

ANALISIS POSISI PEMASANGAN REM AERODINAMIS TERHADAP JARAK Pengereman PADA KERETA BERKECEPATAN TINGGI DENGAN METODE CFD

*Mira Devy Kusuma Angesti¹, Tony Suryo Utomo², Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: miradevykusuma@gmail.com

Abstrak

Kereta berkecepatan tinggi membutuhkan sistem pengereman yang aman dan efektif, mengingat sifatnya yang dinamis dan potensi bahaya yang tinggi saat operasi pada kecepatan tinggi. Pada penelitian terdahulu telah dilakukan penambahan rem aerodinamis untuk dapat meningkatkan kinerja dan efektifitas pengereman. Pada penelitian kali ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penempatan rem aerodinamis terhadap penurunan jarak dan waktu pengereman. Metode penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan metode CFD pada kereta berkecepatan tinggi untuk memperoleh nilai gaya dan koefisien *drag*. Simulasi dilakukan dengan kondisi keadaan tunak dan arah aliran secara *headwind*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan rem aerodinamis pada bagian kepala kereta paling efektif dalam memperpendek jarak dan waktu pengereman. Sebaliknya, pemasangan pada ekor kereta menghasilkan performa paling rendah. Hal ini menegaskan bahwa untuk mendapatkan performa rem aerodinamis yang optimal di perlukan posisi pemasangan yang tepat.

Kata Kunci: jarak pengereman; kereta berkecepatan tinggi; komputasi dinamika fluida; pengereman aerodinamis

Abstract

High-speed trains require a braking system that is both safe and effective, considering their dynamic characteristics and the high potential risks during operation at elevated speeds. Previous studies have introduced aerodynamic brakes to enhance braking performance and efficiency. The present study aims to investigate the influence of aerodynamic brake placement on the reduction of braking distance and time. The research method employed computational fluid dynamics (CFD) simulations on a high-speed train to obtain drag force and drag coefficient values. The simulations were conducted under steady-state conditions with a headwind flow direction. The results indicate that installing aerodynamic brakes at the head of the train is the most effective configuration for reducing braking distance and time, whereas installation at the tail yields the lowest performance. These findings highlight the importance of selecting the appropriate placement of aerodynamic brakes to achieve optimal braking performance in high-speed trains.

Keywords: aerodynamic braking; braking distance; computational fluid dynamics; high-speed train

1. Pendahuluan

Kereta berkecepatan tinggi (*High Speed Train*) merupakan teknologi inovasi dalam dunia transportasi yang dirancang untuk dapat mengurangi waktu perjalanan dengan kecepatan tinggi. Dengan semakin meningkatnya kecepatan pada kereta berkecepatan tinggi, dibutuhkan pengereman dengan performa yang optimal. Kereta dengan kecepatan tinggi berarti memiliki sifat yang lebih dinamis dan potensi bahaya yang lebih besar. Oleh karena itu keamanan dalam pengereman kereta merupakan sebuah tantangan tersendiri. Pada pengereman mekanis tradisional terdapat permasalahan pada jarak pemberhentian yang lama. Meskipun telah terdapat kemajuan menggunakan komponen pneumatik dalam sistem pengereman, hal tersebut tidak cukup untuk pengereman pada kecepatan tinggi terlebih lagi pada kereta berkecepatan tinggi [1].

Sebagai teknologi pengereman non-adhesif, penambahan pelat pengereman aerodinamis dinilai menghasilkan kinerja yang lebih baik daripada hanya dengan pengereman tradisional untuk kereta berkecepatan tinggi [2]. Pelat pengereman aerodinamis memberikan keuntungan yakni berupa desain yang sederhana, bersifat ramah lingkungan, dan memiliki potensi keausan yang kecil karena tidak melibatkan kontak fisik langsung antar komponen. Sebagai sistem pengereman tanpa kontak, pengereman aerodinamis memanfaatkan gaya hambat udara yang sebanding dengan kuadrat kecepatan. Sehingga semakin tinggi kecepatan kereta, maka akan semakin efektif kinerja pengeremannya. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh M. K. Lee dan Bhandari [3] juga menyatakan bahwa pengereman aerodinamis dapat mengurangi jarak pengereman secara signifikan. Dengan begitu, pengereman aerodinamis sejauh ini merupakan solusi yang paling baik untuk mengurangi jarak pengereman pada kereta berkecepatan tinggi.

