

INOVASI SIMULATOR DAN ALAT UJI PERFORMA *HYBRID STORAGE SYSTEM* BATERAI DAN SUPERKAPASITOR

Teguh Afrianda¹, Markus Diantoro^{1*)}, Muchammad Harly², Nasikhudin¹, Bagja Rahmat Mubarak¹
dan Nuviya Illa Muthi Aturroifah¹

¹Departemen Fisika, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

*) Penulis korespondensi, E-mail: markus.diantoro.fmipa@um.ac.id

Abstrak

Penyimpanan energi merupakan komponen terpenting dalam sistem penggerak kendaraan listrik atau *electric vehicles* (EV). *Hybrid storage system* yang menggunakan baterai dan superkapasitor banyak digunakan karena dapat menghasilkan sistem penyimpanan energi listrik yang baik dengan kapasitas penyimpanan besar, kepadatan daya dan kepadatan energi tinggi, siklus *charge-discharge* cepat, dan *cycle life* panjang. Namun, pengaplikasian *hybrid storage system* pada kendaraan listrik memerlukan banyak komponen pendukung dan parameter kompleks yang digunakan untuk menciptakan sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik yang efektif. Sistem simulator diperlukan untuk memudahkan analisis dan investigasi kinerja perangkat penyimpanan energi pada teknologi kendaraan listrik. Pada penelitian ini, dilakukan inovasi pembuatan simulator dan alat uji coba performa gabungan baterai LiFePO₄ dan superkapasitor berbasis kontroler dan motor BLDC, dengan memperhatikan pengaruh gaya gesek dan laju kecepatan yang menyerupai kondisi sebenarnya. Hasil uji coba menunjukkan bahwa motor BLDC bekerja lebih efisien pada *revolutions per minute* (rpm) tinggi, dimana daya yang dibutuhkan tidak lagi meningkat secara signifikan meskipun rpm bertambah. Penelitian diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan infrastruktur pendidikan dan penelitian di bidang kendaraan listrik di Indonesia.

Kata kunci: kendaraan listrik, *hybrid storage system*, simulator, BLDC.

Abstract

Energy storage is the most important component in the electric vehicle (EV) drive system. Hybrid storage systems combining batteries and supercapacitors are widely used due to their ability to provide efficient energy storage with large capacities, high power and energy densities, rapid charge-discharge cycles, and long cycle life. However, the application of hybrid storage systems in electric vehicles requires many supporting components and complex parameters used to create an effective energy storage system in electric vehicles. A simulator system is needed to facilitate the analysis and investigation of the performance of energy storage devices in electric vehicle technology. In this study, an innovation was made in the creation of a simulator and a combined performance test tool for LiFePO₄ batteries and supercapacitors based on a controller and BLDC motor by considering the effects of friction and speed that resemble actual conditions. The test results show that the BLDC motor works more efficiently at high revolutions per minute (rpm), where the power required no longer increases significantly even though the rpm increases. This research is expected to contribute to the development of educational and research infrastructure in the field of electric vehicles in Indonesia.

Keywords: electric vehicles, *hybrid storage systems*, simulators, BLDC.

1. Pendahuluan

Kesadaran lingkungan dan persediaan bahan bakar fosil yang terus berkurang telah memberikan ancaman serius bagi pengguna kendaraan bermesin pembakaran internal atau *internal combustion engine* (ICE) yang menggunakan bahan bakar fosil, sehingga beralih menggunakan kendaraan Listrik atau *electric vehicles* (EV). Jika dibandingkan kendaraan yang menggunakan bahan bakar fosil, keunggulan kendaraan listrik diantaranya adalah lebih hemat bahan bakar dan ramah lingkungan [1]. Sistem

penggerak listrik pada kendaraan listrik berperan penting dalam proses mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk menggerakkan roda kendaraan. Kendaraan listrik melibatkan operasi akselerasi dan deselerasi pada saat menyelip dengan cepat, pengereman darurat, melewati jalan menanjak, dan saat melewati kemacetan lalu lintas kota [2]. Pemilihan motor listrik yang sesuai sangat penting, karena respons kendaraan listrik di berbagai situasi bergantung pada penggerak motor yang digunakan. Salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan adalah *Brushless DC motors* (BLDCM), karena telah

terbukti efisien dan andal dalam menggerakkan kendaraan listrik menggunakan baterai sebagai pengganti bahan bakar fosil [3], [4]. Keunggulan BLDCM saat diterapkan pada kendaraan listrik diantaranya adalah kepadatan daya baik, peningkatan kinerja, biaya perawatan mudah [5]. Kendaraan listrik memiliki kebutuhan daya yang berubah-ubah seiring waktu. Periode percepatan dan regenerasi pada kendaraan listrik menunjukkan perubahan beban pulsa, dimana perangkat penyimpanan energi listrik harus menyerap arus pengisian transien yang besar [6].

