

PEMODELAN DAN ANALISIS SISTEM PENGGERAK KENDARAAN LISTRIK BERBASIS MATLAB/SIMULINK UNTUK TRANSPORTASI MAHASISWA DALAM KAMPUS

*Naufal Mulya Andzaka¹, 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: naufalmulya921@gmail.com

Abstrak

Kendaraan listrik berkembang sebagai solusi ramah lingkungan untuk mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil dan emisi karbon. Kendaraan konvensional mengonsumsi bahan bakar tinggi dan menghasilkan emisi berbahaya, sehingga dibutuhkan alternatif yang lebih efisien dan bersih. Penggunaan kendaraan listrik di lingkungan kampus diharapkan mendukung mobilitas berkelanjutan dengan efisiensi energi dan dampak lingkungan yang lebih rendah. Motor BLDC dipilih sebagai sistem penggerak karena efisiensi tinggi, responsif, perawatan rendah, dan umur lebih lama. Penelitian ini memodelkan dan menganalisis kinerja motor BLDC pada kendaraan angkutan mahasiswa berbasis sasis mobil kijang kotak menggunakan Matlab/Simulink dengan model-based design, mengintegrasikan parameter teknis, karakteristik motor, dan data siklus FTP-75 yang merepresentasikan pola perjalanan kampus. Simulasi satu motor menunjukkan torsi maksimum 200–250 Nm dan daya puncak 2,5 kW pada beban penuh dan medan menanjak. Pada konfigurasi dua motor, beban torsi dan daya terbagi rata (torsi 100–150 Nm dan daya 1–1,5 kW per motor). Konsumsi energi siklus sekitar 5,5 juta joule dengan jarak tempuh 17,77 km. Pola torsi dan daya yang dinamis sesuai karakteristik berkendara kampus ditampilkan. Analisis ini menjadi dasar teknis pengembangan kendaraan listrik kampus yang efisien dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: angkutan mahasiswa; ftp-75; kendaraan listrik; matlab/simulink; motor bldc; sasis kijang kotak

Abstract

Electric vehicles offer an eco-friendly alternative to reduce fossil fuel reliance and carbon emissions from conventional engines, which have high fuel consumption and harmful emissions. Particularly in campus settings, electric vehicles promote sustainable mobility with improved energy efficiency and reduced environmental impact. BLDC motors are preferred for their efficiency, responsiveness, low maintenance, and longer lifespan. This study models and analyzes BLDC motor performance for campus shuttle vehicles based on the Kijang Kotak chassis using Matlab/Simulink and a model-based design incorporating vehicle specs, motor characteristics, and FTP-75 driving cycle data reflecting campus travel. Simulations show single motors deliver 200–250 Nm torque and 2.5 kW peak power under load and incline, while dual motors share torque and power evenly (100–150 Nm and 3–3.5 kW each). Energy consumption is about 5.5 million joules per 17.77 km cycle. Dynamic torque and power patterns align with campus driving profiles, providing a solid technical foundation for developing efficient, reliable, and green campus electric vehicles.

Keywords: bldc motor; electric vehicle; ftp-75; kijang kotak chassis; matlab/simulink; student transport

1. Pendahuluan

Perkembangan kendaraan listrik sebagai solusi transportasi ramah lingkungan semakin mendapat perhatian serius dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca serta ketergantungan pada bahan bakar fosil. Terlebih di lingkungan kampus yang padat aktivitas, kebutuhan akan moda transportasi yang efisien dan hemat energi menjadi sangat penting untuk mendukung mobilitas yang berkelanjutan dan menciptakan lingkungan yang sehat. Kendaraan listrik dengan motor Brushless DC (BLDC) menjadi pilihan utama karena efisiensi tinggi, responsivitas yang baik, dan kebutuhan perawatan yang rendah[1].

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan menganalisis performa sistem penggerak kendaraan listrik berbasis motor BLDC yang dikembangkan menggunakan Matlab/Simulink dan disesuaikan dengan kondisi operasional di lingkungan kampus. Siklus berkendara FTP-75 dipilih sebagai representasi pola perjalanan harian di kampus yang melibatkan banyak fase akselerasi, deselerasi, serta pola *stop-and-go*[2]. Pendekatan *model-based design* ini memungkinkan evaluasi torsi, daya, dan konsumsi energi motor BLDC secara akurat tanpa perlu uji coba fisik langsung.

Analisis performa sistem penggerak dengan konfigurasi satu motor dan dua motor menunjukkan bahwa pembagian beban secara merata pada dua motor memberikan efisiensi energi lebih baik dan distribusi torsi yang optimal, sehingga

meningkatkan keandalan sistem pada kondisi medan yang bervariasi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar teknis pengembangan kendaraan listrik kampus yang lebih efisien, andal, dan ramah lingkungan, sekaligus mendukung program kampus hijau dan mobilitas berkelanjutan[3].

2. Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) merupakan solusi transportasi yang semakin berkembang pesat sebagai alternatif ramah lingkungan guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta menurunkan emisi karbon yang berbahaya bagi lingkungan[4]. Di lingkungan kampus, penerapan kendaraan listrik diharapkan dapat mendukung mobilitas berkelanjutan dengan efisiensi energi yang lebih baik dan dampak lingkungan yang lebih rendah.

Sistem penggerak kendaraan listrik mengintegrasikan berbagai komponen utama yang saling bekerja sama untuk memastikan performa optimal, keamanan, serta efisiensi. Komponen utama tersebut meliputi *Vehicle Management System* (VMS), motor listrik sebagai penggerak (dalam penelitian ini menggunakan motor *Brushless DC* atau *BLDC*), baterai sebagai sumber energi, sistem kontrol elektronik, *gearbox*, differential, dan ban sebagai elemen penghubung ke jalan[5].

