

SIMULASI PERFORMA MODEL KENDARAAN LISTRIK SEBAGAI SARANA TRANSPORTASI DALAM KAMPUS

*Fajar Wahyudi¹, M. Munadi², Ismoyo Haryanto²,

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: fajarwahyudi633@gmail.com

Abstrak

Penggunaan kendaraan listrik sebagai sarana transportasi dalam lingkungan kampus menjadi alternatif yang potensial untuk mendukung mobilitas yang efisien dan ramah lingkungan. Untuk memastikan kinerja sistem penggerak sesuai dengan kebutuhan operasional, diperlukan analisis performa kendaraan secara komprehensif melalui pendekatan simulasi. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan menganalisis performa kendaraan listrik berbasis motor BLDC dan baterai LiFePO₄ 72 V 105 Ah menggunakan MATLAB/Simulink dengan siklus berkendara FTP-75 yang merepresentasikan kondisi lalu lintas *stop-and-go*. Analisis performa dilakukan dengan mengevaluasi kebutuhan torsi motor, daya motor, kecepatan kendaraan, jarak tempuh, daya regeneratif, konsumsi energi, serta perubahan *State of Charge* (SOC) baterai selama satu siklus pengujian. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kebutuhan daya motor berfluktuasi mengikuti profil kecepatan FTP-75 dengan daya maksimum mencapai sekitar 9 kW pada fase akselerasi, sedangkan putaran motor maksimum berada pada kisaran 4.000 rpm. Kecepatan rata-rata kendaraan berada pada rentang 20-25 km/jam dengan jarak tempuh total sekitar 13,5 km selama satu siklus. Sistem *regenerative braking* mampu menghasilkan daya hingga sekitar 8 kW pada fase deselerasi, sehingga membantu mengurangi beban energi baterai. Secara keseluruhan, model yang dikembangkan mampu merepresentasikan respons dinamis kendaraan listrik terhadap variasi beban dan perubahan kecepatan, serta dapat digunakan sebagai dasar evaluasi performa dan efisiensi energi kendaraan listrik untuk aplikasi transportasi kampus.

Kata kunci: efisiensi energi; ftp-75; kendaraan listrik; matlab/simulink; *state of charge*

Abstract

The use of electric vehicles as a mode of transportation within campus environments represents a promising alternative to support efficient and environmentally friendly mobility. To ensure that the propulsion system performance meets operational requirements, a comprehensive performance analysis through a simulation-based approach is required. This study aims to model and analyze the performance of an electric vehicle powered by a BLDC motor and a 72 V 105 Ah LiFePO₄ battery using MATLAB/Simulink with the FTP-75 driving cycle, which represents stop-and-go traffic conditions. Performance analysis was carried out by evaluating motor torque demand, motor power, vehicle speed, driving range, regenerative power, energy consumption, and battery State of Charge (SOC) variation during a single test cycle. The simulation results indicate that motor power demand fluctuates following the FTP-75 speed profile, reaching a maximum of approximately 9 kW during the acceleration phase, while the maximum motor speed is around 4,000 rpm. The average vehicle speed ranges between 20–25 km/h, with a total driving distance of approximately 13.5 km per cycle. The regenerative braking system is capable of generating up to approximately 8 kW during deceleration, thereby reducing battery energy consumption. Overall, the developed model is able to represent the dynamic response of the electric vehicle under varying load and speed conditions and can be used as a basis for evaluating vehicle performance and energy efficiency for campus transportation applications.

Keywords: *electric vehicles; energy efficiency; ftp-75; matlab/simulink; state of charge*

1. Pendahuluan

Sektor transportasi merupakan salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca akibat dominasi penggunaan bahan bakar fosil, sehingga mendorong pengembangan kendaraan listrik (*Electric Vehicle*) sebagai solusi mobilitas yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Kendaraan listrik memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan berbasis mesin pembakaran dalam serta mampu menurunkan emisi lokal secara signifikan [1]. Dalam konteks transportasi kampus yang memiliki karakteristik jarak tempuh pendek dan pola berkendara *stop-and-go*, penggunaan EV menjadi alternatif yang sesuai untuk mendukung sistem mobilitas berkelanjutan [2].

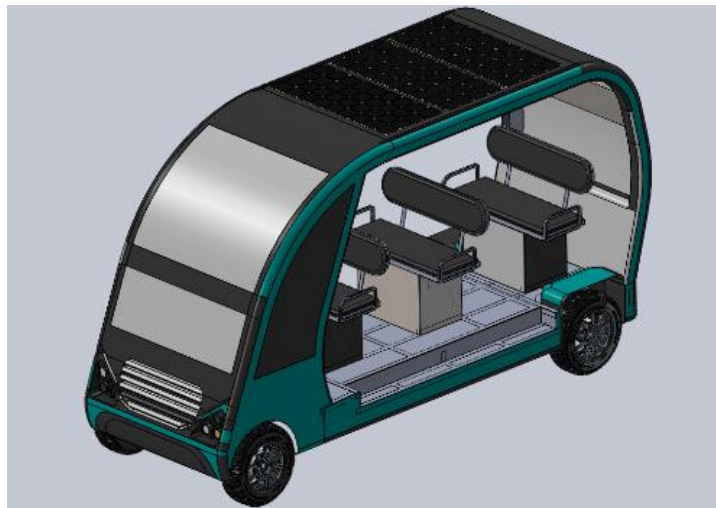
Meskipun memiliki berbagai keunggulan, performa kendaraan listrik sangat dipengaruhi oleh karakteristik sistem penggerak yang meliputi motor listrik, sistem kontrol, baterai, serta dinamika kendaraan secara keseluruhan. Parameter seperti kebutuhan torsi, daya motor, konsumsi energi, dan perubahan *State of Charge* (SOC) baterai menjadi faktor

penting dalam menentukan kemampuan operasional kendaraan [3]. Oleh karena itu, analisis performa secara menyeluruh diperlukan untuk memastikan bahwa kendaraan listrik mampu memenuhi kebutuhan mobilitas kampus secara optimal dan efisien.