Secara umum, kendaraan listrik menggunakan baterai sebagai perangkat penyimpanan energi listrik. Namun, kelemahan baterai diantaranya adalah keterbatasan pada umur baterai, jarak tempuh, kepadatan energi rendah, material relatif beracun, respons relatif lambat, dan waktu pengisian lama [7]. Hal ini dapat membatasi kegunaan baterai dalam memenuhi kebutuhan daya yang tinggi seperti daya output dan variasi beban, serta kehilangan daya tambahan karena respons baterai yang lambat untuk mengimbangi kebutuhan energi puncak sementara [8]. Upaya untuk mengatasi kelemahan baterai tersebut salah satunya dengan menciptakan *hybrid storage system*. Penggabungan baterai dan superkapasitor sebagai *hybrid storage system* dapat meminimalisir kelemahan baterai dan superkapasitor karena memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Superkapasitor memiliki *cycle life* yang lebih lama dan kepadatan daya tinggi, namun kapasitas penyimpanan yang rendah dan kepadatan energi rendah [8], [9]. Disisi lain, baterai memiliki kepadatan daya tinggi yang dapat mengatasi kelemahan superkapasitor. Upaya *hybrid storage system* dapat menghasilkan sistem penyimpanan energi listrik yang memiliki kepadatan energi dan kepadatan daya tinggi, sehingga dapat meningkatkan fleksibilitas operasional [6].

Efektivitas *hybrid storage system* pada kendaraan listrik sangat berkaitan dengan pemilihan strategi manajemen energi yang tepat. Namun, kurangnya pemahaman dan pengetahuan terkait strategi manajemen energi, serta kurangnya fasilitas pembelajaran terkait *hybrid storage system* menjadi kendala dalam menciptakan kendaraan listrik dengan sistem penyimpanan yang efektif. Pengembangan simulator untuk perangkat pembelajaran memiliki peran penting untuk meningkatkan pemahaman dari kerja suatu perangkat berdasarkan objek fisik benda nyata [10]. Penelitian mengenai simulator *hybrid storage system* pada kendaraan listrik telah banyak dikembangkan dan dikelompokkan menjadi kategori strategi kontrol berbasis aturan, pengoptimalan, dan kecerdasan [11]. Pada penelitian Kiran Raut et al., pemodelan dan simulasi *hybrid storage system* untuk kendaraan listrik bertenaga fotovoltaik dilakukan menggunakan aplikasi MATLAB [12]. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa superkapasitor memberikan peran penting dalam menghemat daya baterai hingga 94%. Disisi lain, penelitian Jhoan Alejandro et al. Menyebutkan bahwa penyesuaian parameter kontrol dengan kondisi sistem

sesuai kondisi nyata membuat sistem lebih efisien, sehingga memberikan kinerja transien yang tangguh dan fleksibel [13]. Penggunaan kontroler *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) pada BLDC motor pada simulator kendaraan listrik dilakukan pada penelitian Subbarao Mopidevi et al., yang menunjukkan peningkatan karakteristik pengoperasian seperti waktu naik, waktu tenang, persentase kelebihan beban puncak, dan respons kendaraan dalam hal kecepatan dan jarak [14]. Namun, kontroler ANFIS membutuhkan banyak perhitungan komputasi sehingga sulit jika diimplementasikan secara *real-time*.

