .....	2
1.3      Batasan Masalah.....	2
1.4      Tujuan.....	2
1.5      Manfaat.....	2
BAB 2        TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1      Hasil Penelitian Terdahulu .....	4
2.2      Dasar Teori .....	4
2.2.1      Kereta Api.....	4
2.2.2      Fluida .....	5
2.2.3      Sifat-sifat Fluida (Udara).....	6
2.2.4      Kebisingan .....	7
2.2.5      Aerodinamis .....	7
2.2.6      Teorema Archimedes.....	10
2.2.7      Teorema Bernoulli.....	11
2.2.8      Dinamika Aliran Fluida Komputasi ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ) .....	12
BAB 3        METODOLOGI.....	14
3.1      Metode Yang Digunakan.....	14
3.1.1 <i>Preprocessing</i> .....	14
3.1.2 <i>Processing</i> atau <i>Solving</i> .....	16
3.1.3 <i>Postprocessing</i> .....	16
3.2      Urutan Pelaksanaan Penelitian .....	16
BAB 4        HASIL DAN PEMBAHASAN.....	18
4.1      Hasil Penelitian.....	18
4.1.1      Analisis Desain Kereta Api .....	18
4.1.2      Analisis <i>Meshing</i> Kereta Api.....	19
4.1.3      Analisis Data Kereta Api.....	20

4.1.4	Analisis Tekanan Permukaan Badan Kereta Api .....	20
4.1.5	Analisis Gaya Aerodinamis .....	21
4.1.6	Analisis Tingkat Tekanan Bunyi .....	24
4.2	Pembahasan .....	26
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	30
5.1	Kesimpulan.....	30
5.2	Saran .....	30
	DAFTAR PUSTAKA .....	31
	LAMPIRAN.....	33
	BIODATA PENULIS .....	52

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Lokomotif dan kereta penumpang .....	5
Gambar 2. 2 Tingkat tekanan suara sebagai fungsi kecepatan pada (segitiga) mobil listrik terbaru, (lingkaran) mobil listrik lama, dan (persegi) kendaraan trailer.....	8
Gambar 2. 3 Gaya hambat pada mobil .....	9
Gambar 2. 4 Distribusi koefisien gaya angkat ( <i>lift force</i> ) .....	10
Gambar 2. 5 Benda terapung (kiri), benda melayang (tengah), dan benda tenggelam (kanan). .....	11
Gambar 2. 6 Aliran gaya angkat pada pesawat .....	12
Gambar 2. 7 Diagram blok simulasi dengan CFD .....	13
Gambar 2. 8 Diagram simulasi Fluent pada ANSYS Workbench 24.2 .....	13
Gambar 3. 1 Domain Pemodelan Bodi (3D Flow) .....	15
Gambar 3. 2 Diagram Alir.....	17
Gambar 4. 1 Geometri kereta api pertama.....	18
Gambar 4. 2 Geometri kereta api kedua .....	18
Gambar 4. 3 Meshing kerete api kedua .....	19
Gambar 4. 4 Meshing kerete api kedua .....	19
Gambar 4. 5 Hasil <i>pressure contour</i> tampak depan pada kereta api pertama .....	20
Gambar 4. 6 Hasil <i>pressure contour</i> dan <i>streamline</i> tampak depan pada kereta api kedua .....	20
Gambar 4. 7 Grafik tekanan minimum terhadap kecepatan .....	21
Gambar 4. 8 Grafik tekanan maksimum terhadap kecepatan.....	21
Gambar 4. 9 Grafik gaya aerodinamis terhadap variasi kecepatan .....	22
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan antara koefisien hambat terhadap kecepatan kereta .....	23
Gambar 4. 11 Grafik perbandingan antara koefisien angkat terhadap kecepatan kereta .....	24
Gambar 4. 12 Kontur tingkat tekanan bunyi pada desain kedua .....	24
Gambar 4. 13 Grafik tingkat tekanan bunyi terhadap frekuensi pada kereta 2 .....	25
Gambar 4. 14 Grafik kecepatan kereta terhadap waktu.....	25
Gambar 4. 15 Grafik SPL terhadap waktu .....	26

## DAFTAR TABEL

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan sektor vital dalam kehidupan modern yang memungkinkan mobilitas manusia dalam mendukung berbagai aktivitas sosial dan ekonomi. Untuk memenuhi kebutuhan mobilitas tersebut, berbagai moda transportasi massal diciptakan dengan kapasitas dan desain yang bervariasi, sesuai dengan tuntutan efisiensi, kenyamanan, dan keselamatan. Kereta api, sebagai salah satu moda transportasi massal, memainkan peran yang sangat penting dalam mengatasi tantangan kemacetan dan meningkatkan kapasitas transportasi dalam suatu daerah. Keberadaannya menjadi solusi yang efektif untuk mengurangi kepadatan lalu lintas, terutama di kota-kota besar dengan tingkat mobilitas tinggi (Timothy, 2020).

Pada akhir dekade ini, tuntutan akan kenyamanan berkendara menjadi salah satu pertimbangan utama bagi penumpang kereta api. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi kenyamanan adalah kinerja aerodinamis kereta, yang secara langsung berhubungan dengan desain badan kereta. Desain aerodinamis yang baik dapat mengurangi hambatan udara (*drag*), meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi tingkat kebisingan dan getaran yang mengganggu kenyamanan penumpang (Groenesteijn, 2014). Selain itu, desain aerodinamis yang optimal juga berpengaruh terhadap kecepatan dan stabilitas kereta yang beroperasi dalam kondisi kecepatan tinggi.

Aerodinamika merupakan cabang ilmu yang mempelajari interaksi antara aliran fluida, dalam hal ini udara, dengan objek yang bergerak di dalamnya, seperti kereta. Tujuan utama dari desain aerodinamis pada kereta adalah untuk meminimalkan hambatan udara (*drag*) yang timbul akibat gesekan antara permukaan kereta dan aliran udara. Hambatan udara yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar, penurunan efisiensi energi, dan mengganggu stabilitas kendaraan. Selain itu, turbulensi yang dihasilkan oleh aliran udara di sekitar kereta dapat memicu peningkatan *sound pressure level* (SPL), yang merupakan ukuran tekanan suara yang dapat mengganggu kenyamanan penumpang dan mencemari lingkungan sekitar (Nazri, 2019).

Penelitian mengenai aerodinamika kereta api sangat penting karena dampaknya terhadap kinerja operasional dan lingkungan, terutama terkait dengan konsumsi energi, kebisingan, dan stabilitas kereta. Dengan semakin banyaknya penggunaan kereta berkecepatan tinggi di berbagai negara, tantangan besar muncul dalam hal pengaruh aerodinamika terhadap *drag*, lift, dan turbulensi yang dihasilkan saat kereta bergerak melalui udara. Dalam upaya mengatasi tantangan tersebut, penggunaan *computational fluid dynamics* (CFD) telah menjadi alat penting dalam menganalisis dan memprediksi perilaku aliran udara di sekitar kereta. CFD memungkinkan simulasi yang lebih akurat dan efisien, sehingga dapat membantu dalam merancang bentuk bodi kereta yang lebih aerodinamis, mengurangi *drag*, dan meminimalkan turbulensi yang berkontribusi pada kebisingan (Prabhu, 2020).

Simulasi CFD juga memungkinkan untuk menganalisis turbulensi yang terjadi di sekitar kereta dan mempelajari bagaimana aliran udara berinteraksi dengan permukaan kereta. Turbulensi ini menghasilkan tekanan tidak merata di berbagai titik permukaan, yang pada gilirannya menyebabkan peningkatan *drag* serta ketidakstabilan aliran yang mempengaruhi SPL. Fenomena ini, khususnya yang terjadi di sekitar bagian seperti *bogie* dan bagian depan kereta, menyebabkan peningkatan SPL yang dapat mengganggu kenyamanan penumpang dan

merusak kualitas lingkungan. Oleh karena itu, dengan menggunakan CFD, desain aerodinamis kereta dapat dioptimalkan, misalnya dengan memperbaiki bentuk kepala dan ekor kereta atau menambahkan elemen desain seperti spoiler untuk mengurangi turbulensi dan dampaknya terhadap kebisingan. Dengan demikian, CFD memungkinkan perancangan yang lebih presisi dan efisien dalam mengurangi dampak negatif ini, baik dari segi efisiensi energi, pengurangan gaya hambat, maupun pengurangan kebisingan yang dihasilkan selama perjalanan kereta (Hassan, 2023).

Dalam penelitian ini, pendekatan CFD digunakan untuk menganalisis dan membandingkan dua desain hidung kereta dengan tujuan mengoptimalkan aerodinamika dan pengurangan kebisingan (SPL). Pendekatan CFD memberikan pemahaman mengenai aliran udara pada sekitar permukaan kereta api, tekanan pada permukaan kereta, dan gaya aerodinamis pada kereta api. Tahap dalam CFD dari desain kereta api, *meshing*, pengaturan *boundary condition*, dan hasil yang diperoleh. Fokus utama penelitian adalah mengurangi drag, memperbaiki aliran udara di sekitar kereta, dan mengurangi dampak kebisingan yang dihasilkan oleh turbulensi dan vortex di bagian depan dan bogie kereta. Dengan demikian, simulasi CFD ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap desain kereta yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan nyaman bagi penumpang.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana distribusi tekanan pada kontur kereta api?
2. Bagaimana hasil koefisien *drag* ( $C_d$ ) pada kereta api?
3. Bagaimana hasil koefisien *lift* ( $C_l$ ) pada kereta api?
4. Bagaimana hasil perbandingan antara SPL simulasi dengan hasil eksperimental?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Simulasi dilakukan menggunakan software ANSYS *Workbench* 24.2.
2. Simulasi numerik dilakukan tanpa adanya roda, *bogie*, dan elemen tambahan.
3. Simulasi hanya membandingkan 2 geometri kereta.
4. Sumber kebisingan hanya diamati pada aliran aerodinamis.
5. Hanya berfokus pada tekanan, gaya hambat ( $C_d$ ), dan gaya angkat ( $C_l$ ).
6. Pengukuran dilakukan pada *sidewall* kereta api k1 New Generation dalam kondisi dinamis.

## 1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana distribusi tekanan pada kontur kereta api?
2. Bagaimana hasil koefisien *drag* ( $C_d$ ) pada kereta api
3. Bagaimana hasil koefisien *lift* ( $C_l$ ) pada kereta api?
4. Bagaimana hasil perbandingan antara SPL simulasi dengan hasil eksperimental?

## 1.5 Manfaat

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membantu pengembangan metode simulasi aerodinamis berbasis CFD dengan mengamati gaya aerodinamis dan tingkat tekanan suara

2. Sebagai dasar pengembangan dalam mengamati pengaruh sumber kebisingan kereta api.
3. Dengan memberikan iterasi dan desain yang lebih kompleks, dapat mempermudah dalam menganalisis lebih detail dan mendalam mengenai gaya dan tingkat tekanan bunyi aerodinamis.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Kajian terhadap fenomena aerodinamika dan karakteristik kebisingan pada kereta api berkecepatan tinggi telah banyak dilakukan, mengingat peningkatan kecepatan operasi secara langsung berdampak pada peningkatan gaya hambat dan intensitas tekanan bunyi. Minelli et al. (2020) melakukan penelitian numerik terhadap model bagian depan kereta ICE3 menggunakan metode *Improved Delayed Detached Eddy Simulation* (IDDES) yang dikombinasikan dengan pendekatan akustik *Ffowcs Williams–Hawkings* (FW-H). Hasil simulasi menunjukkan bahwa area *cavity bogie* merupakan sumber utama emisi kebisingan aerodinamis, dengan frekuensi dominan tekanan bunyi berkisar antara 1700 hingga 3400 Hz. Fenomena ini dikaitkan dengan pembentukan *shear layer* dan *vortex* kompleks yang terbentuk akibat interaksi aliran udara dengan permukaan kereta.

Penelitian serupa dilakukan oleh Jin, Liu, dan Tu (2024), yang memfokuskan analisisnya pada pengaruh variasi panjang hidung kereta terhadap distribusi tekanan aerodinamis pada struktur penghalang suara (*noise barrier*). Dengan menggunakan simulasi numerik berbasis ANSYS Fluent, studi ini menunjukkan bahwa desain hidung yang lebih panjang mampu menurunkan tekanan puncak secara signifikan, serta mereduksi propagasi gelombang tekanan awal (*head wave*) dan turbulensi ekor (*wake wave*). Temuan tersebut menegaskan peran krusial bentuk geometri depan kereta dalam mengendalikan beban aerodinamis dan potensi radiasi akustik terhadap lingkungan sekitarnya.

Pada penelitian yang dilakukan Liu et al. (2022), studi numerik terhadap performa aeroakustik di area pantograf kereta berkecepatan tinggi dengan kecepatan operasi hingga 400 km/jam. Penelitian ini mengevaluasi beberapa strategi desain pelindung pantograf untuk menurunkan tingkat tekanan bunyi (*Sound Pressure Level*) dan fluktuasi tekanan akibat *vortex shedding*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa modifikasi bentuk pelindung pantograf memberikan dampak signifikan terhadap penurunan SPL, serta memperbaiki kestabilan aliran di sekitar komponen eksternal kereta.

Secara keseluruhan, ketiga studi tersebut menggarisbawahi pentingnya pendekatan numerik berbasis CFD, khususnya dengan pemanfaatan ANSYS Fluent, dalam menganalisis parameter aerodinamika dan karakteristik tekanan bunyi pada kereta api. Temuan-temuan tersebut menjadi landasan metodologis dan konseptual bagi penelitian ini, yang memfokuskan pada analisis aerodinamika dan distribusi tekanan bunyi pada lokomotif kereta api sebagai bagian kritis dari sistem kendaraan rel modern.

### 2.2 Dasar Teori

#### 2.2.1 Kereta Api

Kereta api adalah moda transportasi massal yang terdiri dari rangkaian kereta yang ditarik oleh lokomotif. Dalam sekali perjalanan kereta api mempunyai kapasitas angkut sampai 300 kursi penumpang tergantung panjang rangkaian gerbong yang digunakan. Menurut Peraturan Menteri Perhubungan No. 43 Tahun 2011 tentang rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNAS) bahwa strategi pengembangan jaringan tersebut harus mampu mengakomodasi kebutuhan layanan kereta api berdasarkan dimensi kewilayahan antara lain, jaringan kereta api antar kota di Pulau Jawa difokuskan untuk mendukung layanan angkutan penumpang dan

barang, sedangkan jaringan kereta api antar kota di pulau Sumatra, Kalimantan, Sulawesi dan Papua difokuskan untuk mendukung layanan angkutan barang (Situmorang, 2012).



Gambar 2. 1 Lokomotif dan kereta penumpang  
(Sumber : <https://www.inka.co.id/tentang-inka>)

Berdasarkan undang-undang No. 23 Tahun 2007 Pasal 96, sarana perkeretaapian menurut jenisnya terdiri atas, lokomotif, kereta, gerbong, dan peralatan khusus. Lokomotif adalah sarana perkeretaapian yang memiliki penggerak sendiri yang dapat bergerak dan digunakan untuk menarik atau mendorong kereta, gerbong, atau peralatan khusus, antara lain lokomotif listrik dan lokomotif diesel. Kemudian ada jenis kereta yang harus ditarik atau didorong lokomotif dan kereta yang mempunyai penggerak sendiri. Kedua kereta ini digunakan untuk mengangkut orang, contohnya seperti kereta rel listrik (KRL), kereta rel diesel (KRD), kereta penumpang, kereta makan, kereta bagasi dan kereta pembangkit. Gerbong adalah sarana perkeretaapian yang ditarik dan/atau didorong lokomotif digunakan untuk mengangkut barang, jenis – jenis gerbong antara lain gerbong datar, gerbong tertutup, gerbong terbuka dan gerbong tangki. Dan peralatan khusus adalah sarana perkeretaapian yang tidak digunakan untuk angkutan penumpang atau barang, tetapi untuk keperluan khusus antara lain kereta inspeksi (lori), gerbong penolong, derek (*crane*), kereta ukur dan kereta pemeliharaan jalan rel (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2007).

### 2.2.2 Fluida

Mekanika fluida adalah cabang ilmu fisika yang mempelajari fluida dalam keadaan diam maupun bergerak serta gaya-gaya yang ditimbulkannya pada batas sistem, seperti permukaan padat atau fluida lainnya. Fluida sendiri adalah zat yang akan mengalami deformasi secara terus-menerus apabila diberikan tegangan geser sekecil apa pun (Pritchard & McDonald, 2011).

Pembahasan tentang fluida bergerak umumnya menggunakan pendekatan *control volume* untuk mempermudah analisis fenomena fisik secara keseluruhan. Hal ini disebabkan oleh sifat fluida yang mudah mengalami deformasi, sulitnya pelacakan partikel individual, dan kebutuhan untuk menganalisis pengaruh aliran terhadap sistem (Pritchard & McDonald, 2011).

Selanjutnya, aliran diklasifikasikan berdasarkan waktunya. Aliran tunak (*steady*) adalah aliran di mana kecepatan pada titik tertentu tidak berubah terhadap waktu ( $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ ), sedangkan

pada aliran tak tunak (*unsteady*), kecepatan berubah terhadap waktu ( $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ ) (Pritchard & McDonald, 2011).

Udara sebagai fluida memiliki sifat fisik berupa densitas dan viskositas. Pada kecepatan di bawah sepertiga kecepatan suara, variasi tekanan dan temperatur kecil, sehingga aliran udara dapat diasumsikan *incompressible* (Damjanovic et al., 2010). Viskositas merupakan akibat gesekan antar partikel molekul dalam fluida dan mempengaruhi timbulnya *friction drag* yang penting dalam dinamika fluida kendaraan (Tuakia, 2008).

### 2.2.3 Sifat-sifat Fluida (Udara)

Udara merupakan jenis fluida yang memiliki densitas dan viskositas, dua parameter penting dalam analisis dinamika fluida. Densitas ( $\rho$ ) didefinisikan sebagai massa per satuan volume, dan nilainya bergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Pada kondisi standar (P = 1 atm dan T = 288 K), densitas udara bernilai 1,2250 kg/m<sup>3</sup> (Pritchard & McDonald, 2011).

Kecepatan kendaraan yang umumnya berada di bawah sepertiga kecepatan suara (Mach < 0,3) memungkinkan variasi tekanan dan suhu dalam aliran udara di sekitar kendaraan untuk dianggap kecil. Oleh karena itu, aliran udara pada kondisi ini dapat dikategorikan sebagai *incompressible flow* (Damjanovic et al., 2010). Sifat-sifat fluida sebagai berikut.

#### a) Densitas

Densitas ( $\rho$ ) atau kerapatan suatu zat adalah ukuran untuk konsentrasi zat tersebut yang dinyatakan dalam massa persatuan volume pada atmosfer bumi. Properti ini bergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Densitas dinyatakan dalam tiga bentuk, yaitu:

##### 1) Densitas Massa

Densitas massa merupakan perbandingan jumlah massa dengan jumlah volume. Densitas massa dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan berikut.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Dimana  $\rho$  adalah massa jenis ( $kg/m^3$ ),  $m$  adalah massa ( $kg$ ), dan  $V$  adalah volume ( $m^3$ ).

##### 2) Berat Spesifik

Didefinisikan sebagai gaya gravitasi terhadap massa yang terkandung dalam sebuah satuan volume zat.

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.2)$$

Dimana  $\gamma$  adalah berat spesifik ( $N/m^3$ ),  $\rho$  adalah massa jenis ( $kg/m^3$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi bumi ( $m/s^2$ ).

##### 3) Densitas Relatif

Densitas relatif disebut juga *specific gravity* (SG) yaitu perbandingan antara berat spesifik suatu zat dengan berat spesifik air. Karena kerapatan semua zat cair bergantung pada temperature serta tekanan, maka temperature zat cair yang dipertanyakan, serta temperature air dijadikan acuan harus dinyatakan untuk mendapatkan harga-harga gravitasi yang tepat (Damjanovic et al., 2010; Sutantra, 2001).

$$SG = \frac{\gamma_{zat}}{\gamma_{air}} \quad (2.3)$$

dimana  $\gamma_{zat}$  adalah berat spesifik zat padat ( $N/m^3$ ) dan  $\gamma_{air}$  adalah berat spesifik air ( $N/m^3$ ).

### 2.2.3.1 Viskositas

Viskositas merupakan pengukuran ketahanan fluida terhadap deformasi, sedangkan viskositas sendiri disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena gradien kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yaitu:

1) Viskositas Dinamis

Merupakan rasio tegangan geser terhadap laju perubahan deformasi. Untuk udara pada kondisi standar,  $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ .

2) Viskositas Kinematik

Merupakan perbandingan viskositas dinamik dengan densitas

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.4)$$

dimana  $\nu$  adalah kecepatan udara ( $\approx 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) (Tuakia, 2008).

### 2.2.4 Kebisingan

Secara sederhana kebisingan didefinisikan sebagai bunyi yang tidak diinginkan dan mengganggu pendengaran atau biasa disebut dengan *noise is unwanted sound*. Namun ada juga yang mendefinisikannya sebagai bunyi yang ada pada saat yang salah, di tempat yang salah, atau *noise is sound at the wrong place, at the wrong time*. Dari definisinya, kebisingan tidak terlalu bergantung pada keras atau lemahnya bunyi. Yang berkaitan langsung dengan kebisingan yaitu terganggu atau tidaknya seseorang dengan bunyi tersebut (Everest, dkk, 2009).

Badan Standardisasi Nasional Indonesia sampai saat ini belum mengeluarkan standar kebisingan secara lengkap. Oleh karenanya, data dari Badan Standardisasi Internasional seringkali digunakan sebagai acuan. Ini berarti bahwa apabila suatu bunyi nilainya melebihi acuan tersebut, maka bunyi itu dapat dikategorikan sebagai kebisingan. Sedangkan menurut SNI 19-1721-1989 menerangkan bahwa nilai ambang batas (NAB) di tempat kerja sebesar 85 dB. Karena pada hakikatnya kebisingan merupakan suatu bunyi yang dapat mengganggu manusia baik di kesehatan pendengaran maupun kenyamanan. Peraturan Menteri Perhubungan No. 15 Tahun 2011, tentang standar spesifikasi teknis kereta yang ditarik lokomotif, mengatur mengenai standar kebisingan maksimum pada ruang penumpang yaitu sebesar 85 dBA.

### 2.2.5 Aerodinamis

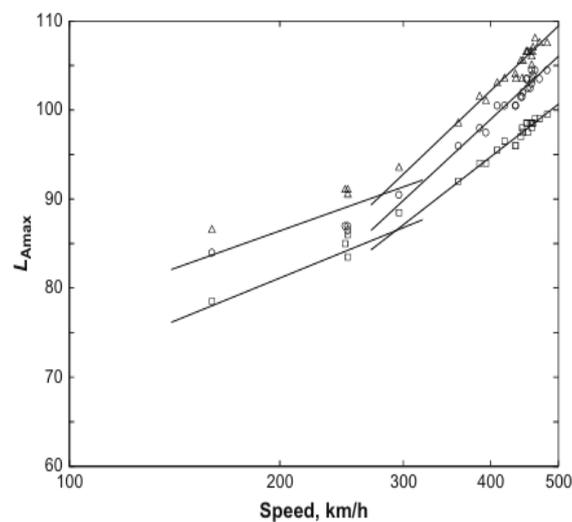
Aerodinamika adalah cabang dari mekanika fluida yang mempelajari aliran udara dan interaksinya dengan objek yang bergerak di dalamnya. Dalam konteks kereta api, aerodinamika berfokus pada bagaimana aliran udara berinteraksi dengan bentuk bodi kereta yang bergerak dengan kecepatan tinggi, serta dampak dari interaksi tersebut terhadap *drag*, *lift*, stabilitas, dan kebisingan yang dihasilkan. Desain aerodinamis yang baik tidak hanya mengurangi hambatan udara, tetapi juga meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan kebisingan yang dihasilkan oleh turbulensi dan vortex aliran (Sutantra N, 2001).