Pendekatan simulasi berbasis perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink banyak digunakan dalam penelitian kendaraan listrik karena mampu merepresentasikan dinamika longitudinal kendaraan secara terintegrasi tanpa memerlukan pengujian fisik yang kompleks dan berbiaya tinggi. Dengan menerapkan siklus berkendara yang merepresentasikan kondisi lalu lintas nyata, seperti FTP-75 yang memiliki karakteristik percepatan dan deselerasi berulang, performa kendaraan dapat dianalisis secara lebih realistis. atau panel surya pada kendaraan listrik telah dikaji sebagai solusi untuk menyediakan suplai energi tambahan yang dapat mengurangi beban baterai dan meningkatkan efisiensi sistem [4].

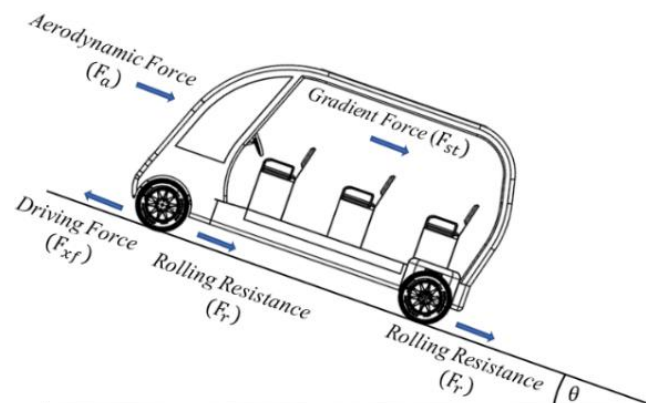
2. Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik (*Electric Vehicle*) merupakan sistem transportasi yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama dengan sumber energi berasal dari baterai. Dibandingkan kendaraan bermesin pembakaran dalam, EV memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi karena energi listrik langsung dikonversi menjadi energi mekanik tanpa proses pembakaran [5]. Sistem penggerak kendaraan listrik mengintegrasikan berbagai komponen utama yang saling bekerja sama untuk memastikan performa optimal, keamanan, serta efisiensi. Komponen utama tersebut meliputi, motor listrik sebagai penggerak (dalam penelitian ini menggunakan BLDC), baterai sebagai sumber energi, sistem kontrol elektronik, *gearbox*, *differential*, dan ban sebagai elemen penghubung ke jalan [6]. Desain *assembly* kendaraan listrik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain *assembly* kendaraan listrik yang disimulasikan

Analisis performa kendaraan listrik secara longitudinal didasarkan pada keseimbangan gaya yang bekerja pada kendaraan. Gaya total yang harus diatasi oleh motor listrik terdiri dari gaya hambat aerodinamis, gaya hambat gulir, gaya inersia akibat percepatan, serta gaya akibat kemiringan jalan [7]. Gambar 2 menunjukkan gaya utama yang berpengaruh pada performa kendaraan listrik.



Gambar 2. Gaya utama yang bekerja pada kendaraan listrik

Gaya hambat udara (*Aerodynamic Force*) adalah gaya yang timbul akibat interaksi antara udara dan permukaan kendaraan yang bergerak. Besarnya gaya hambat ini akan bergantung pada kecepatan kendaraan, luas penampang depan, densitas udara serta koefisien hambat aerodinamis [8]. Persamaannya dapat ditulis dengan Persamaan (1).

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A_F (V + V_0)^2 \quad (1)$$

Nilai koefisien drag aerodinamis (C_d) sangat bergantung pada bentuk dan tipe kendaraan. Semakin aerodinamis bentuk kendaraan, semakin kecil nilai (C_d) yang dihasilkan, sehingga hambatan udara yang diterima pun lebih rendah. Berikut merupakan Tabel 1 yang menunjukkan nilai koefisien drag aerodinamis.

Tabel 1. Koefisien drag aerodinamis

Tipe Kendaraan	Nilai Koefisien Drag (C_d)
Sedan	0.22 - 0.40
Hatchback	0.28 - 0.35
MPV/Minibus	0.35 - 0.45
SUV	0.32 - 0.45
Bus	0.65 - 0.95
Truk	0.70 - 1

Gaya hambat gulir (*Rolling Resistance*) adalah faktor yang menghambat gerakan maju ban, yang timbul akibat deformasi ban dan permukaan jalan selama kendaraan bergerak. Besarnya gaya ini tergantung pada massa kendaraan, kondisi jalan, tekanan ban, serta jenis permukaan [7]. Untuk menghitung besarnya gaya hambat gulir ini bisa menggunakan persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$F_r = mgCr \cos\theta \quad (2)$$

Untuk menganalisis gaya hambat gulir yang bekerja pada kendaraan listrik, perlu diketahui nilai koefisien hambatan gulir (Cr) berdasarkan tipe permukaan jalan yang dilalui. Nilai koefisien hambatan gulir bisa dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien hambatan gulir

Tipe Permukaan Jalan	Koefisien Hambatan Gulir (Cr)
Beton atau Aspal	0.013
Jalan Kerikil Kecil	0.02
Jalan Tanah Alami	0.1-0.35

Gaya inersia (*Acceleration Resistance*) sendiri merupakan gaya yang terjadi ketika kendaraan mengalami percepatan atau perlambatan saat kendaraan melaju. Gaya inersia ini muncul sebagai reaksi terhadap perubahan kecepatan [8]. Menurut hukum kedua Newton, gaya inersia dapat dihitung dengan Persamaan (3).

$$F_i = m \cdot a \quad (3)$$

Gaya hambat tanjakan (*Gradient Resistance*) adalah gaya yang timbul saat kendaraan melaju di jalan yang permukaannya miring, karena sebagian berat kendaraan bekerja sejajar dengan permukaan jalan. Besarnya gaya sebanding dengan massa kendaraan dan sudut tanjakan yang dilalui [9]. Besarnya gaya hambat tanjakan ini dapat dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$F_g = m g \sin\theta \quad (4)$$

Total gaya hambat merupakan penjumlahan dari seluruh gaya yang menghambat laju kendaraan. Gaya tersebut meliputi gaya hambat udara, gaya hambat gulir, gaya inersia dan gaya hambat tanjakan. Setiap gaya hambat memiliki karakteristik sendiri yang dipengaruhi oleh faktor seperti kecepatan kendaraan, kondisi permukaan jalan, kemiringan jalan, massa kendaraan, serta perubahan kecepatan [7]. Untuk menghitung total gaya hambat ini bisa menggunakan Persamaan (5).

