

Sistem Manajemen Energi Hibrida pada Sumber Energi Baterai-Superkapasitor Berbasis *Automatic Switching*

Bagja Rahmat Mubarak¹, Hafizh Prihtiadi^{*2}, Markus Diantoro³, Muchammad Harly⁴, Teguh Afrianda⁵

^{1,2,3,5}Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang, Indonesia

⁴Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

e-mail: ¹bagja.rahmat.2303228@students.um.ac.id, ^{*2}hafizhp.fmipa@um.ac.id,

³markus.diantoro.fmipa@um.ac.id, ⁴muchammadharly.ft@um.ac.id,

⁵teguh.afrianda.2303228@students.um.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan sistem manajemen energi hibrida berbasis switching otomatis yang mengintegrasikan baterai dan superkapasitor untuk meningkatkan efisiensi distribusi daya pada kendaraan listrik. Sistem dikendalikan oleh mikrokontroler yang memantau arus secara real-time dan mengaktifkan jalur superkapasitor ketika arus melebihi 10 A. Rangkaian switching menggunakan IR2110 dan MOSFET IRFP4568. Pengujian dilakukan dalam tiga skenario: baterai saja, hybrid tanpa beban, dan hybrid dengan beban. Pada kondisi tanpa beban, superkapasitor menghasilkan arus puncak 18.23 A dan rata-rata 5.73 A, sementara baterai mencatat arus rata-rata 8.52 A. Dalam kondisi berbeban, arus puncak superkapasitor mencapai 20.87 A, dengan rata-rata 10.82 A, sedangkan baterai sebesar 11.95 A. Total energi meningkat dari 55022.25 J (baterai saja) menjadi 92000.76 J (tanpa beban) dan 147019.09 J (dengan beban). Efisiensi juga meningkat dari 1.0% menjadi 2.4% pada konfigurasi hybrid. Sistem menunjukkan efisiensi konversi energi stabil sebesar 95% pada kedua kondisi hybrid. Hasil ini membuktikan bahwa integrasi superkapasitor secara otomatis mampu meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem tanpa kompleksitas algoritma kontrol.

Kata kunci—Baterai, Superkapasitor, Energi, Sistem Manajemen, Hibrida

Abstract

This research develops an automatic switching-based hybrid energy management system that integrates batteries and supercapacitors to improve power distribution efficiency in electric vehicles. The system is controlled by a microcontroller that monitors the current in real-time and activates the supercapacitor line when the current exceeds 10 A. The switching circuit uses IR2110 and IRFP4568 MOSFETs. Tests were conducted in three scenarios: battery only, hybrid without load, and hybrid with load. In the no-load condition, the supercapacitor produced a peak current of 18.23 A and an average of 5.73 A, while the battery recorded an average current of 8.52 A. In the loaded condition, the supercapacitor peak current reached 20.87 A, with an average of 10.82 A, while the battery was 11.95 A. The total energy increased from 55022.25 J (battery only) to 92000.76 J (no-load) and 147019.09 J (with load). The efficiency also increased from 1.0% to 2.4% in the hybrid configuration. The system showed a stable energy conversion efficiency of 95% under both hybrid conditions. These results prove that automatic integration of supercapacitors can improve system efficiency and performance without the complexity of control algorithms.

Keywords—Battery, Supercapacitor, Energy, Management System, Hybrid

1. PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan akibat emisi karbon dioksida (CO₂) menjadi isu global yang semakin mendapat perhatian. Sektor transportasi, yang menyumbang sekitar 29%-32% emisi, merupakan penyumbang emisi terbesar kedua setelah sektor industri [1][2]. Berdasarkan data terkini, terdapat sekitar 1,5 miliar kendaraan di dunia, dan jumlah ini diperkirakan akan meningkat menjadi lebih dari 2,5 miliar pada tahun 2030[3]. Kekhawatiran terhadap keterbatasan bahan bakar fosil serta meningkatnya kesadaran masyarakat tentang dampak kerusakan lingkungan telah mendorong adopsi teknologi energi alternatif, salah satunya adalah kendaraan listrik (EV)[4].

Kendaraan listrik dianggap sebagai solusi transportasi yang ideal untuk membangun sistem yang lebih ramah lingkungan, dengan keunggulan signifikan dalam efisiensi energi, pengurangan emisi, dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil[5][6]. Sistem penyimpanan energi merupakan komponen krusial dalam kendaraan listrik (EV). Di antara berbagai perangkat penyimpanan energi, baterai, fuel cell, dan superkapasitor adalah tiga teknologi utama yang dianggap paling unggul. Baterai berbasis lithium (Li) menjadi pilihan paling populer dan menjanjikan karena memiliki keunggulan seperti kepadatan energi tinggi, bobot ringan, efisiensi penggunaan, umur siklus yang panjang, ramah lingkungan, serta mampu menyediakan energi besar yang dibutuhkan kendaraan listrik[7].

Secara ideal, baterai dirancang untuk menyediakan aliran energi yang stabil guna menggerakkan kendaraan dalam jangka waktu yang lama[8]. Namun, baterai sering kali tidak mampu menangani beban jangka pendek yang terjadi saat kendaraan membutuhkan akselerasi mendadak untuk menghasilkan lonjakan daya yang besar. Untuk mengatasi pulsa daya tinggi ini, baterai harus bekerja pada tingkat arus yang sangat tinggi, yang dapat mempercepat kerusakan baterai[9]. Salah satu solusi yang efektif adalah menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida (HESS), yang mengombinasikan perangkat penyimpanan energi dengan kepadatan daya tinggi, seperti superkapasitor, sehingga lebih cocok untuk diaplikasikan pada kendaraan listrik[10].