#### 2.2.5.1 Kebisingan Aerodinamis

Kebisingan aerodinamis merupakan fenomena yang terjadi akibat adanya interaksi aliran udara dengan permukaan benda yang bergerak pada kecepatan yang tinggi, dimana

menghasilkan pembentukan lapisan batas turbulen disekitar bodi kereta dan radiasi gelombang tekanan ke lingkungan sekitar. Dalam konteks transportasi rel berkecepatan tinggi, kebisingan ini menjadi faktor dominan dalam spektrum akustik di kereta api saat mencapai kecepatan tertentu, yang melampaui kontribusi kebisingan mekanis seperti dari roda dan rel (Thompson, 2009). Namun pada kebisingan ini didapatkan suatu fakta bahwa seiring dengan meningkatnya kecepatan, maka tingkat kebisingan juga akan mengalami peningkatan. Tingkat tekanan bunyi yang dihasilkan oleh interaksi antara roda dan rel dapat meningkatkan proporsional terhadap  $30\log V$ , dimana ( $v$ ) merupakan kecepatan kereta api. Sementara itu, kebisingan aerodinamis yang meningkat dengan laju yang lebih tinggi, umumnya mengikuti tren  $60\log V$ , sehingga pada kecepatan tertentu dapat dikatakan sebagai kecepatan transisi. Sehingga dengan adanya fenomena ini kebisingan aerodinamis dapat menjadi faktor kebisingan yang dominan.

Berikut adalah grafik tingkat tekanan suara terhadap kecepatan dari ketiga jenis mobil berbeda.



Gambar 2. 2 Tingkat tekanan suara sebagai fungsi kecepatan pada (segitiga) mobil listrik terbaru, (lingkaran) mobil listrik lama, dan (persegi) kendaraan trailer (Sumber: Thompson, 2009).

Gambar 2.2 menunjukkan hubungan antara tingkat kebisingan dan kecepatan kereta, dengan puncak kebisingan berasal dari mesin motor di bagian depan dan belakang kereta. Pada kecepatan 300 km/jam, terjadi perubahan kemiringan grafik yang mencerminkan transisi bertahap dalam pola kebisingan. Dalam sistem kereta konvensional, transisi ini terjadi pada kecepatan lebih rendah akibat desain aerodinamis yang kurang efisien, sementara pada kereta berkecepatan tinggi, kebisingan aerodinamis menjadi faktor dominan bagi lingkungan eksterior maupun interior. Kebisingan aerodinamis, yang telah diteliti sejak 1990-an (Thompson, 2009), berasal dari interaksi aliran udara, sehingga propagasi gelombang suara dalam medium akustik menjadi lebih kompleks. Hanya sebagian kecil energi aerodinamis yang dikonversi menjadi energi akustik. Pada permukaan datar, kecepatan aliran udara menurun hingga nol m/s akibat gaya gesek, sementara pada jarak tertentu kecepatan mencapai nilai maksimum yang setara dengan kecepatan relatif bebas terhadap kereta. Di antara kedua kondisi ini, terbentuk lapisan batas yang mengalami transisi dari aliran laminar ke turbulen akibat efek viskositas. Secara teoritis, kebisingan aerodinamis dapat dijelaskan melalui analogi matematis dengan sumber kuadrupol ekuivalen dalam medium akustik diam. Efisiensi radiasi sumber kuadrupol

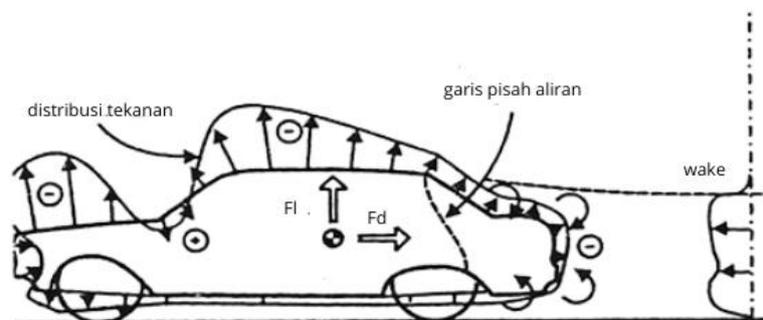
cenderung rendah, terutama pada frekuensi rendah, akibat terjadinya gelombang destruktif yang mengurangi emisi kebisingan secara signifikan (Thompson, 2009).

### 2.2.5.2 Gaya Aerodinamis

Merupakan gaya-gaya yang diterima oleh satu bodi akibat fluida yang mengalir. Dengan adanya fluida yang mengalir maka mendapat gaya tekan dan geser. Akibatnya gaya-gaya tersebut membentuk resultan gaya yang disebut gaya aerodinamika. Untuk resultan yang searah dengan aliran disebut gaya drag, sedangkan gaya yang tegak lurus aliran adalah gaya *lift*.

#### 2.2.5.2.1 Drag Force (Gaya Hambat)

Gaya hambat (*drag*) adalah gaya yang bekerja dalam arah horizontal (pararel terhadap aliran) dan berlawanan arah dengan arah gerak maju kendaraan. Besarnya gaya hambat (*drag*) untuk setiap bentuk kendaraan berbeda satu dengan yang lainnya, dan ini tergantung pada faktor koefisien *drag* atau  $C_d$ . selain itu juga dipengaruhi oleh luasan frontal dari kendaraan, dan tekanan dinamik. Lebih jelasnya perhatikan gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2. 3 Gaya hambat pada mobil  
(Sumber: Sutantra N, 2001)

Gambar 2.3 menjelaskan bagaimana aliran yang terjadi pada permukaan mobil, dapat dilihat bahwa distribusi tekanan merata di area permukaan atas. *Control volume* digambarkan di sekeliling bodi yang ditunjukkan dengan garis putus-putus. Control volume dibatasi oleh *Upper* dan *lower streamline* yang letaknya jauh di atas dan di bawah bodi, garis yang tegak lurus terhadap kecepatan aliran yang letaknya jauh di muka (di depan) dan di belakang bodi, dan potongan yang mengelilingi dan membungkus permukaan bodi. (Damjanovic et al., 2010)

Adapun perumusan gaya hambat (drag) pada kendaraan adalah sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_f \quad (2.11)$$

Dimana  $A$  adalah luas frontal.  $\rho$  adalah massa jenis udara, dan  $V$  adalah kecepatan kendaraan relatif terhadap udara

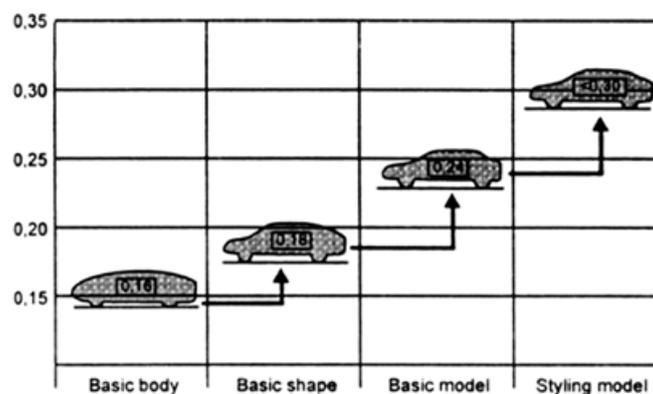
Hubungan antara koefisien drag ( $C_d$ ) dan luas frontal kendaraan ( $A$ ) disebut dengan faktor bentuk atau *shape factor*. Pertimbangan untuk sebuah bodi dua dimensi di dalam suatu aliran, seperti pada gambar 2.3.

Gaya hambat atau *drag force* yang terjadi pada kendaraan menurut Barnard (1996) sumbernya berasal dari *surface friction drag*, *pressure* atau *form drag*, *trailing vortex drag*, *extrencence drag*, *drag* karena roda, dan *drag* karena sistem pendingin. Namun pada analisa

gaya *drag* sudut pandang 2 dimensi *drag* karena roda, dan drag karena sistem pendingin diabaikan. Hal ini diakibatkan bentuk model uji yang minim dan tidak adanya peralatan tersebut.

### 2.2.5.2.2 Lift Force (Gaya Angkat)

Perbedaan bentuk antara permukaan atas dan bagian bawah kendaraan menyebabkan aliran udara pada permukaan atas lebih cepat daripada aliran udara pada permukaan bawah, sehingga tekanan pada permukaan atas kendaraan lebih rendah daripada tekanan permukaan bawah. Faktor lain adalah kekasaran bagian permukaan bawah kendaraan yang disebabkan oleh profil mesin dan komponen lain yang memperlambat aliran di bawah sehingga memperbesar tekanan aliran permukaan bawah. Karena itu tekanan yang bekerja pada bagian bawah kendaraan secara umum lebih besar dari tekanan yang bekerja pada bagian atas kendaraan sehingga menimbulkan terbentuknya gaya angkat karena adanya desakan aliran udara dari permukaan bawah ke permukaan atas kendaraan, seperti yang dijelaskan pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2. 4 Distribusi koefisien gaya angkat (*lift force*)  
(Sumber: Sutantra N, 2001)

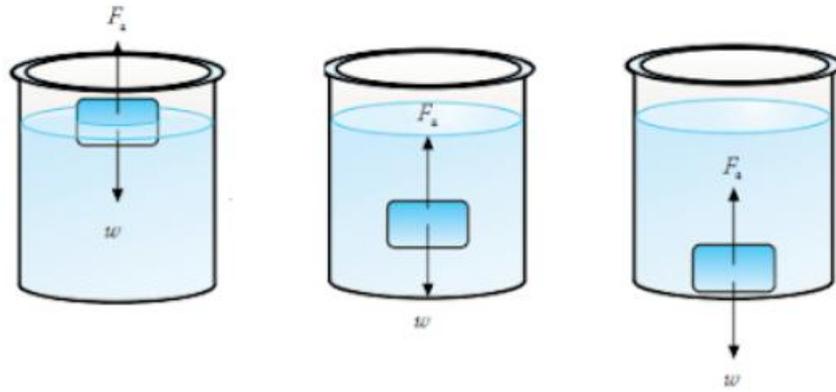
Gaya angkat bekerja dalam arah vertikal dan biasanya arah ke atas ditandai sebagai arah positif dan ke bawah sebagai arah negatif. Gaya lift secara total dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_L = \frac{1}{2} C_l \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_f \quad (2.12)$$

dimana  $F_L$  adalah gaya angkat,  $C_l$  adalah koefisien angkat,  $\rho$  adalah masa jenis udara,  $V$  adalah kendaraan relatif terhadap udara, dan  $A_f$  adalah luas area kendaraan bagian samping.

### 2.2.6 Teorema Archimedes

Teorema Archimedes menyatakan bahwa suatu benda yang dicelupkan seluruhnya atau sebagian ke dalam fluida akan mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Gaya ke atas ini dikenal sebagai gaya apung (*buoyant force*), dan bekerja secara vertikal ke atas melalui pusat massa fluida yang dipindahkan yang dapat dijelaskan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Benda terapung (kiri), benda melayang (tengah), dan benda tenggelam (kanan).  
(Sumber: semi-yanto.blogspot.com)

Pada Gambar 2.5 menjelaskan bahwa sebuah benda dicelupkan ke dalam fluida, jika gaya apung lebih besar dari berat benda, maka benda akan terapung; jika sama besar, benda akan melayang; dan jika lebih kecil, benda akan tenggelam. Fenomena ini menjadi prinsip kerja banyak teknologi, mulai dari perahu sederhana hingga kapal selam (Munson et al., 2013). Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F_A = \rho_f \cdot g \cdot V_f \quad (2.13)$$

dimana  $F_A$  adalah gaya apung ( $N$ ),  $\rho_f$  adalah massa jenis fluida ( $kg/m^3$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $9,81 m/s^2$ ), dan  $V_f$  adalah volume fluida yang dipindahkan oleh benda ( $m^3$ ).

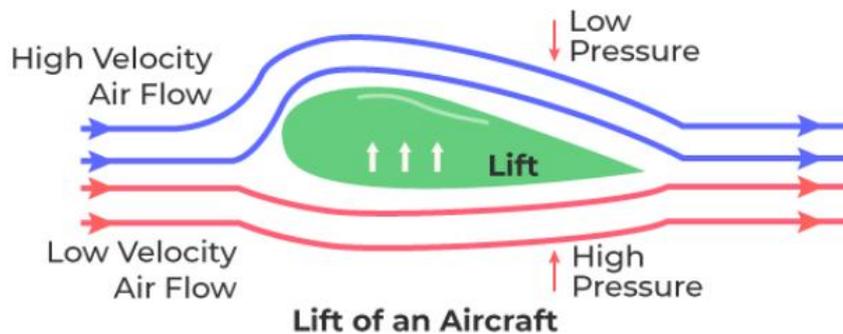
Walaupun Teorema Archimedes secara langsung menjelaskan interaksi antara benda dan fluida dalam kondisi diam (statik), prinsip dasarnya tetap relevan dalam konteks aerodinamika, khususnya dalam menjelaskan gaya angkat (lift) pada benda yang bergerak dalam fluida seperti udara. Gaya angkat pada pesawat terbang, misalnya, dapat dianalogikan dengan gaya apung, meskipun dalam kasus aerodinamika, gaya ini disebabkan oleh perbedaan tekanan akibat kecepatan fluida (menurut prinsip Bernoulli), bukan semata-mata oleh perpindahan volume (Cengel & Cimbala, 2010).

### 2.2.7 Teorema Bernoulli

Teorema Bernoulli merupakan salah satu prinsip fundamental dalam mekanika fluida yang menyatakan bahwa pada suatu aliran fluida ideal (inkompresibel, tidak viskus, dan tunak), jumlah energi total yang dimiliki fluida pada suatu titik sepanjang garis arus akan tetap konstan. Energi total ini terdiri atas energi tekanan, energi kinetik, dan energi potensial gravitasi (Munson et al., 2013).

Teorema Bernoulli memainkan peran kunci dalam sebuah kendaraan. Seperti halnya pada pesawat, dimana pada sayap pesawat dirancang dengan bentuk tertentu untuk memanfaatkan prinsip ini. Saat pesawat bergerak, udara mengalir di atas dan di bawah sayap dengan kecepatan yang berbeda. Menurut prinsip Bernoulli, udara yang bergerak lebih cepat di atas sayap menciptakan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan udara yang bergerak lebih lambat di bawah sayap.

Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya ke atas pada sayap. Ketika gaya ke atas ini melebihi berat pesawat, pesawat akan terangkat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 6 Aliran gaya angkat pada pesawat  
(Sumber : [www.geeksforgeeks.org](http://www.geeksforgeeks.org))

Pada Gambar 2.5 memberikan pemahaman mengenai bagaimana pengaruh perbedaan tekanan pada bagian atas dan bawah serta kecepatan aliran menyebabkan perubahan gaya angkat yang terjadi pada sayap pesawat. Berikut merupakan persamaan teorema Bernoulli.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{konstan} \quad (2.14)$$

di mana  $P$  adalah tekanan statik (Pa),  $\rho$  adalah massa jenis fluida ( $kg/m^3$ ),  $v$  adalah kecepatan aliran (m/s),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ), dan  $h$  adalah ketinggian terhadap acuan (m) (Cengel & Cimbala, 2010).

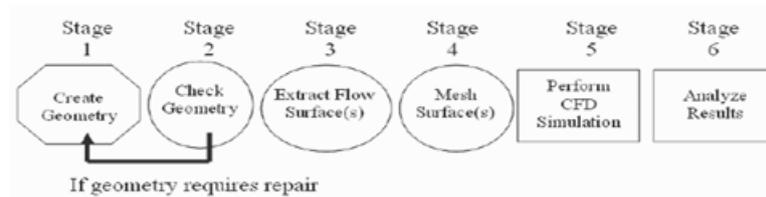
Teorema ini menjelaskan bahwa peningkatan kecepatan fluida akan menyebabkan penurunan tekanan, dan sebaliknya. Prinsip ini banyak diterapkan dalam analisis aliran fluida seperti pada nosel, pipa venturi, dan desain sistem aerodinamika kendaraan, termasuk kereta api, guna memahami distribusi tekanan di sekitar badan kereta dan menentukan potensi terjadinya drag atau lift (White, 2011). Meskipun sangat berguna, persamaan Bernoulli memiliki batasan karena hanya berlaku dalam kondisi ideal dan tidak mempertimbangkan efek viskositas, turbulensi, maupun kompresibilitas aliran.

### 2.2.8 Dinamika Aliran Fluida Komputasi (*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 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 untuk menyelesaikan medan tekanan dan kecepatan. Domain komputasi tersebut kemudian dibagi menjadi elemen-elemen kecil untuk diselesaikan menggunakan suatu model turbulensi tertentu (Baker, 2019).

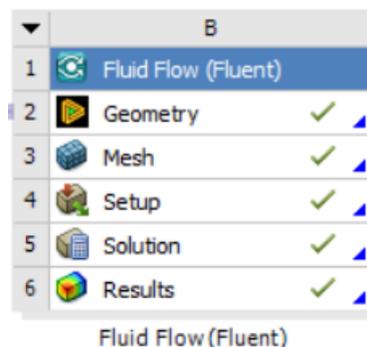
Dengan menggunakan salah satu software CFD dapat dibuat virtual prototype dari sebuah sistem atau alat yang ingin dianalisis dengan menerapkan kondisi nyata di lapangan. Computational fluid dynamics (CFD) merupakan perangkat analisa system dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain didasarkan simulasi berbantuan komputer. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju alir massa (*mass flow rate*). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan turbulence model, spesifikasi parameter dan grid generation) kemudian *postprocessing* (*visualization dan treatment data*). Prosedur CFD melalui tahapan seperti diagram pada gambar 2.20 berikut.



Gambar 2. 7 Diagram blok simulasi dengan CFD

(Sumber: Zulfa, 2017)

Software CFD akan memberikan data-data, gambar gambar, atau kurva-kurva yang menunjukkan prediksi dari performansi keandalan sistem yang telah didesain tersebut. Hasil analisis CFD bisa menyajikan prediksi kualitatif dan kuantitatif dari berbagai persoalan dinamika fluida.



Gambar 2. 8 Diagram simulasi Fluent pada ANSYS Workbench 24.2

Software CFD yang digunakan yaitu Ansys Workbench 24.2 dengan Fluent-Solver sebagai sarana simulasinya. Pada gambar 2.6 dapat dilihat software Ansys Workbench 18.1 sudah menyediakan beberapa program yang akan membantu proses pengujian pada Fluent dalam bentuk yang sudah diruntutkan misalnya Geometry untuk membuat desain geometri 3D maupun 2D atau juga dapat membuat suatu boundary layer dan mesh untuk sarana melakukan meshing pada geometri yang telah dibuat. Selanjutnya akan disajikan lebih lanjut pada berikut ini.

## BAB 3 METODOLOGI

Secara umum peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas 2 tahap, yakni simulasi dan pengukuran. Pada tahap simulasi menggunakan *software*, adapun *software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah ANSYS. ANSYS merupakan *engineering simulation software* yang dilengkapi dengan kemampuan untuk melakukan permodelan dan simulasi untuk membantu analisis yang berkaitan dalam menyelesaikan permasalahan terkait mekanika termasuk permasalahan akustik. Melalui kemampuan tersebut, *software* ANSYS menjadi sarana yang tepat dalam melakukan *modelling* dan simulasi dalam analisis aeroakustik kereta api.

Selanjutnya pada pengukuran, terdapat alat yang digunakan pada pengukuran pada sidewall kereta api adalah satu buah mikrofon sebagai alat ukur, laptop yang terinstall oleh software Adobe Audition sebagai visual data, soundcard sebagai proses sinyal analog ke digital, kabel mic sebagai penghubung antara mikrofon dan *soundcard*, dan kabel jack sebagai penghubung antara soundcard dan laptop.

### 3.1 Metode Yang Digunakan

Pada penelitian ini ada tiga metode tahapan utama yang harus dilakukan, yaitu *preprocessing*, *solving* atau *processing*, dan *postprocessing*. Dikarenakan keterbatasan visualisasi aliran melintasi model kereta api maka penelitian ini menggunakan metode numerik dengan bantuan software Ansys Workbench 24.2 dengan menggunakan CFD-solver, sehingga dapat membantu mempermudah melakukan proses bertahap dikarenakan sudah dalam bentuk yang berurutan dan bila terdapat proses yang belum terselesaikan maka proses selanjutnya tidak dapat dilanjutkan. Dalam penelitian ini juga disertakan penampilan 3D dari model kereta api.

#### 3.1.1 *Preprocessing*

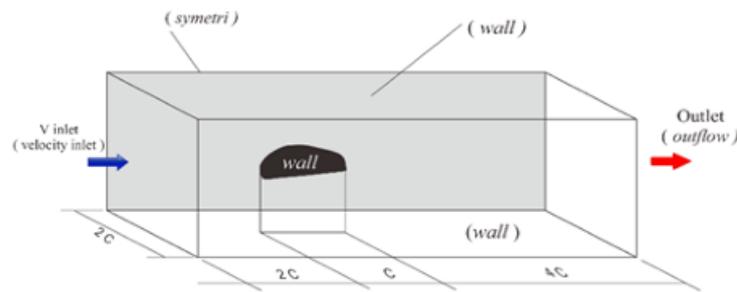
*Preprocessing* merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD). Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan meshing dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

##### 3.1.1.1 Geometri Kereta Api

Pembuatan geometri kereta api ini menggunakan software SolidWork. Yang kemudian akan diimport ke Geometri ANSYS

##### 3.1.1.2 Domain Pemodelan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran 3D yang melintasi bodi yaitu pengujian dengan tidak menyertakan *ground clearance*. Penentuan dimensi domain merujuk pada penelitian berbasis *vehicle aerodynamics* yang dilakukan oleh **Damjanović** dalam pemodelan numerik yang nantinya menjadi batasan pada software Ansys Fluent 24.2. berikut ini adalah gambar 3.1 tentang domain yang digunakan untuk pemodelan.



Gambar 3. 1 Domain Pemodelan Bodi (3D Flow)

Untuk membuat domain pemodelan pada hal yang pertama kali dilakukan adalah dengan membuka software Ansys Workbench 24.2, pada gambar 3.1 dapat dilihat bahwa terdapat 5 urutan proses dimana masing-masing proses harus terselesaikan secara bertahap.