$$F_{load} = F_a + F_r + F_i + F_g \quad (5)$$

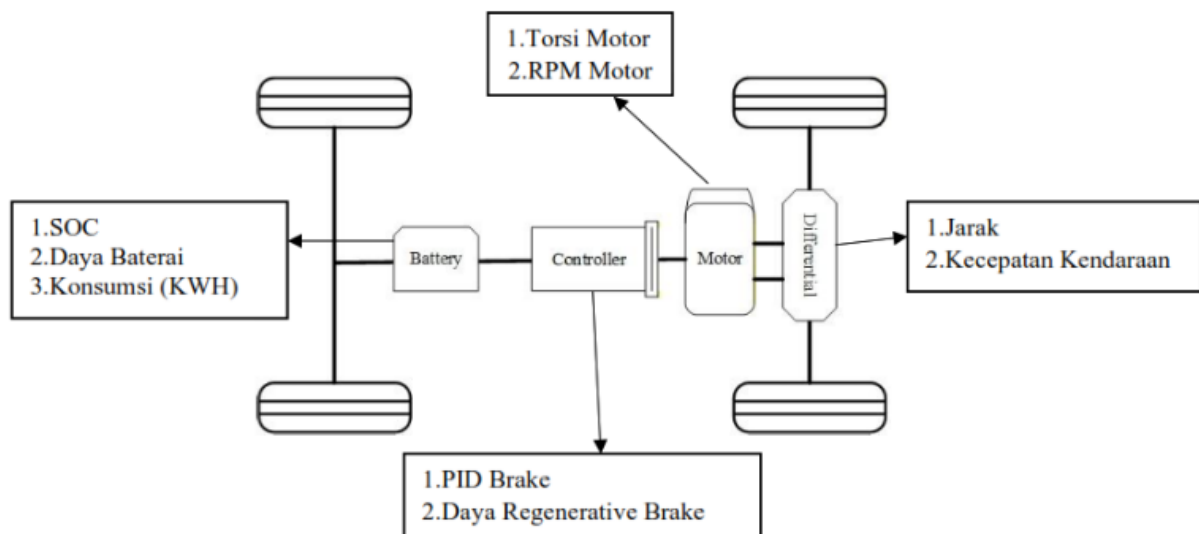
3. Bahan dan Metodologi Penelitian

3.1 Matlab/Simulink

Matlab/Simulink digunakan sebagai platform utama dalam pemodelan dan simulasi sistem penggerak kendaraan listrik dengan integrasi panel surya. Dengan pendekatan *model-based design*, Matlab/Simulink memungkinkan perancangan sistem secara modular dan integratif dengan kemampuan visualisasi yang kuat. Sistem kendaraan listrik, dimodelkan secara matematis untuk mensimulasikan respons dinamis pada berbagai kondisi operasi. Simulasi siklus berkendara FTP-75 dilakukan untuk menggambarkan profil penggunaan kendaraan di lingkungan kampus. Platform ini mendukung evaluasi performa kendaraan listrik yang meliputi kecepatan kendaraan, kebutuhan torsi dan daya motor, konsumsi energi, serta perubahan *State of Charge* (SOC) [10].

3.2 Proses Penelitian

Alur penelitian ini dimulai dari pengumpulan data, pemodelan, simulasi, serta analisis hasil simulasi sehingga dapat ditarik kesimpulan. Untuk analisis hasil simulasi sendiri terdapat beberapa analisis terkait dengan hasil simulasi yang dilakukan. Hasil simulasi sendiri merupakan *output* dari masing-masing simulasi sistem kendaraan listrik yang dilakukan. Skematik tentang *output* dari masing-masing simulasi sistem kendaraan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Output simulasi

Langkah pertama dalam penelitian ini yaitu dengan pengumpulan data teknis kendaraan yang digunakan untuk simulasi. Pemodelan performa kendaraan listrik dilakukan berdasarkan data tersebut. Simulasi dijalankan dengan menggunakan siklus berkendara FTP-75 untuk menggambarkan profil penggunaan kendaraan di lingkungan kampus. Dari hasil simulasi diperoleh data performa kendaraan listrik, meliputi hasil simulasi motor listrik, komponen *differential*, komponen *controller* dan yang terakhir simulasi komponen baterai.

Parameter fisik kendaraan berupa massa kendaraan dan penumpang, radius roda, koefisien *drag* aerodinamis, luas area frontal kendaraan, koefisien hambatan gulir, rasio gear, densitas udara, sudut kemiringan jalan, kecepatan angin, percepatan gravitasi, kecepatan sudut roda, serta kecepatan kendaraan di lingkungan kampus. Berikut merupakan Tabel 3 yang menunjukkan data kendaraan listrik.

Tabel 3. Data Kendaraan

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai
Massa Kendaraan + Penumpang	m	kg	$1000 + 600 = 1600$
Radius Roda	r	m	0,3
Koefisien <i>Drag</i>	C_d	-	0,95
Luas Area Frontal	A_f	m^2	2,96
Koefisien Hambatan Gulir	C_r	-	0,013
<i>Gear Ratio</i>	N	-	7,8: 1
Densitas Udara	ρ	kg/m^3	1,2
Sudut Kemiringan Jalan	θ	$^\circ$	17,12
Kecepatan Angin	V_o	m/s	0
Gaya Gravitasi	g	m/s^2	9,81
Kecepatan Sudut Roda	ω	rad/s	41,04
Kecepatan Kendaraan	V	m/s	$34 \text{ km/h} = 9,44$