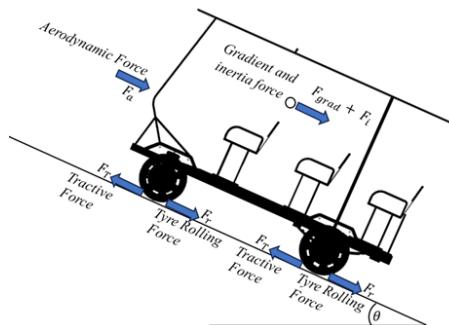
Vehicle Management System (VMS) bertugas mengontrol serta mengoordinasikan energi dari baterai ke motor, mengatur komunikasi antar subsistem, memonitor status kendaraan, dan mengoptimalkan penggunaan daya demi memastikan keamanan dan kenyamanan pengendara. Input pengemudi seperti akselerasi, pengereman, dan pengendalian arah diteruskan ke sistem kontrol kendaraan, yang akan menyesuaikan respon motor dan komponen lainnya sesuai kebutuhan operasional[6].

Motor *BLDC* dipilih sebagai penggerak utama karena memiliki tingkat efisiensi yang tinggi, responsif, serta masa perawatan yang rendah. Motor ini bekerja dengan prinsip komutasi elektronik, di mana arus listrik dialirkan secara bergantian pada kumparan stator yang menghasilkan medan magnet bergantian sehingga memutarkan rotor magnet permanen secara sinkron[7][8]. Pengendalian arus dilakukan oleh *Electronic Speed Controller* (ESC) melalui teknik *six-step commutation* atau *trapezoidal control*, menghasilkan torsi yang stabil dengan minim keausan mekanis.

Selain itu, kendaraan listrik juga dilengkapi dengan sistem pengereman regeneratif yang mengubah energi kinetik saat kendaraan melambat menjadi energi listrik untuk isi ulang baterai, meningkatkan efisiensi energi secara signifikan.

Dalam menguji performa kendaraan listrik, *drive cycle* standar seperti FTP-75 digunakan untuk mensimulasikan pola berkendara di lingkungan perkotaan dan kampus, yang melibatkan banyak fase akselerasi, deselerasi, serta perjalanan dengan karakteristik *stop-and-go*[19]. Siklus ini memungkinkan pemodelan dan simulasi dinamika kendaraan secara realistik menggunakan Matlab/Simulink.

Dalam analisis dinamika kendaraan listrik, beberapa gaya resistif utama diperhitungkan, yaitu hambatan aerodinamika yang bergantung pada bentuk bodi kendaraan dan kecepatan angin, hambatan gulir yang berasal dari kontak ban dengan permukaan jalan, gaya gradien akibat tanjakan atau turunan jalan, serta gaya inersia akibat percepatan kendaraan. Total gaya resistif ini kemudian digunakan untuk menghitung torsi dan daya yang dibutuhkan oleh motor untuk menggerakkan kendaraan sesuai dengan profil kecepatan siklus berkendara[10]. Gambar 1 menunjukkan gaya utama yang bekerja pada kendaraan listrik.



Gambar 1. Gaya utama yang bekerja pada kendaraan listrik

Gaya aerodinamis muncul akibat resistansi udara yang diterima kendaraan saat bergerak. Besarnya bergantung pada bentuk bodi kendaraan, luas frontal, densitas udara, serta kecepatan relatif kendaraan terhadap angin[11]. Persamaan umum gaya aerodinamis dalam kendaraan listrik dinyatakan pada persamaan (1) sebagai berikut:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A_F (V_x + V_{wind})^2 \quad (1)$$

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/Bentuk	Koefisien Drag Aerodinamis (C_d)
Teardrop (rasio 2,4)	0.04
Sedan Modern	0.22 – 0.29
Sedan Klasik	0.30 – 0.40
Hatchback	0.28 – 0.35
MPV/Minibus	0.35 - 0.45
SUV	0.32 - 0.45
Cabriolet (Atap Terbuka)	0.5 - 0.7
Bus	0.6 - 0.8
Truk Berat	0.7 - 1.0
Mobil Balap Formula 1	0.7 - 1.1
Mobil Listrik Modern (Tesla Model S)	0.24

Hambatan akibat kontak dan deformasi ban dengan permukaan jalan yang menyebabkan resistansi gerak. Besarannya dipengaruhi oleh massa kendaraan, koefisien hambatan gulir, dan kondisi permukaan jalan[12]. Gaya hambat gulir dapat diketahui dengan persamaan (2) berikut:

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

Untuk menganalisis gaya hambat gulir yang bekerja pada kendaraan listrik, perlu diketahui nilai koefisien hambatan gulir (C_r) 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 (C_r)
Beton atau Aspal	0.013
Jalan Kerikil Kecil	0.02
Jalan Tanah Alami	0.1 - 0.35

Gaya gradien adalah gaya yang harus diatasi kendaraan saat melewati permukaan jalan miring, baik menanjak maupun menurun. Besarannya tergantung pada massa kendaraan, percepatan gravitasi, dan sudut kemiringan jalan[13]. Persamaan umum gaya gradien dalam kendaraan listrik dapat dinyatakan pada persamaan (3) sebagai berikut:

$$F_{grad} = m g \sin \theta \quad (3)$$

Gaya akibat percepatan atau deselerasi kendaraan, yang merupakan hasil kali massa kendaraan dengan percepatan liniernya[14]. Persamaan umum gaya gradien dalam kendaraan listrik dapat dinyatakan pada persamaan (4) sebagai berikut:

$$F_i = ma \quad (4)$$

Masing-masing gaya ini mempengaruhi total gaya resistif yang harus dilawan oleh penggerak kendaraan agar kendaraan dapat bergerak sesuai dengan profil kecepatan yang diinginkan. Total gaya resistif tersebut menjadi dasar perhitungan kebutuhan torsi dan daya motor penggerak.

