

Perancangan dan Analisis Sistem Powertrain Direct Drive Berbasis Motor BLDC untuk Aplikasi Mobil Wisata

Avif Dwi Erlanthiana¹, Tri Mulyanto^{2*}, Heru Kuncoro³

¹Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Indonesia

^{2*}Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Indonesia

³Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Indonesia

Alamat: Jl. Margonda Raya No. 100, Pondok Cina, Depok, Jawa Barat

Email: tri_mulyanto@staff.gunadarma.ac.id

Abstract. *The development of clean-energy-based electric vehicles has driven the need for efficient, compact, and high-performance powertrain systems. This study aims to design and analyze a direct drive powertrain system utilizing a Brushless Direct Current (BLDC) motor for an electric tourist vehicle application. The direct drive configuration was selected for its high mechanical efficiency, elimination of transmission and differential components, and fast torque response. The methodology includes vehicle power requirement calculations, powertrain modeling, BLDC motor selection, and performance simulation under electromagnetic, thermal, and mechanical conditions using multiphysics-based software. The analysis results indicate that a 600-kg tourist vehicle operating at 30 km/h requires a total drive power of 7.6 kW with a 72 V 116 Ah battery pack. A 4 kW rear-wheel BLDC motor produces 76 N·m of torque, 573 rpm no-load speed, and 88% system efficiency. Virtual testing using an urban driving cycle yields a peak torque of 100 N·m and an average efficiency of 78%. These results demonstrate that the BLDC-based direct drive powertrain configuration is feasible for low-speed electric tourist vehicle applications.*

Keywords: *electric tourist vehicle, powertrain system, direct drive, BLDC motor, energy efficiency*

Abstrak. Perkembangan kendaraan listrik berbasis energi bersih mendorong kebutuhan desain sistem penggerak (*powertrain*) yang efisien, sederhana, dan memiliki performa tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem *powertrain* tipe *direct drive* berbasis motor *Brushless Direct Current* (BLDC) yang diterapkan pada mobil wisata listrik. Sistem *direct drive* dipilih karena memiliki efisiensi mekanik tinggi, tidak memerlukan transmisi maupun diferensial, serta mampu memberikan respon torsi yang cepat. Metodologi penelitian meliputi perhitungan kebutuhan daya kendaraan, pemodelan sistem penggerak, pemilihan motor BLDC, serta simulasi kinerja secara elektromagnetik, termal, dan mekanik menggunakan perangkat lunak berbasis *multiphysics*. Hasil analisis menunjukkan bahwa mobil wisata dengan massa 600 kg dan kecepatan 30 km/jam memerlukan daya total sebesar 7,6 kW dengan kapasitas baterai 72 V 116 Ah. Motor BLDC berkapasitas 4 kW pada roda belakang menghasilkan torsi 76 N·m, kecepatan tanpa beban 573 rpm, dan efisiensi sistem 88%. Pengujian virtual pada siklus berkendara tipe *urban* menunjukkan nilai puncak torsi 100 N·m dan efisiensi rata-rata 78%. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi *powertrain direct drive* berbasis motor BLDC layak diterapkan pada kendaraan wisata listrik berkecepatan rendah.

Kata kunci: *direct drive, efisiensi energi, mobil wisata listrik, motor BLDC, sistem powertrain.*

LATAR BELAKANG

Perkembangan kendaraan listrik (EV) menjadi fokus global dalam mendukung transisi menuju sistem transportasi berkelanjutan yang rendah emisi. Kendaraan listrik berperan penting dalam mengurangi emisi gas rumah kaca sekaligus meningkatkan

Received: November 2, 2025; Revised: December 14, 2025; Accepted: December 15, 2025; Online

Available: : December 17, 2025; Published: : December 17, 2025;

*Corresponding author, tri_mulyanto@staff.gunadarma.ac.id

efisiensi energi sektor transportasi (Diouf, 2021). Efisiensi sistem tenaga kendaraan listrik sangat dipengaruhi oleh rancangan *powertrain*, meliputi konfigurasi motor, sistem transmisi, dan kontrol daya (Li et al., 2024).