### 3.1.1.3 Meshing

Salah satu tahap penting dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah proses *meshing*, yaitu pemecahan domain geometri menjadi elemen-elemen diskrit yang digunakan sebagai dasar perhitungan numerik. Proses ini memungkinkan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi diselesaikan secara lokal pada setiap elemen kontrol. Mesh yang dibuat harus mampu merepresentasikan bentuk geometri secara akurat serta menangkap gradien perubahan fisika, khususnya di daerah kritis seperti permukaan padat, zona turbulen, atau lapisan batas. Dalam tugas akhir ini, proses *meshing* dilakukan menggunakan modul ANSYS Meshing dengan mempertimbangkan kerapatan elemen yang adaptif, terutama pada area dengan perubahan aliran yang signifikan. Mesh yang berkualitas baik sangat menentukan kestabilan numerik, akurasi hasil, serta efisiensi waktu komputasi.

### 3.1.1.4 Parameter Pemodelan

Pada pemodelan karakteristik fluida ini akan menggunakan salah satu software analisis komputasi fluida dinamik atau Computational Fluid Dynamic (CFD). Langkah pertama yang harus dilakukan adalah dengan membuka proses selanjutnya setelah mesh yaitu setup, yang otomatis membawa kita ke software ANSYS Fluent dengan fitur 3D.

Berikut ini merupakan langkah-langkah pemodelan numerik menggunakan software ANSYS Fluent:

1. *Domain Models*

Merupakan perkiraan kondisi yang diberikan pada kondisi pengoperasian STP (*Standart, Temperature and Pressure*) dalam pengaturan Default Domain berupa tekanan (P) disekitar kereta api, yaitu sebesar  $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pascal}$ .

2. *Fluid Models*

Untuk menentukan model dari sifat fluida maka pada Default Domain terdapat pengaturan *Fluid Models*.

3. *Material*

Langkah yang paling penting dalam pemodelan di CFD adalah mendefinisikan sifat fisik material. Pada form material terdapat data-data propertis dan material yang harus dimasukkan. Dalam hal ini material yang digunakan adalah *air ideal gas* dengan densitas  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan *dynamic viscosity*  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ .

4. *Bondary Domain Condition*

Merupakan penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun pemberian kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta kondisi pada *wall*. Pada kondisi batas *inlet* adalah kecepatan *subsonic* sebesar 100 km/jam dan pada kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Untuk kondisi batas dinding kanan, dinding kiri, dinding atas dan dinding bawah adalah *wall* dengan pilihan *no slip wall* termasuk juga seluruh bodi dari Kereta Api.

5. *Solver Control*

Solusi pada pemodelan ini adalah menggunakan *High Resolution* (karena dapat mempercepat konvergensi untuk kasus yang sederhana) dan diskritisasinya menggunakan *First Order*.

6. *Convergence Control*

Menentukan kriteria konvergensi, dalam hal ini max iteration ditetapkan dengan sebesar 1000, artinya jumlah maksimal iterasi untuk mendapatkan kriteria konvergensi yang diinginkan. *Convergence Criteria* menggunakan tipe residual monitor dan target kriteria konvergensi yang ditetapkan sebesar  $10^{-6}$  artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga  $10^{-6}$ .

7. *Initialize*

Proses *iterate* memerlukan *initialize* (tebakan awal) sebelum memulai perhitungan agar memudahkan konvergen.

8. Iterasi

Menentukan kriteria konvergensi (tebakan awal dari hasil iterasi).

### 3.1.2 *Processing* atau *Solving*

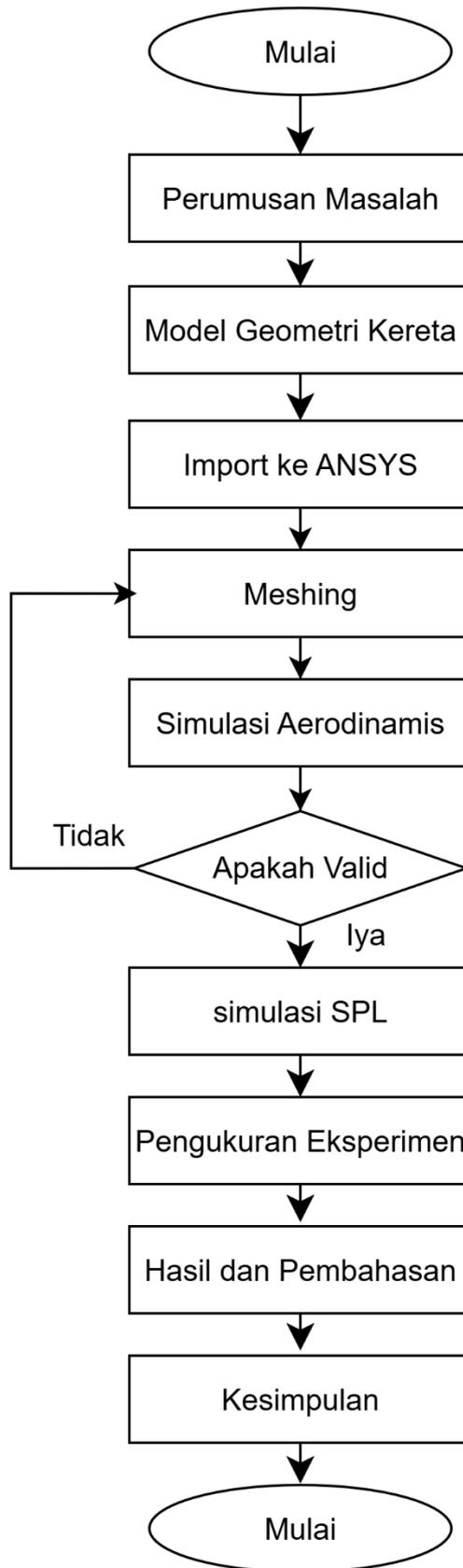
Dengan bantuan software CFD-Solver Manager, kondisi kondisi yang telah ditetapkan pada saat preprocessing di dalam software ANSYS akan dihitung (diiterasi). Jika kriteria konvergensi tercapai dengan kriteria konvergensi  $10^{-6}$ , maka tahapan dilanjutkan pada postprocessing dan jika tidak tercapai tahapan akan mundur kebelakang pada tahapan pembuatan meshing atau dengan mengurangi kriteria konvergensi

### 3.1.3 *Postporcessing*

*Postprocessing* pada software CFD-Post merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan, Gaya drag dan Gaya lift. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *pathlines* berupa *velocity magnitude*.

## 3.2 Urutan Pelaksanaan Penelitian

Urutan pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada *flowchart* sebagaimana terlampir pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram Alir

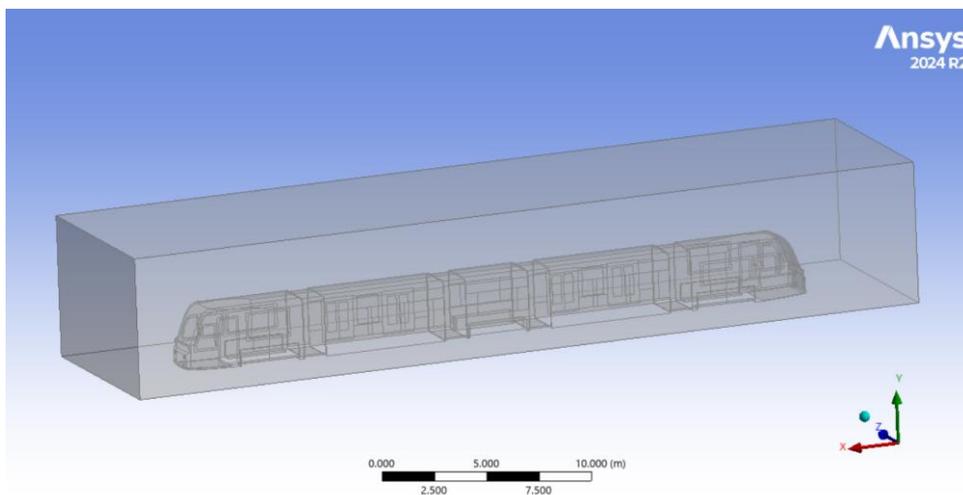
## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian

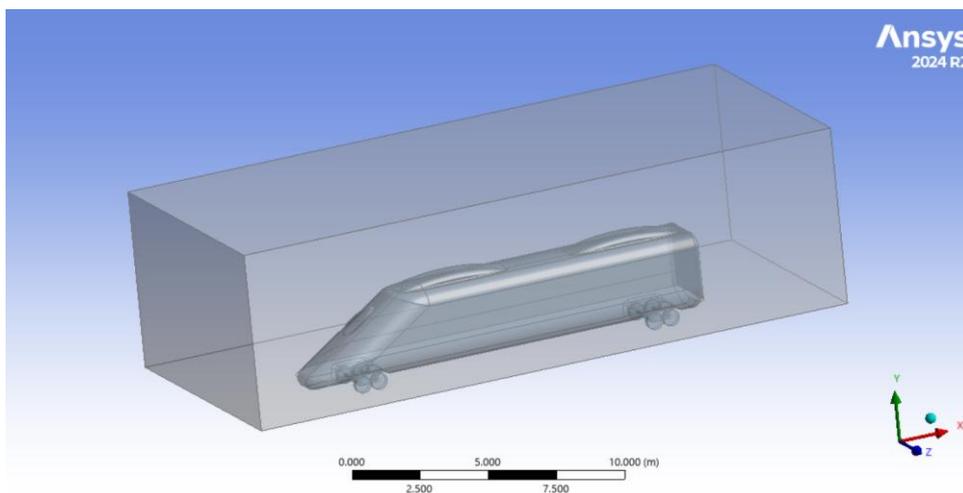
Pada Tugas Akhir ini pengamatan simulasi gaya aerodinamis yang dilakukan pada bagian badan dari kereta api. Simulasi yang dilakukan untuk mendapatkan parameter *contour of pressure*, *velocity of streamline*, grafik tekanan, koefisien *drag* ( $C_d$ ), koefisien *lift* ( $C_l$ ). Sehingga dapat dilakukan analisa distribusi tekanan, analisa distribusi kecepatan dan analisa gaya *drag* dan *lift*.

#### 4.1.1 Analisis Desain Kereta Api

Pada simulasi dilakukan pembuatan desain kereta api dengan variasi 2 desain. Pertimbangan menggunakan 2 desain kereta api adalah untuk membandingkan hasil antara kedua desain kereta tersebut yang nantinya akan dianalisis di pembahasan. Pada tahap desain kereta api mempertimbangkan beberapa aspek seperti bentuk depan kereta dan kerumitan desain kereta yang mempengaruhi analisis. Berikut adalah desain kereta api yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2



Gambar 4. 1 Geometri kereta api pertama



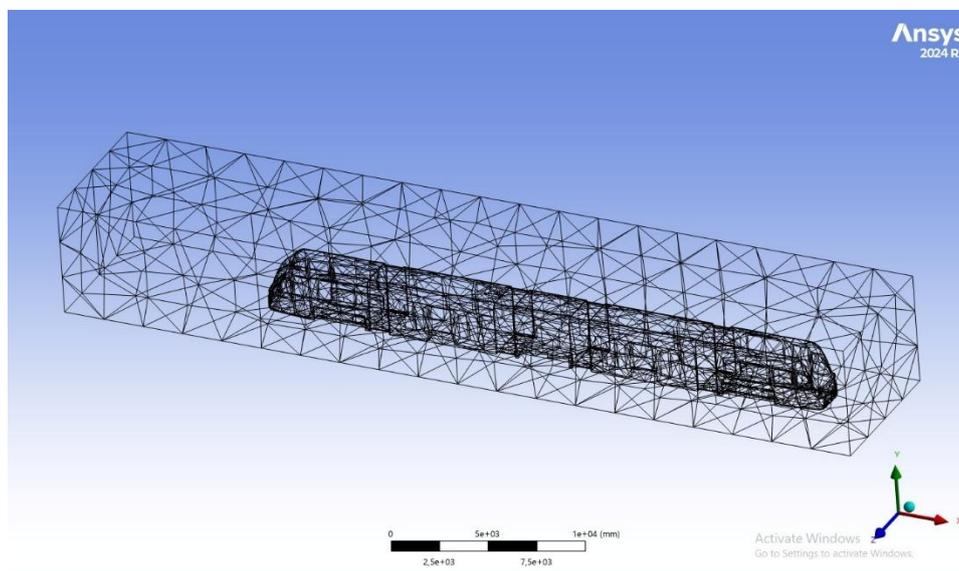
Gambar 4. 2 Geometri kereta api kedua

Pada Gambar 4.1, memiliki geometri lengkap baik lokomotif dan gerbong. Pada Gambar 4.2, memiliki geometri hanya lokomotif dengan desain depan permukaan yang moncong kedepan.

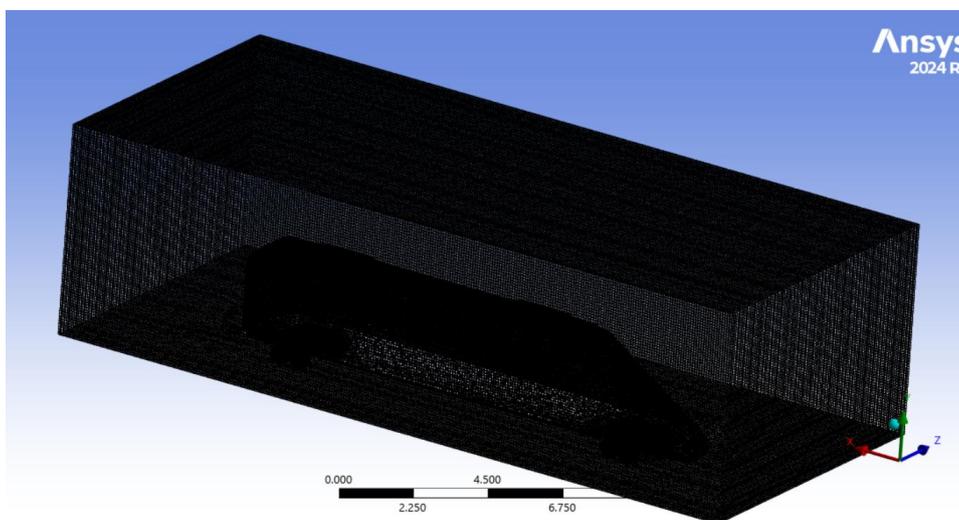
#### 4.1.2 Analisis *Meshing* Kereta Api

Pada simulasi ini dilakukan beberapa pertimbangan terhadap interval mesh yang digunakan. Pertimbangan antara lain berdasarkan bisa atau tidaknya proses simulasi berjalan hingga mencapai kriteria konvergensi yang ditetapkan yaitu  $10^{-6}$  dengan asumsi input parameter yang sudah benar dan pertimbangan lain yaitu keterbatasan kemampuan PC/Hardware dalam melakukan proses simulasi terhadap kondisi dan waktu.

Terdapat 3 jenis interval mesh yaitu Coarse, Medium, dan Fine. Berikut adalah percobaan masing-masing dari 3 jenis interval mesh terhadap hasil proses simulasi pada residual monitor yang menunjukkan tercapai atau tidaknya pada kriteria konvergensi  $10^{-6}$ . Namun pada penelitian ini digunakan mesh medium karena penggunaan Fine terlalu kompleks. Hasil meshing dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Meshing kerete api kedua

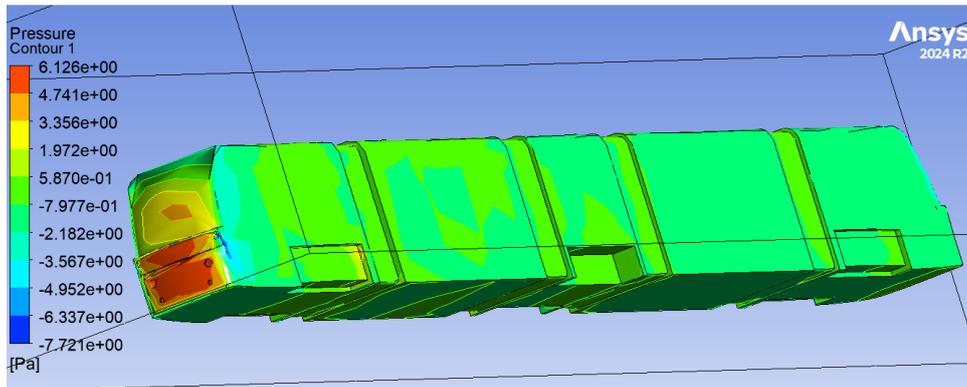


Gambar 4.4 Meshing kerete api kedua

Pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 meshing dilakukan dengan *Span Angle Center medium* dengan *Element Size Default* dan *Resolution Default*.

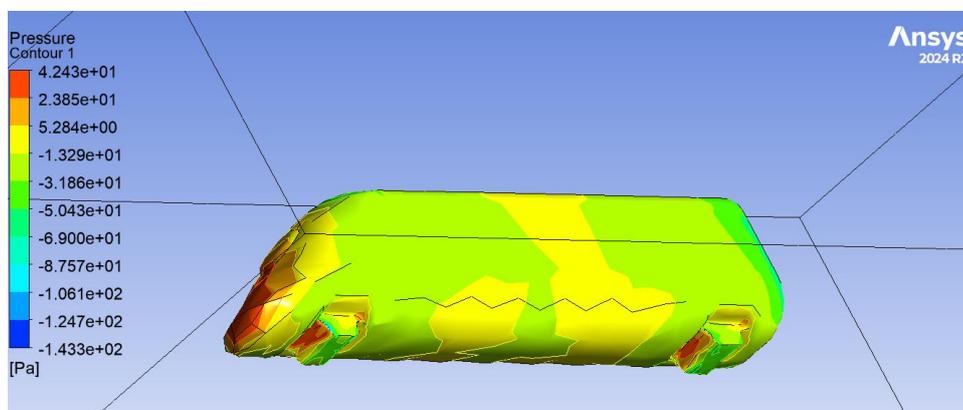
### 4.1.3 Analisis Data Kereta Api

Hasil dari simulasi pada penelitian ini diperoleh *pressure contour* dari kedua kereta yang dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6 dibawah ini.



Gambar 4. 5 Hasil *pressure contour* tampak depan pada kereta api pertama

Pada gambar 4.5 menampilkan kontur dari desain kereta 1 dengan variasi kecepatan 10 km/jam, dari hasil kontur didapatkan tekanan berpusat pada permukaan depan kereta api dan pada tekanan menengan terdistribusi samping ke belakang. Untuk variasi kecepatan 20 km/jam hingga 120 km/jam ditampilkan pada lampiran.

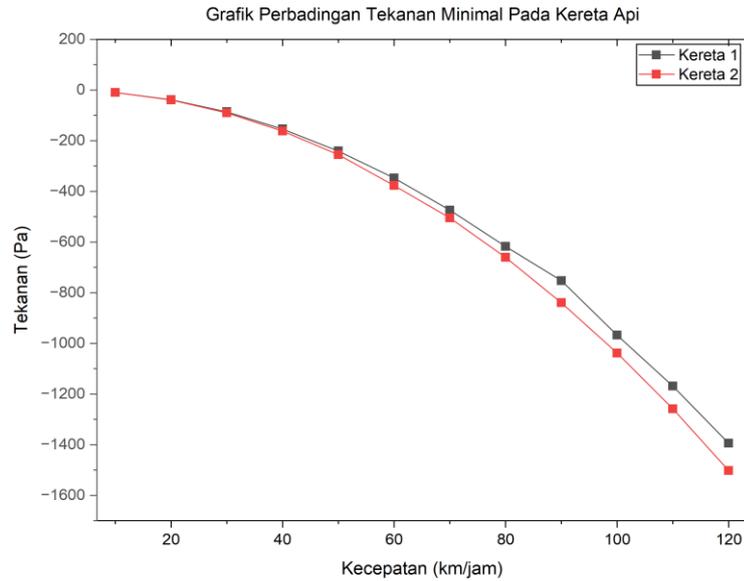


Gambar 4. 6 Hasil *pressure contour* dan *streamline* tampak depan pada kereta api kedua

Pada gambar 4.6 menampilkan kontur dari desain kereta 1 dengan variasi kecepatan 10 km/jam, untuk variasi kecepatan 20 km/jam hingga 120 km/jam ditampilkan pada lampiran.

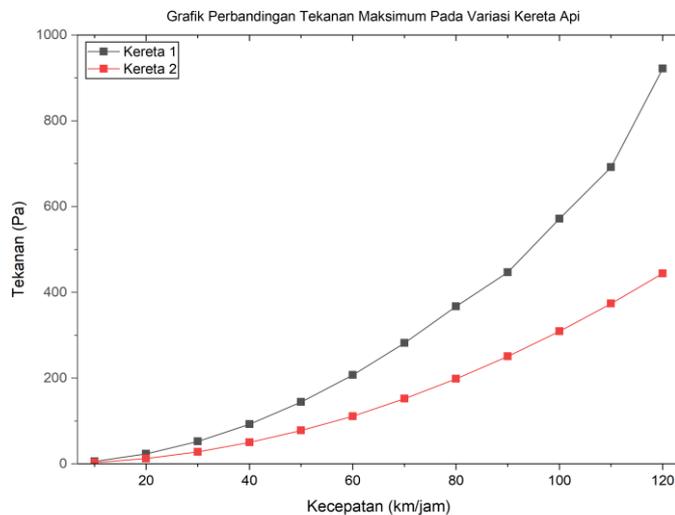
### 4.1.4 Analisis Tekanan Permukaan Badan Kereta Api

Setelah memperoleh kontur dari simulasi yang dilakukan, diperoleh data kecepatan terhadap waktu yang ditampilkan pada grafik berikut.



Gambar 4. 7 Grafik tekanan minimum terhadap kecepatan

Pada Gambar 4.7 tekanan minimum terjadi pada daerah sekitar belakang kereta api, hal ini karena minimnya interaksi antar udara dan kereta. Namun pada daerah ini juga terjadinya vortex yang menyebabkan daerah belakang kebawah mengalami tekanan menengah. Selanjutnya grafik tekanan maksimum terhadap kecepatan yang ditampilkan pada Gambar 4.8.



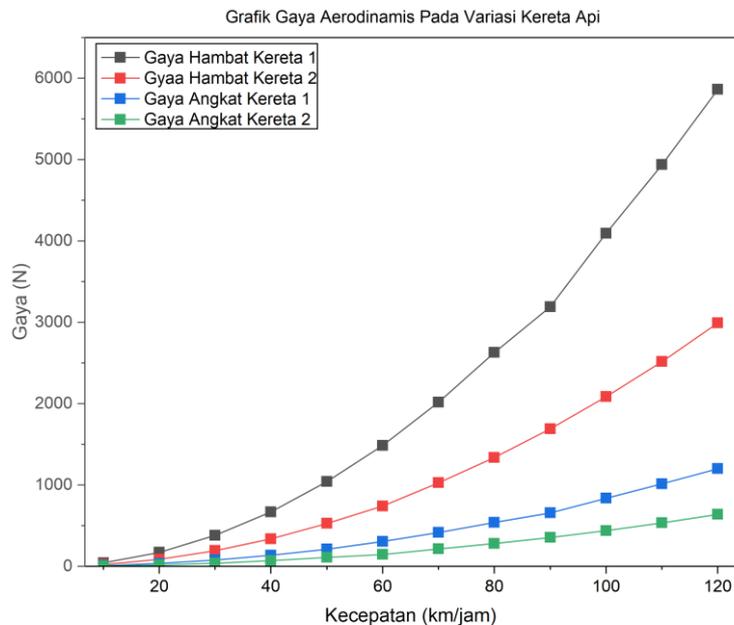
Gambar 4. 8 Grafik tekanan maksimum terhadap kecepatan

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa tekanan pada kereta 1 lebih besar dibandingkan dengan tekanan pada kereta 2. Hal ini disebabkan oleh permukaan depan yang lebih pipih sehingga interaksi antar udara dan permukaan lebih besar, sedangkan pada kereta 2 permukaan depannya lebih meruncing sehingga tekanan pada permukaan depan lebih kecil.