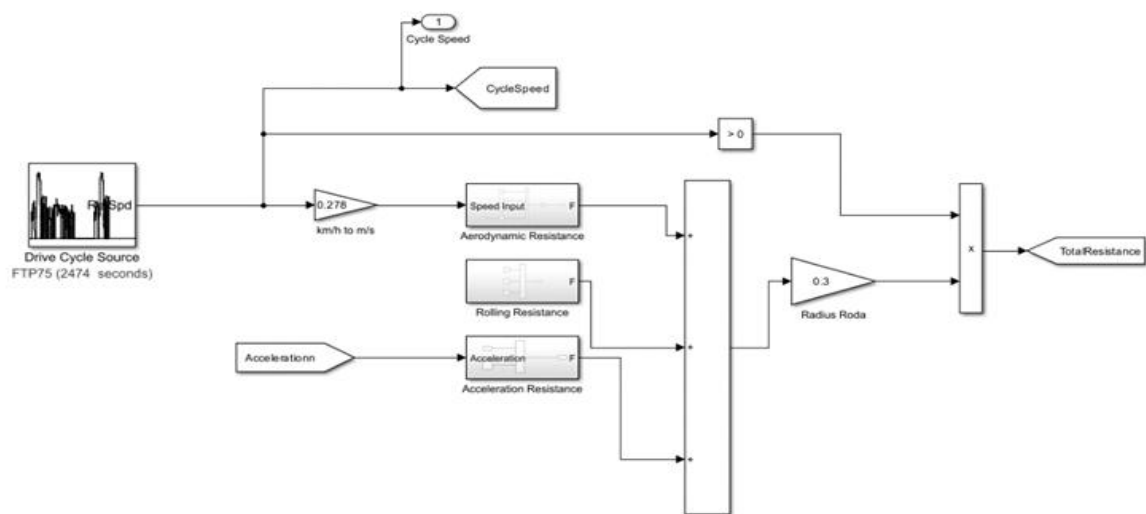
Selain data kendaraan, data dari baterai digunakan untuk memodelkan dan mensimulasikan sistem kendaraan listrik khususnya sistem baterai itu sendiri. Data ini mencakup karakteristik elektrik dan berat serta dimensi dari baterai yang diperoleh dari *datasheet* baterai. Data acuan baterai bisa dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data acuan baterai

Parameter	Nilai
Jenis	LiFePO4
Tegangan	3,2 V
Kapasitas	105 Ah
Dimensi	175 x 27 x 220 mm
Berat	1,8 kg
Life Cycles	Lebih dari 4000 siklus

3.3 Pemodelan Sistem

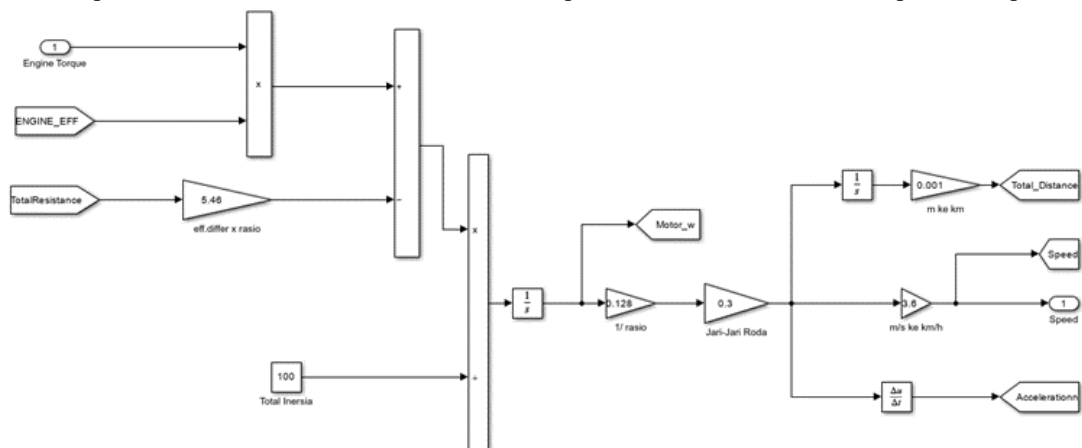
Pemodelan sistem ini meliputi pemodelan kendaraan listrik dengan integrasi panel surya yang terdiri dari empat bagian utama, yaitu pemodelan dinamika kendaraan, pemodelan *powertrain*, pemodelan *controller* dan motor, serta pemodelan baterai. Pemodelan ini dilakukan untuk mensimulasikan performa kendaraan listrik secara realistis menggunakan Matlab/Simulink. Pemodelan dinamika kendaraan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan dinamika kendaraan

Pemodelan dinamika kendaraan dilakukan dengan menggunakan profil kecepatan FTP-75 sebagai input untuk menghitung gaya resistansi total yang terdiri dari hambatan aerodinamis, hambatan gulir, dan gaya inersia akibat percepatan. Data kecepatan dari blok *Drive Cycle Source* dikonversi ke m/s, kemudian diturunkan untuk memperoleh percepatan. Ketiga komponen gaya dijumlahkan menjadi *Total Resistance Force*, yang selanjutnya dikalikan dengan jari-jari roda untuk menentukan torsi beban motor selama siklus pengujian.

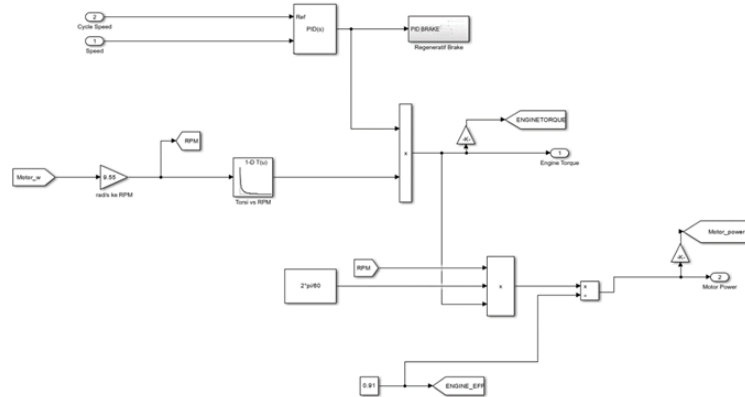
Pemodelan *powertrain* berfungsi untuk menggambarkan hubungan antara torsi motor listrik, gaya resistansi kendaraan, dan respons dinamis kendaraan. Pemodelan sistem *powertrain* kendaraan listrik dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan sistem *powertrain*

Blok *powertrain* memproses torsi motor dan gaya resistansi total untuk menghasilkan torsi bersih sistem penggerak dengan mempertimbangkan efisiensi motor, rasio transmisi, dan diferensial. Torsi bersih dibagi dengan inersia kendaraan untuk memperoleh percepatan sudut, yang kemudian diintegrasikan menjadi kecepatan motor dan dikonversi menjadi kecepatan linier serta jarak tempuh. Keluaran utama blok ini adalah kecepatan, percepatan, dan jarak kendaraan sebagai dasar perhitungan konsumsi daya dan efisiensi.