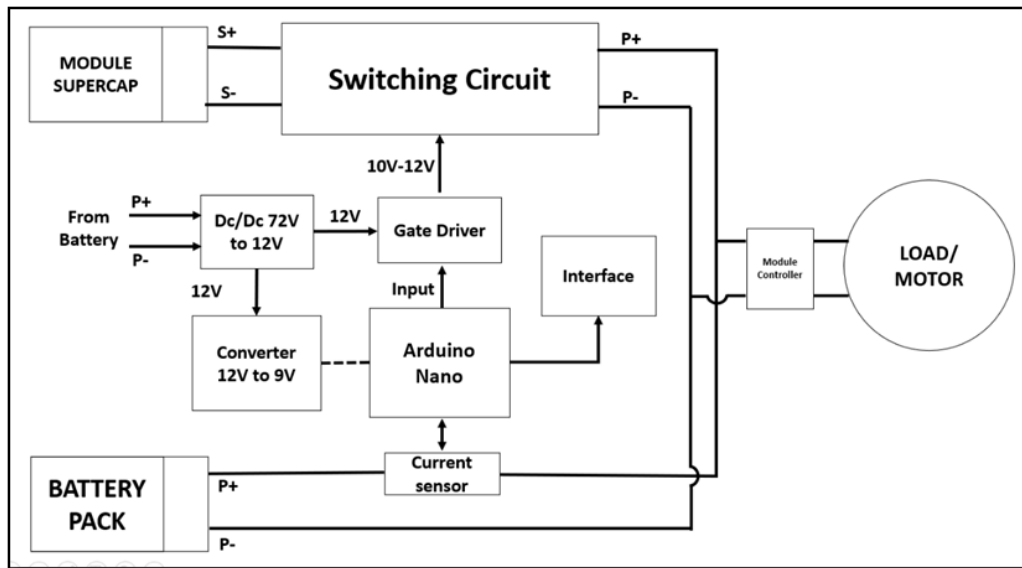
Sistem hibrida pada kendaraan listrik menggabungkan peran baterai dan superkapasitor, di mana baterai bertugas menyediakan daya rata-rata untuk kendaraan, sedangkan superkapasitor menangani kebutuhan daya puncak. Dengan mengintegrasikan superkapasitor (SC) sebagai unit pengelola daya puncak, sistem penyimpanan energi hibrida (HESS) dapat secara signifikan mengurangi beban transien pada baterai[11]. Superkapasitor (SC) merupakan teknologi penyimpanan energi yang menjanjikan karena kemampuan menghasilkan daya puncak tinggi, pengisian/pengosongan cepat, efisiensi tinggi, dan umur siklus panjang. SC telah banyak digunakan dalam industri, serta diproduksi secara komersial di seluruh dunia[12][13]. Sistem penyimpanan energi pada kendaraan listrik menghadapi tantangan dalam menangani fluktuasi daya, seperti akselerasi mendadak dan pengereman regeneratif, di mana baterai tidak cukup cepat untuk daya puncak, sementara superkapasitor tidak mampu menyediakan energi jangka panjang. Meskipun banyak penelitian menggunakan strategi berbasis aturan atau algoritma kompleks, masih ada kesenjangan dalam solusi yang praktis dan responsif. Untuk mengatasinya, solusi yang ditawarkan adalah sistem manajemen energi berbasis switching otomatis yang mengalihkan beban daya antara baterai dan superkapasitor, dengan superkapasitor menangani daya puncak dan baterai menyediakan energi rata-rata, sehingga memperpanjang umur baterai dan meningkatkan efisiensi kendaraan listrik.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Hybrid Energy Management System

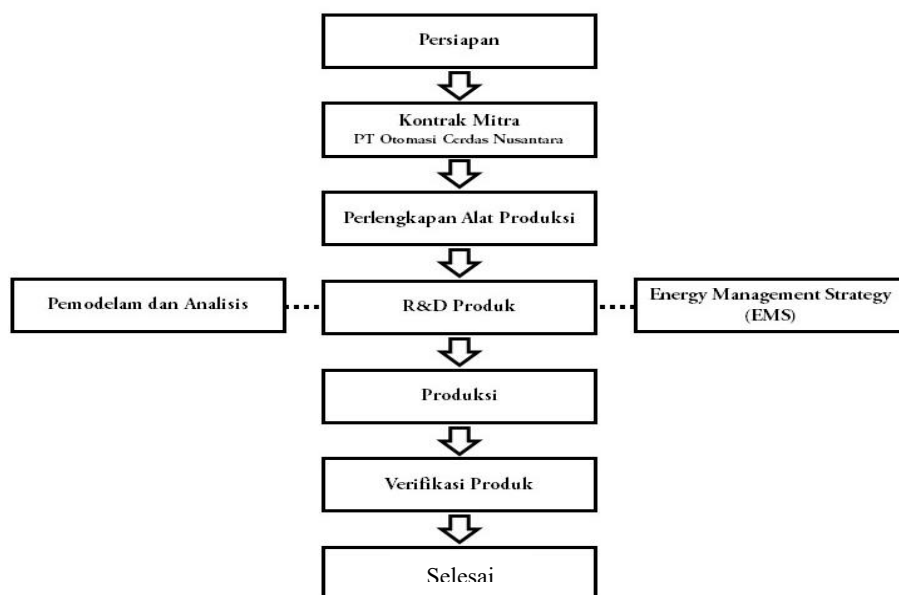
Penelitian ini difokuskan pada pembuatan dan implementasi sistem manajemen energi hibrida (Hybrid Energy Management System) dari baterai-superkapasitor sumber energi. Sistem

dirancang dengan mekanisme *automatic switching* berdasarkan kondisi tertentu melalui logika program yang membaca distribusi arus baterai sebagai sumber utama dan superkapasitor menjadi energi tambahan ketika terjadi lonjakan arus besar.