#### 4.1.5 Analisis Gaya Aerodinamis

Analisa mengenai data kuantitatif diperlukan untuk menunjang dan sekaligus menyimpulkan argumentasi mengenai fenomena yang terobservasi pada data kualitatif. Gaya

drag dan gaya lift yang dihasilkan oleh kereta api dapat diketahui berdasarkan hasil analisis numerik 3D di software CFD-Post. Adapun hasil data yang diperoleh dari simulasi dari kedua kereta api diperoleh grafik berbandingan antara perubahan gaya aerodinamis terhadap kecepatan yang dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Grafik gaya aerodinamis terhadap variasi kecepatan

Pada gambar 4.9 Gaya hambat pada kereta 1 memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan Gaya hambat pada kereta 2. Hal ini disebabkan oleh permukaan depan dari kedua desain kereta api memiliki perbedaan signifikan, dimana pada kereta 1 memiliki permukaan depan desain yang cukup pipih yang membuat aliran udara mengenai seluruh permukaan depan kereta. Sedangkan pada kereta 2 memiliki permukaan depan desain yang moncong kedepan, sehingga dominasi aliran akan mengenai bagian depan namun tidak keseluruhan permukaan depan desain kereta karena terdistribusi kearah samping desain kereta.

Gaya *drag* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: densitas, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien drag. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini.

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

dimana  $C_d$  adalah koefisien hambat,  $F_d$  adalah gaya hambat,  $\rho$  adalah densitas,  $V$  adalah kecepatan udara, dan  $A_f$  adalah luas area depan

Maka perhitungan  $C_D$  menjadi

$$C_d = \frac{2 \times 43,735902}{1,225 \times (27,7)^2 \times 6,8145} = 1,35801$$

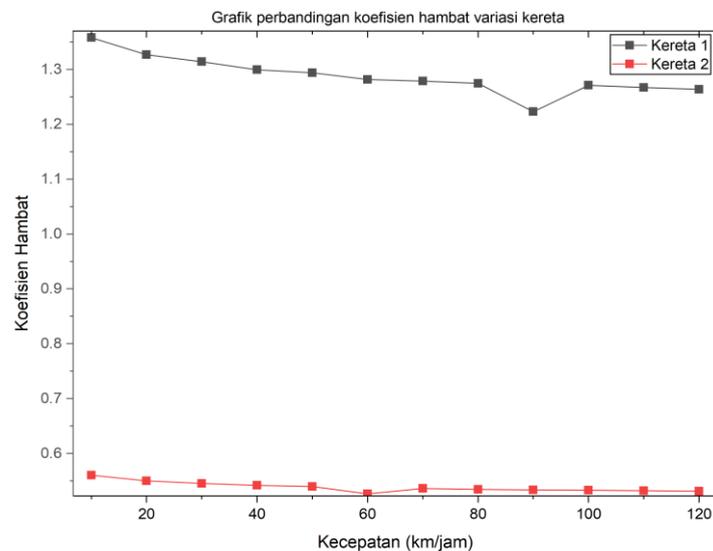
Gaya lift yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa factor antara lain: density, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien lift. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini.

$$C_l = \frac{2 \cdot F_l}{\rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

Maka perhitungan  $C_D$  menjadi

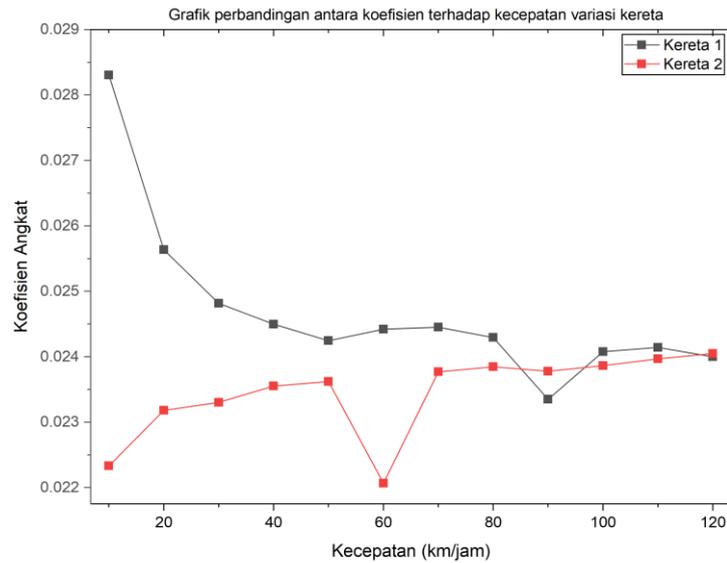
$$C_l = \frac{2 \times 9,8322212}{1,225 \times (27,7)^2 \times 73,49821} = 0,02831$$

Selanjutnya nilai dari koefisien drag dan koefisien lift dapat dilihat pada lampiran. Grafik koefisien drag dan koefisien lift ditampilkan pada gambar 4. 10 dan 4. 11.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan antara koefisien hambatan terhadap kecepatan kereta

Pada Gambar 4.10, nilai dari gaya hambatan mempengaruhi koefisien hambatan yang menyebabkan perbedaan yang cukup signifikan. Sehingga, desain kereta 2 memiliki performa yang cukup baik dibandingkan dengan desain kereta 1.



Gambar 4. 11 Grafik perbandingan antara koefisien angkat terhadap kecepatan kereta

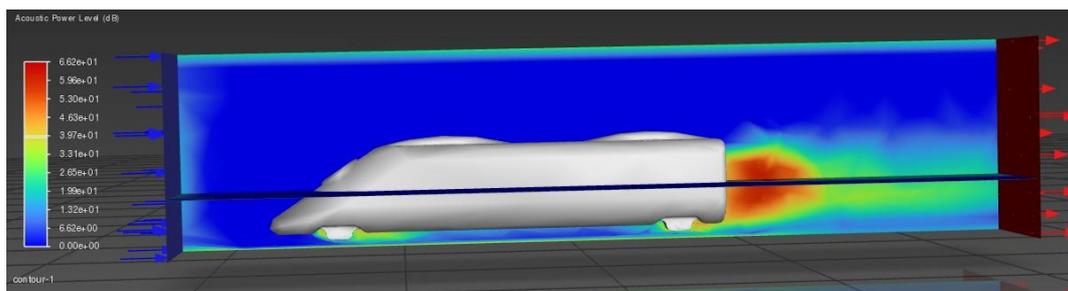
Pada gambar 4.11, koefisien angkat pada kecepatan 10 km/jam memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Saat kecepatan 120 km/jam, koefisien angkat kedua desain memiliki nilai yang serupa sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua desain saat kecepatan tinggi memiliki gaya angkat yang sama.

#### 4.1.6 Analisis Tingkat Tekanan Bunyi

Pada tahap ini, dilakukan simulasi tingkat tekanan bunyi

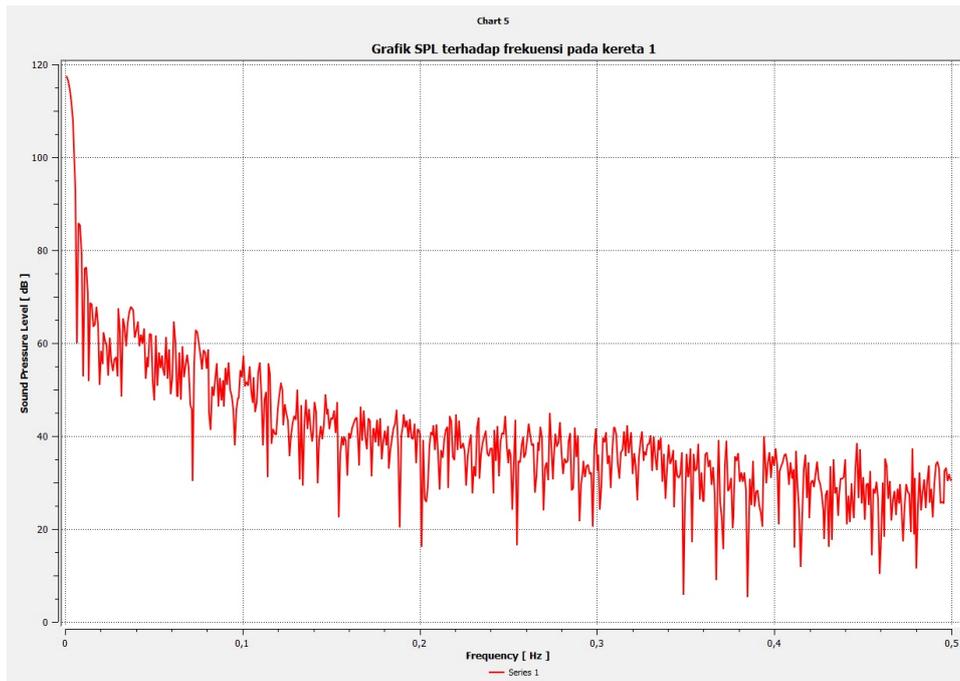
##### 4.1.6.1 Hasil Analisis Simulasi Tingkat Tekanan Bunyi

Berikut adalah hasil tingkat tekanan suara pada variasi kecepatan 120 km/jam pada desain kereta api kedua yang ditampilkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Kontur tingkat tekanan bunyi pada desain kedua

Gambar 4. 12 menampilkan simulasi hasil tingkat tekanan bunyi pada desain kereta api kedua memberikan visual bahwa nilai tertinggi pada 66 dB. Kemudian pada simulasi juga dapat memberikan penempatan mikrofon pada belakang badan kereta api dengan menampilkan nilai tingkat tekanan suara yang dapat dilihat pada Gambar 4.13.

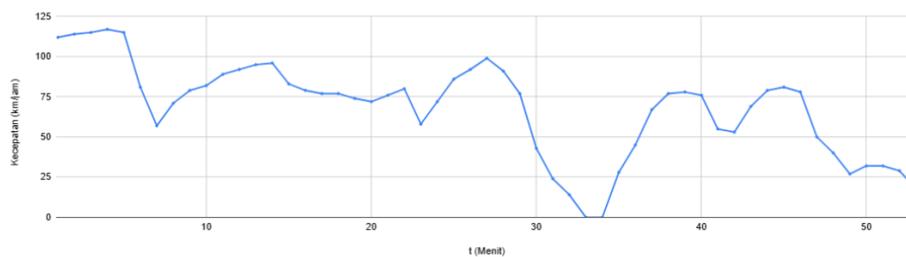


Gambar 4. 13 Grafik tingkat tekanan bunyi terhadap frekuensi pada kereta 2

Gambar 4. 13 menampilkan grafik yang ditempatkan pada belakang kereta memberikan visual data bahwa pada frekuensi rendah memiliki nilai desibel yang tinggi, kemudian grafik tersebut menurun di frekuensi menengah keatas.

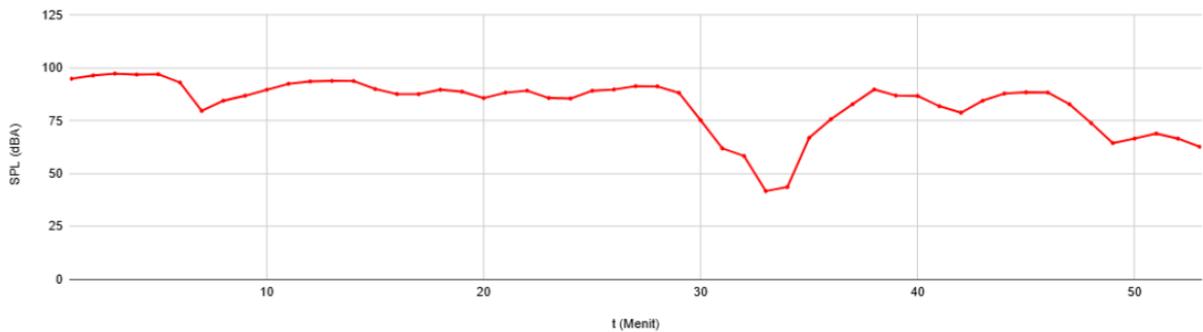
#### 4.1.6.2 Hasil Pengukuran Pada Sidewall Kereta Api

Berikut adalah data hasil pengukuran yang dilakukan pada sisi samping badan kereta api, kereta K1 New Generation yang dilakukan selama 52 menit secara kontinu yang dapat dilihat pada Gambar 4. 14.



Gambar 4. 14 Grafik kecepatan kereta terhadap waktu

Pada Gambar 4. 14 menampilkan kecepatan kereta api selama 52 menit, dapat dilihat bahwa perubahan kecepatan kereta api memberikan variasi terhadap data yang akan didapatkan. Selanjutnya data tingkat tekanan suara terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Grafik SPL terhadap waktu

Seperti yang dilihat pada 4.15 bahwa pada kecepatan 118 km/jam, SPL sebesar sekitar 107 dB atau 96 dBA. Hal ini bisa disimpulkan bahwa nilai pada simulasi dan pengukuran memiliki perbedaan yang signifikan. Untuk data pengukuran dengan kecepatan dan tingkat tekanan bunyi terhadap waktu ditampilkan pada lampiran.

## 4.2 Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tekanan yang terjadi pada permukaan bodi kereta api sebagai akibat dari interaksi aliran udara terhadap geometri kereta. Gejala fisis yang menjadi fokus utama adalah fenomena stagnasi dan separasi aliran yang menghasilkan distribusi tekanan tidak merata di sepanjang permukaan kereta. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent menunjukkan bahwa tekanan tertinggi terjadi pada bagian frontal kereta akibat terbentuknya zona stagnasi, sedangkan tekanan rendah terdistribusi di bagian ekor kereta yang mengalami *separation flow* dan menghasilkan *wake region*. Fenomena ini secara signifikan memengaruhi besarnya gaya hambat dan kestabilan aerodinamis kendaraan. Dengan memahami pola distribusi tekanan ini, perancang dapat mengidentifikasi daerah kritis untuk dilakukan modifikasi desain guna meningkatkan performa aerodinamis dan mengurangi energi yang hilang akibat resistansi udara.

Mengevaluasi parameter gaya aerodinamis berupa gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*) yang bekerja pada struktur kereta api. Secara fisis, gaya drag timbul akibat kombinasi dari *friction drag* yang berasal dari gesekan lapisan batas antara udara dan permukaan kereta, serta *pressure drag* yang dipicu oleh perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang kereta. Adapun gaya *lift* muncul sebagai akibat dari perbedaan distribusi tekanan antara bagian atas dan bawah bodi kereta, yang dapat mengganggu kestabilan vertikal kendaraan. Perhitungan koefisien *drag* ( $C_d$ ) dan *lift* ( $C_l$ ) dilakukan dengan memanfaatkan hasil gaya total dari simulasi dan mempertimbangkan parameter fluida seperti densitas udara, kecepatan aliran, serta luas permukaan frontal. Nilai  $C_d$  dan  $C_l$  yang lebih rendah menunjukkan desain kereta yang lebih aerodinamis dan stabil, serta lebih efisien dalam penggunaan energi selama operasi. Analisis terhadap parameter ini memberikan pemahaman kuantitatif mengenai efisiensi desain dan kontribusinya terhadap keseluruhan performa kendaraan.

Selain itu, melakukan analisis terhadap tingkat tekanan bunyi (*Sound Pressure Level*) yang dihasilkan oleh aliran aerodinamis di sekitar kereta, serta membandingkannya dengan hasil pengukuran eksperimental. Gejala fisis yang diamati meliputi terbentuknya turbulensi dan vorteks akibat kompleksitas bentuk kereta, khususnya di area sambungan antar gerbong dan struktur bogie. Turbulensi ini menghasilkan fluktuasi tekanan yang menjadi sumber utama

emisi akustik eksternal. Simulasi SPL dilakukan dengan pendekatan numerik menggunakan metode *Ffowcs Williams–Hawkings* yang tertanam dalam solver ANSYS Fluent, sementara data eksperimen diperoleh melalui pengukuran SPL secara langsung pada sidewall kereta menggunakan mikrofon terkalibrasi. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa SPL yang dihasilkan oleh simulasi berada dalam kisaran yang cukup jauh disebabkan terdapat deviasi yang diakibatkan oleh faktor-faktor lingkungan dan sumber kebisingan non-aerodinamis seperti *rolling noise*. Dengan demikian, model simulasi ini terbukti cukup representatif dalam menggambarkan karakteristik aeroakustik kereta, sekaligus menjadi dasar untuk pengembangan desain yang lebih senyap dan nyaman bagi penumpang.

Hasil simulasi pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 menunjukkan bahwa kontur tekanan yang dapat terlihat bahwa bagian depan kereta mengalami peningkatan tekanan yang signifikan, yang diwakili oleh warna merah pada gambar. Ini menunjukkan terjadinya kompresi udara akibat pergerakan kereta yang memotong aliran udara. Kompresi ini menghasilkan gaya *drag* yang menjadi sumber utama hambatan yang harus diatasi oleh kereta untuk mencapai kecepatan yang diinginkan.

Di sisi lain, bagian belakang kereta menunjukkan zona tekanan rendah (*wake*) yang ditandai dengan warna biru pada gambar 4.12. Hal ini menunjukkan bahwa aliran udara mengalami *separation flow* dan terlepas dari permukaan kereta, yang menciptakan turbulensi di daerah tersebut. Turbulensi yang terbentuk di belakang kereta berkontribusi pada peningkatan *drag* serta gaya angkat yang tidak diinginkan, yang mempengaruhi stabilitas dan kenyamanan kereta. Selain itu, *wake* yang terbentuk menyebabkan fluktuasi tekanan yang sangat berpengaruh terhadap tingkat kebisingan (SPL) yang dihasilkan. Fluktuasi tekanan yang tinggi ini menciptakan gelombang suara yang dapat mengganggu kenyamanan penumpang dan menambah dampak negatif terhadap lingkungan.

Pola *streamlines* atau garis aliran yang ditampilkan pada gambar lampiran 18 menunjukkan bahwa aliran udara di bagian depan kereta cenderung lebih teratur dan terarah, dengan garis aliran yang rapat, yang mengindikasikan bahwa aliran udara mengikuti bentuk kereta dengan relatif halus. Namun, di bagian belakang kereta, garis aliran menjadi lebih berantakan, yang menandakan adanya turbulensi dan vorteks yang dihasilkan akibat *separation flow*. Turbulensi ini tidak hanya mempengaruhi *drag*, tetapi juga berkontribusi pada tingkat kebisingan yang lebih tinggi.

Distribusi tekanan pada permukaan bodi kereta api memainkan peran fundamental dalam pembentukan gaya aerodinamis, khususnya gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*). Secara fisis, gaya *drag* timbul dari dua komponen utama, yaitu *pressure drag* akibat perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang kereta, serta *friction drag* akibat gesekan viskos fluida pada permukaan kereta. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa tekanan maksimum terakumulasi pada bagian frontal kereta sebagai akibat dari zona stagnasi aliran udara, sedangkan tekanan minimum terjadi pada bagian ekor akibat fenomena *separation flow* yang menghasilkan daerah *wake*. Perbedaan tekanan ini membentuk gradien tekanan longitudinal yang menjadi penyebab utama terbentuknya gaya *drag*. Semakin besar perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang kereta, semakin besar pula gaya hambat yang dihasilkan. Oleh karena itu, kontur tekanan yang menunjukkan zona tekanan tinggi di depan dan tekanan rendah yang luas di belakang merupakan indikasi langsung dari tingginya nilai gaya *drag*.

Sementara itu, gaya *lift* berasosiasi dengan perbedaan tekanan vertikal antara permukaan atas dan bawah kereta. Dalam konteks aerodinamika kereta api, gaya angkat dapat bersifat positif (mengangkat) atau negatif (menekan), tergantung pada distribusi tekanan di sepanjang sumbu vertikal. Hasil kontur tekanan menunjukkan bahwa apabila tekanan di bagian bawah kereta lebih besar daripada di bagian atas, maka akan terbentuk gaya lift positif yang cenderung mengangkat bodi kereta. Fenomena ini umumnya terjadi akibat bentuk geometrik bagian bawah yang cenderung datar dan kompleks, seperti keberadaan bogie dan sambungan antar gerbong, yang menghambat aliran dan meningkatkan tekanan lokal. Sebaliknya, tekanan yang lebih besar pada bagian atas menghasilkan gaya *lift* negatif yang dapat meningkatkan kestabilan vertikal kendaraan. Oleh karena itu, distribusi tekanan yang tidak simetris secara vertikal akan menghasilkan gaya angkat yang signifikan, yang perlu diminimalkan untuk menghindari ketidakstabilan dinamika gerak vertikal.

Pada data eksperimental, saat kereta api bergerak dengan kecepatan 118 km/jam terukur sebesar sekitar 100 dbA. Hal ini disebabkan oleh banyak hal, salah satunya adalah interaksi antar udara dan kereta api, namun penyebab lainnya seperti rolling noise juga menjadi penyebab utama tingginya SPL saat terukur. Sehingga perlu adanya simulasi lebih lanjut untuk mengetahui seberapa besar pengaruh gaya aerodinamis. Untuk kecepatan lainnya terlampirkan pada lampiran 5.

*Sound Pressure Level* (SPL) yang dihasilkan oleh kereta api selama operasi sebagian besar bersumber dari interaksi antara aliran fluida dan permukaan bodi, yang menghasilkan turbulensi, *vortex*, serta fluktuasi tekanan. Meskipun SPL pada dasarnya merupakan fenomena akustik dan gaya *lift* serta drag merupakan fenomena mekanika fluida, keduanya berasal dari asal fisis yang sama, yaitu ketidakstabilan aliran (*flow instabilities*) di sekitar bodi kereta. Oleh karena itu, hubungan antara SPL dan gaya aerodinamis bersifat korelasi tidak langsung namun signifikan.

Secara prinsip, daerah yang mengalami separasi aliran dan menghasilkan *wake turbulence* adalah sumber dominan baik untuk gaya *drag* yang tinggi maupun pola tekanan fluktuatif yang menyebabkan radiasi suara. Ketika aliran udara tidak lagi mengikuti kontur permukaan bodi dan terpisah, terbentuklah vorteks dan aliran tak beraturan (turbulen) yang menciptakan perbedaan tekanan spasial dan temporal. Fenomena ini memperbesar drag karena menambah tekanan balik pada bodi, sekaligus menjadi sumber radiasi akustik yang terekam sebagai peningkatan SPL. Dengan kata lain, semakin besar drag akibat separasi dan turbulensi, semakin tinggi pula kemungkinan terjadinya emisi akustik dengan SPL yang besar.