Sejauh ini, pengembangan simulator *hybrid storage system* untuk kendaraan listrik didominasi untuk skala besar untuk keperluan industri. Simulator *hybrid storage system* sebagai media pembelajaran masih terbatas pada pengukuran performa berbasis aplikasi, dimana tidak memperhatikan faktor eksternal seperti gaya gesekan saat penggunaan kendaraan listrik. Oleh karena itu, penelitian ini menciptakan prototipe simulator *hybrid storage system* berbasis baterai LiFePO₄ dan superkapasitor yang dirancang dengan memperhatikan pengaruh gaya gesek, laju kecepatan dan konsumsi arus sesuai dengan kondisi operasi kendaraan listrik sebenarnya. Penelitian ini menggunakan duplikat komponen kendaraan listrik sebagai elemen utama, seperti motor BLDC 3000 watt dan kontroler Votol EM-100, yang merepresentasikan sistem nyata yang tersedia di pasar Indonesia. Kontroler Votol EM-100 dipilih karena biaya relatif rendah dan kontroler berbasis algoritma yang sudah tertanam, sehingga dapat mengontrol kecepatan dan torsi motor BLDC secara langsung [15]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran akurat mengenai performa *hybrid storage system* pada kendaraan listrik, meningkatkan pemahaman dan pengetahuan, serta mendorong kemajuan teknologi otomotif di Indonesia.

2. Metode

2.1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian secara urut disajikan pada Gambar 1, dan dijelaskan pada uraian berikut:

1. Studi literatur
Merupakan tahap awal dimana peneliti mencari referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan untuk mempelajari dan memahami teori-teori yang mendukung penelitian tersebut.
2. Perancangan awal
Tahap ini meliputi pembuatan desain hardware dan software yang kemudian diintegrasikan sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya. Implementasi alat pada tahapan ini pembuatan prototipe dari hasil desain yang telah dirancang sebelumnya.
3. Pengujian alat
Pengujian alat merupakan tahap akhir dari proses perancangan dan pembuatan prototipe. Tahap ini

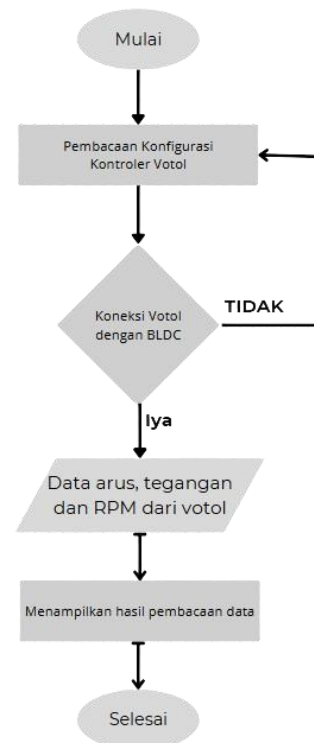
digunakan untuk melihat integrasi *hardware* dan *software*, serta respons kerja prototipe berdasarkan program yang diterapkan.

4. Analisa data
Analisis data merupakan proses pengumpulan data yang diperoleh dari kinerja simulator *hybrid storage system* baterai dan superkapasitor.
5. Kesimpulan
Kesimpulan merupakan ringkasan dari hasil penelitian. Dari hasil analisis data yang dilakukan pada saat pengujian simulator.



Gambar 1. Diagram tahapan penelitian.

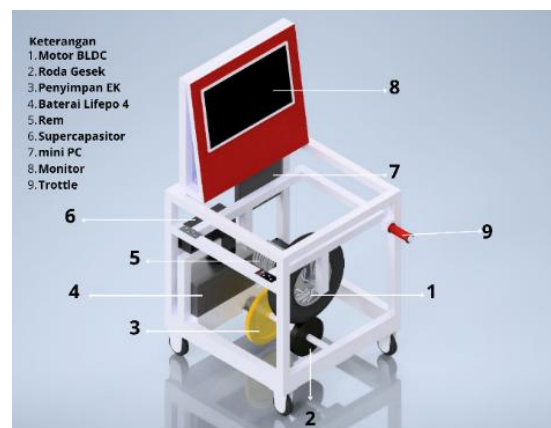
Pengujian sistem bertujuan untuk menguji alat yang dibuat apakah dapat beroperasi dengan baik dan sesuai dengan rancangan sebelumnya. Untuk Pengujian sistem dapat dilihat pada gambar flowcart sistem.



Gambar 2. flowcart sistem.

2.1. Perancangan simulator

Pada penelitian ini, pengembangan produk simulator nyata dilakukan menggunakan perangkat lunak *autodesk inventor 3D* untuk pembuatan model tiga dimensi yang mendetail dan realistis. Proses pembuatan model ini mencakup desain struktural, dimensi, dan komponen utama yang disesuaikan dengan spesifikasi aktual dari produk yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tata letak simulator *storage hybrid system*.