Gambar 1. Desain Hybrid Energy Management System

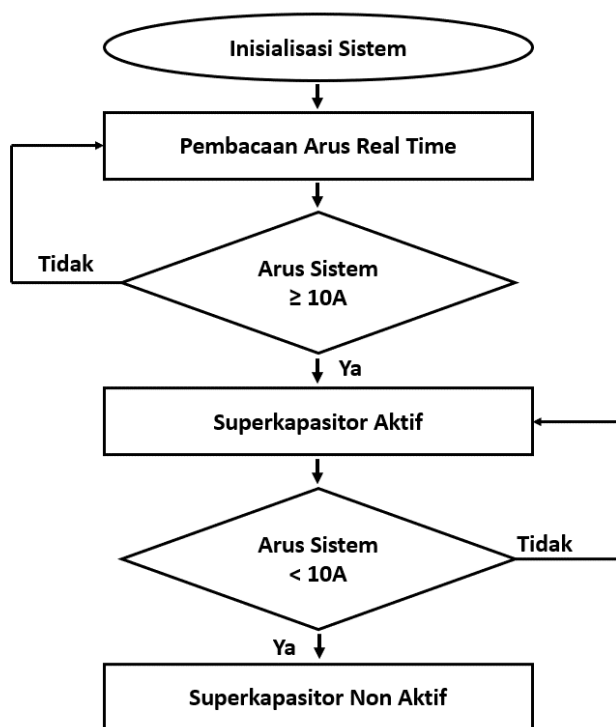
Penelitian ini mengembangkan metodologi untuk mengintegrasikan sistem manajemen energi hibrida berbasis baterai dan superkapasitor guna mendukung operasi beban atau motor pada kendaraan listrik yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem dirancang menggunakan rangkaian switching yang menghubungkan modul superkapasitor dan baterai, memungkinkan distribusi energi secara adaptif sesuai kebutuhan. Modul baterai dihubungkan ke DC/DC converter (72V ke 12V) yang menyediakan daya untuk gate driver dan Arduino Nano sebagai pengendali utama. Arduino Nano menerima input dari sensor arus untuk memantau distribusi daya dan mengontrol mekanisme switching. Sebuah konverter tambahan (12V ke 9V) digunakan untuk menstabilkan tegangan yang disuplai ke Arduino.



Gambar 2. Alur Penelitian

Proses pembuatan sistem manajemen energi yang menggabungkan baterai dan superkapasitor dimulai dengan tahap persiapan, mencakup perencanaan strategis serta penyusunan kebutuhan teknis dan sumber daya. Pengadaan dan persiapan perlengkapan produksi dilakukan untuk mendukung pengembangan sistem ini.

Tahap pemodelan dan analisis menjadi sangat penting dalam menciptakan strategi pengelolaan energi yang paling efektif, yang nantinya akan menjadi landasan penelitian dan pengembangan (R&D) produk. Hasil dari R&D itu kemudian digunakan dalam proses produksi untuk menghasilkan prototipe sistem. Setelah sistem tersebut diproduksi, tahap berikutnya adalah melakukan verifikasi menggunakan simulator hybrid sistem untuk menguji performa, keandalan, serta kesesuaiannya dengan spesifikasi desain. Proses ini memastikan bahwa sistem telah memenuhi parameter yang ditentukan sebelum diimplementasikan lebih lanjut.



Gambar 3. Alur Kerja Sistem

Gambar flowchart menunjukkan proses kerja sistem switching otomatis yang dikembangkan dalam penelitian ini. Sistem ini mengandalkan pemantauan arus secara real-time untuk menentukan kapan jalur superkapasitor harus diaktifkan atau dinonaktifkan. Proses diawali dengan inisialisasi sistem dan sensor arus oleh mikrokontroler (MCU). Selanjutnya, MCU secara terus-menerus membaca arus dari sensor yang terpasang pada jalur daya utama, yaitu jalur baterai. Jika nilai arus yang terdeteksi mencapai atau melebihi batas ambang 10A, MCU akan mengaktifkan jalur superkapasitor dengan membuka saklar elektronik (MOSFET). Hal ini memungkinkan superkapasitor menyuplai energi tambahan ke beban, terutama saat terjadi lonjakan kebutuhan daya seperti saat akselerasi. Saat arus sistem turun kembali di bawah ambang batas (10A), jalur superkapasitor akan dinonaktifkan guna menghindari over-discharge serta menjaga umur pakai superkapasitor.

Siklus ini berlangsung secara berulang dan adaptif, menjadikan sistem mampu merespons dinamika perubahan beban secara efisien. Desain switching ini bertujuan untuk mengurangi beban pada baterai, meningkatkan efisiensi distribusi energi, dan mempercepat respons sistem terhadap kondisi kerja motor listrik.

2.2 Spesifikasi Baterai dan Superkapasitor

Penelitian ini menggunakan 1 *battery pack* dan 1 modul superkapasitor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Besar nilai *battery pack* dan modul superkapasitor dirancang berdasarkan daya referensi motor pada perangkat *simulator hybrid system* yakni 3000 Watt 72V-84V. Berikut di bawah ini adalah spesifikasi *battery pack* dan modul superkapasitor yang akan digunakan dalam penelitian.

