



Analisis Zona Wake dan Distribusi Energi Turbulen pada *Electric Shuttle Bus* 14 Seats Menggunakan Simulasi CFD

Mahesa Jihaddul Akbar Haryadi^{1*}, Ramdhani², Sriyono³

¹⁻³ Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

*Penulis Korespondensi: mahesajihaddul22@upi.edu

Abstract. Climate change issues and dependence on fossil fuels have driven a rapid increase in electric vehicle development, including electric shuttle buses for public transportation. Although superior in emissions and noise levels, these vehicles still face challenges in energy efficiency, particularly due to aerodynamic drag at medium to high speeds. This study aims to analyze the wake zone characteristics and Turbulent Kinetic Energy (TKE) distribution on a 14-seat electric shuttle bus to comprehensively understand the mechanisms of aerodynamic drag. The method employed is a Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical simulation using the $k-\omega$ SST turbulence model. Simulations were conducted at velocity variations of 20 km/h, 40 km/h, and 60 km/h. The simulation results indicate that increasing velocity strengthens the flow separation phenomenon, triggering an expansion of the wake zone length from 19.51 cm to 30.05 cm. This expansion correlates linearly with a sharp surge in the maximum TKE value from 530 m^2/s^2 to 6,100 m^2/s^2 , which significantly contributes to the increase in total drag force. These findings imply that aerodynamic evaluation should not solely rely on the global drag coefficient but must also account for the management of wake structures and turbulent energy. Ultimately, this research provides a strategic foundation for vehicle body design optimization to enhance the energy efficiency and driving range of electric shuttle buses.

Keywords: Aerodynamics; Computational Fluid Dynamics; Electric Shuttle Bus; Turbulent Kinetic Energy; Wake Zone.

Abstrak. Isu perubahan iklim dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil telah mendorong peningkatan pesat pengembangan kendaraan listrik, termasuk *electric shuttle bus* sebagai sarana transportasi publik. Meskipun unggul dalam aspek emisi dan kebisingan, kendaraan ini masih menghadapi tantangan pada efisiensi energi, terutama hambatan aerodinamika pada kecepatan menengah hingga tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik *zona wake* dan distribusi energi kinetik turbulen (*Turbulent Kinetic Energy/TKE*) pada *electric shuttle bus* berkapasitas 14 penumpang guna memahami mekanisme hambatan aerodinamika secara komprehensif. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan model turbulensi $k-\omega$ SST. Simulasi dilakukan pada variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan memperkuat fenomena separasi aliran yang memicu perluasan *zona wake* dari 19,51 cm menjadi 30,05 cm. Peningkatan tersebut berkorelasi linier dengan lonjakan nilai TKE maksimum dari 530 m^2/s^2 hingga 6.100 m^2/s^2 , yang berkontribusi signifikan terhadap kenaikan gaya hambat total. Temuan ini mengimplikasikan bahwa evaluasi aerodinamika tidak cukup hanya mengandalkan koefisien *drag*, melainkan harus mempertimbangkan pengendalian struktur *wake* dan energi turbulen. Hasil penelitian ini memberikan landasan strategis bagi optimasi desain bodi kendaraan untuk meningkatkan efisiensi energi dan jarak tempuh pada *electric shuttle bus*.

Kata kunci: Aerodinamika; Computational Fluid Dynamics; Electric Shuttle Bus; Turbulent Kinetic Energy; Zona Wake.

1. LATAR BELAKANG

Isu perubahan iklim dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil membuat perkembangan kendaraan listrik (Electric Vehicles/EV) mengalami peningkatan yang sangat pesat dalam satu dekade terakhir (IEA, 2024). Kendaraan listrik hadir sebagai salah satu solusi untuk menurunkan emisi karbon yang dihasilkan dari kendaraan *internal combustion engine* (ICE) (IPCC, 2023). Salah satu segmen EV yang berkembang pesat adalah *electric shuttle bus*, yang banyak digunakan sebagai sarana transportasi publik, kendaraan kampus, kawasan

industri dan kawasan wisata (Zhang et al., 2023). *Electric shuttle bus* memiliki keunggulan berupa kapasitas penumpang yang cukup besar, kebisingan rendah, serta efisiensi operasional yang lebih baik dibandingkan kendaraan ICE (Li et al., 2024).