3. Bahan dan Metode Penelitian

3.1 Matlab/Simulink

Matlab/Simulink digunakan sebagai platform utama dalam pemodelan dan simulasi sistem penggerak kendaraan listrik. Dengan pendekatan model-based design, Matlab/Simulink memungkinkan perancangan sistem secara modular dan integratif dengan kemampuan visualisasi yang kuat. Sistem kendaraan listrik, termasuk motor BLDC, inverter, dan kontroler PID, 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 torsi, daya, dan konsumsi energi motor secara presisi tanpa membutuhkan uji fisik langsung, sehingga mempermudah analisis dan optimasi desain sistem penggerak[15].

3.2 Proses

Langkah-langkah dalam penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data teknis kendaraan dan motor BLDC yang digunakan untuk simulasi. Pemodelan dinamika kendaraan dilakukan berdasarkan data tersebut, bersamaan dengan

pemodelan motor BLDC secara matematis. Kedua model ini kemudian diintegrasikan untuk membangun sistem simulasi terpadu menggunakan Matlab/Simulink. Simulasi dijalankan dengan menggunakan siklus berkendara FTP-75 untuk menggambarkan profil penggunaan kendaraan di lingkungan kampus. Dari hasil simulasi diperoleh data performa motor dan kendaraan, meliputi torsi, daya yang dibutuhkan, konsumsi energi, dan jarak tempuh. Data ini kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efisiensi dan kelayakan sistem penggerak kendaraan listrik. Proses penelitian diakhiri dengan merumuskan kesimpulan dan saran yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan kendaraan listrik kampus yang lebih optimal.

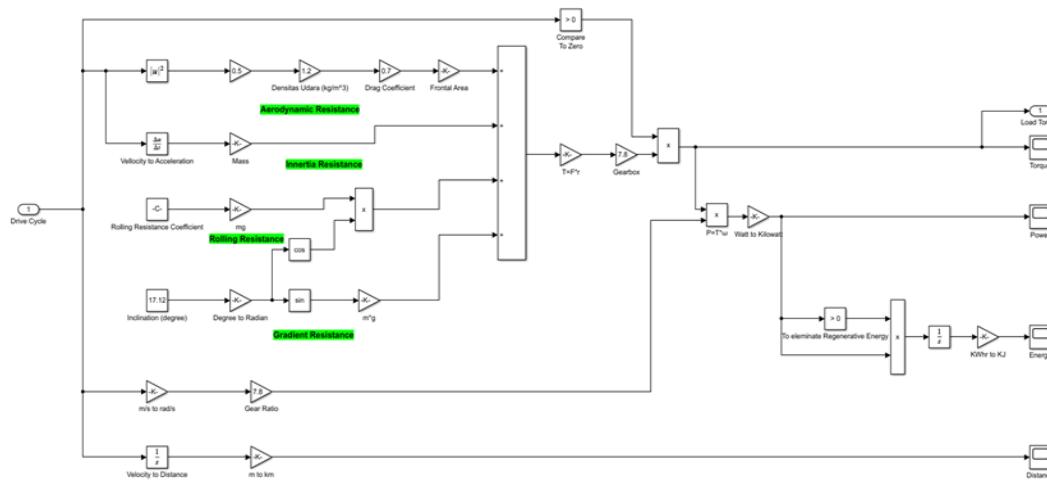
Parameter fisik kendaraan berupa massa kendaraan dan penumpang, radius roda, koefisien drag aerodinamis, luas area frontal kendaraan, koefisien hambatan gulir, rasio gear, densitas udara, sudut kemiringan jalan, kecepatan angin, percepatan gravitasi, kecepatan sudut roda, serta kecepatan kendaraan di 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	0.23
Koefisien Drag Aerodinamis	C_d	-	0.7
Luas Area Frontal	A_f	m^2	2.124
Koefisien Hambatan Gulir	C_r	-	0.013
Gear Ratio	N	-	7.8:1
Densitas Udara	ρ	kg/m^3	1.2
Sudut Kemiringan Jalan	θ	°	17.12
Kecepatan Angin	V_{wind}	m/s	0
Gravitasi	g	m/s^2	9.81
Kecepatan Sudut Roda	ω	rad/s	10.83
Kecepatan Kendaraan	V_x	m/s	34 km/h = 9.44

3.3 Pemodelan Sistem

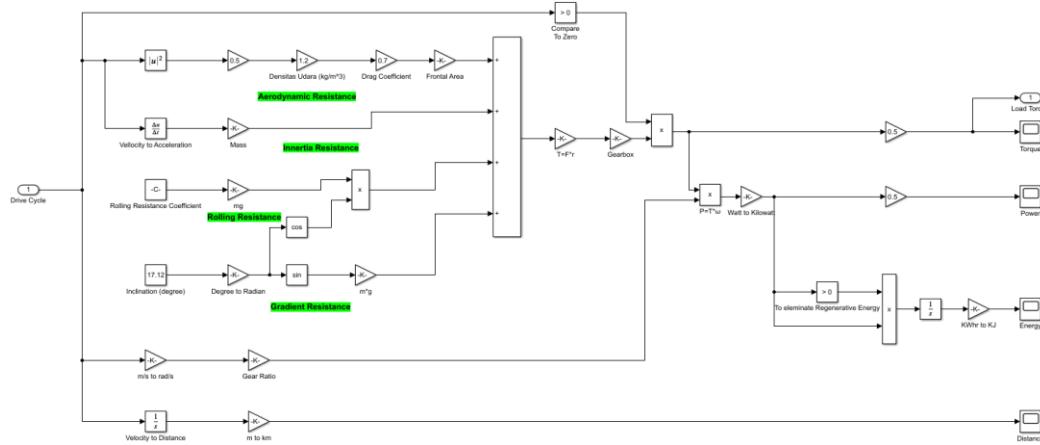
Pemodelan sistem dalam penelitian ini meliputi pemodelan dinamika kendaraan listrik dan motor BLDC sebagai penggerak utama kendaraan. Pemodelan dinamika kendaraan dilakukan dengan memperhitungkan berbagai gaya resistif yang bekerja selama operasional kendaraan, antara lain gaya aerodinamika, gaya hambat gulir, gaya gradien pada tanjakan, dan gaya inersia akibat percepatan kendaraan. Parameter teknis kendaraan seperti massa total, radius roda, koefisien drag, dan koefisien hambatan gulir digunakan sebagai input utama dalam perhitungan gaya-gaya ini. Pemodelan dinamika kendaraan dengan menggunakan satu motor listrik bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemodelan dinamika kendaraan dengan satu motor listrik