Salah satu konfigurasi yang menawarkan efisiensi tinggi adalah sistem direct drive, di mana motor listrik terhubung langsung ke roda tanpa transmisi maupun diferensial. Sistem ini dapat menurunkan kerugian mekanis sekaligus meningkatkan efisiensi hingga 15% dibandingkan sistem dengan transmisi konvensional (Deepak et al., 2023). Motor *Brushless* DC (BLDC) menjadi pilihan utama karena memiliki efisiensi konversi energi tinggi, torsi besar pada kecepatan rendah, dan kebutuhan perawatan yang minimal (Tosun & Serteler, 2022).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja motor *in-wheel* atau *hub motor* pada kendaraan listrik. Simulasi elektromagnetik dan termal menggunakan perangkat lunak seperti ANSYS Maxwell dan Motor-CAD memungkinkan analisis performa motor secara komprehensif, termasuk distribusi suhu dan karakteristik torsi pada berbagai kondisi beban. Desain stator dan rotor yang dioptimasi melalui pendekatan *multiphysics* terbukti mampu meningkatkan kepadatan daya sekaligus memperpanjang umur motor (Dukalski, 2022). Analisis integratif ini menjadi dasar penting dalam perancangan sistem penggerak langsung (*direct drive*) yang handal dan efisien (Lu et al., 2022).

Meski demikian, sebagian besar penelitian yang ada masih berfokus pada kendaraan listrik berkecepatan tinggi atau kendaraan penumpang umum. Penerapan *direct drive hub motor* pada kendaraan wisata listrik berkecepatan rendah masih jarang dikaji, padahal memiliki potensi besar untuk aplikasi transportasi jarak pendek di kawasan wisata dan area publik. Selain itu, sedikit studi yang menggabungkan analisis elektromagnetik, termal, dan mekanik secara bersamaan untuk mengevaluasi performa sistem *battery-to-wheel* dengan pendekatan *multiphysics simulation* (Achariyaviriya et al., 2024; Singer et al., 2023).

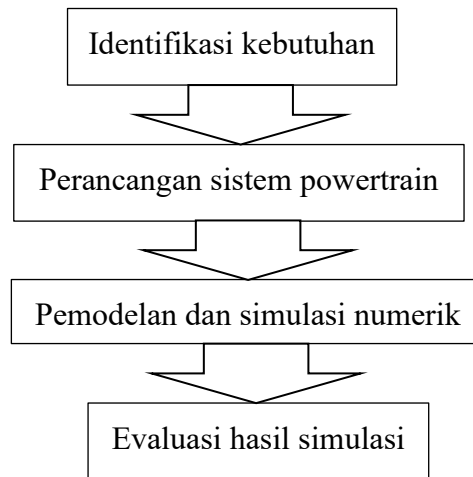
Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan konfigurasi *dual rear-wheel BLDC hub motor direct drive* untuk kendaraan wisata listrik berkecepatan rendah dengan pendekatan analisis terintegrasi berbasis *multiphysics*. Pendekatan ini mencakup simulasi elektromagnetik, termal, dan mekanik secara simultan serta pengujian virtual menggunakan siklus berkendara Artemis untuk mengevaluasi efisiensi sistem. Kombinasi

tersebut belum banyak dilaporkan dalam literatur sebelumnya dan diharapkan dapat menghasilkan sistem *powertrain* efisien dengan efisiensi hingga 88% dan torsi puncak 100 N·m, sehingga memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi kendaraan listrik ramah lingkungan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan perancangan dan simulasi numerik untuk menganalisis sistem *powertrain* tipe *direct drive* berbasis motor *Brushless Direct Current* (BLDC) pada mobil wisata listrik berkecepatan rendah. Tahapan penelitian dimulai dengan penentuan parameter kendaraan dan kebutuhan daya, dilanjutkan dengan perancangan konfigurasi *powertrain*, pemodelan motor BLDC dan baterai, serta analisis performa elektromagnetik, termal, dan mekanik menggunakan perangkat lunak berbasis *multiphysics simulation* (Li et al., 2024).

Gambaran umum tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, yang menjelaskan urutan proses mulai dari pengumpulan data hingga evaluasi hasil simulasi.

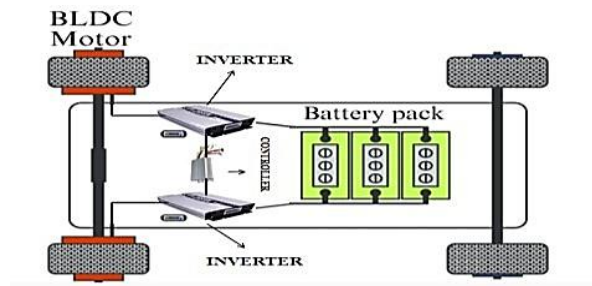


Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian sistem *powertrain direct drive* berbasis motor BLDC.