Gaya *lift*, di sisi lain, sangat dipengaruhi oleh ketidakseimbangan distribusi tekanan vertikal, yang juga dapat terganggu oleh fluktuasi tekanan akibat turbulensi osilasi di bawah atau di atas kereta. Fluktuasi tekanan yang tidak simetris dapat menyebabkan gaya *lift* berubah-ubah secara dinamis, yang berpotensi menghasilkan ketidakstabilan vertikal, terutama pada kecepatan tinggi. Dalam konteks ini, SPL tinggi yang berasal dari fluktuasi tekanan intensif dapat mencerminkan ketidakteraturan aliran yang juga berkontribusi terhadap pembentukan gaya lift tidak stabil.

Dengan demikian, SPL dapat digunakan sebagai indikator tidak langsung terhadap kualitas aliran fluida di sekitar bodi kereta. Nilai SPL yang tinggi biasanya berasosiasi dengan tingginya gaya *drag* akibat separasi dan *wake*, serta kemungkinan munculnya gaya *lift* tak seimbang. Oleh karena itu, dalam desain kereta api modern, reduksi SPL tidak hanya bertujuan mengurangi kebisingan lingkungan, tetapi juga berkorelasi dengan peningkatan efisiensi aerodinamis dan

kestabilan gerak. Pendekatan ini mengarah pada pentingnya desain terpadu aeroakustik, di mana aspek aerodinamika dan akustik dianalisis secara bersamaan untuk mencapai kinerja optimal.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa Kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada desain kereta api pertama memiliki tekanan lebih besar dibandingkan dengan desain kereta api kedua karena pengaruh dari permukaan depan dari kedua desain. Pada hasil simulasi, menampilkan hasil kontur tekanan terbesar pada desain kereta api pertama sebesar 992 Pa pada kecepatan 120 km/jam. Sedangkan desain kereta api kedua memiliki tekanan terbesar sebesar 444 Pa.
2. Koefisien hambat ( $C_d$ ) desain pertama lebih besar dibandingkan dengan koefisien hambat kedua pada kecepatan 120 km/jam, dengan nilai masing-masing sebesar 1,3 dan 0,5.
3. Koefisien angkat ( $C_l$ ) desain pertama lebih besar dibandingkan dengan koefisien angkat kedua pada kecepatan 120 km/jam, dengan nilai masing-masing paling besar sebesar 0,024 dan 0,022.
4. Perbandingan antara simulasi dan pengukuran memiliki perbedaan yang cukup jauh, hal tersebut disebabkan pada simulasi dalam kondisi tanpa adanya pengaruh eksternal, sedangkan pada pengukuran adanya pengaruh eksternal seperti rolling noise dan interaksi dengan lingkungan.

### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dipaparkan, dapat dirumuskan beberapa saran untuk penelitian berikutnya, yaitu:

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk desain kereta api yang lebih kompleks.
2. Perlu adanya pemanfaatan dan pengembangan lebih lanjut pada metode Aeroakustik Ffowcs Williams-Hawkings.
3. Perlu dilakukan evaluasi untuk simulasi SPL.

## DAFTAR PUSTAKA

- Andersson, T., Aronson, L., Pettersson, B., 1994. Train Wind Force Caused by Passing Trains. Report (in Swedish).
- Baker, C., 2019. Discussion of paper “Field study on high-speed train induced fluctuating pressure on a bridge noise barrier” by Xiong et al. (2018). *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 185, 54. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.12.014>.
- Barnard R.H. 1996. Road vehicle Aerodynamic design : An Introduction. England : Longman
- Blocken, B., 2014. 50 years of computational wind engineering: past, present and future. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 129, 69–102.
- Blocken, B., 2015. Computational Fluid Dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Build. Environ.* 91, 219–245.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2010). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill.
- Damjanovic, Darko, Kozak, Dražan, Ivandic, Zeljko, and Kokanivic, Mato. Car Design As A New Conceptual And CFD Analysis In Purpose of Improving Aerodynamics. 2010. Croatia
- D. J. Thompson, E. Latorre Iglesias, X. Liu, J. Zhu, and Z. Hu, “Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains,” *International Journal of Rail Transportation*, vol. 3, no. 3, pp. 119–150, 2015.
- Everest, F. Alton. (2009). *Master Handbook of Acoustics* (Edisi ke-5). New York: McGraw-Hill Professional.
- Ffowcs Williams JE, Hawkings DL. Sound generation by turbulence and surface in arbitrary motion. *Philos Trans Series A, Math, Phys, Eng Sci* 1969;264:321–42.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST Office Brussels. ISBN: 3-00-018312-4.
- Gilkeson, C. A., Thompson, H. M., Wilson, M. C. T., Gaskell, P. H., & Barnard, R. H. (2009). An experimental and computational study of the aerodynamic and passive ventilation characteristics of small livestock trailers. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 97(9–10), 415–425.
- J. A. Schetz, “Aerodynamics of high-speed trains,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 33, pp. 371–414, 2001.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2007). Undang-Undang No. 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian. Jakarta: Kementerian Perhubungan.
- Luo, C., Zhou, D., Chen, G., Krajnovic, S., Sheridan, J., 2020. Aerodynamic effects as a maglev train passes through a noise barrier. *Flow, Turbul. Combust.* 105 (3), 761–785. Luo, W., Jiang, J., 2016. Dynamic calculation of noise barrier subjected to impulsive wind pressure based on ANSYS. In: 5th International Conference on Energy and Environmental

- Protection (ICEEP 2016). Atlantis Press, pp. 787–791. Lv, J.P., 2010. Structural Study on the Noise Barrier of Inserted and Integral Type for High-Speed Railway. Doctoral dissertation, Southeast University, Nanjing, China (in Chinese).
- Maydiyanto, Ismail. 2015. Permodelan Medan Aliran 3 Dimensi Pada Bodi Mobil Listrik Nogogeni 5 . Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7th ed. Wiley.
- Pritchard, Philip J., Fox and Mc Donald's. 2011. *Introduction of fluid mechanics : Eight Edition* . USA : John Willey & Sons, Inc.
- Roache, P.J., 1998. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa, Albuquerque, NM.
- Situmorang, L. H. (2012). *Transportasi Kereta Api: Sistem dan Pengembangan di Indonesia*. Jakarta: Penerbit Gadjah Mada.
- Sutantra, I Nyoman. 2001. *Teknologi Otomotif : Teori dan Aplikasinya*. Surabaya : Guna Widya
- T.Kitagawa and K.Nagakura, "Aerodynamic noise generated by Shinkansen cars," *Journal of Sound and Vibration*, vol.231, no. 3, pp.913–924, 2000.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T., 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 96, 1749–1761.
- Tuakia, Firman. 2008. *Dasar dasar CFD Menggunakan FLUENT*. Bandung : Informatika
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*, 7th ed. McGraw-Hill Education.
- Zulfa, Faridatus. 2017. *Pemodelan Numerik Aliran 3 Dimensi Pada Bodi Mobil Listrik Nogogeni 6* . Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

## LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel hasil data pada kereta 1

No	Kecepatan (km/jam)	Gaya Hambat (N)	Gaya Angkat (N)	Koefisien Hambat	Koefisien Angkat
1	10	43,735902	9,8322212	1,35801	0,028306
2	20	170,92901	35,617003	1,326846	0,025634
3	30	380,90931	77,58227	1,314147	0,024817
4	40	669,6365	136,15181	1,299523	0,024498
5	50	1041,8195	210,53813	1,29395	0,024244
6	60	1486,1747	305,39251	1,281835	0,024422
7	70	2017,6617	416,19067	1,278548	0,024452
8	80	2627,3424	540,08541	1,274681	0,024294
9	90	3190,389	656,9295	1,222992	0,023348
10	100	4093,5259	836,36888	1,271049	0,024078
11	110	4937,8103	1014,7484	1,267109	0,024143
12	120	5861,3783	1200,3783	1,263869	0,023998

Lampiran 2 Tabel hasil data pada kereta 2

No	Kecepatan (km/jam)	Gaya Hambat (N)	Gaya Angkat (N)	Koefisien Hambat	Koefisien Angkat
1	10	21,906122	4,1149178	0,56038	-0,02233
2	20	86,0066	17,085864	0,550033	-0,02318
3	30	191,86503	38,643736	0,545344	-0,0233
4	40	338,92452	69,440156	0,541876	-0,02355
5	50	527,58244	108,81795	0,539843	-0,02362
6	60	740,80788	146,3817	0,526405	-0,02207
7	70	1027,0133	214,60753	0,536164	-0,02377
8	80	1337,3074	281,21032	0,534526	-0,02385
9	90	1689,8883	354,92985	0,533692	-0,02378
10	100	2083,7088	439,72245	0,533033	-0,02386
11	110	2.516,9145	534,43174	0,532109	-0,02397
12	120	2.990,7386	638,13399	0,531292	-0,02405

Lampiran 3 Tabel kecepatan terhadap waktu pada kereta 1

No	Kecepatan (km/jam)	Tekanan Minimal (Pa)	Tekanan Maksimal (Pa)
1	10	-9,43E+00	5,91E+00
2	20	-3,81E+01	2,34E+01
3	30	-8,64E+01	5,22E+01
4	40	-1,54E+02	9,25E+01
5	50	-2,41E+02	1,44E+02
6	60	-3,47E+02	2,07E+02
7	70	-4,74E+02	2,82E+02
8	80	-6,17E+02	3,67E+02
9	90	-7,53E+02	4,47E+02

10	100	-9,68E+02	5,72E+02
11	110	-1,17E+03	6,92E+02
12	120	-1,39E+03	9,22E+02

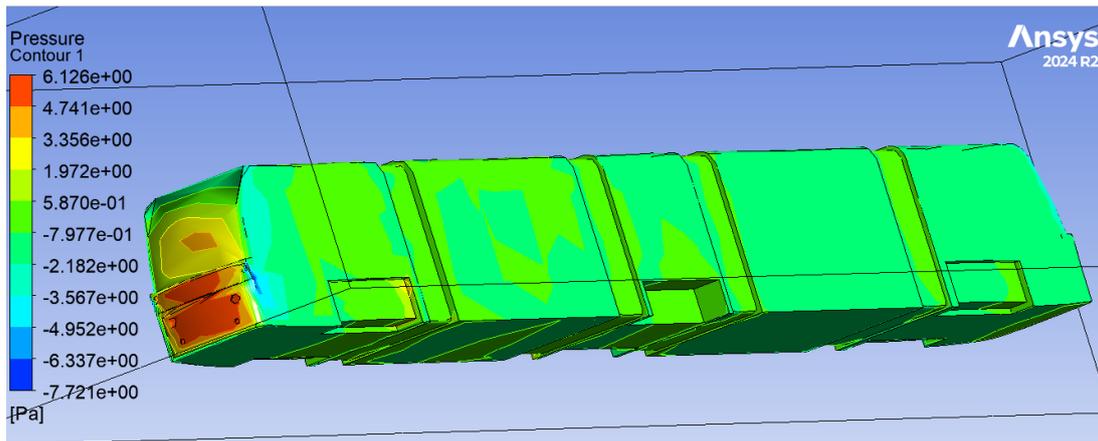
Lampiran 4 Tabel kecepatan terhadap waktu pada kereta 2

No	Kecepatan (km/jam)	Tekanan Minimal (Pa)	Tekanan Maksimal (Pa)
1	10	-9,32E+00	3,20E+00
2	20	-3,89E+01	1,26E+01
3	30	-9,00E+01	2,83E+01
4	40	-1,62E+02	5,00E+01
5	50	-2,55E+02	7,80E+01
6	60	-3,77E+02	1,11E+02
7	70	-5,05E+02	1,52E+02
8	80	-6,61E+02	1,98E+02
9	90	-8,40E+02	2,51E+02
10	100	-1,04E+03	3,09E+02
11	110	-1,26E+03	3,74E+02
12	120	-1,50E+03	4,44E+02

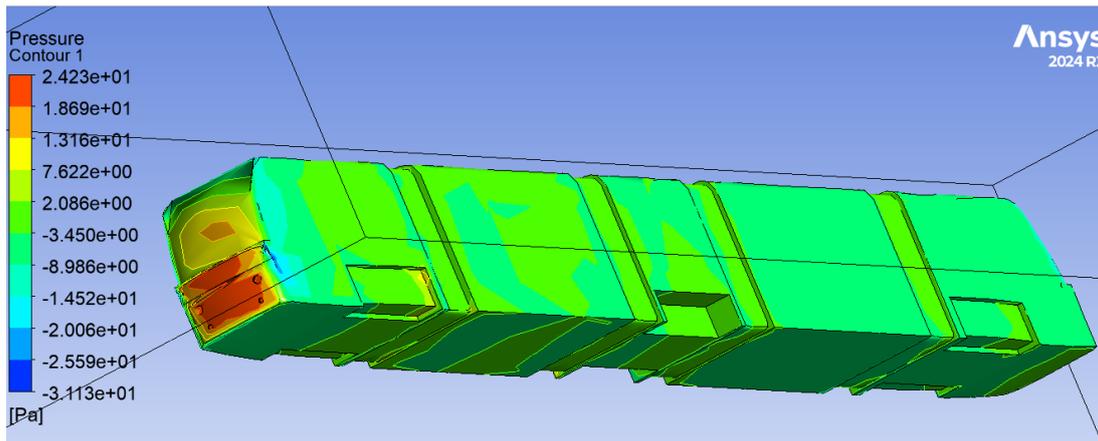
Lampiran 5 Tabel data pengukuran kereta api K1 New Generation

No	Waktu (menit)	Kecepatan (km/jam)	SPL (dB)	SPL (dBA)
1	0:01	113	105,49	94,96
2	0:02	114	106,82	96,52
3	0:03	115	107,5	97,39
4	0:04	118	107,14	96,93
5	0:05	115	107,24	97,1
6	0:06	81	103,72	93,16
7	0:07	57	92,55	79,71
8	0:08	71	96,44	84,54
9	0:09	79	98,68	86,93
10	0:10	82	100,73	89,76
11	0:11	89	103,34	92,55
12	0:12	92	104,34	93,67
13	0:13	95	104,43	93,92
14	0:14	96	104,32	93,86
15	0:15	83	101,12	90,09
16	0:16	79	99,39	87,71
17	0:17	77	99,33	87,66
18	0:18	77	100,97	89,74
19	0:19	74	100,14	88,83
20	0:20	72	97,8	85,83
21	0:21	76	99,82	88,38
22	0:22	80	100,77	89,32
23	0:23	58	97,77	85,84
24	0:24	72	97,66	85,57
25	0:25	86	100,51	89,25

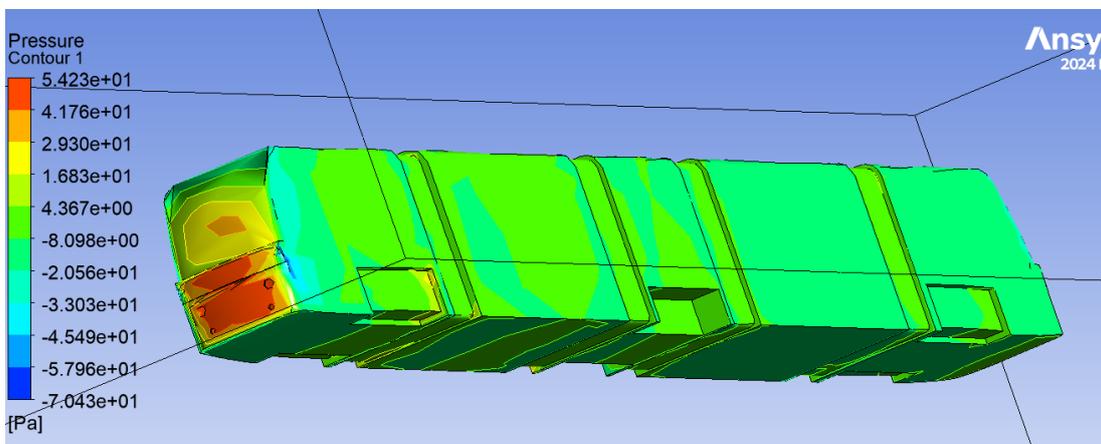
26	0:26	92	100,94	89,87
27	0:27	99	102,32	91,43
28	0:28	91	102,11	91,36
29	0:29	77	99,35	88,29
30	0:30	43	89,29	75,33
31	0:31	24	79,35	62,01
32	0:32	11	73,58	58,42
33	0:33	0	56,12	41,8
34	0:34	0	53,86	43,73
35	0:35	28	82,11	67
36	0:36	45	89,55	75,76
37	0:37	67	95,14	82,9
38	0:38	77	100,6	89,84
39	0:39	78	98,24	86,99
40	0:40	76	97,65	86,81
41	0:41	55	93,36	81,98
42	0:42	53	92,3	78,89
43	0:43	69	96,81	84,55
44	0:44	79	99,68	87,96
45	0:45	81	100,06	88,56
46	0:46	78	100,04	88,42
47	0:47	50	95,25	82,91
48	0:48	40	88,48	73,94
49	0:49	27	81,18	64,51
50	0:50	32	83	66,65
51	0:51	32	84,79	69,02
52	0:52	29	81,78	66,63



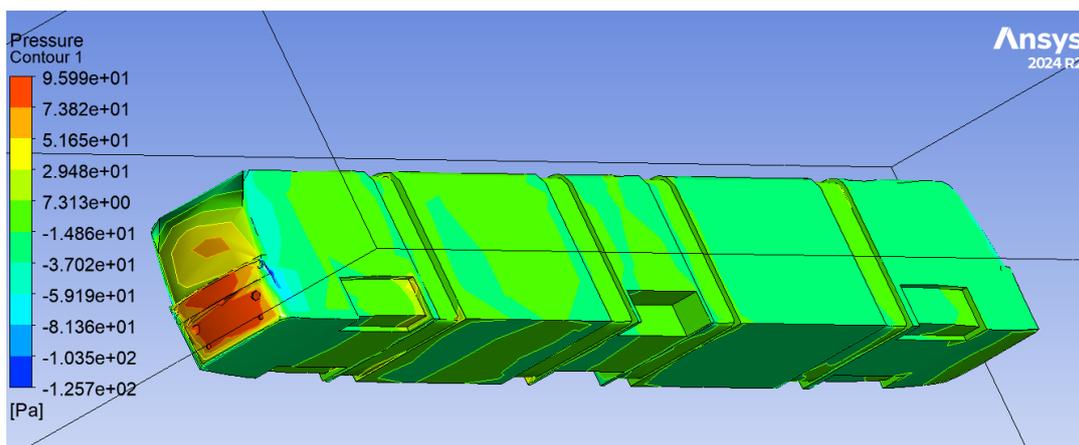
Lampiran 6 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 10 km/jam



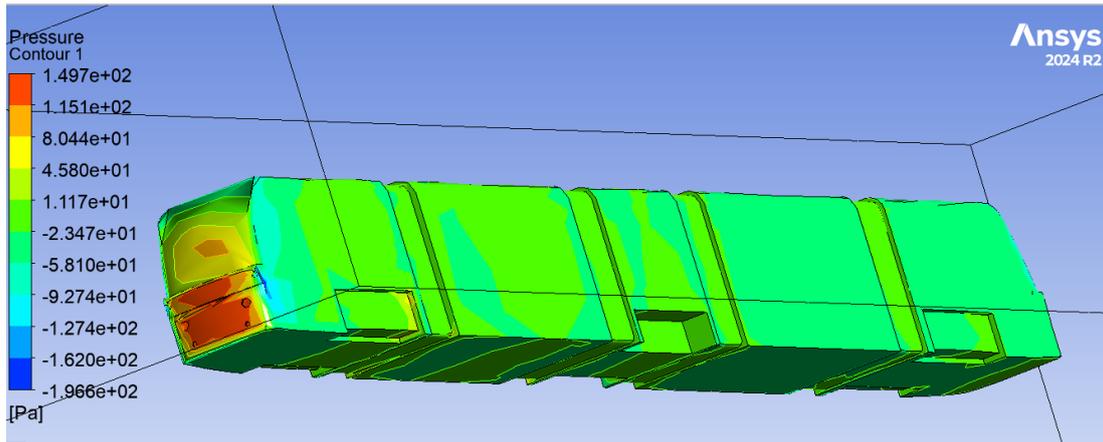
Lampiran 7 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 20 km/jam



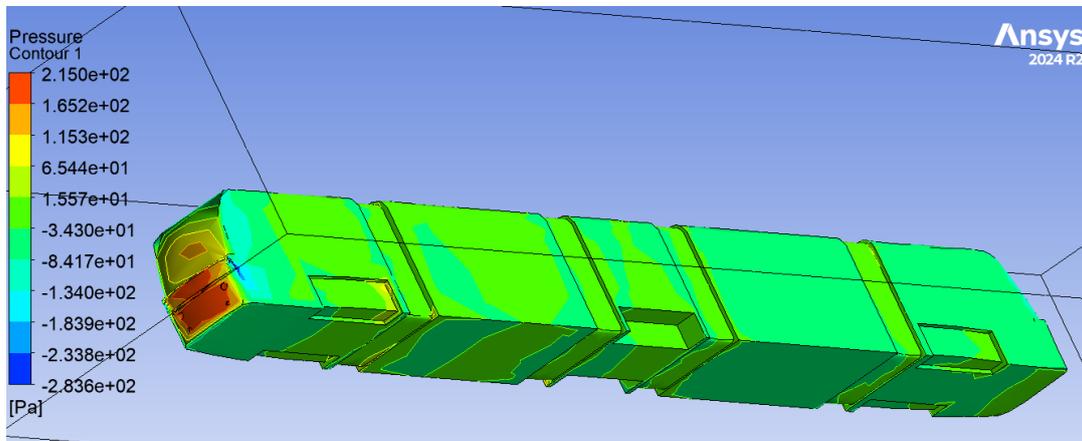
Lampiran 8 Kontur tekanan kereta api variasi kecepatan 30 km/jam



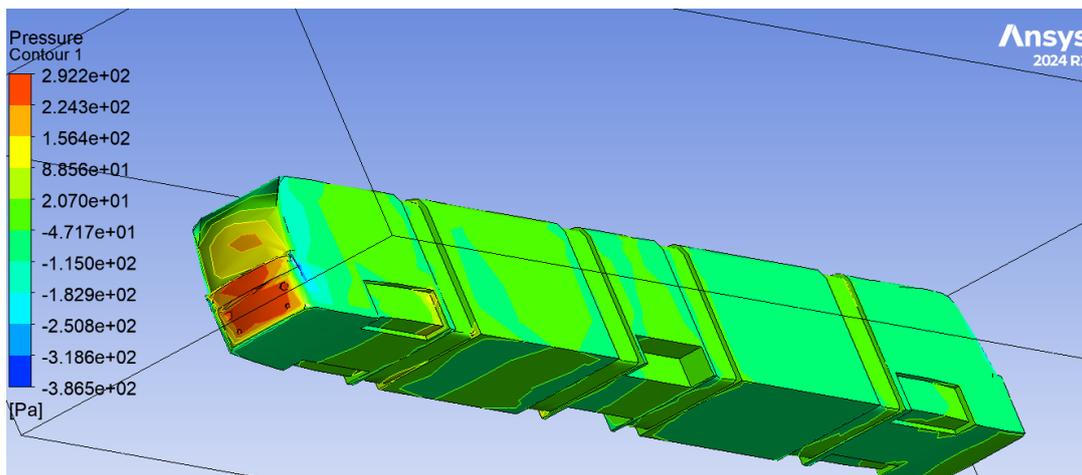
Lampiran 9 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 40 km/jam