Diagram Simulink memodelkan dinamika kendaraan listrik dengan satu motor menggunakan input siklus berkendara untuk mensimulasikan kecepatan, percepatan, torsi, daya, energi, dan jarak tempuh. Model menghitung gaya resistif

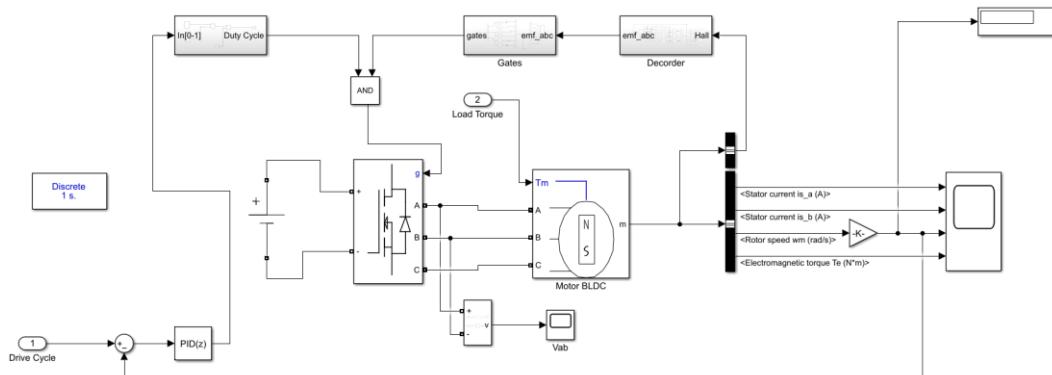
(aerodinamika, inersia, gulir, gradien), kemudian menghasilkan torsi beban, daya, serta konsumsi energi tanpa memperhitungkan energi regeneratif. Jarak tempuh dihitung dari integrasi kecepatan, sehingga performa sistem penggerak dapat dianalisis secara komprehensif dalam konteks operasional kendaraan listrik kampus. Pemodelan dinamika kendaraan dengan menggunakan dua motor listrik bisa dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan dinamika kendaraan dengan dua motor listrik

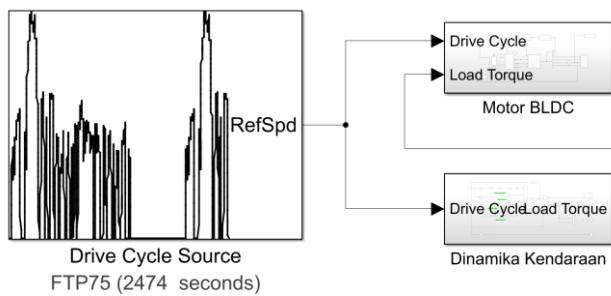
Diagram ini memodelkan dinamika longitudinal kendaraan listrik dengan dua motor penggerak. Input *drive cycle* digunakan untuk menghitung percepatan dan gaya-gaya resistif seperti aerodinamika, inersia, gulir, dan gradien jalan. Gaya total dihitung dan dikonversi menjadi torsi beban yang dibagi merata ke dua motor. Daya diperoleh dari gaya dan kecepatan, dikonversi ke kilowatt, dan diintegrasikan untuk menghitung konsumsi energi, dengan energi regeneratif diabaikan. Jarak tempuh dihitung dari integrasi kecepatan. Model ini memungkinkan evaluasi performa sistem dua motor dengan distribusi beban yang lebih efisien per motor dibandingkan sistem satu motor.

Pemodelan motor BLDC (*Brushless DC Motor*) penting untuk menggambarkan karakteristik dinamis dan elektrik motor sebagai sistem penggerak kendaraan listrik. Motor BLDC unggul dalam efisiensi dan kontrol presisi dibandingkan motor DC konvensional. Dalam penelitian ini, model motor BLDC dibangun secara matematis dan diimplementasikan menggunakan Matlab/Simulink untuk menganalisis performa motor. Simulasi ini memungkinkan pengujian berbagai kondisi operasional, seperti akselerasi dan kecepatan konstan, serta optimasi sistem kontrol motor, seperti PID controller atau PWM, untuk memastikan kinerja efisien dan responsif dalam kendaraan listrik. Pemodelan motor BLDC ditampilkan pada Gambar 4.



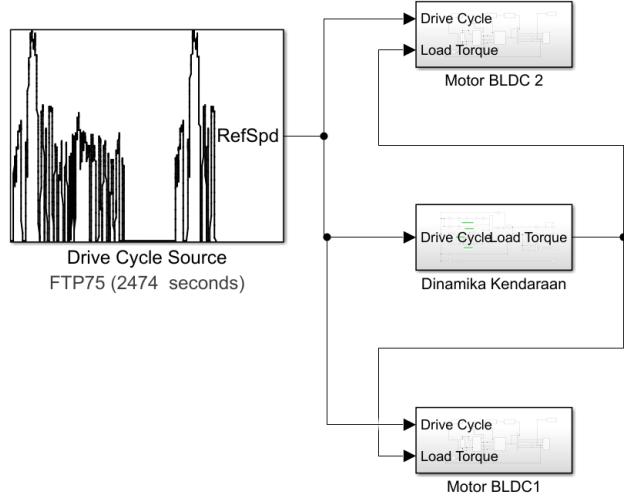
Gambar 4. Pemodelan motor BLDC

Integrasi satu motor BLDC dengan dinamika kendaraan mensimulasikan sistem penggerak di mana torsi dipenuhi oleh satu motor. Motor menghasilkan torsi berdasarkan kecepatan referensi dan beban kendaraan, digunakan untuk perhitungan gaya longitudinal. Integrasi ini memungkinkan evaluasi performa motor dan efisiensi sistem. Pemodelan dengan Matlab/Simulink dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan integrasi satu motor BLDC dan dinamika kendaraan