Parameter dasar kendaraan wisata yang menjadi objek penelitian meliputi massa kendaraan, koefisien hambat udara (*drag coefficient*), luas frontal, koefisien gesekan ban, kecepatan maksimum, dan percepatan awal. Kendaraan dirancang untuk membawa dua penumpang dengan total massa 600 kg dan kecepatan operasi maksimum 30 km/jam.

Data tersebut digunakan untuk menghitung kebutuhan gaya traksi, torsi roda, dan daya total kendaraan berdasarkan persamaan dinamika kendaraan (Li et al., 2024). Perhitungan kebutuhan daya mencakup komponen hambatan gulir, hambatan aerodinamika, hambatan tanjakan, serta gaya percepatan (Adegbohun et al., 2021).

Konfigurasi *powertrain* dirancang menggunakan dua unit motor BLDC yang dipasang langsung pada roda belakang (*rear wheel hub motor*) sehingga menghasilkan sistem penggerak tipe *direct drive* tanpa transmisi maupun diferensial. Sistem ini terdiri atas tiga komponen utama: motor BLDC, inverter, dan paket baterai (*battery pack*). Motor BLDC dipilih karena memiliki efisiensi tinggi, torsi besar pada kecepatan rendah, serta karakteristik operasi yang halus (Chandran et al., 2022). Berdasarkan hasil perhitungan, kebutuhan daya kendaraan sebesar 7,6 kW didistribusikan ke dua motor dengan kapasitas masing-masing 4 kW pada tegangan nominal 72 V. Gambar 2 menunjukkan model sistem *powertrain* hasil rancangan



Gambar 2. Konsep desain EV wisata.

Baterai yang digunakan merupakan jenis Panasonic NCR18650 dengan tegangan nominal 3,7 V dan kapasitas 3,2 Ah per sel. Konfigurasi total terdiri dari 19 sel seri dan 37 sel paralel, menghasilkan kapasitas 116 Ah dengan tegangan sistem 72 V. Inverter dirancang memiliki daya nominal 4,8 kW dan efisiensi sekitar 80 % untuk mengatur suplai arus ke masing-masing motor.

Analisis performa motor dilakukan melalui simulasi elektromagnetik, termal, dan mekanik menggunakan perangkat lunak *Multiphysics Simulation*. Analisis elektromagnetik dilakukan untuk menentukan torsi, daya, arus, serta efisiensi motor dengan mempertimbangkan *cogging torque* dan *back electromotive force (back-EMF)*. Analisis termal digunakan untuk mengevaluasi kenaikan suhu motor dalam kondisi tunak dengan suhu ambien 40 °C menggunakan pendingin cairan air. Analisis mekanik

menghitung tegangan dan deformasi rotor akibat gaya sentrifugal selama operasi (Deepak et al., 2023).

Selanjutnya dilakukan pengujian *virtual duty cycle* dengan skenario *Artemis Urban Driving Cycle* menggunakan modul *virtual lab* pada perangkat lunak *Motor-CAD*. Simulasi ini memprediksi konsumsi energi, torsi puncak, efisiensi sistem, dan kondisi termal motor pada situasi berkendara nyata (Chandran et al., 2022). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem *powertrain direct drive* mampu menghasilkan torsi puncak sebesar 100 N·m, daya maksimum 4,9 kW, efisiensi rata-rata 78 %, dan temperatur puncak motor mencapai 120°C. Hasil tersebut menjadi dasar evaluasi kelayakan penerapan sistem *powertrain direct drive* berbasis motor BLDC pada kendaraan wisata listrik berkecepatan rendah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian mencakup perhitungan kebutuhan daya kendaraan, rancangan sistem *powertrain direct drive* berbasis motor BLDC, serta hasil simulasi performa elektromagnetik, termal, dan mekanik menggunakan perangkat lunak *multiphysics simulation*. Seluruh hasil dibandingkan dengan data literatur untuk memastikan keandalan rancangan.