Pada penelitian ini akan berfokus untuk menganalisis bagaimana pengaruh penempatan rem aerodinamis terhadap penurunan jarak pengereman yang terjadi pada kereta berkecepatan tinggi. Pemasangan rem aerodinamis dilakukan dengan tiga posisi yang berbeda yaitu pada bagian kepala kereta, bagian tengah badan kereta, dan pada bagian ekor kereta.

2. Dasar Teori

Aerodynamic Brake adalah sistem pengereman yang memanfaatkan gaya hambat udara (*aerodynamic drag*) untuk mengurangi kecepatan kendaraan tanpa menggunakan kontak mekanis. *Aerodynamic Brake* bekerja dengan membuka panel ke arah aliran udara sehingga memperbesar luas penampang *frontal* dan menghasilkan perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang panel akibat pemisahan aliran (*flow separation*). Perbedaan tekanan tersebut menciptakan gaya hambat yang berlawanan dengan arah gerak. Karena gaya hambat aerodinamis berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan, sistem ini sangat efektif digunakan pada kendaraan dengan kecepatan tinggi [4].

Pada kendaraan seperti kereta cepat terdapat gaya aerodinamis diantaranya adalah *lift*, *downforce*, *thrust*, dan *drag* [5]. Benda yang berada di dalam aliran fluida (*immersed bodies*) akan mengalami gaya akibat interaksi dengan fluida di sekitarnya. Gaya ini timbul karena adanya *normal stresses* (tegangan normal) dan *shear stresses* (tegangan geser) yang dipengaruhi oleh viskositas fluida. Pada aliran fluida, gaya yang searah dengan arah aliran fluida disebut *drag forces* [6]. Pada kereta berkecepatan tinggi, *drag coefficient* menjadi salah satu faktor penting yang memengaruhi efisiensi energi dan kecepatan maksimum. *Drag coefficient* merupakan parameter tak berdimensi yang menggambarkan hambatan aerodinamis suatu objek saat bergerak melalui fluida, seperti udara. Nilai *drag coefficient* dipengaruhi oleh bentuk geometri benda, kekasaran permukaan, dan kondisi aliran seperti bilangan Reynolds [7].

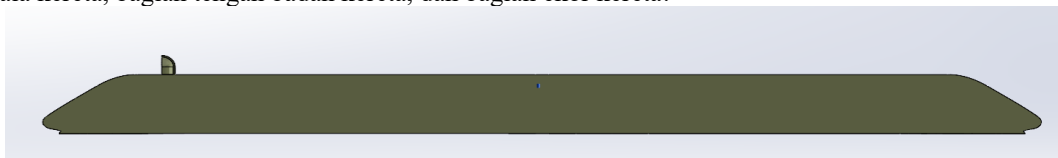
Jarak pengereman merupakan parameter penting dalam keselamatan kendaraan. Jarak pengereman adalah jarak yang ditempuh sejak rem diaktifkan hingga kendaraan berhenti total. Secara umum jarak pengereman dihitung dengan mempertimbangkan energi kinetik kendaraan yang dilawan oleh gaya gesekan antara ban dan permukaan jalan. Pada kasus pengereman aerodinamis, besarnya gaya drag berperan sebagai gaya resistansi tambahan selain dari gaya gesek ban terhadap permukaan jalan. Dalam dinamika kendaraan, deselerasi muncul akibat gaya-gaya yang bekerja melawan arah gerak. Pada pengereman konvensional gaya utama berasal dari gesekan antara ban dan jalan. Sedangkan pada kasus *Aerodynamic Brake*, gaya drag menjadi gaya utama untuk dapat meningkatkan deselerasi [8].