Integrasi dua motor BLDC dengan dinamika kendaraan mensimulasikan sistem penggerak di mana torsi dibagi merata antara kedua motor. Torsi total dibagi, masing-masing motor menghasilkan torsi sesuai karakteristiknya, lalu digabungkan untuk menggerakkan kendaraan. Ini memungkinkan analisis performa sistem ganda yang lebih efisien dan responsif terhadap variasi beban. Pemodelan dengan Matlab/Simulink dapat dilihat pada Gambar 6.

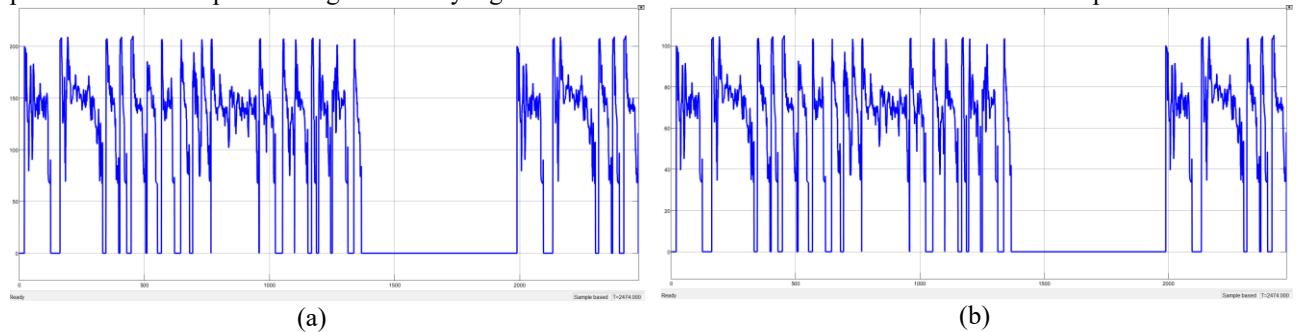


Gambar 6. Pemodelan integrasi dua motor BLDC dan dinamika kendaraan

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Simulasi Torsi Kendaraan Listrik

Hasil simulasi torsi kendaraan listrik menggunakan motor BLDC, baik pada konfigurasi satu motor maupun dua motor, menunjukkan variasi dan dinamika torsi yang signifikan sesuai dengan pola siklus berkendara FTP-75. Pada konfigurasi satu motor, torsi yang dihasilkan mengalami fluktuasi tajam dengan rentang nilai yang luas, mencerminkan respons kendaraan terhadap akselerasi, deselerasi, dan medan jalan yang beragam. Sementara pada konfigurasi dua motor, torsi total kendaraan dibagi secara merata ke masing-masing motor, menghasilkan distribusi beban yang lebih seimbang sehingga mengurangi beban kerja tiap motor dan meningkatkan efisiensi operasional. Kedua konfigurasi ini secara komprehensif mampu merepresentasikan karakteristik torsi kendaraan listrik selama siklus penggunaan di lingkungan perkotaan dan kampus. Hasil grafik torsi yang dibutuhkan oleh satu motor dan dua motor bisa dilihat pada Gambar 7.



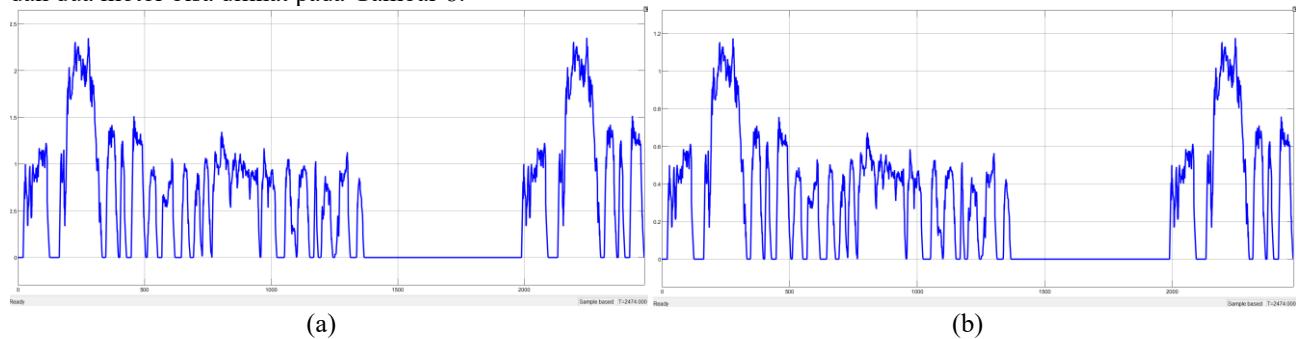
Gambar 7. (a) Hasil grafik torsi yang dibutuhkan dengan satu motor; (b) Hasil grafik torsi yang dibutuhkan dengan dua motor

Hasil simulasi torsi pada kendaraan listrik dengan motor BLDC menggunakan siklus FTP-75 menunjukkan fluktuasi torsi yang dinamis, berkisar antara 0 hingga lebih dari 200 Nm. Torsi positif diperlukan untuk akselerasi dan tanjakan, sementara torsi negatif untuk deselerasi atau penggereman regeneratif. Meskipun torsi puncak terjadi saat akselerasi atau menghadapi gradien jalan, sebagian besar waktu torsi terdistribusi pada rentang yang lebih rendah. Simulasi ini menekankan pentingnya pemilihan sistem penggerak yang tepat agar kendaraan dapat beroperasi secara efisien di lingkungan kampus dengan medan dan pola penggunaan yang bervariasi.