1. Kebutuhan Daya dan Konfigurasi Powertrain

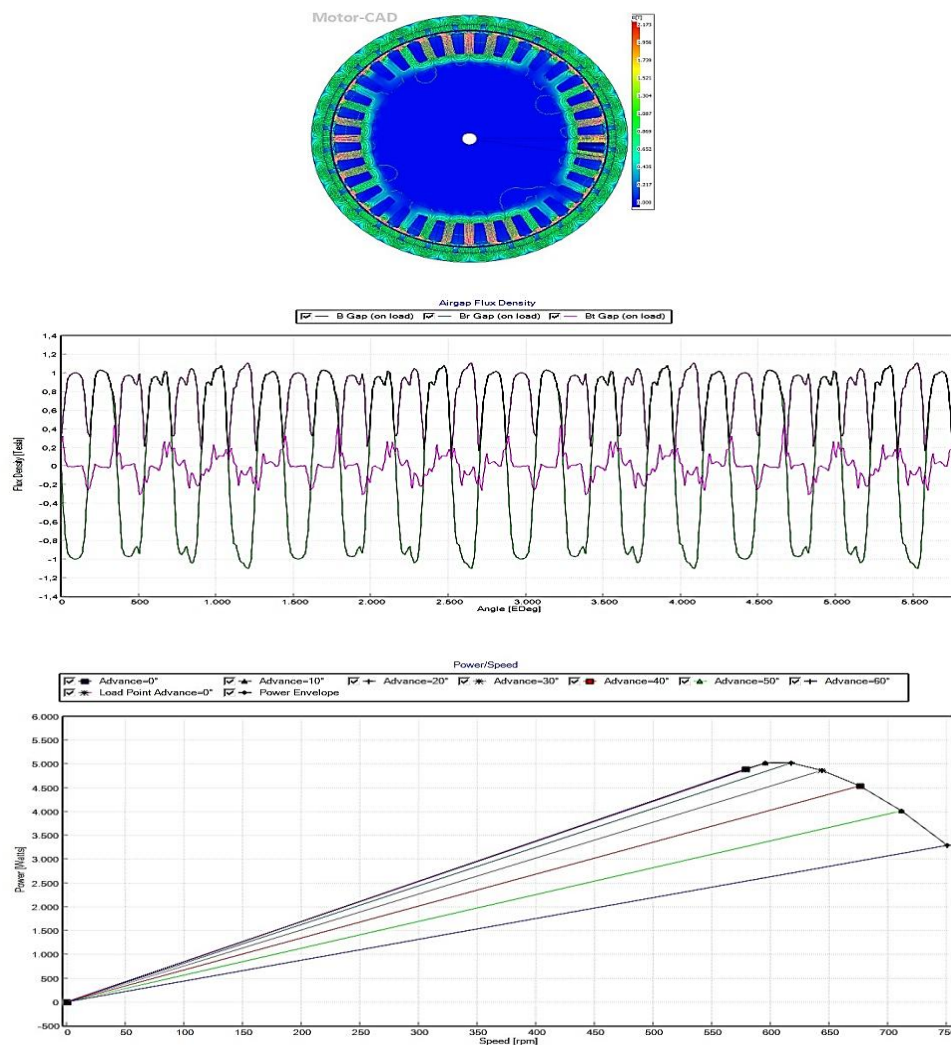
Berdasarkan parameter kendaraan dengan massa total 600 kg dan kecepatan maksimum 30 km/jam, diperoleh kebutuhan gaya traksi total sebesar 1.156 N dengan daya penggerak 7,6 kW. Daya puncak kendaraan mencapai 9,6 kW pada kondisi percepatan maksimum. Nilai ini kemudian dijadikan dasar untuk menentukan kapasitas motor, inverter, dan baterai

Sistem *powertrain* dirancang menggunakan dua unit motor BLDC berkapasitas 4 kW, 72 V, yang masing-masing dipasang langsung pada roda belakang sehingga menghasilkan sistem penggerak tipe *direct drive* tanpa transmisi maupun diferensial. Desain ini mengurangi rugi mekanis dan meningkatkan efisiensi torsi pada kecepatan rendah (Deepak et al., 2023).

Paket baterai disusun dari sel Panasonic NCR18650 dengan tegangan nominal 3,7 V dan kapasitas 3,2 Ah. Konfigurasi 19 seri $\times$ 37 paralel menghasilkan kapasitas total 116 Ah pada tegangan 72 V dengan energi tersimpan 8,3 kWh. Inverter dirancang dengan daya nominal 4,8 kW dan efisiensi sekitar 80 % untuk mengatur suplai arus ke motor.