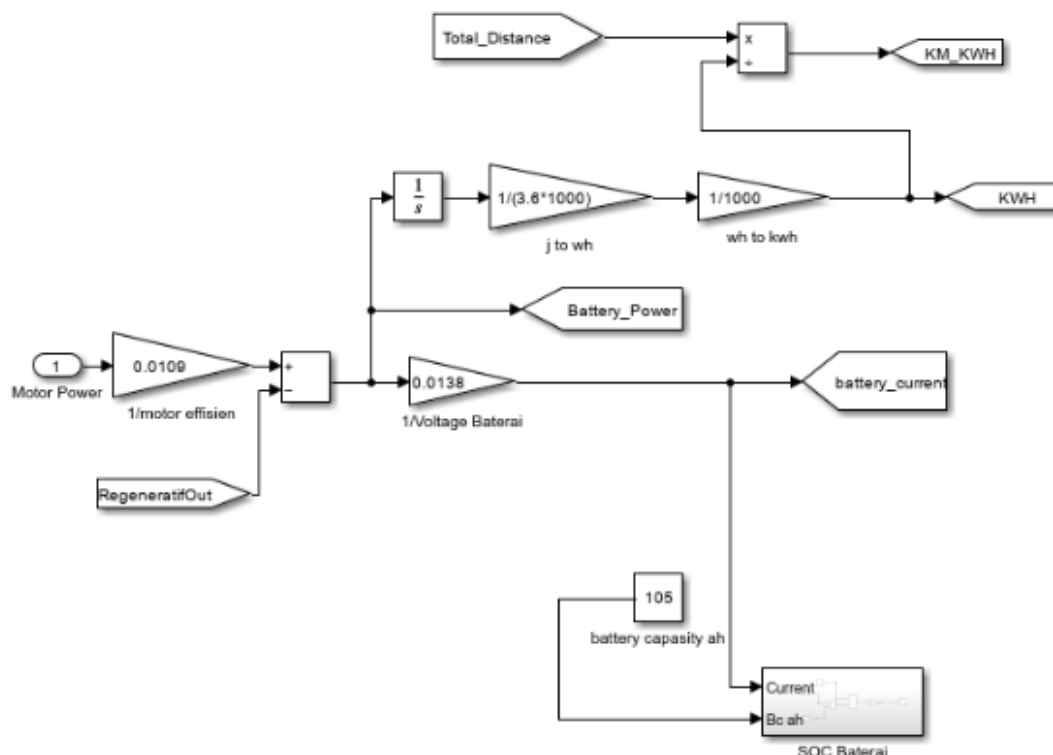
Pemodelan *controller* dan motor listrik bertujuan merepresentasikan hubungan sinyal referensi kecepatan dari *drive cycle* dengan respon motor terhadap beban dan gaya resistansi kendaraan. Pemodelan ini dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pemodelan *controller* dan motor

Blok *controller* dan motor menjelaskan bahwa sinyal kecepatan FTP-75 digunakan sebagai referensi dan dibandingkan dengan kecepatan hasil simulasi, kemudian *error* dikendalikan oleh PID untuk menghasilkan torsi motor, termasuk pengaturan regenerative braking saat deselerasi. Torsi aktual diperoleh dari kurva torsi-RPM menggunakan *lookup table*, lalu dikalikan efisiensi motor untuk menghasilkan daya efektif.

Pemodelan baterai pada simulasi ini bertujuan untuk merepresentasikan proses penyimpanan dan penyaluran energi listrik dari baterai sebagai sumber daya utama kendaraan listrik. Pemodelan baterai dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pemodelan baterai

Blok baterai memproses daya dari motor dan energi regeneratif untuk menghitung konsumsi energi, arus, serta pembaruan *State of Charge* (SOC) secara dinamis. Energi total diperoleh dari integrasi daya terhadap waktu dan

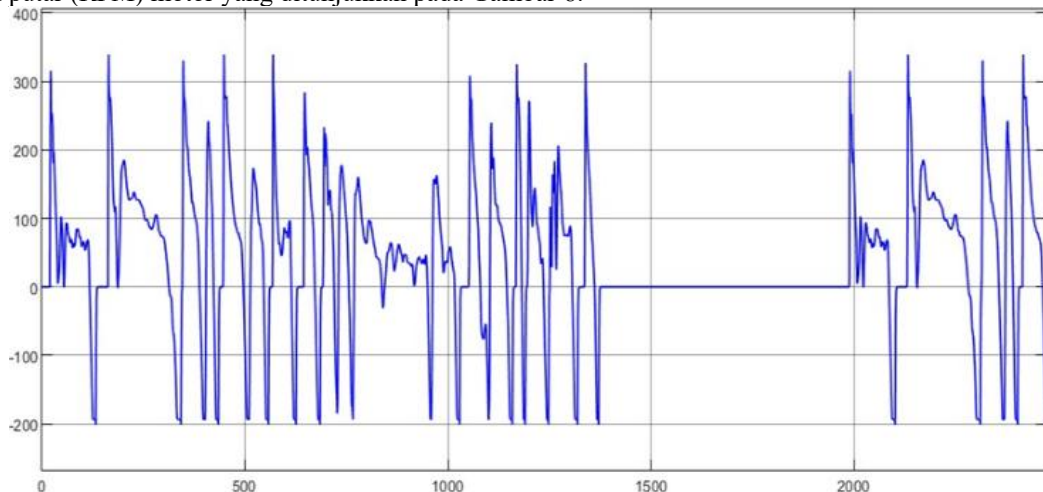
dikonversi ke kWh maupun kWh/km untuk analisis efisiensi. Model ini menampilkan SOC gabungan, energi total, dan efisiensi per kilometer untuk mengevaluasi performa kendaraan listrik.