Grafik torsi motor BLDC pada sistem dua motor menunjukkan distribusi beban yang seimbang sesuai siklus FTP-75, dengan torsi bervariasi antara nol hingga 100-120 Nm. Pada detik ke-1000, motor pertama menghasilkan torsi tinggi (+100 Nm) saat menanjak, sementara motor kedua menyesuaikan dengan torsi lebih rendah, memastikan beban tersebar merata. Pada fase penggereman, kedua motor menunjukkan torsi mendekati nol, mengindikasikan penggereman regeneratif yang halus. Konfigurasi dua motor ini memberikan pengendalian torsi yang stabil dan efisiensi daya optimal, cocok untuk lingkungan kampus dengan medan dan pola penggunaan beragam.

4.2 Hasil Simulasi Daya Kendaraan

Hasil simulasi daya kendaraan listrik, baik pada konfigurasi satu motor maupun dua motor, memperlihatkan pola fluktuasi yang dinamis sesuai dengan karakteristik siklus berkendara FTP-75. Variasi daya yang dibutuhkan mencerminkan fase akselerasi, deselerasi, dan penggereman regeneratif yang terjadi selama operasi kendaraan. Pada konfigurasi dua motor, distribusi daya yang merata pada masing-masing motor membantu mengurangi beban kerja motor individual sekaligus meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Hasil grafik daya yang dibutuhkan oleh satu motor dan dua motor bisa dilihat pada Gambar 8.



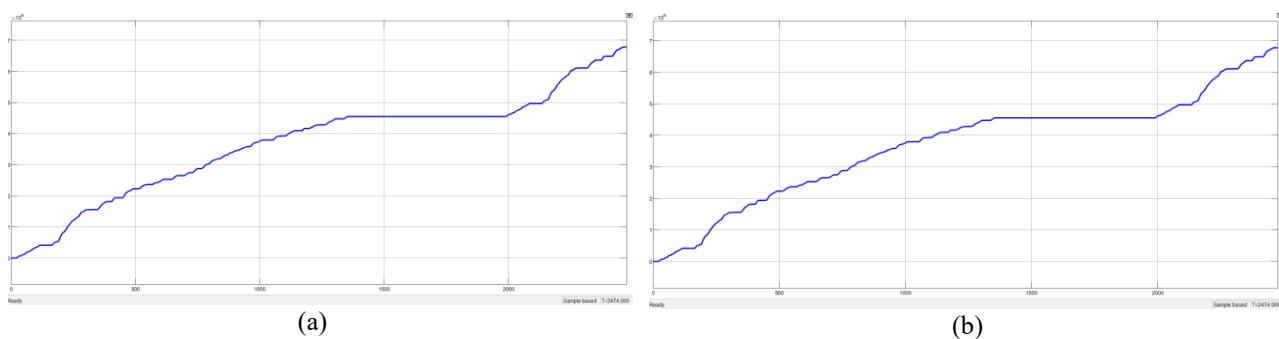
Gambar 8. (a) Hasil grafik daya yang dibutuhkan dengan satu motor; (b) Hasil grafik daya yang dibutuhkan dengan dua motor

Hasil simulasi daya pada kendaraan listrik satu motor dengan beban 1600 kg menunjukkan fluktuasi tajam sesuai kebutuhan energi dalam kondisi operasional nyata. Puncak daya mencapai 2,5 kW saat akselerasi atau menghadapi tanjakan, sementara daya turun mendekati nol saat kendaraan berhenti atau jelajah konstan. Pada cruising, daya berkisar antara 1–1,5 kW, mencerminkan efisiensi kendaraan di jalur datar. Hasil ini menunjukkan sistem penggerak yang efisien dan adaptif terhadap beban nyata di lingkungan kampus.

Hasil simulasi daya pada sistem dua motor kendaraan listrik menunjukkan menunjukkan fluktuasi daya yang signifikan, dengan puncak mencapai 1–1,2 kW per motor pada fase akselerasi atau tanjakan, seperti pada detik ke-2050. Pada fase cruising atau idle, daya turun mendekati nol, menunjukkan kendaraan berjalan stabil atau berhenti. Sebagai contoh, pada detik ke-250, kedua motor bekerja di atas 1 kW untuk akselerasi mulus, sementara di rute datar dengan kecepatan konstan, daya per motor rata-rata berada di kisaran 0,4–0,6 kW. Fluktuasi daya ini mengindikasikan pembagian kerja yang optimal antar motor, meningkatkan efisiensi energi dan respons kendaraan pada pola *stop-and-go* serta beban variatif di lingkungan kampus.

4.3 Hasil Simulasi Konsumsi Energi Kendaraan

Hasil simulasi konsumsi energi dari kendaraan listrik dengan konfigurasi satu motor dan dua motor menunjukkan konsumsi total energi yang relatif sama selama siklus berkendara FTP-75. Meskipun demikian, pembagian beban kerja pada konfigurasi dua motor memberikan potensi efisiensi energi yang lebih tinggi dengan mengurangi stres pada tiap motor secara individual. Temuan ini menegaskan efektivitas penggunaan sistem dua motor dalam mengoptimalkan pengelolaan energi kendaraan listrik di lingkungan operasional perkotaan dan kampus. Gambar 9 menunjukkan hasil grafik energi yang dikonsumsi dengan satu motor dan dua motor.