2. Analisis Elektromagnetik

Simulasi elektromagnetik dilakukan untuk menentukan karakteristik torsi, kecepatan, dan efisiensi motor. Hasil perhitungan menunjukkan motor BLDC menghasilkan torsi rata-rata 79,5 N·m, kecepatan tanpa beban 573 rpm, dan efisiensi sistem 88,2 %. Nilai *cogging torque* sebesar 0,29 N·m menunjukkan getaran rendah sehingga sistem stabil pada putaran rendah. Gambar 3 memperlihatkan pola sebaran fluks magnet dan karakteristik torsi–kecepatan motor BLDC hasil simulasi



Gambar 3. Hasil simulasi elektromagnetik motor BLDC

Karakteristik *torque–speed curve* menunjukkan penurunan torsi yang linier terhadap kenaikan kecepatan, sesuai dengan karakteristik ideal motor BLDC untuk kendaraan listrik ringan (Chandran et al., 2022). Daya elektromagnetik yang dihasilkan sebesar 4,06 kW dengan rugi daya total 0,52 kW, menunjukkan keseimbangan yang baik antara daya keluaran dan efisiensi konversi.

3. Analisis Termal dan Mekanik

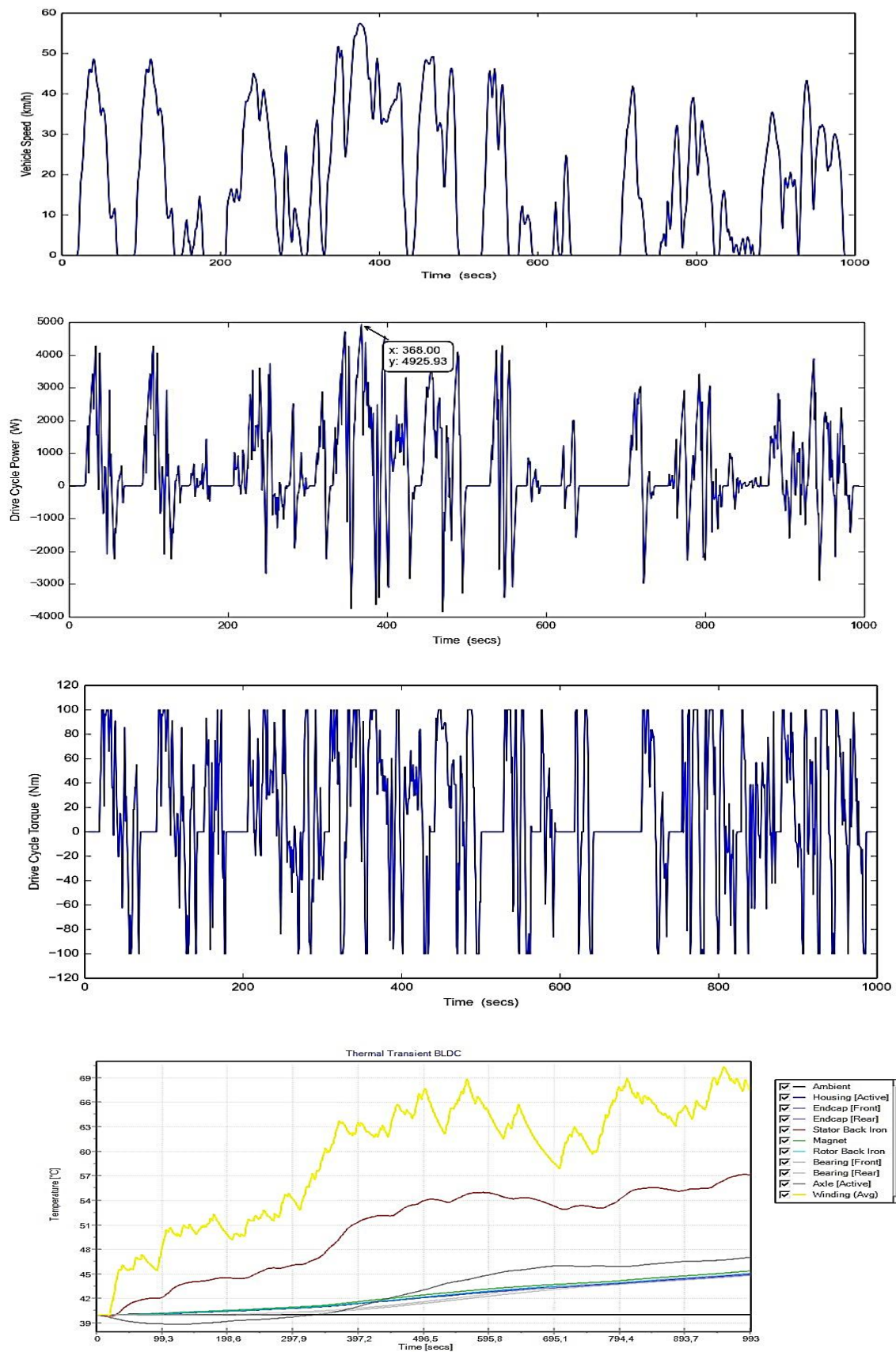
Analisis termal dilakukan dengan pendinginan cairan air bersuhu 30 °C. Suhu maksimum motor yang dicapai pada kondisi *steady state* adalah 120 °C, masih berada dalam batas aman operasi magnet permanen tipe NdFeB yang memiliki ambang demagnetisasi sekitar 150 °C (Adegbohun et al., 2021). Temuan ini menegaskan bahwa sistem pendingin internal efektif menjaga stabilitas termal motor selama operasi berkelanjutan.