Pengembangan *electric shuttle bus* masih menghadapi tantangan utama terkait efisiensi energi dan keterbatasan jarak tempuh baterai (Gao et al., 2023). Pada kecepatan menengah hingga tinggi, konsumsi energi kendaraan listrik cenderung meningkat karena hambatan aerodinamika menjadi faktor dominan, sehingga peningkatan efisiensi aerodinamika menjadi sangat penting untuk mendukung operasional kendaraan yang lebih optimal (Hucho & Sovran, 2021).

Secara aerodinamis, perilaku aliran udara di sekitar bodi kendaraan menghasilkan gaya hambat yang memengaruhi performa keseluruhan kendaraan (Anderson, 2020). Parameter yang umum digunakan untuk menilai performa aerodinamika adalah koefisien *drag* (C_d), namun parameter tersebut belum sepenuhnya mampu menjelaskan mekanisme aliran udara secara menyeluruh (White, 2019). Analisis *wake zone* dan distribusi energi turbulen menjadi penting untuk memahami karakteristik hambatan aerodinamika secara lebih komprehensif (Kim et al., 2022).

Zona wake yang terbentuk di belakang kendaraan dapat meningkatkan *pressure drag*, khususnya pada kendaraan berdimensi besar seperti bus (Ahmed et al., 2021). Energi turbulen juga berperan dalam menggambarkan intensitas fluktuasi aliran yang berkontribusi terhadap pembentukan *drag* (Choi et al., 2023). Dengan demikian, kajian aerodinamika yang hanya berfokus pada nilai C_d masih perlu dilengkapi dengan analisis struktur wake dan energi turbulen (Rahman et al., 2023).

2. KAJIAN TEORITIS

Kendaraan Listrik dan *Electric shuttle bus*

Kendaraan listrik merupakan jenis kendaraan yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tenaga utama penggerakannya, yang disimpan dalam baterai dan diubah menjadi energi mekanik melalui motor listrik. Perkembangan kendaraan listrik dalam beberapa dekade terakhir mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap isu lingkungan, keterbatasan bahan bakar fosil, serta kebutuhan akan sistem transportasi yang lebih efisien dan berkelanjutan (Mahmud et al., 2024). Dibandingkan kendaraan bermesin pembakaran dalam, kendaraan listrik memiliki keunggulan berupa emisi

gas buang yang lebih rendah, efisiensi energi yang lebih tinggi, serta tingkat kebisingan yang lebih kecil (Kumar et al., 2024).

Salah satu bentuk pengembangan kendaraan listrik pada sektor transportasi publik adalah *electric shuttle bus*. *Electric shuttle bus* merupakan kendaraan listrik berkapasitas menengah yang dirancang untuk melayani mobilitas penumpang pada rute-rute tertentu, seperti kawasan kampus, bandara, kawasan industri, pusat kota, dan area wisata (Azis et al., 2026). Kendaraan ini umumnya memiliki kapasitas antara 10 hingga 20 penumpang dengan karakteristik bodi yang relatif besar dan berbentuk kotak (*boxy shape*) guna memaksimalkan ruang kabin dan kenyamanan penumpang.

Prinsip Dasar Aerodinamika Kendaraan

Aerodinamika kendaraan mempelajari interaksi antara aliran udara dan permukaan bodi kendaraan. Interaksi tersebut menghasilkan gaya aerodinamika utama berupa gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*) (Hucho & Sovran., 1993).

Gaya hambat (*drag*) merupakan gaya yang bekerja berlawanan arah dengan gerak kendaraan akibat perbedaan tekanan dan gesekan udara pada permukaan kendaraan. Besarnya hambatan aerodinamis dinyatakan melalui koefisien drag (C_d). Semakin besar nilai C_d , semakin besar energi yang dibutuhkan kendaraan untuk mempertahankan kecepatan tertentu (Zhao et al., 2024). Sementara itu, gaya angkat (*lift*) timbul akibat perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah kendaraan yang dapat memengaruhi stabilitas kendaraan saat bergerak (Katz., 2006).