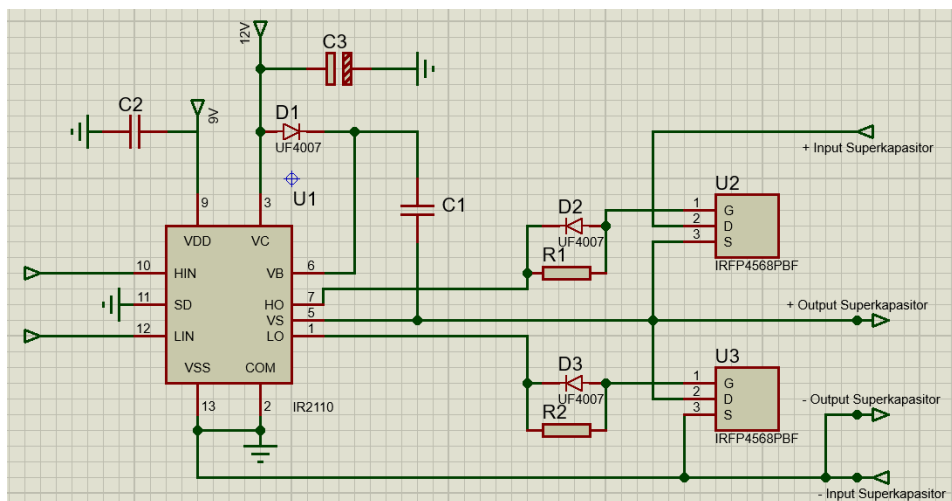
Table 1. Spesifikasi Battery Pack

Spesifikasi Battery Pack	Nilai
Tegangan Sel	3.2V
Kapasitas	15Ah
Konfigurasi 24S/2P	76.8V/30Ah

Table 2. Spesifikasi Modul Superkapasitor

Spesifikasi Modul Superkapasitor	Nilai
Tegangan Sel	3.7V
Kapasitas	500Farad
Konfigurasi 20S/4P	74V/10.23Ah

Berdasarkan spesifikasi yang tercantum pada Tabel 1 dan Tabel 2, sistem manajemen energi hibrida mengintegrasikan baterai dengan konfigurasi 24S/2P yang menghasilkan tegangan total 76,8V dan superkapasitor dengan konfigurasi 20S/4P yang menghasilkan tegangan total 74V. Untuk mendukung operasi yang optimal, tegangan kerja kedua sumber energi tersebut diatur dalam rentang 60V-72V. Ini bertujuan agar keduanya kompatibilitas dengan sistem secara keseluruhan, meningkatkan efisiensi distribusi energi, serta menghindari kondisi tegangan ekstrem yang dapat memengaruhi kinerja atau umur komponen.



Gambar 4. Hybrid Energy Management System

Sistem switching otomatis ini dirancang untuk mengatur aliran energi antara superkapasitor dan beban secara adaptif, berdasarkan arus terukur secara real-time. IR2110 digunakan sebagai gate driver untuk mengendalikan dua MOSFET IRFP4568 yang berperan sebagai sakelar elektronik. Sinyal logika dari mikrokontroler diteruskan ke pin HIN dan LIN untuk mengaktifkan jalur high-side atau low-side, dengan dukungan rangkaian bootstrap (dioda dan kapasitor) untuk menggerakkan gate MOSFET sisi atas. Dua jalur switching dikendalikan oleh MOSFET IRFP4568 dan dilengkapi dioda freewheeling sebagai proteksi terhadap spike tegangan induktif. Saat arus sistem melebihi ambang batas, switching menghubungkan superkapasitor ke beban; sebaliknya, saat arus turun, jalur superkapasitor diputus untuk

mencegah over-discharge. Rangkaian ini memungkinkan respons cepat terhadap lonjakan daya, meningkatkan efisiensi distribusi energi, serta mengurangi beban baterai secara signifikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji efektivitas sistem penyimpanan energi hibrida pada kendaraan listrik. Misalnya, Hasan dan Hudaya (2023) [2] melakukan pengujian kombinasi baterai lithium-ion dan superkapasitor untuk kendaraan listrik, dan menyimpulkan bahwa penggunaan superkapasitor dapat membantu menangani lonjakan daya, sekaligus memperpanjang umur baterai. Penelitian lain oleh Kouchachvili et al. (2018) [10] menunjukkan bahwa integrasi superkapasitor secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem dan performa dinamis pada kendaraan listrik, terutama saat akselerasi dan deselerasi.

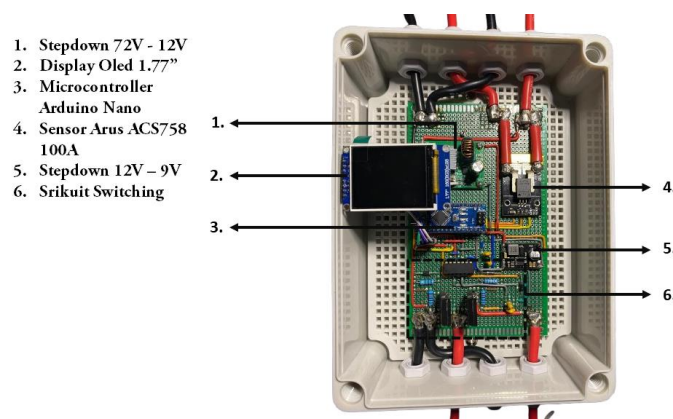
Strategi manajemen energi yang digunakan pada berbagai penelitian umumnya memanfaatkan kontrol berbasis aturan (rule-based control), metode prediktif seperti Model Predictive Control (MPC), dan strategi berbasis SOC (State of Charge) untuk pengaturan aliran daya antara baterai dan superkapasitor [5][6]. Namun, sebagian besar pendekatan tersebut memerlukan pemodelan sistem yang kompleks, pemrosesan komputasi tinggi, serta tidak selalu cocok untuk implementasi real-time pada sistem embedded sederhana seperti Arduino.