4. Hasil dan Pembahasan

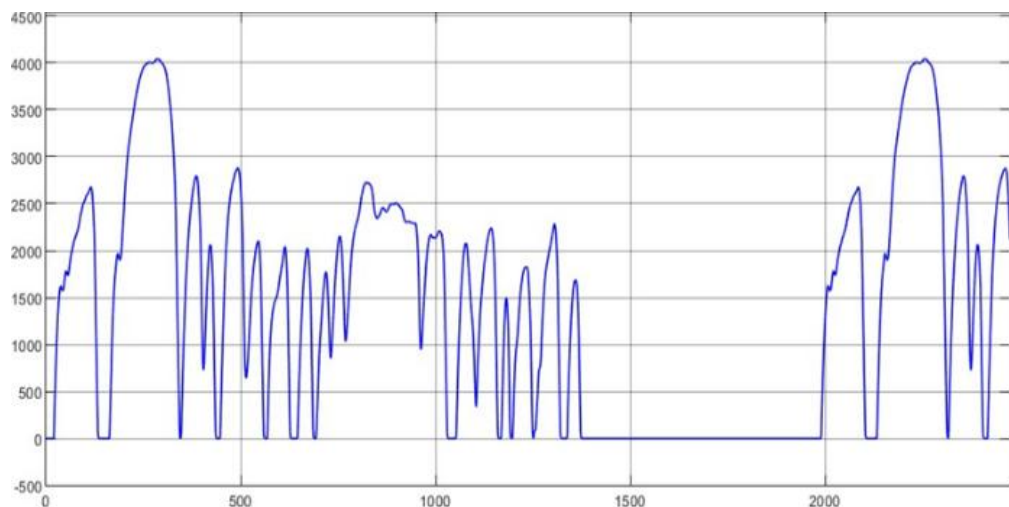
4.1 Hasil Simulasi Kinerja Sistem Kendaraan Listrik

Sistem kendaraan yang disimulasikan meliputi semua komponen dalam kendaraan listrik, seperti komponen motor listrik, differential, controller dan baterai. Simulasi ini dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan input kecepatan dari siklus berkendara FTP-75.

Motor listrik merupakan penggerak utama pada kendaraan listrik, hasil simulasi motor listrik meliputi torsi motor, dan kecepatan putar (RPM) motor yang ditunjukkan pada Gambar 8.



(a)



(b)

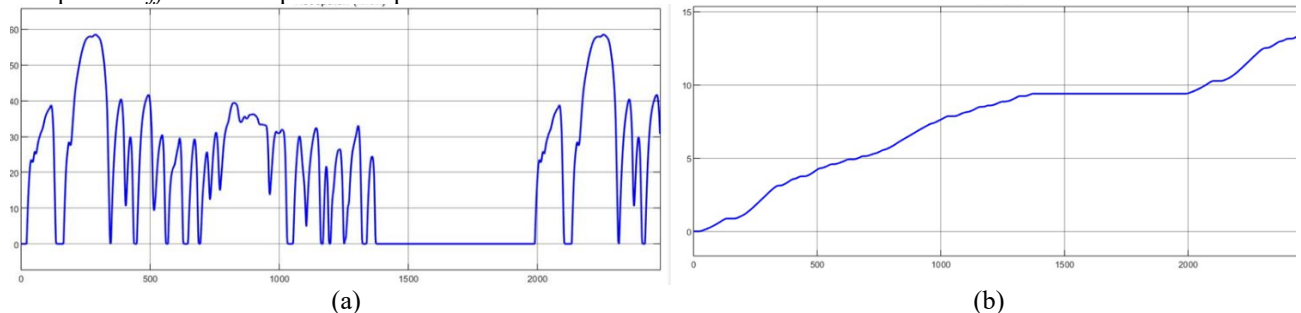
Gambar 8. (a) Grafik hasil simulasi torsi motor yang dibutuhkan; (b) Grafik hasil simulasi kecepatan putar motor

Grafik hasil simulasi torsi motor menunjukkan bahwa motor mampu merespons kebutuhan gaya traksi kendaraan selama siklus berkendara FTP-75. Nilai torsi yang dihasilkan mengalami perubahan dari torsi negatif hingga positif dengan nilai maksimum mendekati ± 300 Nm. Pada saat kendaraan mengalami akselerasi, motor menghasilkan torsi positif yang cukup besar untuk mengatasi gaya inersia serta hambatan yang bekerja pada kendaraan. Sebaliknya, ketika kendaraan memasuki fase deselerasi, torsi motor bernilai negatif, yang menunjukkan bahwa sistem pengereman regeneratif bekerja dengan mengonversi energi kinetik menjadi energi listrik untuk disalurkan kembali ke baterai.

Grafik hasil simulasi putaran motor menunjukkan variasi kecepatan putar motor yang mengikuti pola siklus berkendara FTP-75. Nilai putaran motor meningkat secara signifikan pada fase akselerasi dan saat kendaraan mencapai kecepatan yang lebih tinggi, dengan putaran maksimum berada pada kisaran 4.000 rpm. Pada beberapa interval waktu, terlihat penurunan putaran motor hingga mendekati nol rpm, yang mengindikasikan kondisi kendaraan berhenti atau melaju dengan kecepatan sangat rendah. Kondisi ini umum terjadi pada fase stop-and-go dalam siklus FTP-75. Selain itu,

fluktuasi putaran motor yang cukup tajam juga terlihat pada fase deselerasi dan akselerasi berulang, yang mencerminkan respons motor terhadap perubahan kecepatan referensi yang cepat.

Differential merupakan salah satu komponen penggerak pada kendaraan listrik yang berfungsi untuk meneruskan daya dan torsi dari motor listrik ke roda penggerak, sehingga parameter keluaran atau *output* yang diamati meliputi kecepatan kendaraan, dan jarak yang dapat ditempuh kendaraan selama siklus berkendara FTP-75. Hasil simulasi komponen *differential* dapat dilihat pada Gambar 9.