Analisis mekanik menunjukkan tegangan maksimum rotor sebesar 0,57 MPa, jauh di bawah batas luluh material 305 MPa dengan *safety factor* > 500. Nilai deformasi maksimum rotor sebesar 0,0002 mm, sehingga dapat disimpulkan bahwa struktur mekanik motor aman terhadap beban dinamis akibat gaya sentrifugal.

4. Simulasi Siklus Berkendara Virtual

Simulasi *Artemis Urban Driving Cycle* (siklus mengemudi perkotaan Artemis) digunakan untuk mengevaluasi performa sistem pada kondisi operasi nyata kendaraan wisata. Pengujian dilakukan dengan satu motor BLDC dan massa kendaraan dibagi dua (300 kg) untuk merepresentasikan konfigurasi ganda.

Hasil simulasi menunjukkan torsi puncak 100 N·m, daya maksimum 4,9 kW, dan efisiensi energi rata-rata 78 % selama durasi 993 detik pada jarak 4,87 km dengan kecepatan rata-rata 17,7 km/jam. Nilai rugi energi terbesar berasal dari *copper loss* (58,2 Wh) dan *iron loss* (8,5 Wh), sedangkan *magnet loss* relatif kecil. Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi *virtual duty cycle* yang menggambarkan dinamika kecepatan dan torsi motor selama siklus pengujian urban.



Gambar 4. Grafik Hasil Simulasi Siklus Berkendara Urban (*Virtual Lab*)

Secara keseluruhan Hasil penelitian mengindikasikan bahwa sistem *powertrain direct drive* berbasis motor BLDC memiliki efisiensi tinggi serta menghasilkan torsi yang cukup untuk mendukung operasi mobil wisata listrik berkecepatan rendah. Nilai efisiensi yang diperoleh sejalan dengan hasil studi Deepak et al. (2023) dan Li et al. (2024), yang melaporkan rentang efisiensi sistem *powertrain direct drive* sebesar 75–90 % pada kendaraan listrik ringan.

5. Analisis Kelayakan Sistem

Hasil perancangan memperlihatkan bahwa desain ini memenuhi kebutuhan mobil wisata dari aspek daya, efisiensi, dan keamanan operasi. Motor BLDC *direct drive* memberikan keuntungan signifikan berupa torsi tinggi, efisiensi konversi energi besar, dan perawatan minimal. Dari sisi kelayakan energi, kapasitas baterai 8,3 kWh mampu menunjang durasi operasi sekitar 2 jam pada kecepatan rata-rata 20 km/jam.

Dengan mempertimbangkan hasil perhitungan dan simulasi, sistem *powertrain direct drive* berbasis motor BLDC layak diimplementasikan pada kendaraan wisata listrik skala kampus atau kawasan pariwisata dengan kebutuhan mobilitas jarak pendek dan kecepatan rendah

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah menghasilkan rancangan sistem *powertrain tipe direct drive* berbasis motor *Brushless Direct Current* (BLDC) yang dioptimalkan untuk kendaraan wisata listrik berkecepatan rendah. Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi, diperoleh bahwa kebutuhan daya kendaraan sebesar 7,6 kW dapat dipenuhi dengan konfigurasi dua motor BLDC masing-masing berdaya 4 kW dan tegangan nominal 72 V.