Dibandingkan dengan pendekatan tersebut, penelitian ini mengusulkan metode switching otomatis berbasis ambang arus, yang memiliki keunggulan dari sisi kesederhanaan implementasi, respon cepat terhadap lonjakan arus, serta ketersediaan pada sistem embedded berbiaya rendah. Meskipun efisiensi sistem ini masih relatif rendah (maksimal 2,4%), hasil tersebut cukup menjanjikan mengingat sistem ini tidak mengandalkan metode prediksi atau pemodelan kompleks.

Dengan demikian, penelitian ini menawarkan solusi alternatif yang praktis dan efisien untuk aplikasi skala kecil hingga menengah, terutama pada kendaraan listrik ringan atau sistem eksperimental, di mana faktor kesederhanaan dan respon cepat lebih diutamakan dibanding kecanggihan algoritma.

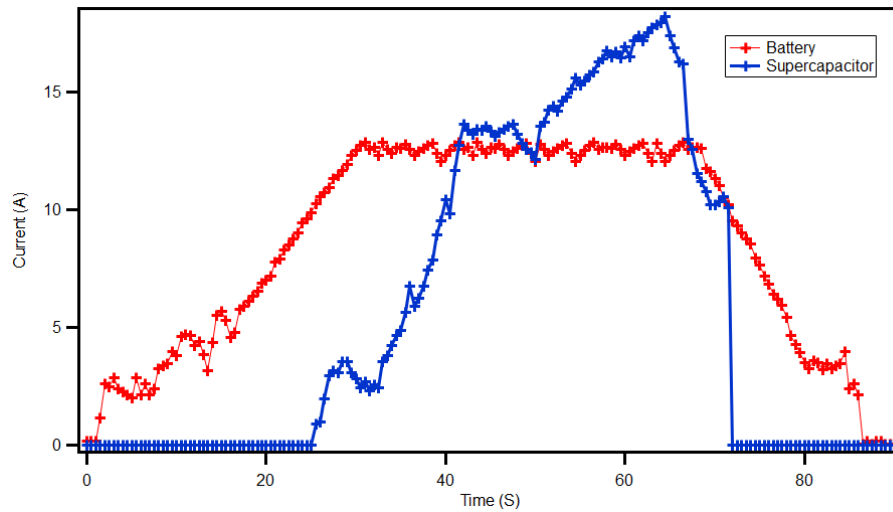
3.1 Modul Hybrid Energy Management System

Di bawah ini merupakan tampilan dari *hybird energy manupement system* yang telah dibuat dengan beberapa *section* yang sudah ditunjukkan pada gambar.



Gambar 5. *Hybrid Energy Management System*

3.2 Hasil Pengujian Hybrid Energy Management System



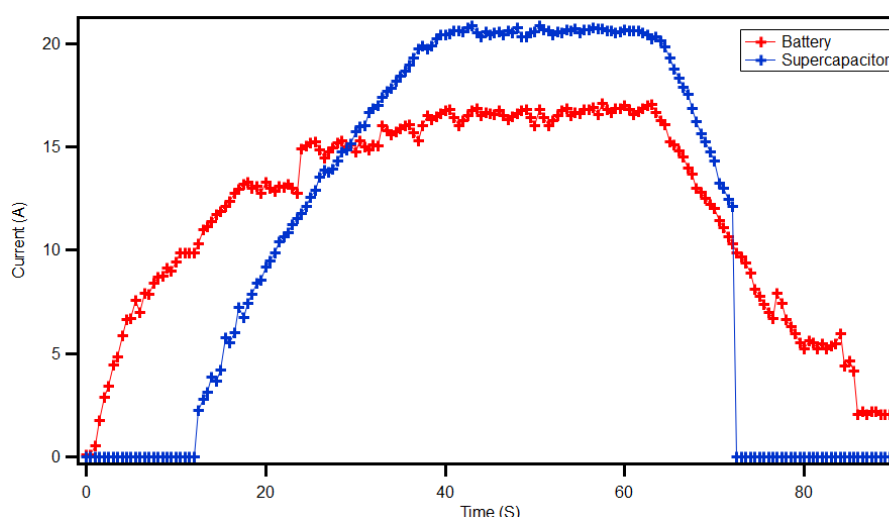
Gambar 6. Sebaran Kontribusi Arus tanpa beban pada *Hybrid Energy Management System*

Table 3. Arus Puncak dan Rata Rata pada Kondisi Tanpa Beban

Parameter	Baterai	Superkapasitor
Arus Puncak (A)	12.87	18.23
Arus Rata Rata (A)	8.52	5.73

Gambar 6 menunjukkan sebaran arus yang terukur dari hybrid energy management system pada kondisi tanpa beban. Sistem automatic switching dirancang untuk mengaktifkan superkapasitor ketika arus sistem mencapai atau melebihi dari 10A, dan memutuskan jalur superkapasitor ketika arus turun di bawah 10A. Pada awal pengujian ($t < 40$ detik), arus berada di bawah 10A sehingga hanya baterai yang beroperasi, sesuai dengan fungsi sistem switching. Namun, ketika arus meningkat hingga melebihi ambang batas 10A ($t \approx 40$ detik), jalur superkapasitor terbuka dan superkapasitor mulai menyuplai energi tambahan. Hal ini terlihat pada grafik, di mana kontribusi arus dari superkapasitor meningkat signifikan, sementara beban pada baterai berkurang. Saat arus mulai menurun ($t \approx 80$ detik), sistem mendeteksi bahwa arus berada di bawah 10A dan secara otomatis menutup jalur superkapasitor. Sehingga, suplai arus kembali sepenuhnya dari baterai. Pola ini menunjukkan bahwa sistem switching berfungsi sesuai rancangan, dengan mengaktifkan dan menonaktifkan jalur superkapasitor secara otomatis berdasarkan kondisi arus.