3. Bahan dan Metode Penelitian

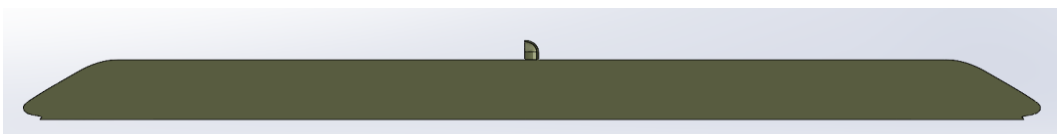
Metode penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan metode CFD pada kereta berkecepatan tinggi untuk memperoleh nilai koefisien hambat. Simulasi dilakukan dengan kondisi keadaan tunak dan arah aliran secara *headwind*. Model turbulensi yang digunakan adalah *shear stress transport $k - \omega$* dan menggunakan kecepatan operasi kereta sebesar 350 km/jam. Pada *boundary condition*, ditetapkan *inlet* sebagai titik masuk aliran fluida ke dalam ruang simulasi, di mana ditetapkan kecepatan masuk fluida untuk menentukan karakteristik awal aliran. Pada penelitian ini, kereta berkecepatan tinggi dimodelkan sebagai dinding dengan kondisi *no-slip*, yaitu fluida pada permukaan kereta tidak bergerak relatif terhadap permukaan tersebut sehingga mencerminkan adanya interaksi gesekan antara fluida dan objek.

Proses meshing pada simulasi menggunakan jenis mesh *Poly-hexcore* dengan tiga lapis *boundary layer* dan penambahan *refinement box* pada area disekitar objek kereta. *Poly-hexcore* merupakan jenis mesh yang menggabungkan beberapa tipe elemen mesh dalam satu domain untuk mencapai efisiensi komputasi dan akurasi simulasi yang baik. Penambahan *boundary layer* dilakukan agar simulasi dapat melakukan perhitungan dengan lebih akurat yaitu dengan menangkap efek viskos di dekat dinding objek. Penambahan *refinement box* juga dimaksudkan untuk meningkatkan akurasi di sekitar objek tanpa perlu penambahan mesh yang berlebih di seluruh domain simulasi.

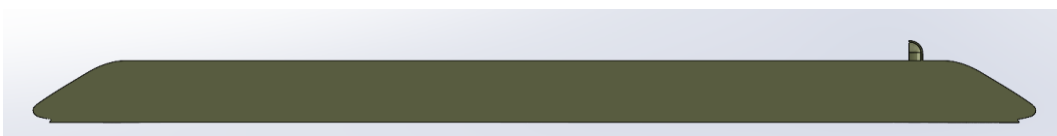
Geometri kereta cepat yang digunakan dibuat secara *symmetry*. Selain itu terdapat modifikasi dimana tidak ada jarak antar gerbong pada kereta. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan proses komputasi pada simulasi CFD. Pada penelitian ini *Aerodynamic Brake* dipasang pada atap kereta berkecepatan tinggi yang diposisikan masing-masing pada bagian kepala kereta, bagian tengah badan kereta, dan bagian ekor kereta.



Gambar 1. Rem Aerodinamis Dengan Pemasangan Pada Bagian Kepala Kereta

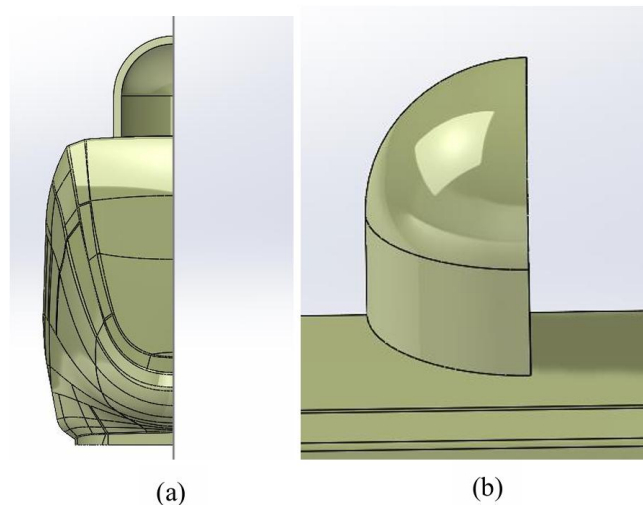


Gambar 2. Rem Aerodinamis Dengan Pemasangan Pada Bagian Tengah Badan Kereta



Gambar 3. Rem Aerodinamis Dengan Pemasangan Pada Bagian Ekor Kereta

Geometri *aerodynamic brake* memiliki dimensi berupa tinggi 1.25 m dan tebal 0.1 m dengan radius kelengkungan 0.75 m. *Aerodynamic brake* dibuat dengan bentuk yang cekung untuk dapat memaksimalkan peningkatan nilai koefisien *drag*. Geometri *aerodynamic brake* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 4. Geometri *Aerodynamic Brake* (a) dari pandangan depan dan (b) dari pandangan samping

Pada penelitian ini pengereman aerodinamis merupakan satu-satunya alat sebagai pengereman kereta berkecepatan tinggi. Sehingga gaya hambat sebagai gaya utama untuk dapat melawan arah gerak kereta. Besarnya gaya hambat (*drag force*) dapat diperoleh menggunakan Persamaan 1 sebagai berikut [9].