Analisis elektromagnetik menunjukkan torsi rata-rata motor sebesar 79,5 N·m dengan efisiensi sistem 88,2 %, sedangkan analisis termal memperlihatkan temperatur maksimum 120 °C, yang masih berada dalam batas aman operasi magnet permanen. Hasil simulasi mekanik menunjukkan tegangan maksimum rotor hanya 0,57 MPa dengan deformasi sangat kecil, sehingga desain motor aman terhadap gaya sentrifugal.

Hasil simulasi *virtual driving cycle* tipe *Artemis Urban* menunjukkan torsi puncak sebesar 100 N·m, daya maksimum 4,9 kW, dan efisiensi energi rata-rata 78 %. Temuan

ini menegaskan bahwa sistem bekerja secara stabil dan efisien pada kecepatan rendah, dengan konsumsi energi minimal. Berdasarkan hasil analisis, sistem powertrain *direct drive* berbasis motor BLDC dinilai layak diterapkan pada mobil wisata listrik berkecepatan rendah di kawasan kampus maupun area pariwisata karena efisiensinya tinggi dan perawatannya minimal.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis elektromagnetik, termal, dan mekanik terhadap sistem *dual rear-wheel BLDC direct drive* untuk kendaraan wisata listrik berkecepatan rendah, yang menjadi kontribusi baru terhadap pengembangan powertrain kendaraan listrik efisien pada aplikasi khusus berkecepatan rendah

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan pengujian eksperimental guna memverifikasi hasil simulasi dan mengevaluasi performa sistem secara nyata, termasuk analisis dinamika kendaraan, konsumsi energi aktual, serta integrasi sistem kontrol motor berbasis sensor kecepatan dan torsi.

DAFTAR REFERENSI

- Adegbohun, F., von Jouanne, A., Phillips, B., Agamloh, E., & Yokochi, A. (2021). High performance electric vehicle powertrain modeling, simulation, and validation. *Energies*, 14(5), 1493. <https://doi.org/10.3390/en14051493>
- Acharyaviriya, W., Lertsatitthanakorn, C., & Soontrapa, K. (2024). A comparative study of vehicle powertrain efficiency: Data-driven insights. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 127, 104118. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100286>
- Chandran, P., Mylsamy, K., & Umapathy, P. (2022). Conceptual design and material analysis of BLDC motor using FEA tools for electric vehicle applications. *Sustainability*, 14(19), 12743. <https://doi.org/10.17559/TV-20210425201219>
- Deepak, K., Frikha, M. A., Benômar, Y., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2023). In-wheel motor drive systems for electric vehicles: State of the art, challenges, and future trends. *Energies*, 16(7), 3121. <https://doi.org/10.3390/en16073121>
- Dukalski, P. (2022). Analysis of the simulation of the operation of a wheel hub motor mounted in a hybrid car during Artemis driving cycles. *Energies*, 15(21), 8323. <https://doi.org/10.3390/en15218323>

- Diouf, B. (2024). The electric vehicle transition. *Environmental Science: Advances*, 3(1), 332–345. <https://doi.org/10.1039/D3VA00322A>
- Li, J., Chen, J., Zhou, W., & Sun, Y. (2024). Integrated design and optimization of powertrain systems for battery electric vehicles. *Electronics*, 13(20), 4103. <https://doi.org/10.3390/electronics13204103>
- Lu, J., Gu, C., Zhao, Y., Tan, C., Lu, Y., & Fu, C. (2022). Refined modeling method and analysis of an electromagnetic direct-drive hydrostatic actuation system. *Actuators*, 11(10), 281. <https://doi.org/10.3390/act11100281>
- Singer, M., Smith, B., & Wilson, P. (2023). Electric vehicle efficiency ratios for light-duty vehicles. *National Renewable Energy Laboratory (NREL) Technical Report ORNL/SPR–2023*. <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84631.pdf>
- Tosun, O., & Serteller, N. F. O. (2022). The design of the outer-rotor brushless DC motor and an investigation of motor axial-length-to-pole-pitch ratio. *Sustainability*, 14(19), 12743. <https://doi.org/10.3390/su141912743>