Tabel yang menyertai grafik tersebut merangkum nilai arus puncak dan arus rata-rata dari masing-masing sumber energi selama pengujian. Terlihat bahwa superkapasitor menghasilkan arus puncak sebesar 18.23 A, lebih tinggi dibandingkan baterai yang hanya mencapai 12.87 A. Hal ini mencerminkan kemampuan superkapasitor dalam merespons lonjakan beban secara cepat, sesuai dengan sifatnya yang memiliki kepadatan daya tinggi. Sebaliknya, arus rata-rata baterai (8.52 A) lebih tinggi dibandingkan superkapasitor (5.73 A), menunjukkan bahwa baterai tetap menjadi sumber utama energi selama operasi normal. Kombinasi ini memperlihatkan bahwa sistem HESS bekerja secara komplementer, baterai menyediakan suplai energi kontinu, sementara superkapasitor aktif secara selektif untuk menangani beban puncak, sehingga mengurangi stres arus tinggi pada baterai dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.



Gambar 7. Sebaran Kontribusi Arus dengan Beban pada *Hybrid Energy Management System*

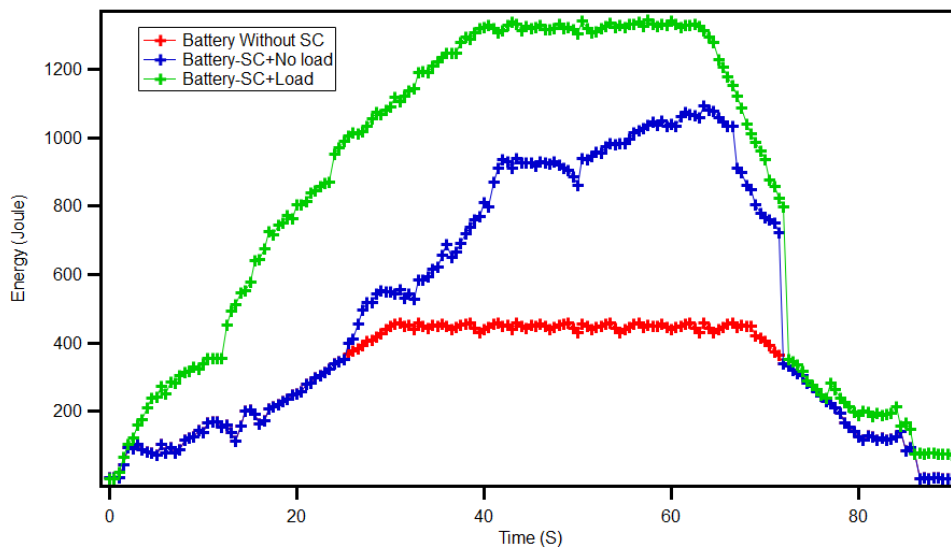
Tabel 4. Arus Puncak dan Rata Rata pada Kondisi dengan Beban

Parameter	Baterai	Superkapasitor
Arus Puncak (A)	17.1	20.87
Arus Rata Rata (A)	11.95	10.82

Gambar 7 merupakan sebaran arus yang terukur dari hybrid energy management system dengan beban konstan. Grafik menunjukkan respons sistem automatic switching pada kondisi dengan beban konstan. Pada awal pengujian ($t < 20$ detik), arus sistem berada di bawah 10A, sehingga hanya baterai yang bekerja untuk memenuhi kebutuhan energi. Ketika arus sistem mencapai ambang batas 10A ($t \approx 20$ detik), switching otomatis mengaktifkan jalur superkapasitor untuk mendukung beban. Hal ini terlihat pada grafik, di mana arus dari superkapasitor (garis biru) meningkat tajam, sementara kontribusi arus dari baterai (garis merah) berkurang.

Selama periode operasi stabil ($t \approx 20$ – 70 detik), superkapasitor mengambil peran utama dalam memenuhi kebutuhan arus tinggi, sedangkan baterai tetap menyuplai arus dalam jumlah lebih kecil. Pada saat arus mulai menurun ($t \approx 70$ detik), sistem mendeteksi bahwa kebutuhan arus total berada di bawah 10A. Switching otomatis menonaktifkan jalur superkapasitor ($t \approx 80$ detik), dan beban kembali sepenuhnya ditangani oleh baterai. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem automatic switching tidak hanya mampu mengelola beban variabel tetapi juga mendistribusikan energi secara efisien pada kondisi beban konstan. Pada kedua kondisi, sistem beroperasi sesuai dengan rancangan.