Berdasarkan Gambar 3, bagian dari simulator ini mendukung untuk mendapatkan data yang dibutuhkan, mulai dari gaya gesekan, laju kecepatan, konsumsi arus untuk permintaan daya puncak yang di hasilkan oleh siklus berkendara pada sumber penyimpanan hibrida. Sistem penggerak kendaraan dikombinasikan dengan baterai tegangan tinggi LiFePO₄ 30 Ah dengan tegangan nominal 72 V, yang memungkinkan operasi listrik murni sejauh 45–54 km dalam kondisi berkendara di dunia nyata [16].

2.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk mendukung proses penelitian. Pengumpulan data pendukung penelitian ini dilakukan dengan menggunakan referensi yang ada. Data yang diperlukan terutama mencakup spesifikasi dan dimensi motor listrik yang umum digunakan dalam sistem simulator. Data-data tersebut diambil dari berbagai sumber yang relevan untuk memastikan ketepatan informasi yang digunakan dalam pengembangan simulator. Rangkaian dari skematik diagram pembacaan data disajikan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Alur rangkaian pembacaan data simulator.

2.3. Spesifikasi Motor BLDC, LiFePO₄ dan Supercapacitor

Pada penelitian ini, akan digunakan motor BLDC, baterai LiFePO₄ dan supercapacitor dengan spesifikasi detail seperti pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1. Spesifikasi Motor BLDC

Spesifikasi	Nilai
Daya	3000 Watt
Tegangan Operasional	72-96 Volt DC
Kecepatan Maksimum	100 km/jam
Torsi	30-180 Nm
Magnet	40 mm

Tabel 2. Spesifikasi Baterai LiFePO₄

Spesifikasi	Nilai
Tegangan	3.2 Volt
Kapasitas	15 Ah
Resistansi Internal	2.5 mΩ
Tegangan Pengisian	3.65 Volt
Arus Charging / Discharge	1C / 3C

Tabel 3. Spesifikasi Supercapacitor

Spesifikasi	Nilai
Tegangan	2.87 Volt
Resistansi Internal	4 mΩ
Arus Maksimum	550 Amper
Siklus	100.000
Berat	70 g

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kinerja Sistem Penyimpanan

Setelah merealisasikan simulator yang di rancang melalui *software autodesk inventor*, terlihat seperti Gambar 5.

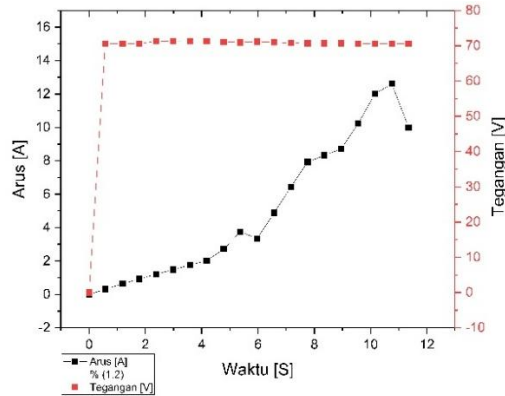


Gambar 5. Simulator *hybrid storage system* baterai dan superkapasitor

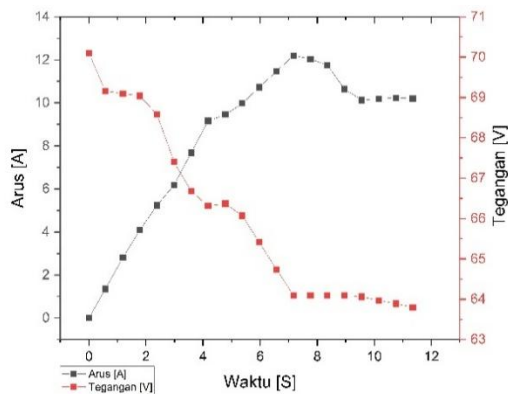
Parameter untuk menentukan daya motor BLDC dengan penyimpanan yang bervariasi. Gambar 6 dan 7 menunjukkan perilaku tegangan dan arus pada motor terhadap penyimpanan *non-hybrid* pada baterai LiFePO₄ dan superkapasitor. Berdasarkan Gambar 6, menunjukkan kondisi *non-hybrid* dari baterai LiFePO₄ dimana tegangan konstan dan arus meningkat secara konsisten kemudian turun setelah mencapai puncak maksimum. Sedangkan Gambar 7, menunjukkan kondisi *non-hybrid* dari superkapasitor yang menunjukkan keterbalikan antara arus dan tegangan.