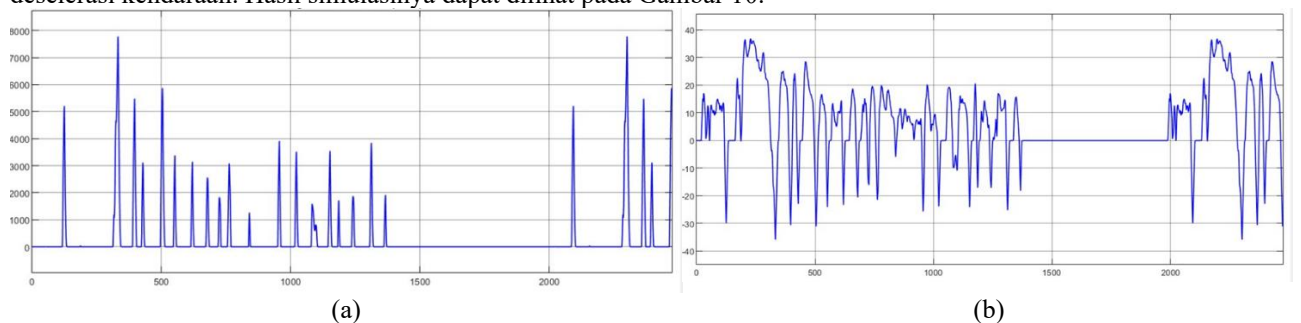


Gambar 9. (a) Grafik hasil simulasi kecepatan kendaraan; (b) Grafik hasil simulasi jarak yang ditempuh kendaraan

Grafik hasil simulasi kecepatan kendaraan menunjukkan pola perubahan kecepatan yang mengikuti karakteristik siklus berkendara FTP-75. Kecepatan kendaraan meningkat pada fase akselerasi dan menurun pada fase deselerasi, dengan kecepatan maksimum mencapai sekitar 60 km/jam. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai kecepatan rata-rata kendaraan yang berada pada kisaran 20 –25 km/jam. Nilai ini sesuai dengan karakteristik siklus FTP-75 yang merepresentasikan kondisi lalu lintas perkotaan dengan intensitas berhenti dan berjalan yang tinggi.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa kendaraan listrik mampu menempuh jarak tertentu selama siklus berkendara FTP-75. Jarak tempuh tersebut diperoleh dari akumulasi kecepatan kendaraan terhadap waktu selama proses simulasi berlangsung, sehingga mencerminkan performa kendaraan dalam merepresentasikan pola berkendara perkotaan yang sesungguhnya. Dari hasil simulasi tersebut, total jarak tempuh kendaraan mencapai kurang lebih 13,5 km.

Controller merupakan komponen yang berperan untuk mengatur aliran daya antara motor listrik, baterai, dan sistem pengereman. Parameter simulasi yang dianalisis meliputi daya *regenerative brake* dan kinerja PID brake selama proses deselerasi kendaraan. Hasil simulasinya dapat dilihat pada Gambar 10.

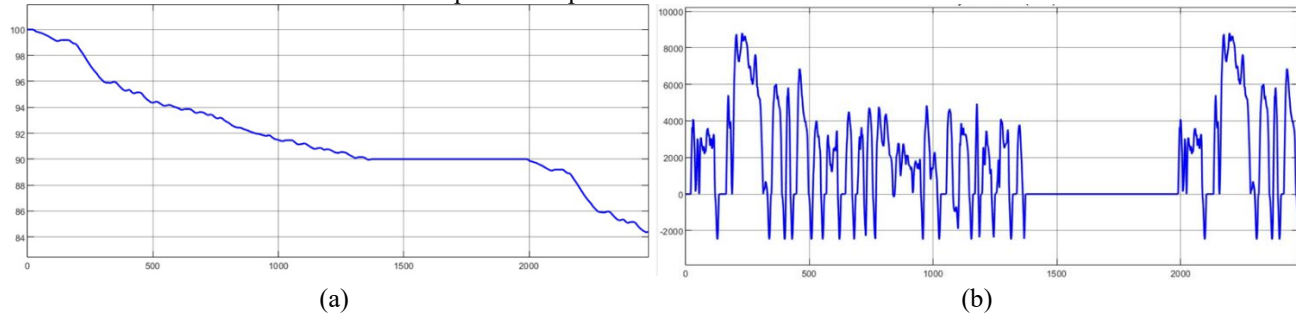


Gambar 10. (a) Grafik hasil simulasi daya regeneratif yang dihasilkan; (b) Grafik hasil simulasi PID *brake* yang dihasilkan

Grafik hasil simulasi daya regeneratif menunjukkan bahwa sistem pengereman regeneratif menghasilkan daya pada waktu tertentu, yang menandakan perubahan fungsi motor listrik menjadi generator saat kendaraan mengalami perlambatan. Kondisi ini terjadi saat energi kinetik kendaraan dikonversi kembali menjadi energi listrik untuk disalurkan ke sistem penyimpanan energi atau baterai. Pada fase deselerasi ringan, daya yang dihasilkan relatif kecil yaitu hanya sekitar 1000 Watt atau 1 kW, sedangkan pada kondisi pengereman yang lebih intens, daya regeneratif meningkat hingga mencapai nilai tertentu dan nilai tertinggi mencapai kurang lebih 8000 Watt atau 8 kW.

Sedangkan untuk hasil simulasi PID *brake* menunjukkan bahwa pengendali mampu mengatur proses perlambatan kendaraan secara efektif selama siklus berkendara. Pada hasil simulasi menunjukkan bahwa PID brake memiliki nilai positif dan negatif selama siklus berkendara. Nilai positif merepresentasikan kondisi ketika sistem penggerak bekerja untuk menggerakkan kendaraan, seperti pada fase akselerasi atau saat mempertahankan kecepatan. Untuk nilai tertingginya kurang lebih 35, pada kondisi ini motor listrik menghasilkan gaya untuk mengatasi gaya hambat serta inersia kendaraan. Nilai PID brake negatif ini hingga sekitar -35, yang menunjukkan bahwa arah kerja sistem berlawanan dengan arah gerak kendaraan dan menandakan sistem pengereman sedang bekerja. Pola ini mencerminkan kemampuan sistem pengereman regeneratif dalam menyesuaikan responsnya terhadap perubahan dinamika kendaraan selama siklus berkendara FTP-75.