Tabel 2 mendukung temuan tersebut dengan menampilkan data arus puncak dan arus rata-rata dari masing-masing sumber energi. Superkapasitor mencatat arus puncak sebesar 20.87 A, yang lebih tinggi dibandingkan baterai sebesar 17.1 A. Hal ini mencerminkan peran aktif superkapasitor dalam menanggapi lonjakan arus secara cepat pada saat beban tinggi. Sementara itu, arus rata-rata baterai sebesar 11.95 A sedikit lebih tinggi dari superkapasitor yang berada pada 10.82 A, yang menunjukkan bahwa meskipun superkapasitor mendukung beban puncak, baterai tetap bertanggung jawab atas penyediaan energi dalam jangka waktu lebih lama dan stabil. Kombinasi karakteristik ini menunjukkan sinergi yang baik antara kedua sumber energi, di mana superkapasitor merespons beban cepat sementara baterai menjaga kontinuitas suplai energi. Hal ini menjadi bukti keberhasilan sistem HESS dalam meningkatkan efisiensi distribusi energi sekaligus menjaga keandalan sumber daya utama.



Gambar 8. Energi Sistem pada 3 Kondisi

Tabel 5. Energi dalam Tiga Kondisi Percobaan

Parameter	Baterai Tanpa Superkapasitor	Baterai Superkapasitor tanpa Beban	Baterai Superkapasitor dengan Beban
Energi Total (J)	55022.25	92000.76	147019.09
Energi Maksimum (J)	458.82	1093.99	1345.68
Energi Rata Rata (J)	303.99	508.29	812.26

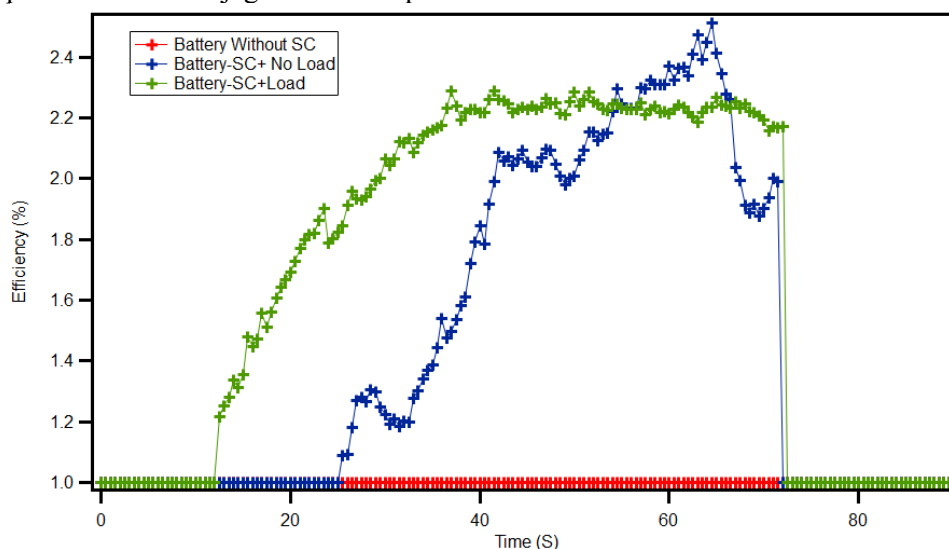
Gambar 8 menunjukkan perbandingan energi sistem *Hybrid Energy Management System* (HEMS) dalam tiga skenario: tanpa superkapasitor, dengan superkapasitor tanpa beban, dan dengan superkapasitor pada beban konstan. Pada sistem tanpa superkapasitor, energi yang dihasilkan sepenuhnya berasal dari baterai dengan kenaikan yang linier. Integrasi superkapasitor menunjukkan peningkatan signifikan pada kapasitas energi, terutama pada kondisi beban konstan.

Pada skenario tanpa beban, superkapasitor hanya aktif saat arus melebihi ambang batas 10A, menghasilkan kontribusi energi yang bersifat intermiten. Sebaliknya, pada kondisi beban konstan, superkapasitor beroperasi secara kontinu, memberikan kontribusi dominan pada distribusi energi. Hal ini mengindikasikan kemampuan sistem HEMS dalam mengelola sumber energi secara efisien, khususnya dalam kondisi beban tetap yang memerlukan pasokan energi tinggi secara konsisten.

Grafik efisiensi (Gambar 9) sistem manajemen energi hibrida memperlihatkan kinerja untuk tiga kondisi: baterai tanpa superkapasitor, baterai dengan superkapasitor tanpa tambahan beban, dan baterai dengan superkapasitor serta tambahan beban konstan. Ketika hanya menggunakan baterai, efisiensi cenderung stabil di angka 1,0% sepanjang waktu pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa baterai saja memiliki keterbatasan dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan beban dinamis.

Namun, saat superkapasitor ditambahkan tanpa beban tambahan, efisiensi meningkat secara signifikan. Pada awal pengujian, efisiensi masih sekitar 1,0%, namun secara bertahap naik hingga mencapai puncak sebesar 2,4% pada detik ke-60. Peningkatan ini menunjukkan bahwa superkapasitor berperan besar dalam membantu memenuhi kebutuhan energi, terutama saat terjadi lonjakan daya. Ketika sistem diuji dengan baterai dan superkapasitor serta tambahan

beban konstan, efisiensi juga mengalami peningkatan yang serupa, meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan kondisi tanpa beban tambahan. Efisiensi awal berada di sekitar 1,0%, kemudian naik tajam hingga 2,0% pada detik ke-25 dan mencapai puncak mendekati 2,2% pada detik ke-60 sebelum stabil. Penurunan efisiensi relatif ini disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan energi akibat tambahan beban, namun tetap mencerminkan kontribusi superkapasitor dalam menjaga kestabilan performa sistem.