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A \quad 1$$

Dimana :

F_D = Gaya hambat (N)

v = Kecepatan kendaraan (m/s)

C_d = Koefisien hambat

A = Luas area penampang (m²)

Dengan menghubungkan persamaan gaya hambat (*drag force*) dengan Hukum Newton II dapat diperoleh persamaan untuk menghitung jarak dan waktu pengereman, yaitu pada Persamaan 2 dan Persamaan 3 berikut.

$$s = \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot C_d \cdot A} \ln \frac{v_0}{v_t} \quad 2$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot C_d \cdot A} \left(\frac{1}{v_t} - \frac{1}{v_0} \right) \quad 3$$

Dimana :

s = Jarak (m)

Δt = Waktu (s)

m = Massa kendaraan (kg)

ρ = Densitas fluida (udara) (kg/m³)

C_d = Koefisien hambat

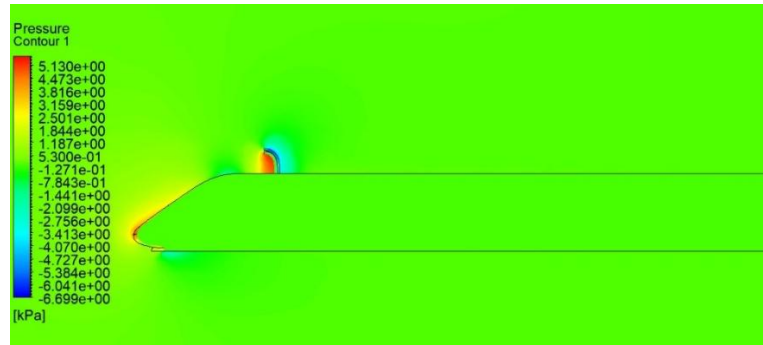
A = Luas area penampang (m²)

v_0 = Kecepatan awal (m/s)

v_t = Kecepatan akhir (m/s)

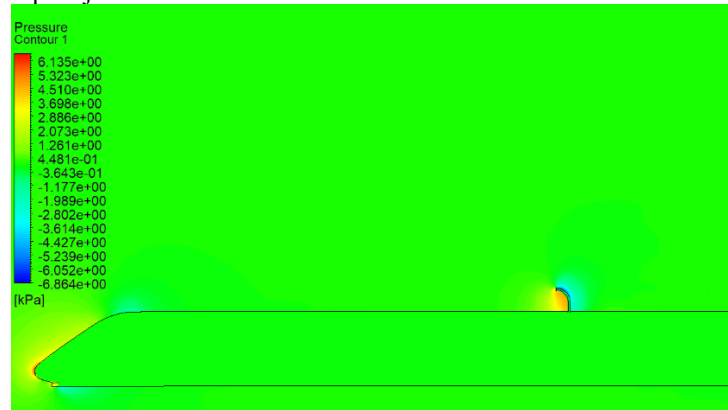
4. Hasil dan Pembahasan

Hasil kontur tekanan menunjukkan adanya perbedaan tekanan pada sisi bagian depan dan sisi bagian belakang rem aerodinamis. Pada penempatan rem di bagian kepala kereta, tekanan maksimal diperoleh sebesar 5.58 kPa dan tekanan minimum diperoleh sebesar -6.69. Perbedaan tekanan rem pada pemasangan di posisi kepala kereta ini mencapai 11.82 kPa. Adanya zona bertekanan tinggi dan zona bertekanan rendah inilah yang menimbulkan terjadinya gaya *drag*.