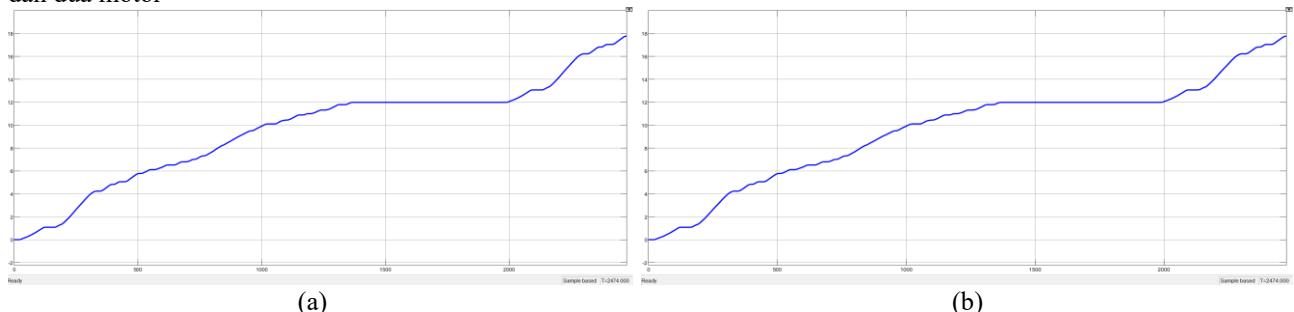
Gambar 9. (a) Hasil grafik energi yang dikonsumsi dengan satu motor; (b) Hasil grafik energi yang dikonsumsi dengan dua motor

Hasil simulasi energi yang dikonsumsi oleh satu motor listrik pada kendaraan dengan massa 1.600 kg selama siklus FTP-75 menunjukkan akumulasi energi yang stabil sekitar 5,5 juta joule. Energi meningkat signifikan saat akselerasi atau tanjakan, sementara pada segmen landai konsumsi energi relatif stabil, mencerminkan fase idle atau penggeraman regeneratif. Pola ini sesuai dengan karakteristik siklus FTP-75, yang melibatkan fase stop-and-go, akselerasi, dan deselerasi. Konsumsi energi ini realistik untuk kendaraan listrik, yang umumnya memerlukan 1,5–2,5 kWh untuk siklus serupa, dan menunjukkan kinerja motor dalam memenuhi kebutuhan energi dinamis. Model ini juga berhasil memisahkan energi traksi dari penggeraman regeneratif, menjadikannya referensi yang berguna untuk pengembangan powertrain dan kapasitas baterai kendaraan listrik di lingkungan kampus.

Hasil simulasi energi yang dikonsumsi oleh sistem dua motor pada kendaraan listrik menunjukkan kenaikan energi kumulatif yang stabil, mencapai lebih dari 5,5 juta joule pada detik ke-2474. Pada sekitar 500 detik, energi yang terakumulasi hampir mencapai 2 juta joule, menandakan konsumsi energi signifikan pada fase akselerasi dan penyesuaian terhadap gaya resistif. Kenaikan energi berkelanjutan ini mencerminkan konsumsi bersih dari sistem penggerak dua motor, mencakup akselerasi, tanjakan, dan deselerasi tanpa kontribusi energi negatif dari penggeraman regeneratif. Grafik ini menggambarkan efektivitas pembagian beban torsi dan daya antara dua motor dalam memenuhi kebutuhan energi kendaraan berbobot 1600 kg yang menghadapi tanjakan hingga 17,12 derajat. Lonjakan energi di segmen akhir menunjukkan puncak kebutuhan daya saat medan berat atau akselerasi tinggi. Stabilitas energi kumulatif mengonfirmasi bahwa simulasi ini menghilangkan energi negatif dari penggeraman regeneratif, menjadikannya acuan realistik untuk perancangan sistem penggerak multi-motor di lingkungan kampus dengan topografi bervariasi.

4.4 Hasil Simulasi Jarak Tempuh Kendaraan

Analisis jarak tempuh kendaraan listrik berdasarkan simulasi siklus berkendara FTP-75 dengan menggunakan dua konfigurasi sistem penggerak, yaitu satu motor dan dua motor. Fokus dari pembahasan ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana perbedaan konfigurasi motor memengaruhi kemampuan kendaraan dalam menyelesaikan siklus perjalanan yang mencerminkan kondisi operasional di lingkungan perkotaan dan kampus. Analisis ini sangat penting untuk memahami efektivitas distribusi beban kerja pada sistem penggerak serta implikasinya terhadap performa kendaraan dalam menghadapi variasi kondisi jalan dan pola berkendara yang dinamis. Studi ini juga bertujuan memberikan wawasan terhadap potensi peningkatan efisiensi, kestabilan, dan keandalan kendaraan listrik melalui pilihan konfigurasi motor yang optimal sesuai kebutuhan operasional. Gambar 10 menunjukkan hasil grafik jarak yang ditempuh dengan satu motor dan dua motor



Gambar 10. (a) Hasil grafik jarak yang ditempuh dengan satu motor; (b) Hasil grafik jarak yang ditempuh dengan dua motor

Hasil simulasi jarak yang ditempuh oleh kendaraan listrik satu motor dengan bobot 1.600 kg pada *drive cycle* FTP-75 menunjukkan kenaikan kumulatif konsisten sepanjang 2.474 detik. Jarak meningkat cepat saat akselerasi atau kecepatan jelajah, sementara fase berhenti terlihat mendatar. Jarak tempuh akhir mencapai 17–18 km, sesuai dengan jarak total FTP-

75 sekitar 17,77 km. Konsistensi ini mengonfirmasi bahwa simulasi realistik dan akurat, serta dapat digunakan untuk analisis efisiensi sistem penggerak dan perbandingan dengan konfigurasi dua motor pada studi lanjutan.