Karakteristik selain *drag* dan *lift*, aliran udara di sekitar kendaraan juga dipengaruhi oleh fenomena *wake flow* dan turbulensi. *Wake* merupakan daerah aliran bertekanan rendah yang terbentuk di belakang kendaraan akibat pemisahan aliran (*flow separation*). Zona *wake* yang besar dapat meningkatkan *pressure drag* sehingga menurunkan efisiensi aerodinamika kendaraan (Rony et al., 2024).

Turbulensi dan Energi Kinetik Turbulen

Turbulensi merupakan kondisi aliran yang ditandai oleh fluktuasi kecepatan dan tekanan secara acak (Laksana et al., 2024). Pada kendaraan, turbulensi umumnya terjadi akibat interaksi aliran udara dengan permukaan bodi dan proses separasi aliran pada bagian belakang kendaraan. Salah satu parameter utama untuk menggambarkan intensitas turbulensi adalah Turbulent Kinetic Energy (TKE) (Allah & Mulyanto, 2025).

Nilai TKE menunjukkan besarnya energi yang tersimpan dalam fluktuasi kecepatan aliran turbulen (Allah & Mulyanto, 2025). TKE yang tinggi mengindikasikan aliran yang tidak stabil dan umumnya berkaitan dengan pembentukan wake yang lebih besar serta peningkatan gaya hambat aerodinamis, maka distribusi TKE dapat digunakan sebagai indikator penting dalam mengevaluasi kualitas desain aerodinamika kendaraan (Koppa Shivanna et al., 2021).

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku aliran fluida melalui penyelesaian persamaan dasar mekanika fluida menggunakan komputer. Dalam bidang aerodinamika kendaraan, CFD memungkinkan visualisasi dan analisis distribusi tekanan, kecepatan aliran, zona *wake*, serta distribusi energi turbulen secara detail tanpa memerlukan pengujian eksperimental yang mahal (Kanekar et al., 2017).

Analisis CFD didasarkan pada persamaan konservasi massa dan momentum yang dikenal sebagai persamaan Navier–Stokes. Untuk memodelkan aliran turbulen, digunakan model turbulensi seperti $k-\epsilon$ dan $k-\omega$ SST. Model $k-\omega$ SST banyak digunakan dalam studi aerodinamika kendaraan karena mampu memprediksi fenomena separasi aliran, zona *wake*, dan distribusi energi turbulen dengan tingkat akurasi yang lebih baik, terutama pada daerah dekat dinding dan aliran kompleks (Menter., 1994).

Zona wake pada Kendaraan

Zona *wake* merupakan daerah aliran di belakang kendaraan yang terbentuk akibat pemisahan aliran udara dari permukaan bodi kendaraan. Daerah ini dicirikan oleh tekanan rendah, aliran resirkulasi, dan turbulensi yang tinggi. Besarnya zona *wake* sangat dipengaruhi oleh geometri kendaraan, luas *frontal area*, dan kondisi aliran udara yang melewati kendaraan (Rony et al., 2024).

Keberadaan *wake* yang besar menyebabkan peningkatan *pressure drag* karena adanya perbedaan tekanan yang signifikan antara bagian depan dan belakang kendaraan. Pada kendaraan listrik, kondisi tersebut berdampak langsung pada peningkatan konsumsi energi dan penurunan jarak tempuh (Lee et al., 2025). Oleh karena itu, pengurangan ukuran *wake* menjadi salah satu strategi utama dalam optimasi aerodinamika kendaraan (Garcia-Ribeiro et al., 2023).

Turbulent Kinetic Energy (TKE)

Turbulent Kinetic Energy (TKE) merupakan parameter yang menggambarkan energi per satuan massa yang terkandung dalam fluktuasi kecepatan aliran turbulen. Pada *electric shuttle bus*, distribusi TKE berkaitan erat dengan fenomena separasi aliran dan pembentukan zona *wake* (Hucho & Sovran., 1993).

Nilai TKE yang tinggi biasanya ditemukan pada daerah *wake* di belakang kendaraan dan menunjukkan adanya turbulensi yang kuat. Kondisi tersebut menyebabkan hilangnya energi aliran dan meningkatkan gaya hambat aerodinamis. Mengurangi intensitas dan sebaran TKE melalui optimasi geometri bodi kendaraan, ukuran *wake* dapat diperkecil sehingga efisiensi aerodinamika dan performa energi kendaraan dapat meningkat (Zhao et al., 2024).