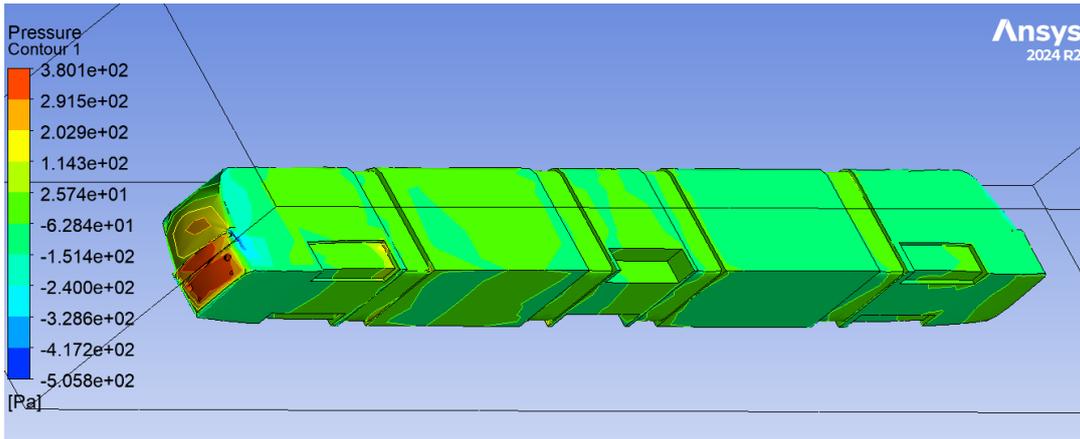
Lampiran 10 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 50 km/jam



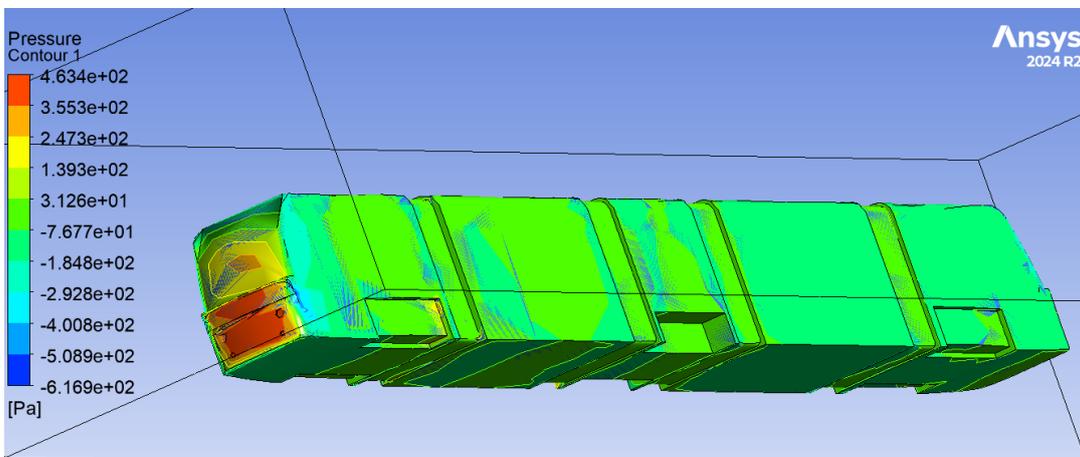
Lampiran 11 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 60 km/jam



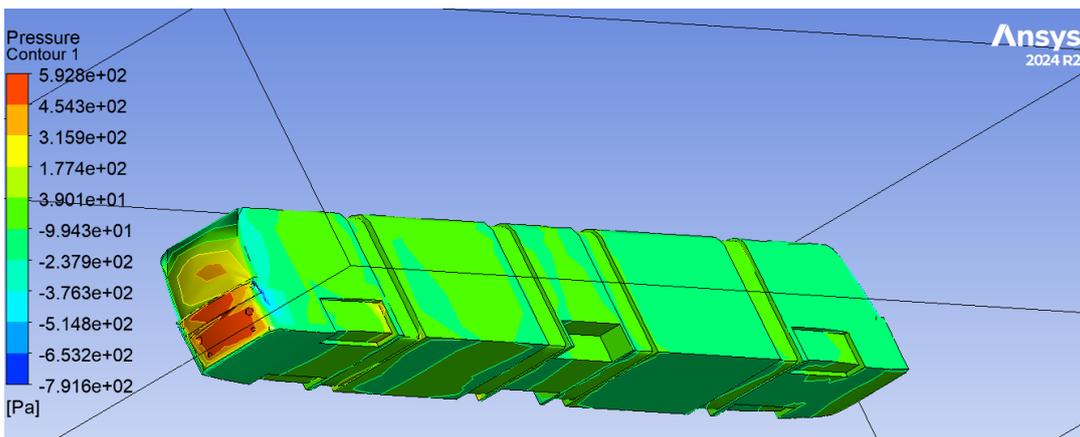
Lampiran 12 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 70 km/jam



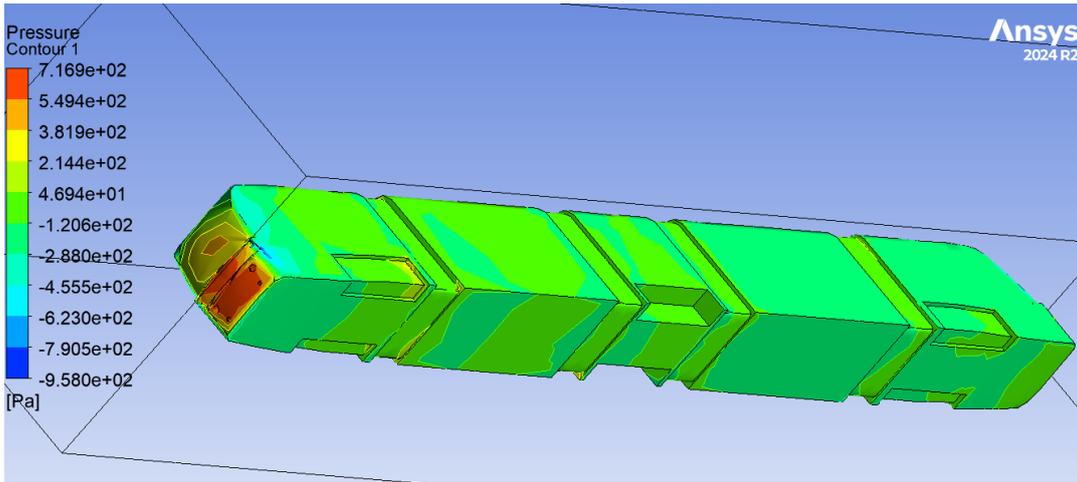
Lampiran 13 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 80 km/jam



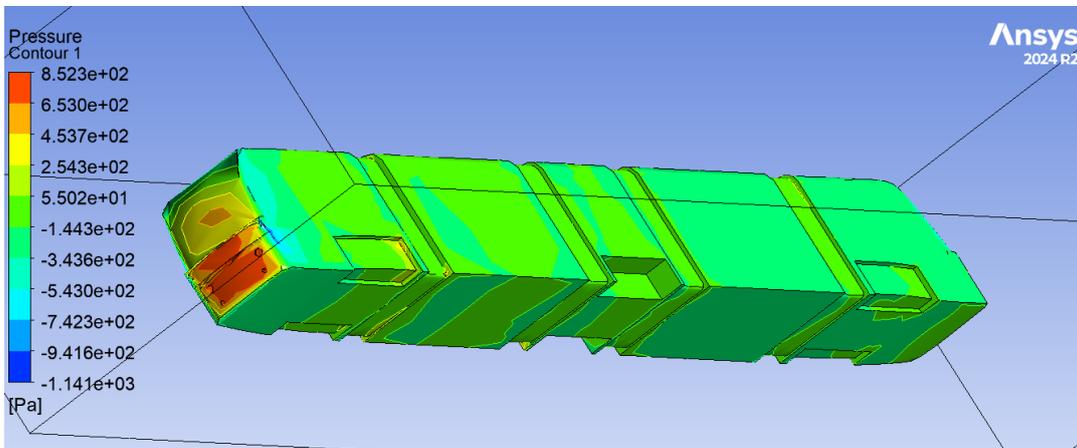
Lampiran 14 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 90 km/jam



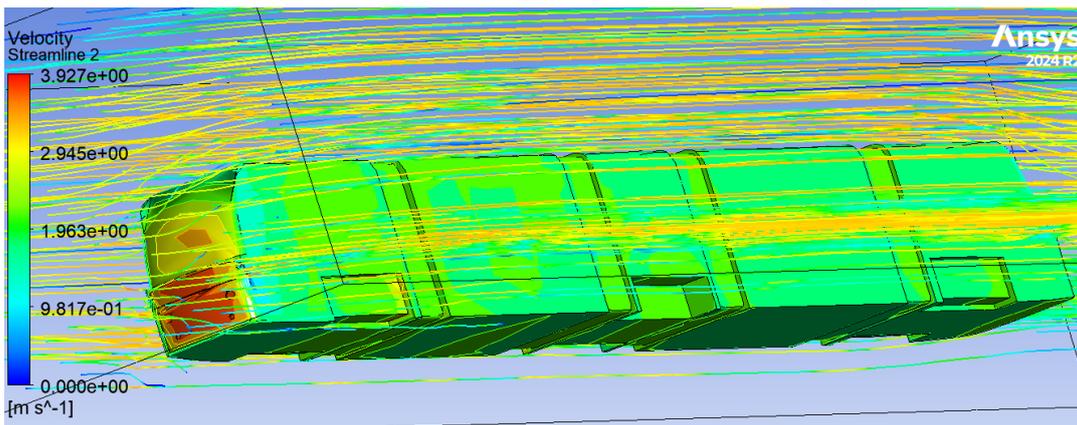
Lampiran 15 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 100 km/jam



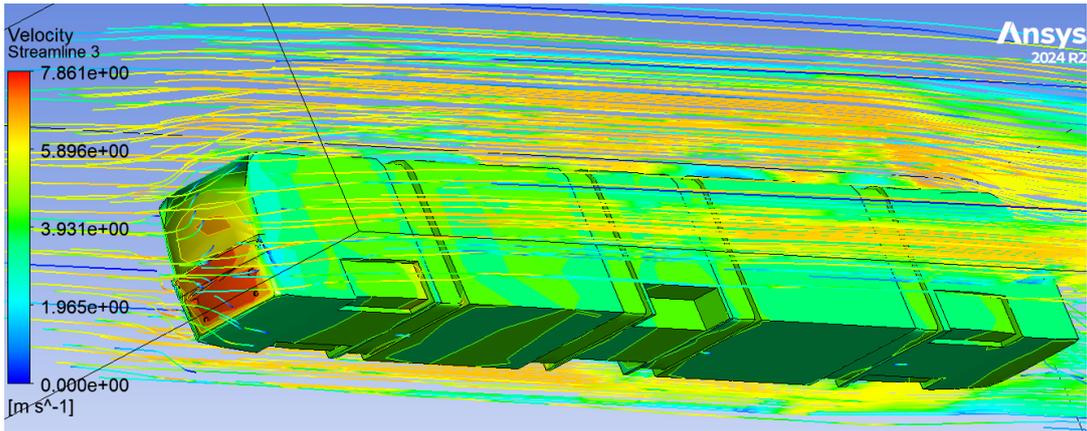
Lampiran 16 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 110 km/jam



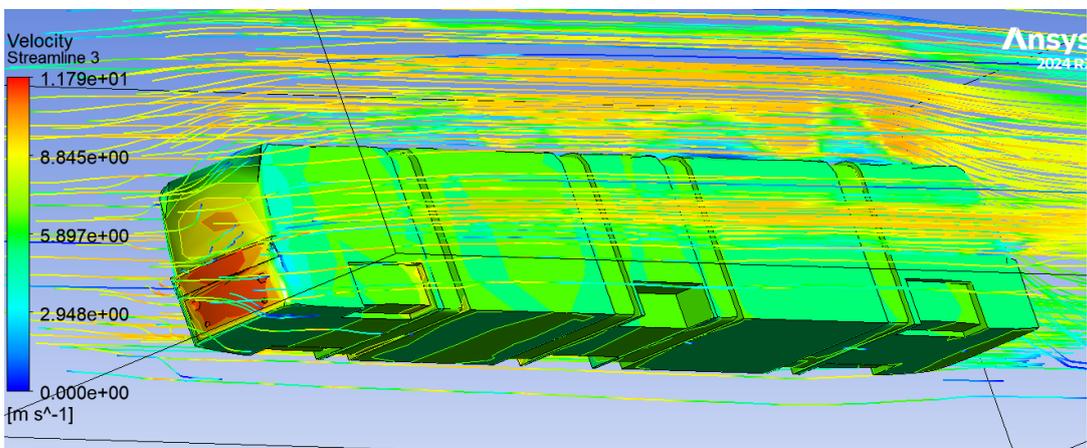
Lampiran 17 Kontur tekanan kereta api 1 variasi kecepatan 120 km/jam



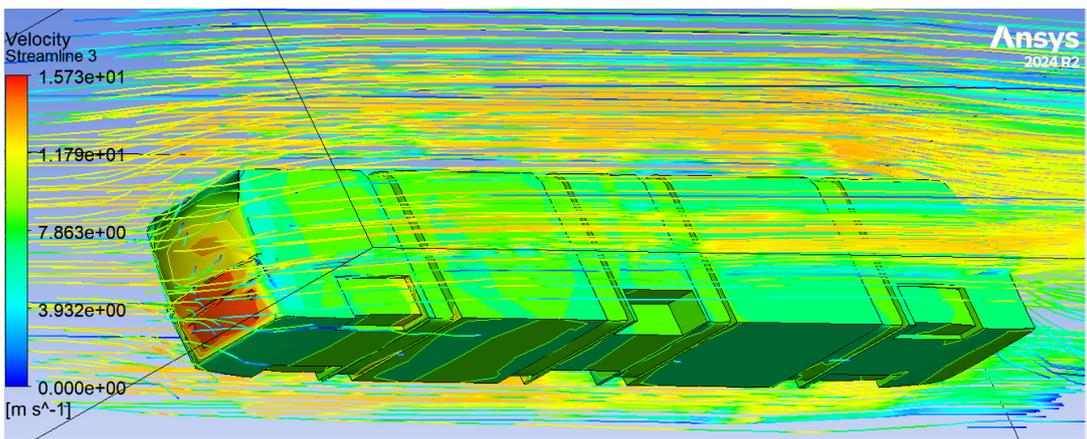
Lampiran 18 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 10 km/jam



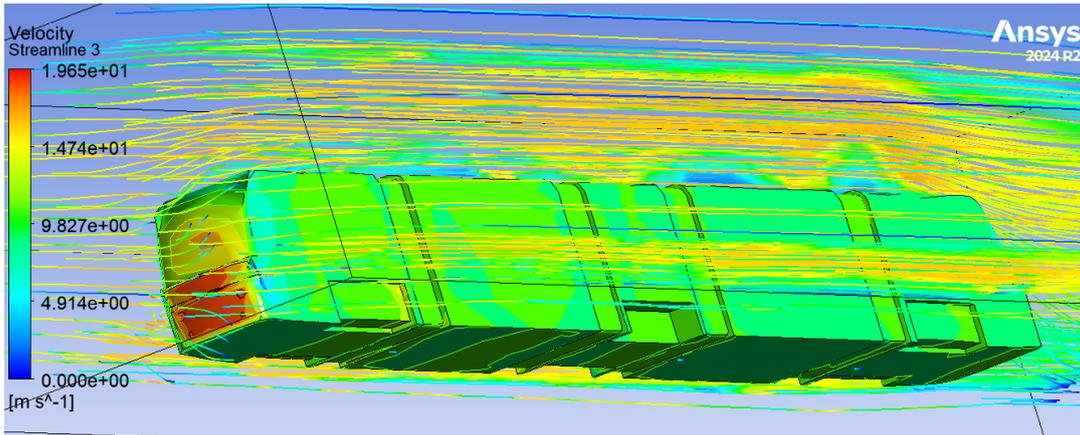
Lampiran 19 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 20 km/jam



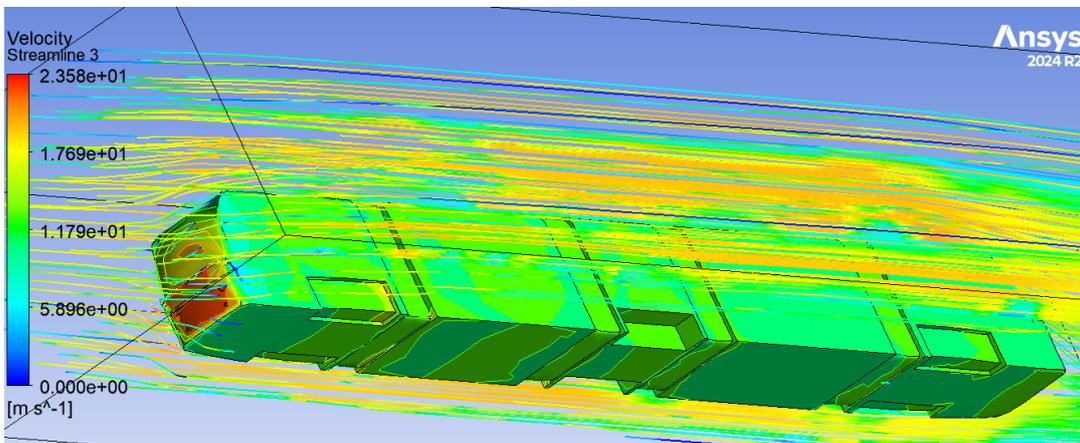
Lampiran 20 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 30 km/jam



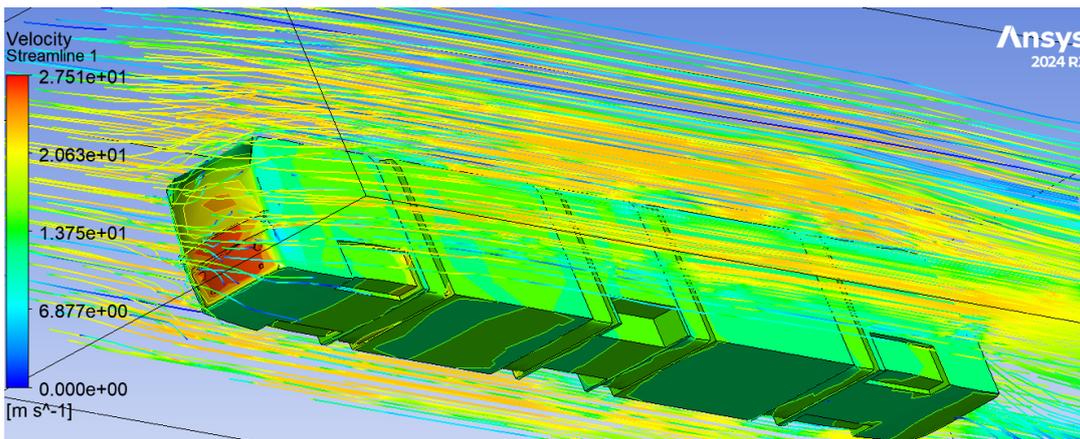
Lampiran 21 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 40 km/jam



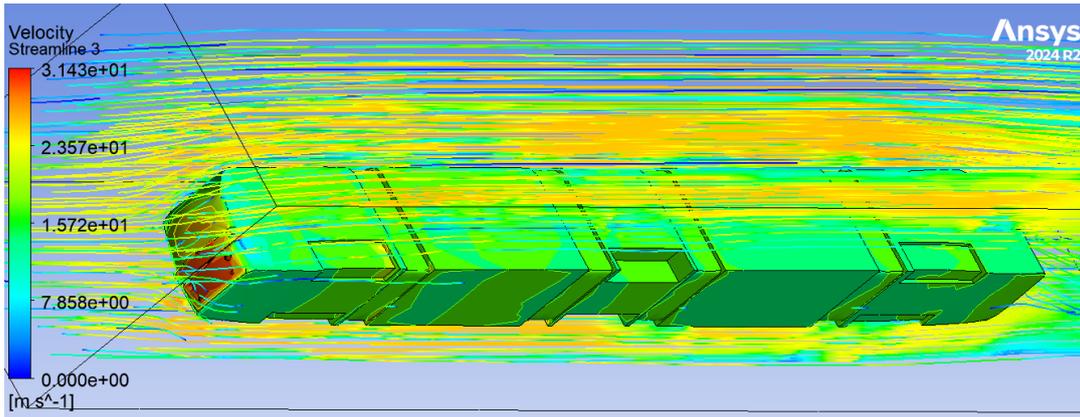
Lampiran 22 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 50 km/jam



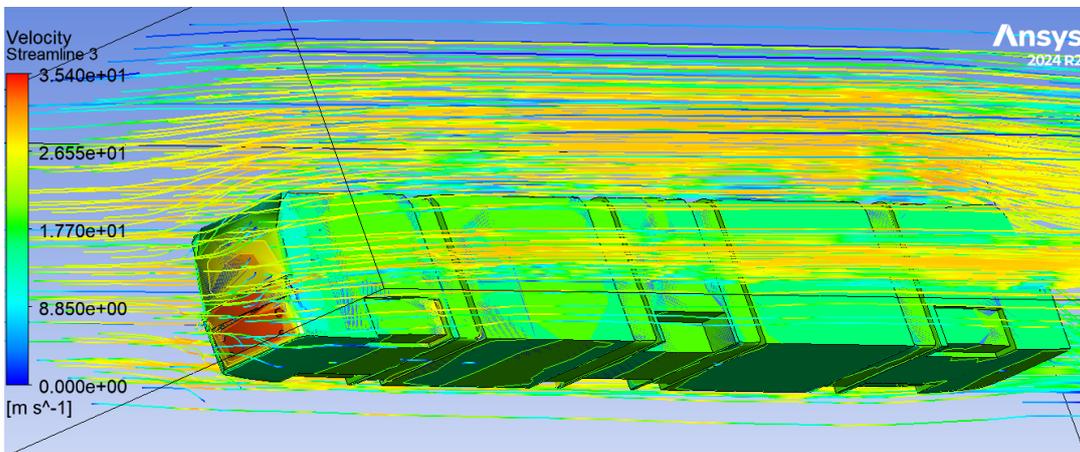
Lampiran 23 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 60 km/jam