Gambar 8 mevisualisasikan sistem penyimpanan *hybrid* dari baterai LiFePO₄ dan superkapasitor. Pada saat kondisi *hybrid*, arus secara konsisten naik kemudian stabil di tidak terjadi penurunan secara drastis. Hal ini disebabkan oleh kemampuan superkapasitor untuk memberikan arus dalam jumlah besar secara konsisten dalam waktu singkat. Namun, tegangan pada superkapasitor cenderung menurun karena kapasitasnya yang terbatas dalam menyimpan daya. Perilaku tegangan dan arus pada motor akan cenderung

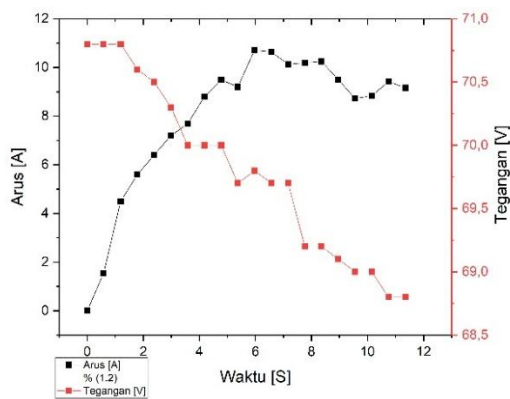
stabil saat terjadi perubahan rpm. Supercapacitor akan mengambil beban saat terjadi lonjakan arus pada rpm yang lebih tinggi, sementara baterai menjaga tegangan tetap stabil.



Gambar 6. Perilaku dinamis arus dan tegangan dalam siklus identifikasi parameter *non-hybrid* dengan baterai LiFePO₄.



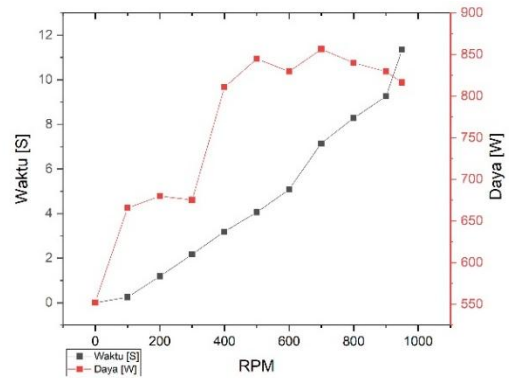
Gambar 7. Perilaku dinamis arus dan tegangan dalam siklus identifikasi parameter *non-hybrid* dengan supercapacitor.



Gambar 8. Perilaku dinamis arus dan tegangan dalam siklus identifikasi parameter penyimpanan *hybrid storage system*.

3.1. Kinerja Sistem Motor BLDC

Berdasarkan dari data pengujian *storage system* dari simulator motor listrik, performa motor terhadap kinerja *hybrid storage system* baterai dan superkapasitor ditampilkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Performa motor terhadap kinerja *hybrid storage system*.

Gambar 9 menunjukkan peningkatan rpm motor yang meningkat secara drastis diiringi daya yang diperlukan motor untuk mencapai maksimum rpm pada simulator. Motor memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai rpm yang tinggi, hal ini didasarkan pada percepatan inersia yang lebih besar pada saat awal putaran. Pada kecepatan putar tinggi, daya yang dibutuhkan untuk menjaga kecepatan rpm yang lebih tinggi menjadi hampir konstan. Fluktuasi daya pada rpm tinggi dapat disebabkan oleh perubahan kecil pada beban atau kondisi motor saat beroperasi pada kecepatan maksimum.

4. Kesimpulan

Menggabungkan baterai LiFePO₄ dan supercapacitor menjadi *hybrid storage system* dapat mempengaruhi kecepatan motor untuk mencapai rpm tinggi dalam waktu yang singkat dan mempertahankan daya setelahnya. Pada penelitian ini lonjakan daya tertinggi dihasilkan pada saat motor melewati inersia awal. Pada saat 0–500 rpm motor, daya meningkat hingga 600 watt dalam waktu 4 detik dan sampai pada daya puncak di detik ke-11, kemudian stabil hingga mulai mengalami penurunan secara perlahan. Dari data yang di tampilkan menunjukkan bahwa motor bekerja lebih efisien pada rpm tinggi, di mana daya yang dibutuhkan tidak lagi meningkat secara signifikan meskipun rpm bertambah. Secara keseluruhan stabilitas daya dan efisiensi pada motor saat kecepatan putaran tinggi. Namun, perlu dilakukan pengembangan lebih lanjut dari simulator ini dengan menambahkan sensor torsi dan terhubung secara *can bus* pada *display* agar mendapatkan torsi secara *real-time*.