Hasil simulasi jarak yang ditempuh oleh kendaraan listrik dengan dua motor menunjukkan kenaikan kumulatif stabil sepanjang siklus FTP-75, mencapai 17–18 km pada detik ke-2.474, sesuai dengan standar siklus FTP-75 sekitar 17,77 km. Pada 500 detik, kendaraan menempuh hampir 6 km selama akselerasi, dan pada 2.000 detik mencapai 12 km dengan kecepatan konstan dan beberapa fase berhenti. Simulasi ini mengonfirmasi bahwa distribusi beban antara dua motor tidak mempengaruhi total jarak tempuh, menjadikannya acuan untuk analisis performa kendaraan listrik multi-motor di lingkungan kampus.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menggambarkan performa motor BLDC sebagai sistem penggerak utama kendaraan listrik dengan akurat dalam kondisi siklus berkendara FTP-75 yang mewakili pola perjalanan di lingkungan kampus. Simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi satu motor menghasilkan torsi maksimum 200–250 Nm dan daya puncak hampir sekitar 2,5 kW, sedangkan konfigurasi dua motor membagi beban kerja secara merata dengan torsi 100–150 Nm dan daya 1–1,5 kW per motor, menjaga efisiensi dan kestabilan kendaraan. Konsumsi energi selama siklus berkendara sekitar 5,5 juta joule dengan jarak tempuh mendekati 17,77 km untuk kedua konfigurasi. Distribusi beban yang merata pada konfigurasi dua motor meningkatkan responsivitas dan keandalan kendaraan di medan yang bervariasi, menjadikannya solusi optimal untuk transportasi mahasiswa yang efisien dan ramah lingkungan di area kampus. Temuan ini memberikan dasar teknis kuat untuk pengembangan kendaraan listrik sistem penggerak BLDC di lingkungan perkotaan yang mengutamakan keberlanjutan dan efisiensi energi. Konfigurasi dua motor juga memberikan respon motor yang lebih responsif dan kestabilan kendaraan yang lebih baik, terutama dalam kondisi jalan yang bervariasi dan pola berkendara *stop-and-go* khas area kampus. Oleh karena itu, penggunaan sistem dua motor dinilai lebih optimal untuk pengembangan kendaraan listrik berbasis motor BLDC yang efisien, andal, dan ramah lingkungan sebagai solusi transportasi mahasiswa di kampus.

6. Daftar Pustaka

- [1] Zainuri, F., Tullah, M. H., Nuriskasari, I., Subarkah, R., Widiyatmoko, W., Prasetya, S., Abdillah, A. A. (2022). Performa Performa Kendaraan Konversi Listrik melalui Pengujian Dynotest. *Jurnal Mekanik Terapan*, 3(2), 44-49.
- [2] Mahendra, S., Fatra, F., & Tamamudin, M. (2024). Analisis Performa pada Sepeda Motor Listrik Menggunakan Motor BLDC 500 W. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 19(3), 339-352.
- [3] Kumar, A., Chandekar, A., Deshmukh, P. W., & Ugale, R. T. (2023). Development of electric vehicle with permanent magnet synchronous motor and its analysis with drive cycles in Matlab/Simulink. *Materials Today: Proceedings*, 72, 643-651.
- [4] Subbarao, M., Dasari, K., Duvvuri, S. S., Prasad, K. R. K. V., Narendra, B. K., & Krishna, V. M. (2024). Design, control and performance comparison of PI and ANFIS controllers for BLDC motor driven electric vehicles. *Measurement: Sensors*, 31, 101001.
- [5] Vikram, S., Vashisht, S., Rakshit, D., & Wan, M. P. (2025). Performance analysis of integrated battery and cabin thermal management system in Electric Vehicles for discharge under drive cycle. *Journal of Energy Storage*, 114, 115678.
- [6] Hutagaol, J. V., Setiawan, D., & Eteruddin, H. (2022). Perancangan Sistem Monitoring Kendaraan Listrik. *Jurnal Teknik*, 16(1), 96-102.
- [7] Mahdi, M., & Lutfi, M. (2018). Kajian Tentang Efektivitas Mobil Listrik dalam Menunjang Transportasi Kampus (Studi Kasus: Kampus IPB Dramaga). *Astonjadro*, 7(2), 70-75.
- [8] Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R., & Esfahanian, V. (2017). A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-430.
- [9] He, L., Jing, H., Zhang, Y., Li, P., & Gu, Z. (2023). Review of thermal management system for battery electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 59, 106443.
- [10] Ariche, S., Boulghasoul, Z., El Ouardi, A., Elbacha, A., Tajer, A., & Espié, S. (2025). Enhancing energy management in battery electric vehicles: A novel approach based on fuzzy Q-learning controller. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 67, 102070.
- [11] Pandian, S., & Palanivelu, A. (2025). An efficient energy management of a hybrid electric vehicle using hybrid QNN-GOA technique. *Journal of Energy Storage*, 106, 114827.
- [12] Giallanza, A., & Puma, G. L. (2020). Fuzzy green vehicle routing problem for designing a threeechelons supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120774.
- [13] Lamichhane, Bipin & Ali, Syed & Habibi, Kouhi. (2023). Economic Analysis of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV).
- [14] Diah Ika Putri, M., Ma'arif, A., & Dwi Puriyanto, R. (2022). Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols. *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, 23(1). <https://doi.org/10.30595/techno.v23i1.10773>

- [15] Abd Aziz, M. A., Saidon, M. S., Romli, M. I. F., Othman, S. M., Mustafa, W. A., Manan, M. R., & Aihsan, M. Z. (2023). A review on BLDC motor application in electric vehicle (EV) using battery, supercapacitor and hybrid energy storage system: efficiency and future prospects. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 30(2), 41-59.
- [16] Apribowo, C. H. B., & Maghfiroh, H. (2021). Fuzzy logic controller and its application in brushless DC motor (BLDC) in electric vehicle-a review. *Journal of Electrical, Electronic, Information, and Communication Technology*, 3(1), 35-43.