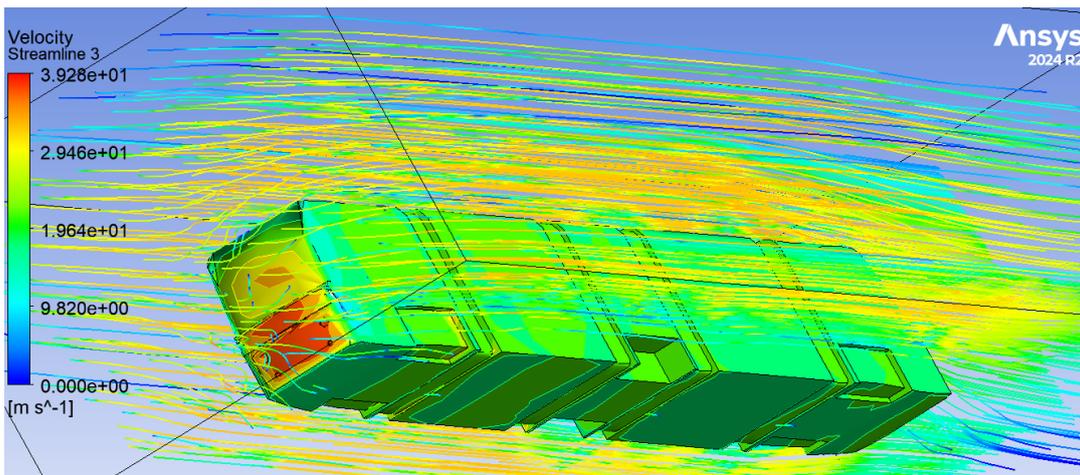
Lampiran 24 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 70 km/jam



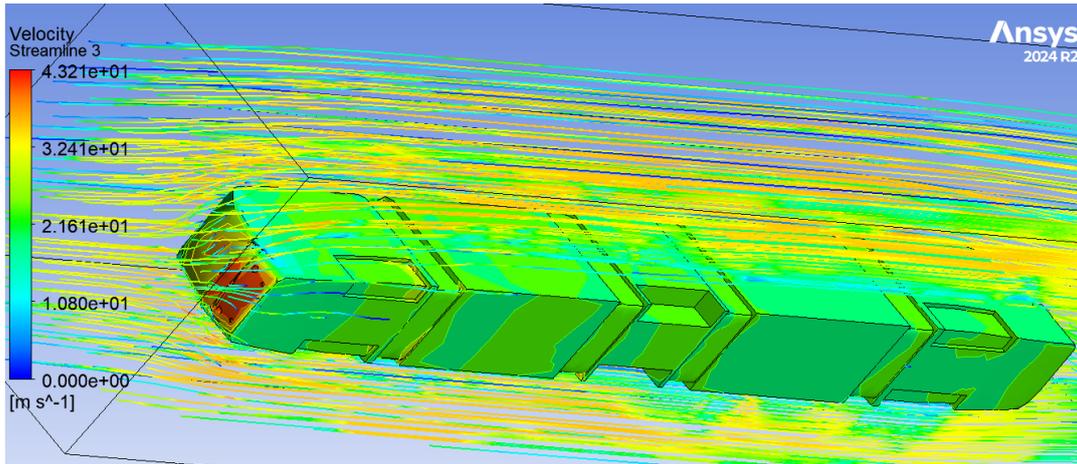
Lampiran 25 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 80 km/jam



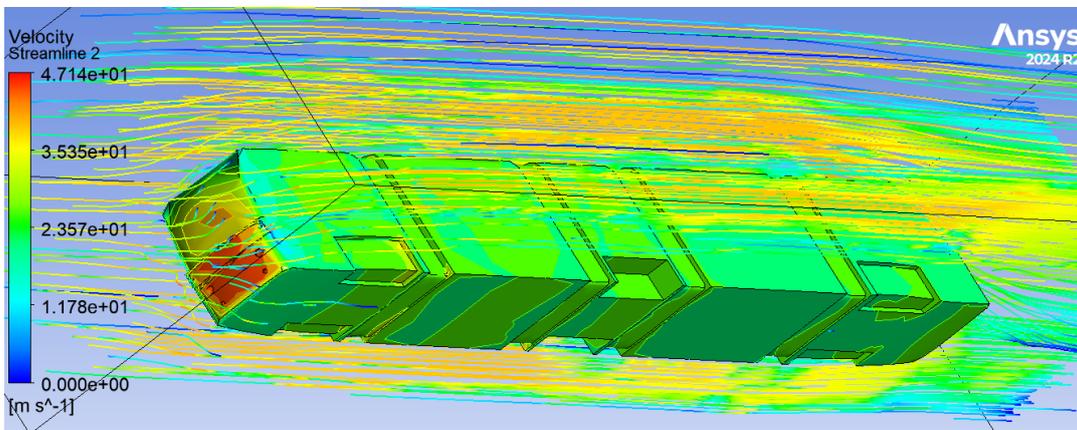
Lampiran 26 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 90 km/jam



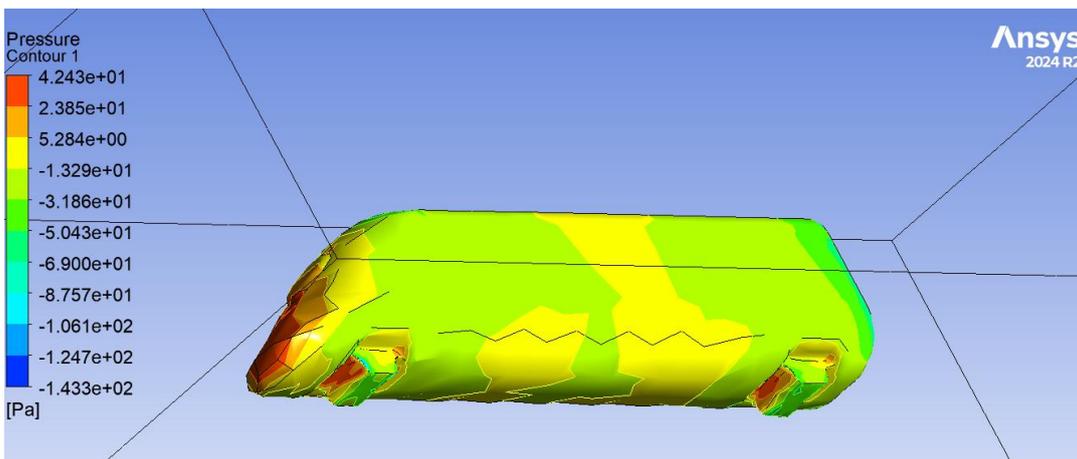
Lampiran 27 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 100 km/jam



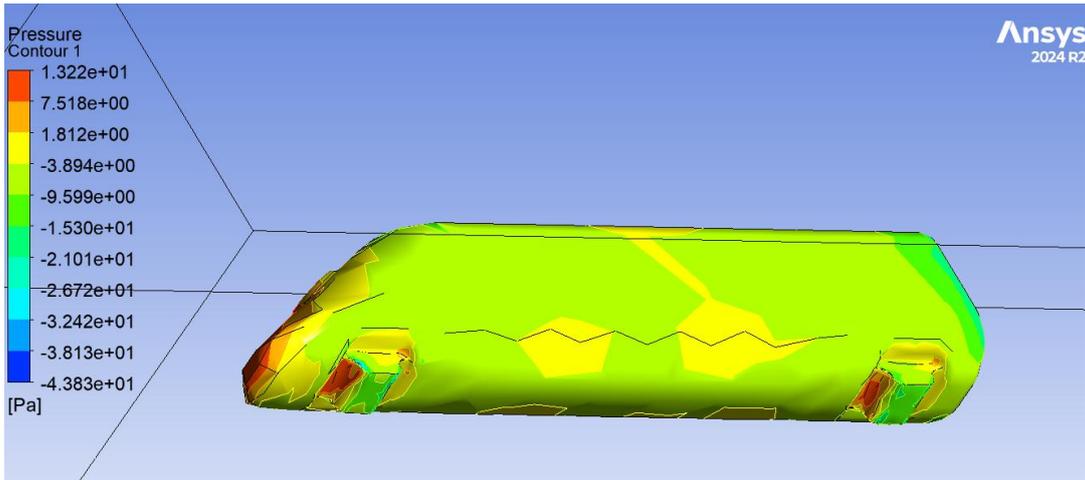
Lampiran 28 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 110 km/jam



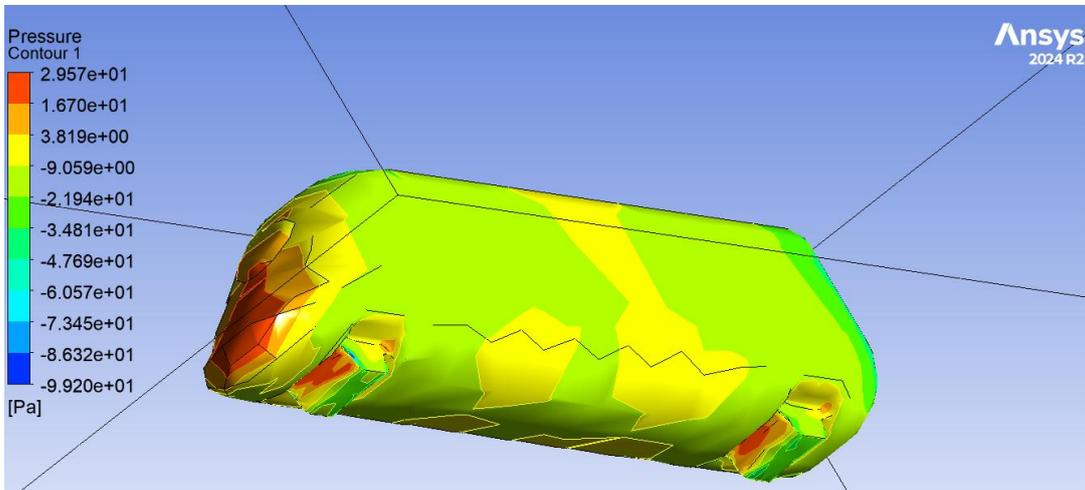
Lampiran 29 Aliran udara kereta api 1 variasi kecepatan 120 km/jam



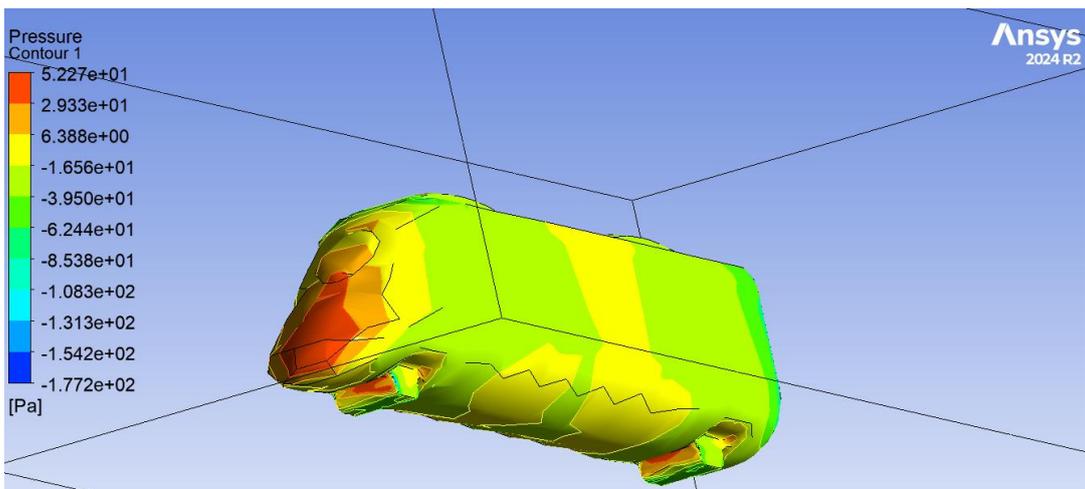
Lampiran 30 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 10 km/jam



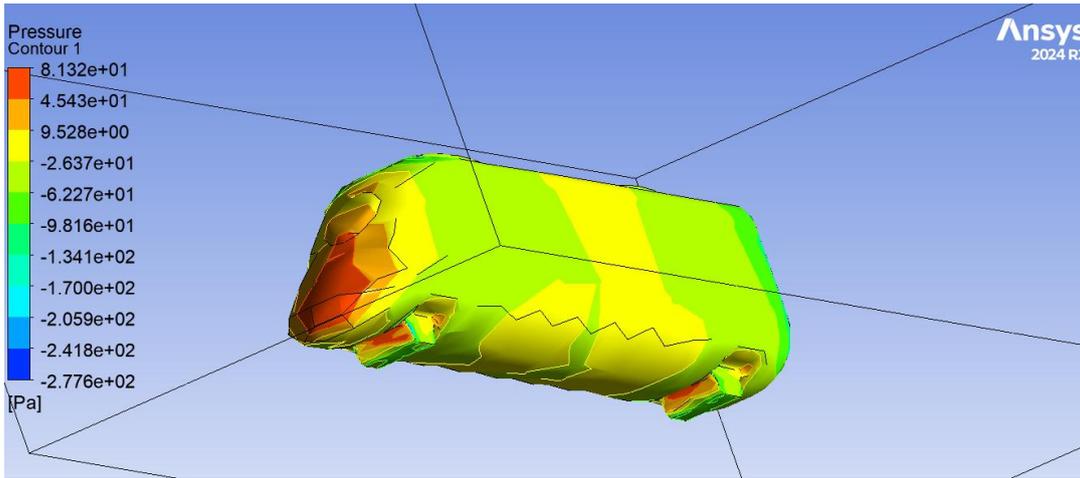
Lampiran 31 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 20 km/jam



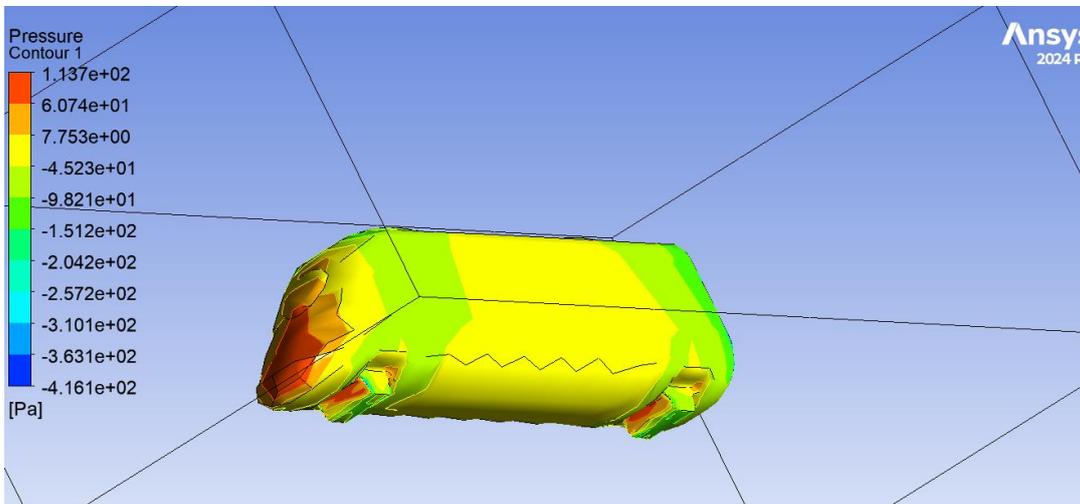
Lampiran 32 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 30 km/jam



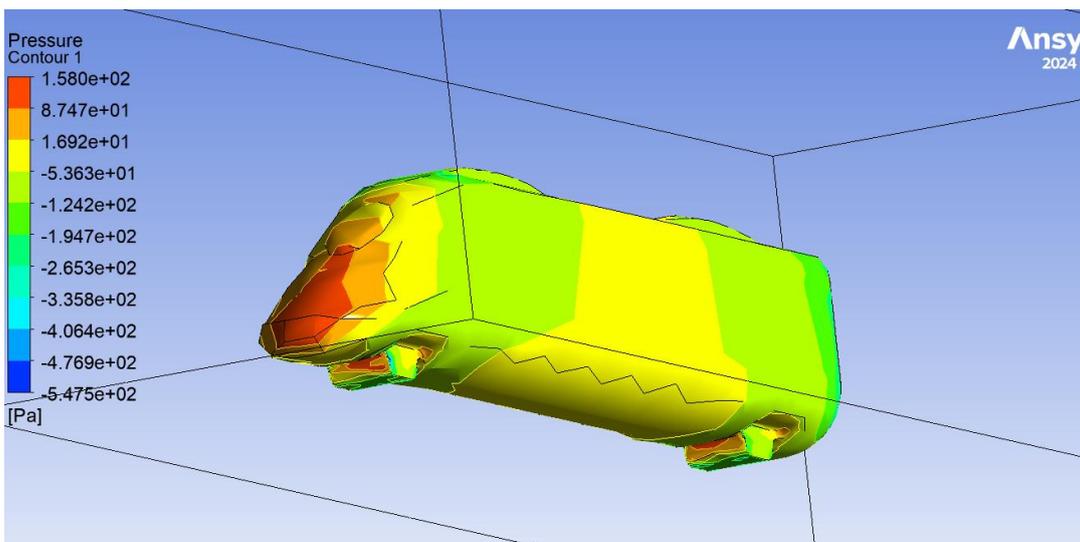
Lampiran 33 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 40 km/jam



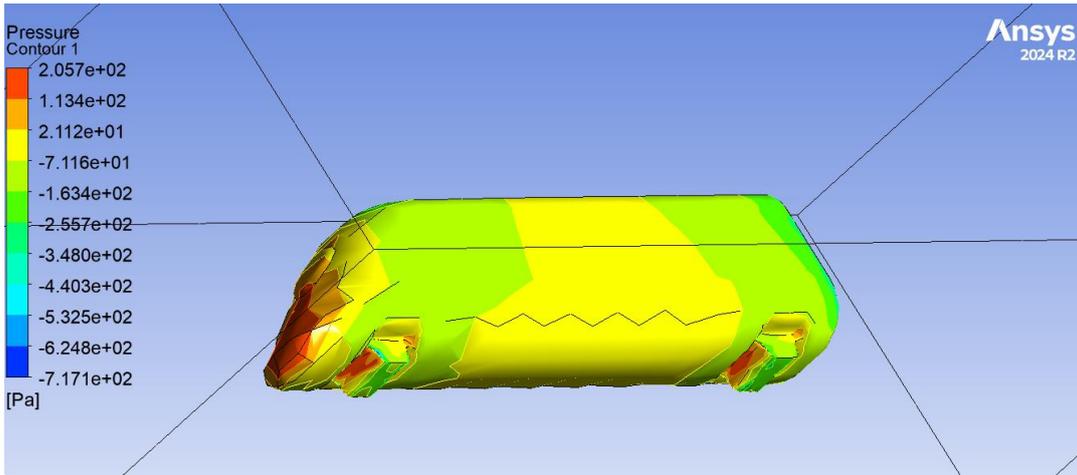
Lampiran 34 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 50 km/jam



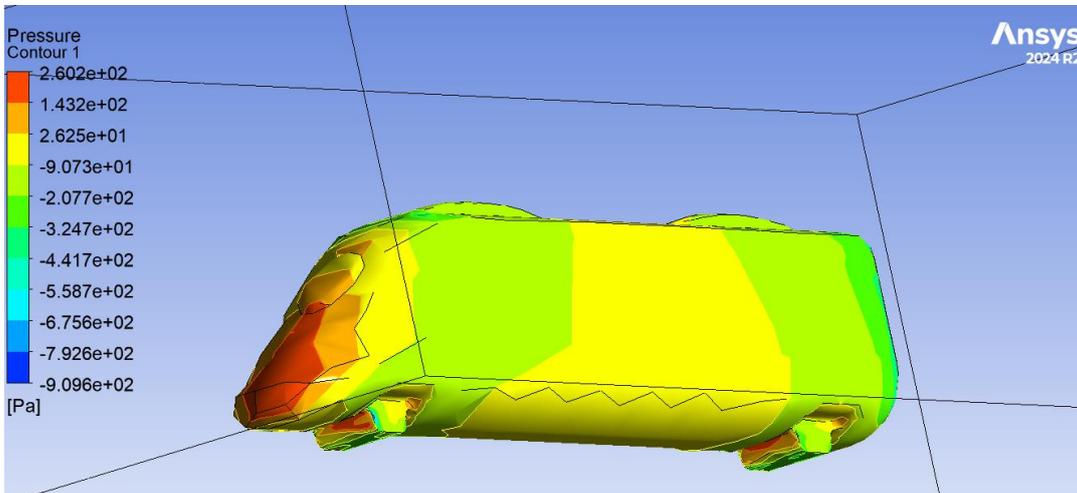
Lampiran 35 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 60 km/jam



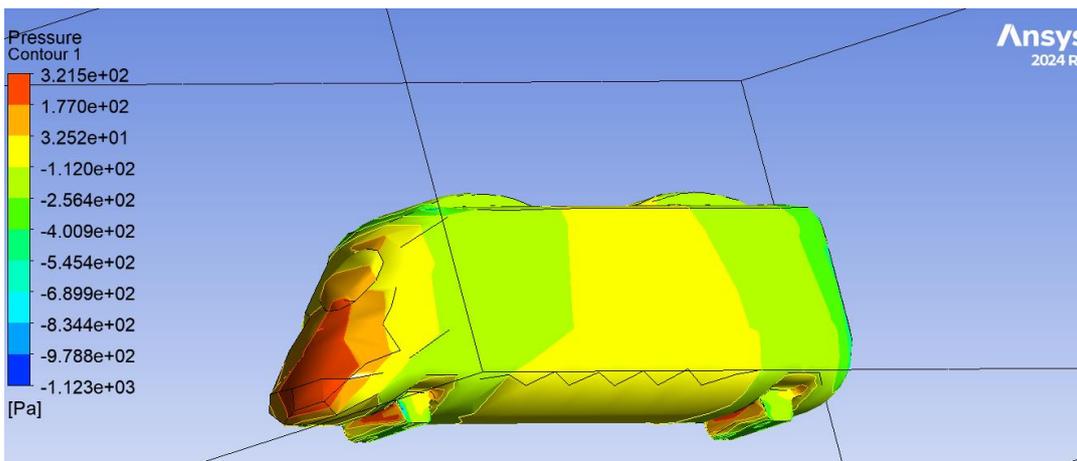
Lampiran 36 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 70 km/jam



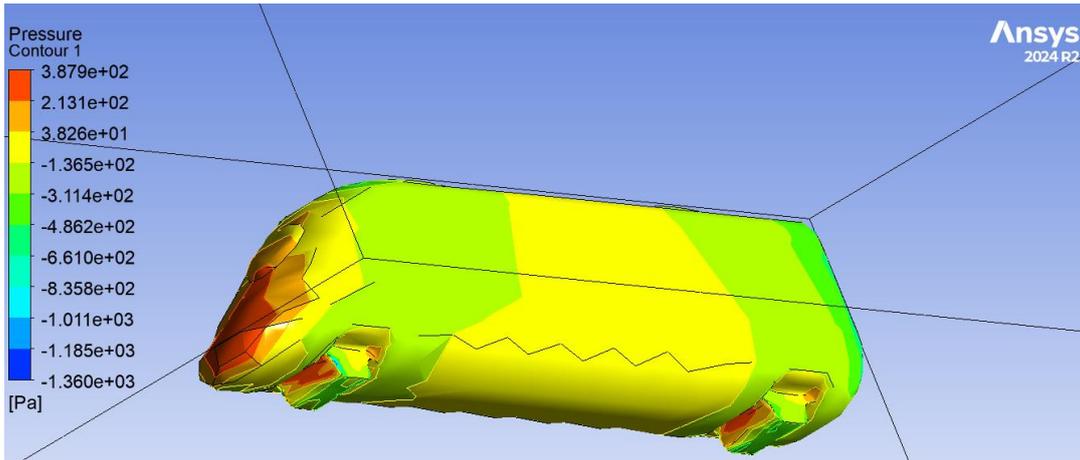
Lampiran 37 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 80 km/jam