Referensi

- [1]. J. Jamaaluddin, A. H. Falah, I. Sulistiyowati, and S. G. Rahmatullah, "Sepeda Listrik Catu Daya Mandiri," *Umsida Press*, pp. 1–87, 2024.
- [2]. V. Dimitrov and N. Pavlov, "Study of the starting acceleration and regenerative braking deceleration of an electric vehicle at different driving modes," in *2021 13th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [3]. A. A. Tabassum, H. M. Cho, and M. I. Mahmud, "Essential features and torque minimization techniques for brushless direct current motor controllers in electric vehicles," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 18, p. 4562, 2024.
- [4]. V. T. P. Sidabutar, "Kajian pengembangan kendaraan listrik di Indonesia: prospek dan hambatannya," *Jurnal Paradigma Ekonomika*, vol. 15, no. 1, pp. 21–38, 2020.
- [5]. M. Dasari, A. S. Reddy, and M. V. Kumar, "A comparative analysis of converters performance using various control techniques to minimize the torque ripple in BLDC drive system," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 33, p. 100648, 2022.
- [6]. R. Ansah and S. Susilawati, "Dampak Kendaraan Listrik Terhadap Lingkungan Dan Sumberdaya Alam: Isu Mutakhir Dalam Transportasi Berkelanjutan," *Zahra: Journal Of Health And Medical Research*, vol. 3, no. 1, pp. 208–211, 2023.
- [7]. E. Ermawati, F. Palaha, P. Pataran, and E. H. Arya, "Analisa Konsumsi Daya Baterai Pada Mobil Listrik," *SAINSTEK*, vol. 12, no. 1, pp. 114–121, 2024.
- [8]. M. Khalid, "A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 23, p. 4559, 2019.
- [9]. A. Jalil, A. Fatana, and F. E. Larobu, "Simulasi Hibrida Baterai dan Supercapacitor dengan Perbedaan Tegangan Input," *Jurnal Fokus Elektroda: Energi Listrik, Telekomunikasi, Komputer, Elektronika dan Kendali*, vol. 9, no. 4, pp. 228–233, 2024.
- [10]. I. Mahdum, T. Permana, and Y. Sukrawan, "ANALYSIS OF MOTOR POWER ELECTRIC MIRROR CONSUMPTION," *MOTOR: Journal of Automotive Engineering*, vol. 1, no. 1, 2024.
- [11]. R. Xiong, H. Chen, C. Wang, and F. Sun, "Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor-A critical review on topology and energy management," *J Clean Prod*, vol. 202, pp. 1228–1240, 2018.
- [12]. K. Raut, A. Shendge, J. Chaudhari, R. Lamba, and N. F. Alshammari, "Modeling and simulation of photovoltaic powered battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles," *J Energy Storage*, vol. 82, p. 110324, 2024.
- [13]. J. A. Montenegro-Oviedo, C. A. Ramos-Paja, M. L. Orozco-Gutierrez, E. Franco-Mejía, and S. I. Serna-Garcés, "Design and Experimental Validation of a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Based on an Adaptive LQG Controller," *Applied System Innovation*, vol. 8, no. 1, p. 1, 2024.
- [14]. M. Subbarao, K. Dasari, S. S. Duvvuri, K. Prasad, B. K. Narendra, and V. B. M. Krishna, "Design, control and performance comparison of PI and ANFIS controllers for BLDC motor driven electric vehicles," *Measurement: Sensors*, vol. 31, p. 101001, 2024.
- [15]. J. P. Spadão, "Controle de transição para veículo de decolagem e aterrissagem vertical-VTOL," 2024.
- [16]. S. Doulgeris, Z. Toumasatos, M. V. Prati, C. Beatrice, and Z. Samaras, "Assessment and design of real world driving cycles targeted to the calibration of vehicles with electrified powertrain," *International Journal of Engine Research*, vol. 22, no. 12, pp. 3503–3518, 2021.