Research Gap dan Novelty

Sebagian besar penelitian aerodinamika kendaraan listrik masih berfokus pada parameter global seperti koefisien *drag* (Cd), koefisien *lift* (Cl), dan distribusi tekanan permukaan. Kajian yang menghubungkan fenomena *wake* dengan distribusi energi turbulen secara kuantitatif masih terbatas, terutama pada *electric shuttle bus* berkapasitas 14 penumpang.

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui simulasi numerik *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menelaah karakteristik aerodinamis bus shuttle listrik berkapasitas 14 penumpang. Pendekatan tersebut dipilih karena mampu menghasilkan data numerik terukur mengenai distribusi tekanan, kecepatan aliran, *zona wake*, energi kinetik turbulen (TKE), dan parameter aerodinamis lain. Objek penelitian berupa model tiga dimensi (3D) yang merepresentasikan bus listrik untuk transportasi jarak pendek hingga menengah. Simulasi dijalankan dengan perangkat lunak CFD guna memperoleh gambaran rinci mengenai perilaku aliran udara di sekitar bodi kendaraan serta dampaknya pada performa aerodinamis.



Gambar 1. Desain *Suttle Bus*

Proses simulasi terbagi menjadi tiga tahap utama: *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Pada *pre-processing* dibuat geometri kendaraan, ditentukan domain fluida, ditetapkan kondisi batas (*boundary condition*), dan dilakukan meshing. Tahap *processing* menyelesaikan persamaan aliran menggunakan model turbulensi $k-\omega$ SST, yang dipilih karena kemampuannya memprediksi aliran dekat dinding, separasi, dan pembentukan *zona wake* secara baik. Selanjutnya pada *post-processing* dilakukan visualisasi dan analisis distribusi tekanan, distribusi kecepatan, pola aliran, *zona wake*, serta distribusi TKE di sekitar kendaraan.

Kondisi batas simulasi menggunakan velocity inlet dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam untuk merepresentasikan kondisi operasional. Outlet diberi pressure outlet sebesar 1 atm, sedangkan permukaan bodi dimodelkan sebagai wall dengan kondisi no-slip. Analisis difokuskan pada pengaruh variasi kecepatan terhadap karakteristik *zona wake*, distribusi TKE, gaya hambat (*drag force*), dan koefisien *drag* (Cd). Hasil simulasi kemudian digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara pembentukan wake, intensitas turbulensi, dan performa aerodinamis bus shuttle listrik 14 penumpang.

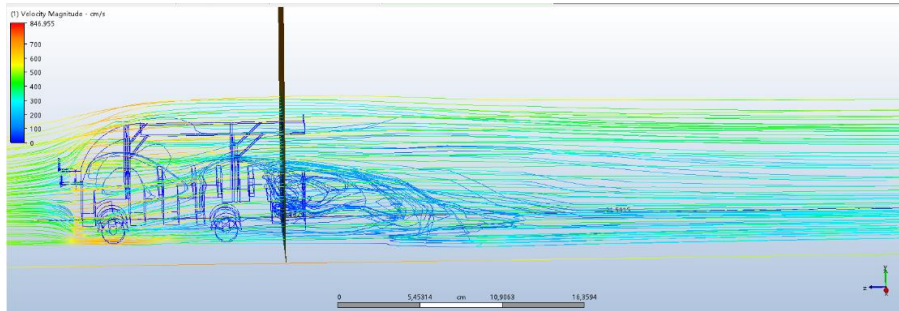
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran udara berpengaruh signifikan terhadap performa dan karakteristik aerodinamika *shuttle bus*.

Tabel 1. Hasil Simulasi CFD

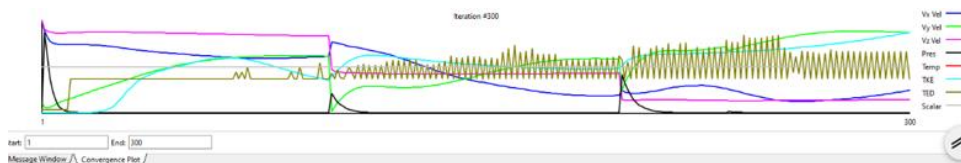
Parameter	20 km/jam	40 km/jam	60 km/jam
Wake Length (cm)	19,51	26,74	30,05
TKE Maksimum	530	5800	6100
Drag Force (N)	0,136	0,305	0,585
Koefisien Drag (Cd)	0,00229	0,00128	0,00066