Gambar 9. Efisiensi Sistem

Secara umum, hasil grafik menunjukkan bahwa penggunaan superkapasitor dapat meningkatkan efisiensi sistem secara signifikan, dengan efisiensi maksimum mencapai 2,4%, jauh lebih tinggi dibandingkan efisiensi baterai saja yang stagnan di 1,0%. Untuk memperkuat temuan ini, dilakukan analisis kuantitatif terhadap estimasi rugi energi dan efisiensi sistem menggunakan pendekatan konservatif sebesar 5% dari total energi input, merujuk pada nilai umum rugi daya pada sistem switching DC (3–10%). Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 4.

Table 3. Energi Hilang

Kondisi Sistem	Energi Total (J)	Energi Hilang (5%) (J)	Energi Efektif (J)	Efisiensi (%)
Hybrid Tanpa Beban	92000.76	4600.04	87400.72	95
Hybrid dengan Beban	147019.09	7350.95	139668.14	95

Tabel 4 menunjukkan bahwa baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban, sistem hybrid menunjukkan efisiensi konversi energi yang stabil di kisaran 95%. Hal ini menegaskan bahwa mekanisme switching otomatis dan pembagian daya antara baterai dan superkapasitor bekerja dengan baik dalam kedua kondisi. Pada kondisi tanpa beban, rugi energi sebesar 4,600.04 Joule terjadi dari total input 92,000.76 Joule, sedangkan pada kondisi dengan beban rugi energi meningkat menjadi 7,350.95 Joule dari total input 147,019.09 Joule. Meskipun nilai absolut rugi energi meningkat seiring bertambahnya beban, proporsi efisiensi sistem tetap terjaga, yang menandakan kestabilan desain elektronik dan sistem manajemen daya. Nilai-nilai ini juga memperkuat klaim bahwa integrasi superkapasitor tidak hanya bermanfaat dalam merespons beban puncak, tetapi juga mendukung efisiensi sistem secara menyeluruh dalam jangka waktu pengoperasian.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem manajemen energi hibrida berbasis switching otomatis yang mengintegrasikan baterai dan superkapasitor untuk kendaraan listrik. Sistem mampu mendeteksi lonjakan arus secara real-time dan mengaktifkan superkapasitor untuk merespons kebutuhan daya puncak. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan efisiensi energi dan distribusi beban yang lebih merata. Superkapasitor terbukti efektif dalam mengurangi beban baterai, meningkatkan energi total hingga lebih dari dua kali lipat dibandingkan sistem baterai saja, serta menjaga efisiensi konversi energi di atas 95% dalam berbagai kondisi beban. Dengan desain yang sederhana, respons cepat, dan implementasi mudah, sistem ini layak diterapkan pada kendaraan listrik ringan dan sistem tertanam berdaya rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Mamouri, T. Mesbahi, P. Bartholomeus, and T. Paul, "Design of a DC/DC power converter for li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles," *2020 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2020 - Proc.*, no. 1, 2020, doi: 10.1109/VPPC49601.2020.9330905.
- [2] M. Hasan and C. Hudaya, "Analisis Hybrid Energy Storage System (HESS) dengan Pengujian Kombinasi Baterai Lithium-Ion dan Superkapasitor pada Kendaraan Listrik," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 9, no. 1, pp. 95–106, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.24036/jtev.v9i1.122396>
- [3] D. Lemian and F. Bode, "Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 15, no. 15, 2022, doi: 10.3390/en15155683.
- [4] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. M. Tripathi, "Storage technologies for electric vehicles," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 7, no. 3, pp. 340–361, 2020, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.004.
- [5] Q. Zhang, L. Wang, G. Li, and Y. Liu, "A real-time energy management control strategy for battery and supercapacitor hybrid energy storage systems of pure electric vehicles," *J. Energy Storage*, vol. 31, no. May, p. 101721, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101721.
- [6] K. Wang, W. Wang, L. Wang, and L. Li, "An improved SOC control strategy for electric vehicle hybrid energy storage systems," *Energies*, vol. 13, no. 20, 2020, doi: 10.3390/en13205297.
- [7] Z. Li, A. Khajepour, and J. Song, "A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles," *Energy*, vol. 182, pp. 824–839, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.077.
- [8] A. K. M. Ahasan Habib *et al.*, "Energy-efficient system and charge balancing topology for electric vehicle application," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, no. PB, p. 102516, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102516.
- [9] H. Moghbelli and S. Sabzi, "Analysis and simulation of hybrid electric energy storage (HEES) systems for high power applications," *ASEE Annu. Conf. Expo. Conf. Proc.*, vol. 122nd ASEE, no. 122nd ASEE Annual Conference and Exposition: Making Value for Society, 2015, doi: 10.18260/p.23548.

- [10] L. Kouchachvili, W. Yaïci, and E. Entchev, “Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 374, no. June 2017, pp. 237–248, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.040.
- [11] T. Zhu, R. Lot, R. G. A. Wills, and X. Yan, “Sizing a battery-supercapacitor energy storage system with battery degradation consideration for high-performance electric vehicles,” *Energy*, vol. 208, p. 118336, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118336.
- [12] Y. Bai, J. Li, H. He, R. C. Dos Santos, and Q. Yang, “Optimal Design of a Hybrid Energy Storage System in a Plug-In Hybrid Electric Vehicle for Battery Lifetime Improvement,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 142148–142158, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3013596.
- [13] J. Zhao, Y. Gao, and A. F. Burke, “Performance testing of supercapacitors: Important issues and uncertainties,” *J. Power Sources*, vol. 363, pp. 327–340, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.07.066.