Gambar 5. Kontur Tekanan Pada Pemasangan Bagian Kepala Kereta

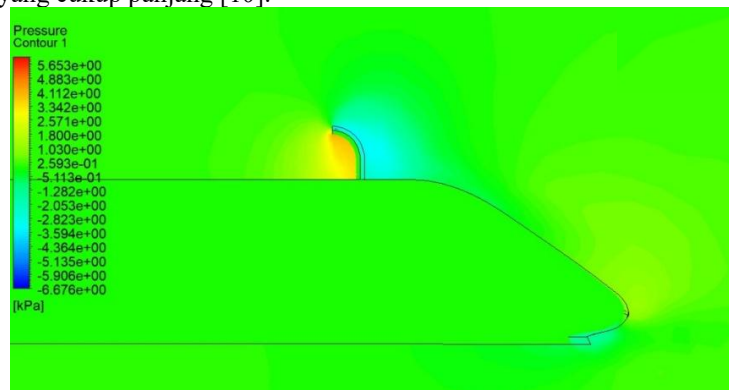
Pada pemasangan rem aerodinamis di bagian tengah badan kereta, didapatkan hasil kontur tekanan dimana tekanan paling tinggi tidak terletak pada rem aerodinamis namun pada bagian *nose* kereta. Tekanan pada bagian depan rem aerodinamis yang terkena langsung dengan aliran udara diperkirakan bernilai sebesar 4.51 kPa apabila dilihat dari hasil kontur tersebut. Dengan demikian perbedaan tekanan dengan sisi belakang rem diperkirakan adalah sebesar 11.37 kPa. Apabila dibandingkan dengan konfigurasi pemasangan di posisi kepala kereta, nilai perbedaan tekanan dengan rem di posisi badan kereta tidak terpaut jauh.



Gambar 6. Kontur Tekanan Pada Pemasangan Bagian Tengah Badan Kereta

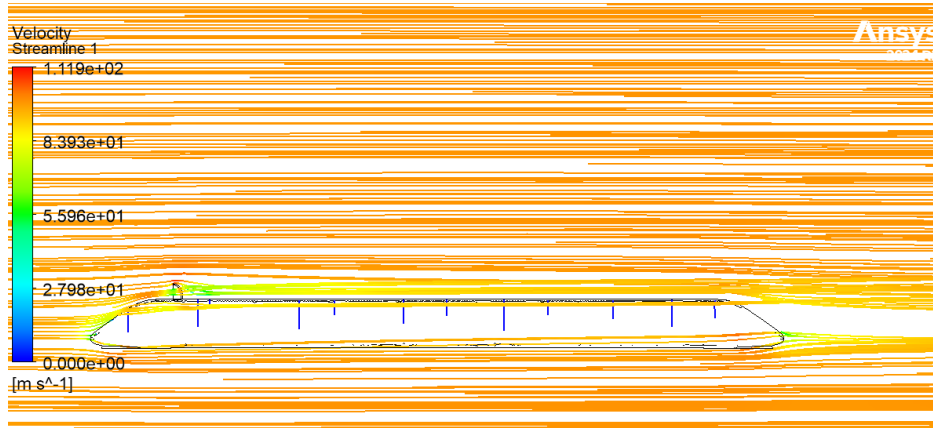
Kemudian pemasangan rem aerodinamis pada bagian ekor kereta menunjukkan perbedaan tekanan yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan kedua posisi sebelumnya. Berdasarkan hasil kontur tekanan dapat di peroleh tekanan di daerah depan rem aerodinamis adalah sekitar 4.11 kPa dan pada daerah belakang rem adalah sekitar -2.82 kPa. Perbedaan tekanan pada dua daerah ini menghasilkan nilai sebesar 6.93 kPa. Perbedaan tekanan yang lebih kecil dibanding kedua posisi sebelumnya menandakan bahwa gaya drag yang dihasilkan juga lebih kecil.

Pada posisi pemasangan rem dibagian ekor kereta, drag yang dihasilkan lebih kecil apabila dibandingkan dengan kedua posisi lain. Hal ini dapat terjadi karena bagian ekor kereta merupakan daerah dengan zona tekanan rendah pada kereta cepat. Sehingga efek dari rem aerodinamis tidaklah signifikan karena telah terjadi gangguan aliran akibat perkenaan kepala dan badan kereta yang cukup panjang [10].