Hasil simulasi CFD pada electric shuttle bus dapat dilihat pada tabel 1, diperoleh nilai *wake length*, *Turbulent Kinetic Energy* (TKE) maksimum, *drag force*, dan koefisien *drag* (Cd) pada tiga variasi kecepatan. Pada kecepatan 20 km/jam, *wake length* yang terbentuk sebesar 19,51 cm dengan nilai TKE maksimum 530, *drag force* 0,136 N, dan koefisien *drag* (Cd) sebesar 0,00229. Pada kecepatan 40 km/jam, *wake length* yang dihasilkan sebesar 26,74 cm, TKE maksimum 5800, *drag force* 0,305 N, dan Cd sebesar 0,00128. Sementara itu, pada kecepatan 60 km/jam diperoleh *wake length* sebesar 30,05 cm, TKE maksimum 6100, *drag force* 0,585 N, dan koefisien *drag* (Cd) sebesar 0,00066. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai dasar analisis karakteristik *zona wake*, distribusi energi turbulen, dan performa aerodinamis kendaraan pada masing-masing kecepatan.



Gambar 2. Visualisasi *streamline*

Visualisasi *streamline* pada gambar 2 mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan memperkuat interaksi antara udara dan bodi kendaraan, sehingga memicu separasi aliran yang lebih dominan di area belakang. Fenomena ini berdampak langsung pada perluasan daerah tekanan rendah yang memperpanjang *zona wake* dari 19,51 cm (20 km/jam) menjadi 26,74 cm (40 km/jam), hingga mencapai 30,05 cm pada kecepatan 60 km/jam



Gambar 3. *Residual Plot*

Gambar 3 memperlihatkan grafik hasil simulasi meluasnya *zona wake* ini selaras dengan lonjakan intensitas turbulensi, di mana nilai *Turbulent Kinetic Energy* (TKE) maksimum meningkat drastis dari $530 \text{ m}^2/\text{s}^2$ menjadi $5800 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dan memuncak pada angka $6100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ akibat kuatnya pembentukan pusaran aliran balik. Penguatan turbulensi dan efek sirkulasi pada *zona wake* tersebut menyebabkan kehilangan energi aliran yang lebih besar, yang dibuktikan dengan kenaikan gaya hambat (*drag force*) dari 0,136 N menjadi 0,305 N, hingga menyentuh 0,585 N pada kecepatan tertinggi.

Secara keseluruhan, meskipun koefisien *drag* (C_d) mengalami penurunan nilai seiring bertambahnya kecepatan, akumulasi gaya hambat total tetap meningkat akibat kontribusi linear dari perluasan *zona wake* dan intensitas TKE. Oleh karena itu, pengendalian fenomena separasi aliran di bagian belakang bodi kendaraan menjadi faktor krusialis dalam upaya optimasi efisiensi aerodinamika *shuttle bus*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik yang telah diuji, penelitian ini secara jelas berhasil menjawab tujuan utamanya dengan membuktikan adanya keterkaitan erat antara kecepatan operasional dengan karakteristik aerodinamika pada bodi *electric shuttle bus* berkapasitas 14 penumpang. Secara logis dan faktual, peningkatan kecepatan udara dari 20 km/jam, 40 km/jam, hingga 60 km/jam terbukti memperkuat fenomena pemisahan aliran udara di area belakang kendaraan. Kondisi ini berdampak langsung pada perluasan panjang *zona wake* yang melebar berturut-turut dari 19,51 cm menjadi 26,74 cm, hingga mencapai 30,05 cm pada kecepatan tertinggi. Meluasnya daerah bertekanan rendah ini memicu lonjakan intensitas turbulensi yang sangat drastis, di mana nilai *Turbulent Kinetic Energy* (TKE) maksimum meroket dari $530 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ke angka $5.800 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dan memuncak pada $6.100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ akibat kuatnya pusaran aliran balik di belakang kendaraan.