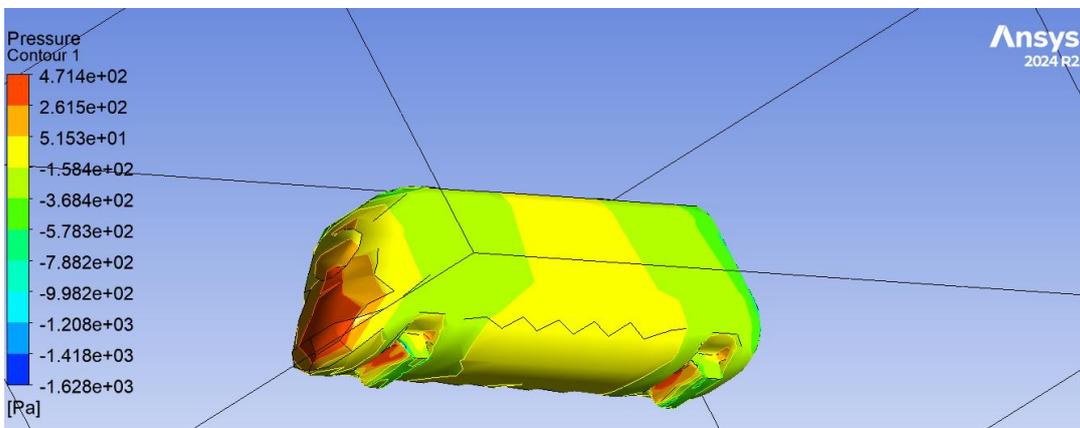
Lampiran 38 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 90 km/jam



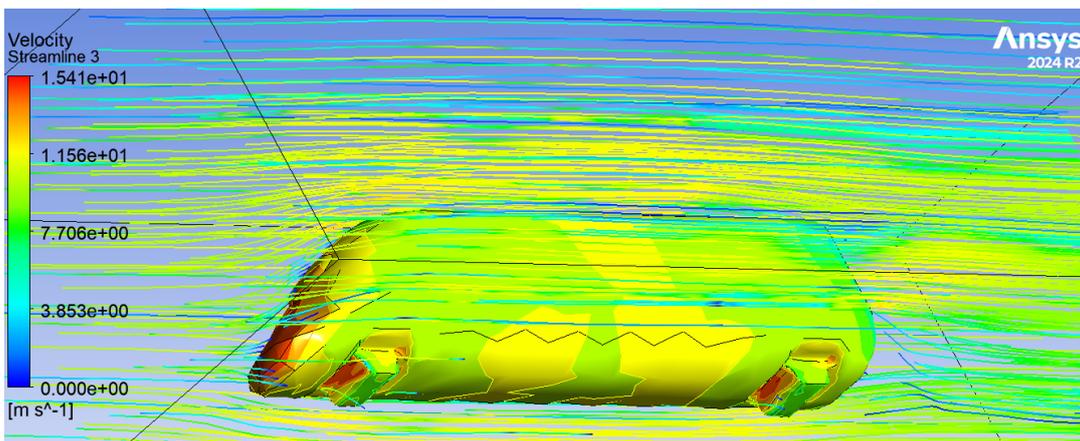
Lampiran 39 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 100 km/jam



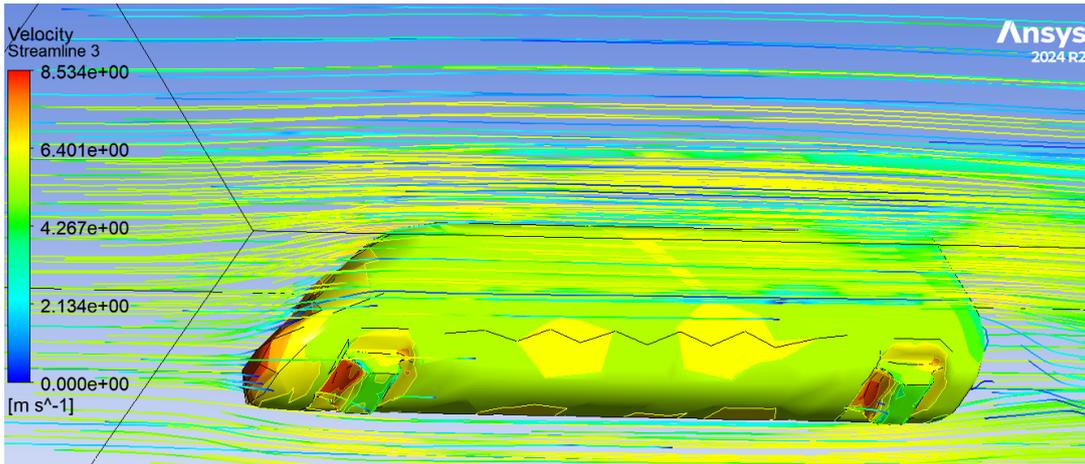
Lampiran 40 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 110 km/jam



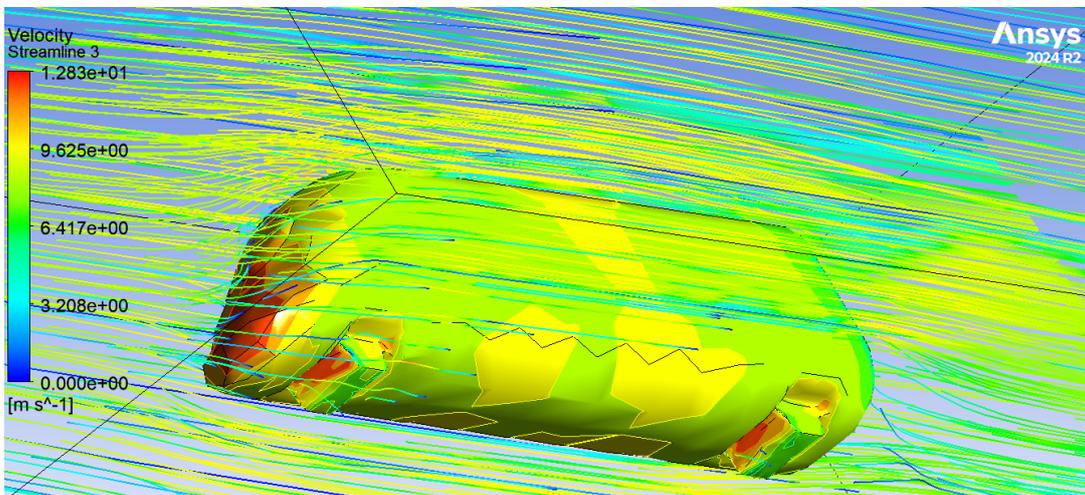
Lampiran 41 Kontur tekanan kereta api 2 variasi kecepatan 120 km/jam



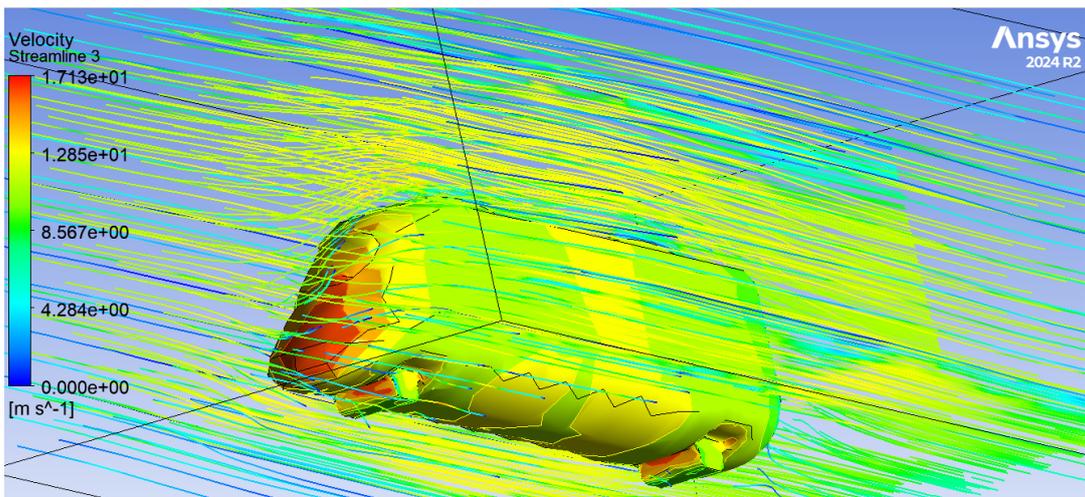
Lampiran 42 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 10 km/jam



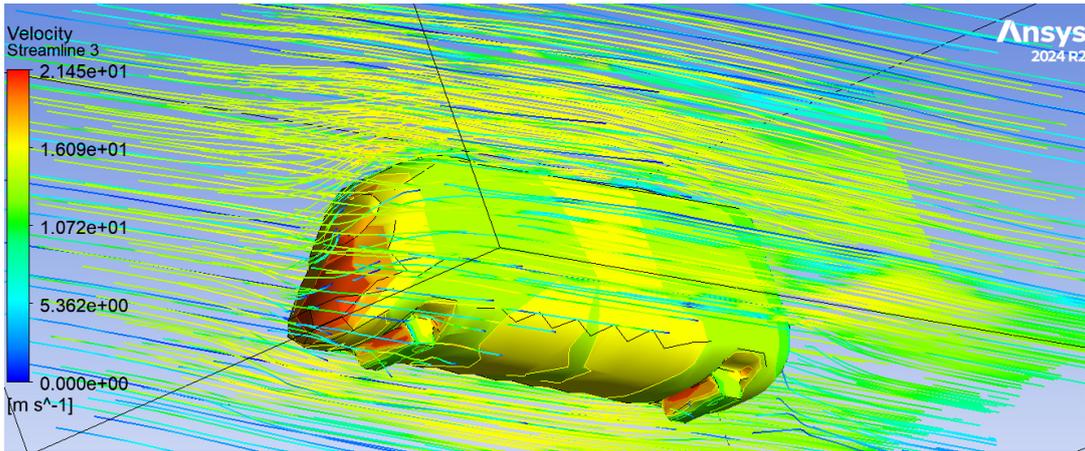
Lampiran 43 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 20 km/jam



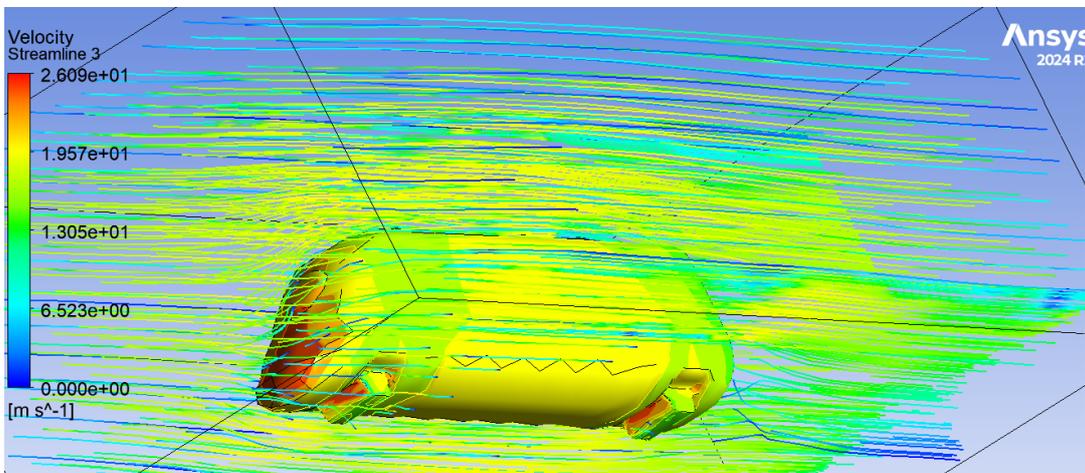
Lampiran 44 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 30 km/jam



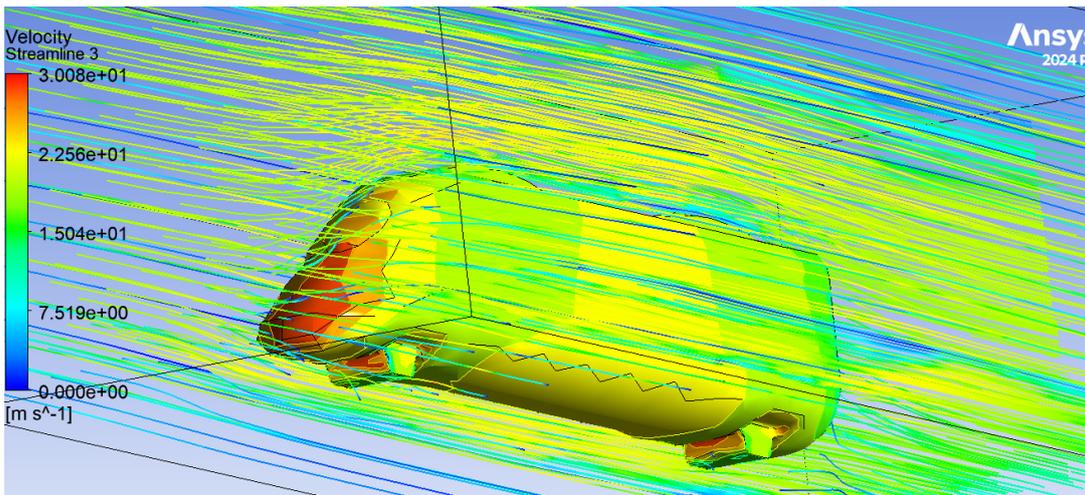
Lampiran 45 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 40 km/jam



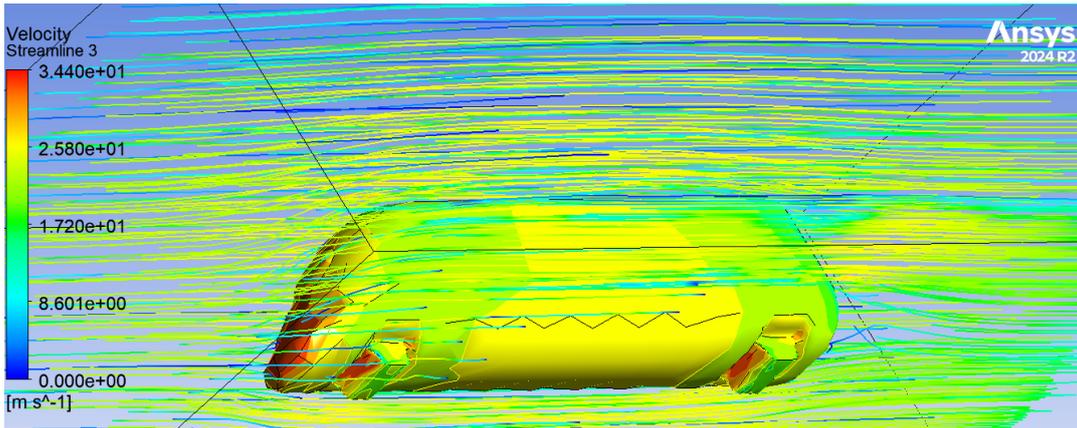
Lampiran 46 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 50 km/jam



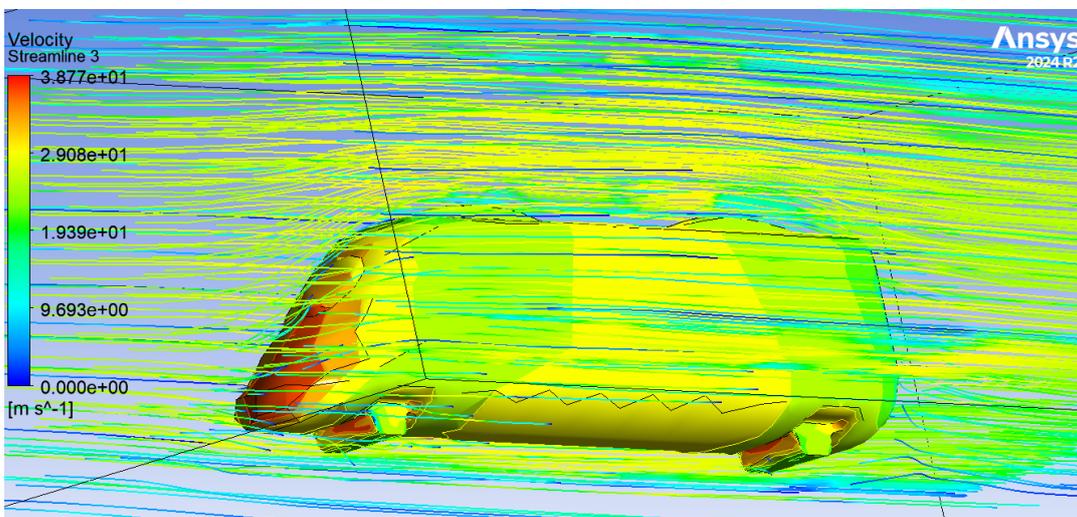
Lampiran 47 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 60 km/jam



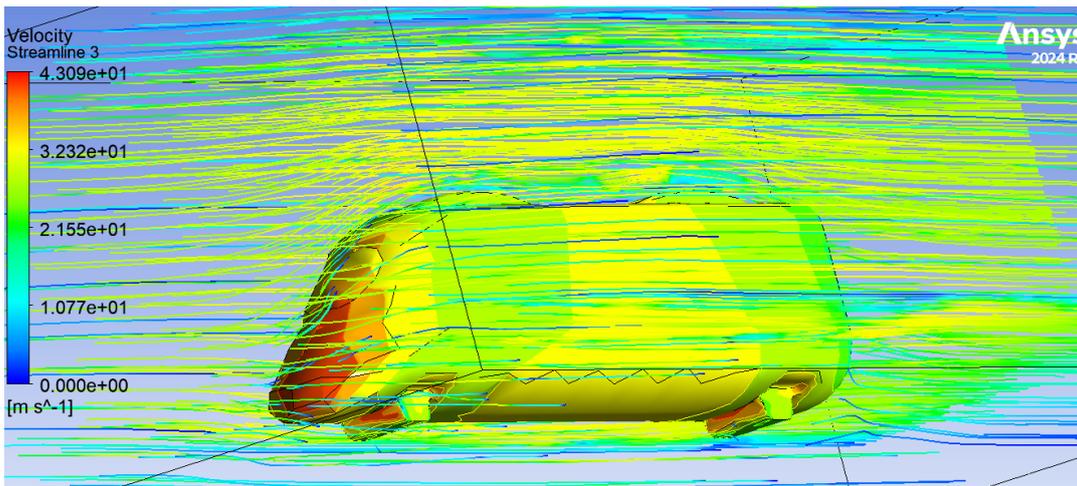
Lampiran 48 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 70 km/jam



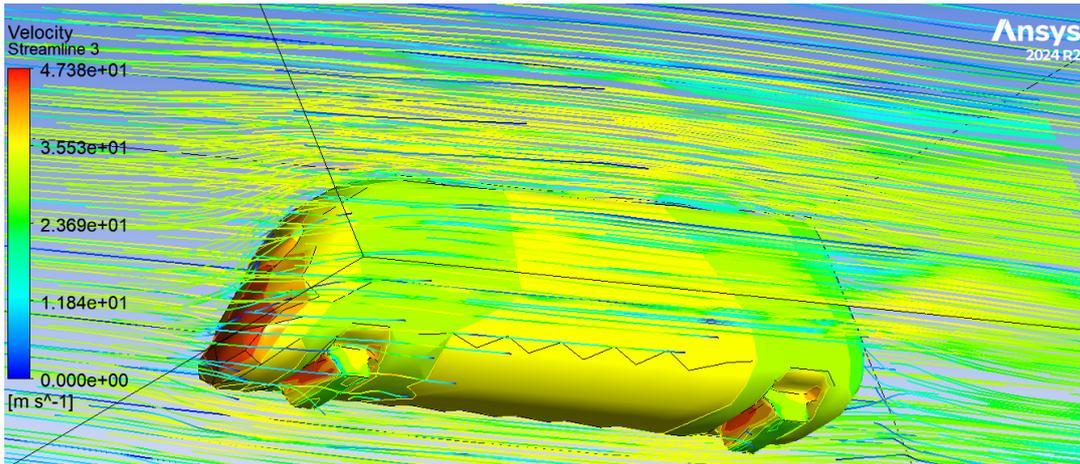
Lampiran 49 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 80 km/jam



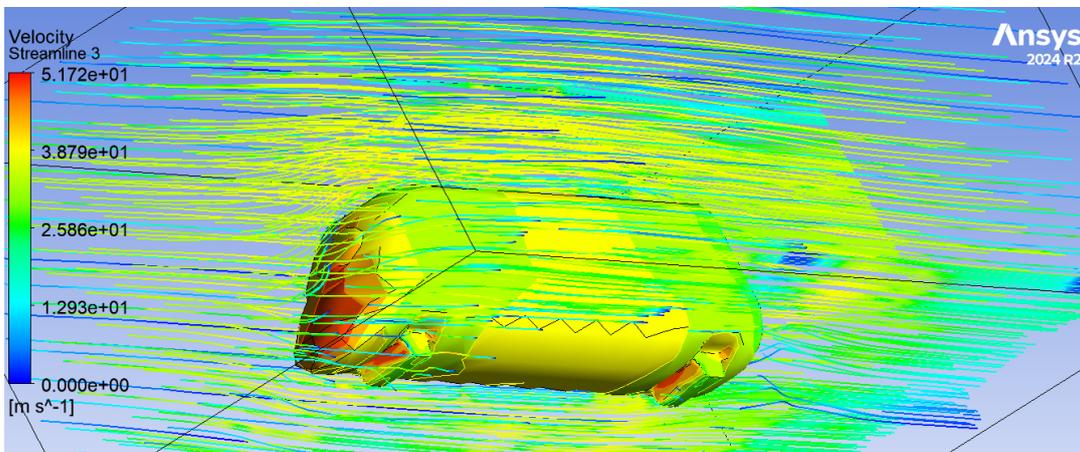
Lampiran 50 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 90 km/jam



Lampiran 51 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 100 km/jam



Lampiran 52 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 110 km/jam



Lampiran 53 Aliran udara kereta api 2 variasi kecepatan 120 km/jam

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Gresik, 19 November 2002, merupakan anak ketiga dari lima bersaudara. Penulis memiliki hobi bermain futsal, membaca buku dan bermain game. telah menempuh Pendidikan formal yaitu di TK Muslimat NU 03 Assa'adah, MI Ma'arif NU Assa'adah, SMPN 1 Bungah, dan SMAN 1 Sidayu. Setelah lulus dari SMAN tahun 2021, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Fisika FSAD-IITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 5001211074.

Selama perkuliahan, penulis pernah mengikuti kegiatan yang diselenggarakan oleh UKM, seperti ICT Chess Tournament 2022 dan beberapa event yang diselenggarakan oleh Fakultas dan Institut seperti menjadi ketua sub-event SCETCH 2023, Dies Natalis 2023, dan Gerigi 2024. Penulis juga mengikuti organisasi tingkat departemen seperti anggota FOSIF dan ketua Ristek HIMASIKA 2024. Penulis juga pernah menjadi Asisten Laboratorium Fisika Dasar, Asisten Fisika Laboratorium I dan Asisten Fisika Laboratorium III.