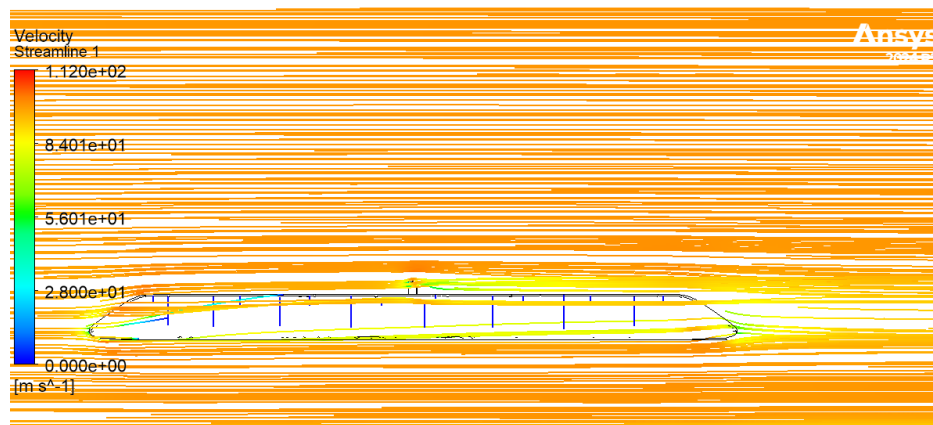


Gambar 7. Kontur Tekanan Pada Pemasangan Bagian Ekor Kereta

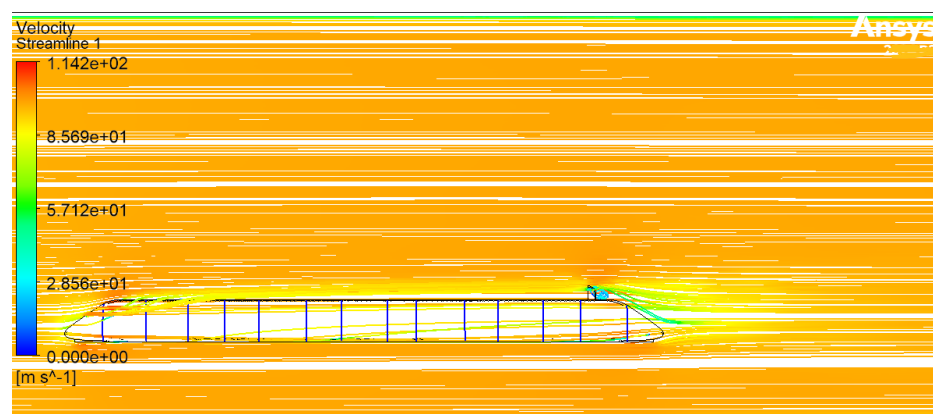
Pola aliran udara juga dapat diperoleh pada hasil simulasi. Setelah aliran melewati rem aerodinamis terjadi fenomena pemisahan aliran (*flow separation*). Pada posisi rem aerodinamis di kepala kereta dan bagian tengah badan kereta dapat terlihat bahwa wake region yang dihasilkan lebih lebar apabila dibandingkan dengan posisi pada ekor kereta. Hal ini berkesinambungan dengan hasil kontur tekanan yang diperoleh, dimana perbedaan tekanan pada rem aerodinamis pada bagian ekor kereta memiliki nilai yang jauh lebih kecil. Sehingga preassure drag yang dihasilkan tidak cukup besar jika dibandingkan dengan kedua posisi lainnya. Perbedaan drag ini yang kemudian membuat pola aliran di ketiga posisi jadi berbeda.



Gambar 8. *Streamline* Pada Pemasangan Bagian Kepala Kereta



Gambar 9. *Streamline* Pada Pemasangan Bagian Tengah Badan Kereta



Gambar 10. *Streamline* Pada Pemasangan Bagian Ekor Kereta

Hasil simulasi dari penelitian yaitu Tabel 1 menunjukkan bahwa posisi pemasangan rem aerodinamis memengaruhi besar gaya *drag* F_d dan koefisien *drag* C_d . Pemasangan di kepala kereta menghasilkan *drag* tertinggi sebesar 50,897 kN, diikuti bagian tengah kereta sebesar 49,714 kN. Sebaliknya, pemasangan di ekor kereta menghasilkan *drag* terendah yaitu 35,327 kN. Hasil ini mengindikasikan bahwa posisi pemasangan pada bagian kepala kereta lebih efektif dalam meningkatkan gaya *drag*.