Penguatan turbulensi dan efek sirkulasi pada *zona wake* tersebut secara jujur mengakibatkan kehilangan energi aliran yang lebih besar, yang ditunjukkan oleh kenaikan gaya hambat total (*drag force*) secara signifikan dari 0,136 N menjadi 0,305 N, dan menyentuh angka 0,585 N pada kecepatan tertinggi. Menariknya, meskipun akumulasi gaya hambat total meningkat, nilai koefisien *drag* (Cd) justru menunjukkan tren menurun dari 0,00229 menjadi 0,00128 dan berakhir di angka 0,00066 karena adanya pengaruh kuadrat kecepatan pada proses normalisasi matematisnya. Melalui temuan kritis ini, dapat dipahami bahwa evaluasi aerodinamika kendaraan tidak boleh hanya bertumpu pada nilai Cd global saja, melainkan harus mengendalikan struktur *wake* dan sebaran energi turbulen secara komprehensif. Kendati demikian, upaya generalisasi dari hasil penelitian ini wajib dilakukan dengan penuh kehati-hatian, mengingat fenomena fisik yang terjadi sangat terikat pada spesifikasi geometri bodi kendaraan yang cenderung kotak (*boxy shape*) serta kondisi batas simulasi spesifik yang digunakan dalam kajian ini.

DAFTAR REFERENSI

- Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (2021). *Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake*. SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, 14(3), 215–229.
- Allah, A. A., & Mulyanto, T. (2025). Analisis Aerodinamika Untuk Desain Mobil Listrik Jenis Kargo Mini. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 10(1), 33–47.
- Anderson, J. D. (2020). *Fundamentals of aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- ANSYS. (2023). *ANSYS Fluent theory guide*. ANSYS Inc.

- Azis, A., Haryadi, M. J. A., Munawar, W., & Sriyono, S. (2026). The influence of the effectiveness of using electric shuttle buses as transportation within the campus environment. *Global Education Journal*, 4(2), 27–32.
- Choi, H., Jeong, J., & Kim, D. (2023). Aerodynamic drag reduction of ground vehicles by wake control techniques: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 142, 100873.
- Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., & Li, J. (2023). Battery capacity and efficiency optimization for electric buses under real-world driving conditions. *Applied Energy*, 334, 120673.
- Garcia-Ribeiro, D., Bravo-Mosquera, P. D., Ayala-Zuluaga, J. A., Martinez-Castañeda, D. F., Valbuena-Aguilera, J. S., Cerón-Muñoz, H. D., & Vaca-Rios, J. J. (2023). Drag reduction of a commercial bus with add-on aerodynamic devices. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(7), 1623–1636.
- IEA. (2024). *Global EV outlook 2024*. International Energy Agency.
- IPCC. (2023). *AR6 synthesis report: Climate change 2023*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Katz, J. (2006). Aerodynamics of race cars. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38, 27–63.
- Kim, J., Lee, S., & Park, J. (2022). Aerodynamic performance analysis of electric vehicles using CFD. *Energies*, 15(18), 6712.
- Laksana, N. A. S., Ariawan, R., Girawan, B. A. G., & Nurhidayat, A. R. S. (2024). Analisis Performa dan Studi Konsumsi Energi Kendaraan Listrik Sepeda Motor Listrik SEMOLI. *Infotekmesin*, 15(1), 1–6.
- Lee, S., et al. (2025). Component-level energy consumption and range analysis of battery electric vehicles under urban and highway driving conditions. *Applied Thermal Engineering*.
- Li, X., Zhou, Y., & Wang, H. (2024). Energy consumption characteristics of electric buses considering aerodynamic drag. *Energy Reports*, 10, 512–524.
- Mahmud, M. I., et al. (2024). Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050. *Energy Reports*.
- Rahman, M. A., Hasan, M. S., & Islam, M. R. (2023). Numerical investigation of wake structure and drag force of ground vehicles. *Heliyon*, 9(6), e16214.
- Rony, M. R., et al. (2024). Aerodynamic study of intercity bus models using CFD. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 17(12), 2592–2607.
- White, F. M. (2019). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill Education. New York, N.Y.
- Zhang, Y., Chen, X., & Liu, S. (2023). Development trends and aerodynamic challenges of electric shuttle buses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 102958.
- Zhao, L., et al. (2024). Optimizing the aerodynamic efficiency of electric vehicles via streamlined design: A computational fluid dynamics approach. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 42(3), 865–876.