Baterai merupakan sumber energi utama yang berfungsi menyuplai daya ke motor listrik. Pada simulasi ini, kinerja baterai dianalisis untuk mengetahui perubahan kondisi pengisian (*State of Charge*) dan besarnya daya baterai yang dibutuhkan. Hasil simulasi dari baterai dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. (a) Grafik hasil simulasi *state of charge* baterai; (b) Grafik hasil simulasi daya baterai yang dibutuhkan

Hasil simulasi nilai *state of charge* (SOC) menunjukkan bahwa baterai mengalami penurunan secara bertahap selama siklus berkendara FTP-75. Penurunan SOC ini mencerminkan penggunaan energi listrik oleh sistem penggerak kendaraan untuk memenuhi kebutuhan traksi selama berbagai kondisi operasi, seperti akselerasi, deselerasi, dan gerak kendaraan pada kecepatan konstan. Laju penurunan SOC tidak bersifat linear, melainkan dipengaruhi oleh perubahan beban kendaraan sepanjang siklus pengujian. Dalam hasil simulasi tersebut hasil kondisi akhir baterai berada pada sekitar 84%. Saat interval waktu tertentu, penurunan SOC lebih lambat atau relatif stabil, kondisi ini terjadi ketika kebutuhan daya motor berkurang atau ketika sistem pengereman regeneratif mulai.

Hasil simulasi daya baterai menunjukkan kebutuhan daya dari baterai yang mengalami perubahan sepanjang siklus berkendara FTP-75. Daya baterai meningkat pada saat kendaraan membutuhkan tenaga penggerak yang lebih besar, terutama pada fase akselerasi dan saat mempertahankan kecepatan pada kondisi beban tertentu. Dalam kondisi tersebut, daya baterai yang dibutuhkan hingga sekitar 9000 Watt atau 9 kW. Saat interval waktu tertentu, daya baterai bernilai lebih negatif, yang menandakan terjadinya pengisian energi ke dalam baterai. Kondisi tersebut terjadi saat kendaraan mengalami perlambatan, di mana energi listrik diperoleh dari proses pengereman regeneratif atau dari sumber energi tambahan seperti panel surya. Daya yang bernilai negatif tersebut berada sekitar 2000 Watt. Perubahan nilai daya ini menunjukkan adanya interaksi dinamis antara baterai, motor, dan sistem manajemen energi kendaraan

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, model kendaraan listrik yang dikembangkan mampu merepresentasikan karakteristik performa dinamis kendaraan secara realistis pada kondisi siklus berkendara FTP-75. Kebutuhan daya dan torsi motor meningkat signifikan pada fase akselerasi dan mengikuti pola perubahan kecepatan yang diberikan, dengan daya maksimum mencapai sekitar 9 kW dan putaran motor maksimum sekitar 4.000 rpm. Rata-rata kecepatan kendaraan berada pada kisaran 20–25 km/jam dengan jarak tempuh total sekitar 13,5 km dalam satu siklus, yang menunjukkan kesesuaian kendaraan untuk operasional transportasi dalam lingkungan kampus yang didominasi pola *stop-and-go*. Sistem *regenerative braking* berkontribusi dalam mengurangi konsumsi energi dengan menghasilkan daya balik saat deselerasi, sehingga membantu mempertahankan efisiensi sistem secara keseluruhan. Penurunan nilai *State of Charge* (SOC) baterai selama pengujian mencerminkan kebutuhan energi aktual kendaraan dalam mempertahankan performa sesuai profil berkendara. Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi sistem penggerak yang digunakan mampu memenuhi kebutuhan performa operasional kendaraan listrik untuk aplikasi transportasi kampus dengan karakteristik efisiensi energi yang baik.

6. Daftar Pustaka

- [1] Kaushik, H., Mathew, M., & Hossain, J. (2018). Comparative Analysis of Greenhouse Gas Emission from Different Vehicular Fuels. *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, Greater Noida, India, 702–705. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665463>
- [2] Albatayneh, A., Assaf, M. N., Alterman, D., & Jaradat, M. (2020). Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 669–680. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0041>
- [3] Akhter, S., Rahman, M. H., Hasan, M. M., & Islam, M. R. (2023). Potential and methods of integrating solar cells into vehicles. In *Proceedings of the International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 715–720). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCEP57893.2023.10127145>
- [4] Chethan, K., Kiran, D. B., Vinesh, S., Sharmila, N., & Shanmukha, G. K. (2024). Design and simulation of solar powered electric cart for university campus. *2024 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)*, 1–7. IEEE.

-
- [5] Pradhan, R. P., Nair, M. S., Hall, J. H., & Bennett, S. E. (2024). Planetary health issues in the developing world: Dynamics between transportation systems, sustainable economic development, and CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 449, 140842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140842>
 - [6] Moosavi, S. M. H., Ma, Z., Armaghani, D. J., Aghaabbasi, M., Ganggayah, M. D., Wah, Y. C., & Ulrikh, D. V. (2022). Understanding and predicting the usage of shared electric scooter services on university campuses. *Applied Sciences*, 12(18), 9392. <https://doi.org/10.3390/app12189392>
 - [7] Karakaş, O., Şeker, U. B., & Solmaz, H. (2021). Modeling of an Electric Bus Using MATLAB/Simulink and Determining Cost Saving for a Realistic City Bus Line Driving Cycle. *Engineering Perspective*, 1(2), 52–62. <https://doi.org/10.29228/eng.pers.51422>
 - [8] Batari, A. (2021). *Pemodelan Dan Analisa Dinamika Mobil Listrik: Studi Kasus Bus Listrik* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
 - [9] Mamun, K. A. (2022). Systematic Modeling and Analysis of On-Board Vehicle Energy Flow and Resistance Forces in Electric Vehicles. *Sustainability*, 14(15), 9134. <https://doi.org/10.3390/su14159134>.
 - [10] Aslan, E., Çelik, S., Yıldız, M., & Kaya, M. (2024). Comprehensive Multidisciplinary Electric Vehicle Modeling Using MATLAB/Simulink. *Sustainability*, 16(3), 1457. <https://doi.org/10.3390/su16031457>