Tabel 1. Nilai F_d dan C_d saat Rem Aerodinamis Terbuka

Kasus	F_d (kN)	C_d	Keterangan
1	50.897	0.531	Pemasangan pada kepala kereta
2	49.714	0.519	Pemasangan pada bagian tengah badan kereta
3	35.327	0.369	Pemasangan pada bagian ekor kereta

Kemudian perhitungan jarak pengereman dilakukan pada kecepatan operasi kereta berkecepatan tinggi dari kecepatan awal yaitu 350 km/jam hingga pada kecepatan 150 km/jam dimana pengereman aerodinamis digunakan sebagai satu-satunya alat pengereman pada kereta. Hasil jarak dan waktu pengereman dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Jarak dan Waktu Pengereman

Kasus	Jarak Pengereman (km)	t (menit)	Keterangan
1	19.25	5.18	Pemasangan pada kepala kereta
2	19.71	5.30	Pemasangan pada bagian tengah badan kereta
3	27.74	7.46	Pemasangan pada bagian ekor kereta

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada kereta berkecepatan tinggi dapat disimpulkan bahwa posisi pemasangan rem aerodinamis pada bagian kepala kereta menunjukkan hasil yang paling efektif untuk memperpendek jarak dan waktu pengereman. Posisi pemasangan pada bagian tengah badan kereta juga masih bisa dipertimbangkan mengingat hasil jarak dan waktu pengereman yang tidak terpaut jauh apabila dibandingkan dengan posisi pemasangan di kepala kereta. Kemudian pemasangan pada bagian ekor kereta menghasilkan performa yang paling rendah, baik dari sisi gaya *drag* maupun efektivitas pengeremannya, sehingga kurang direkomendasikan sebagai posisi utama pemasangan rem aerodinamis. Selain itu, hasil ini juga menunjukkan bahwa efektivitas rem aerodinamis dipengaruhi kuat oleh posisi pemasangan terhadap arah aliran udara. Oleh karena itu, strategi penempatan yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja pengereman pada kereta berkecepatan tinggi.

6. Daftar Pustaka

- [1] Li, Y., Li, T., Zhang, J. (2023). Effect of aerodynamic braking plates installed in Inter-car gap on aerodynamic characteristics of high-speed train. *Alexandria Engineering Journal* 71, hal. 209-225. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.046>
- [2] Çiçek, M., Durmuş, G. (2019). Aerodynamic Control in High Speed Trains with a Novel Design of Wing Set. <http://dergipark.gov.tr/gujisa>
- [3] Lee, M. K., Bhandari, B. (2018). The application of Aerodynamic Brake for high speed trains. *Journal of Mechanical Science and Technology* 32(12), hal. 5749–5754. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1122-8>
- [4] Yoshimura, M., Saito, S., Hosaka, S., Tsunoda, H. (2000). Characteristics of the Aerodynamic Brake of the vehicle on the Yamanashi Maglev test line. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)* 41(2), hal 74–78. <https://doi.org/10.2219/rtrqr.41.74>
- [5] Fahira, A. (2025). Optimalisasi Aerodinamika pada Sayap Depan Mobil Formula1: Pengaruh Drag dan Lift terhadap Performa Mobil di bawah regulasi FIA. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Terapannya (JUPITER)* 6(2), hal. 22–28.
- [6] Pritchard, P. J. (2011). Introduction To Fluid Mechanics. In Fox and McDonald's 8th ed, hal. 42.
- [7] Suswanto, B., Finahari, N. (2013). Studi Pengaruh Model Mobil Dan Variasi Kecepatan Angin Terhadap Gaya Drag. *Widya Teknika* 20(1), hal. 14–19.
- [8] Haggag, S. A., Mansouri, A. (2016). Aerodynamic forces impact on vehicle braking longitudinal dynamics with a sliding mode controller. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0460>.
- [9] Alfian, S. (2023). Analisis CFD Penyempurnaan Penggunaan Pengarah Angin Terhadap Pengurangan Gaya Drag Pada Mobil Barang Bak Tertutup. *Barometer*, 8(1), hal. 42-49.
- [10] Zhang, L., Li, T., Zhang, J. (2021). Effect of braking plates on the aerodynamic behaviors of a high-speed train subjected to crosswinds. *Energies*, 14(2), hal. 401.