

Battery Management System dengan Fitur Adaptive Current Protection terhadap Suhu

SUHARININGSIH, FRIKO YULIANDA, EPYK SUNARNO, MOCHAMAD ARI BAGUS NUGROHO

Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia
Email: frikoyulianda@gmail.com

Received 30 Januari 2024 | *Revised* 25 Februari 2024 | *Accepted* 1 Maret 2024

ABSTRAK

*Ketika charging, baterai lithium-ion seringkali terjadi overhear dan overcharge. Begitu pun ketika discharging juga terjadi overdischarge, overhear dan overcurrent apabila tidak sesuai kurva karakteristik ($T=-8.75*I+60$). Hal tersebut menyebabkan kerusakan sel baterai sehingga mengurangi lifetime baterai. Penelitian ini dibuat sistem battery management system (BMS) yang memantau suhu dan arus melalui pembacaan sensor. Apabila suhu saat charging melebihi batas maksimum (45°C), sistem akan diproteksi dengan menonaktifkan MOSFET (switch). Proteksi ketika discharging terjadi jika suhu atau arus melebihi batas kurva atau safety factor (p). Dari hasil data charging, sistem mampu memproteksi overhear dengan error 0.43% dan menghitung nilai state of charge (SoC) dimana akan beralih ke mode discharge jika melebihi 85% dengan error 0.01%. Saat discharging sistem mampu memproteksi ketika besaran suhu dan atau arus melebihi safety factor yakni 60 dengan error 1.74% serta mampu beralih ke mode charge jika SoC kurang dari 40% dengan error 0.018%.*

Kata kunci: *Safety factor, Battery Management System, State of Charge*

ABSTRACT

*During charging, lithium-ion batteries risk overheating and overcharging, while discharging may lead to overdischarge, overheating, and overcurrent if deviating from the characteristic curve ($T=-8.75*I+60$), causing battery cell damage and reducing lifetime. This study introduces a Battery Management System (BMS) that monitors temperature and current using sensors. If the charging temperature surpasses the limit (45°C), the system protects by deactivating the MOSFET switch. Discharging protection triggers if temperature or current exceeds the curve or safety factor (p). Analyzing charging data, the system defends against overheating with a 0.43% error, calculates State of Charge (SoC), shifting to discharge mode if exceeding 85% with a 0.01% error. During discharging, the system safeguards against temperature and/or current surpassing the safety factor of 60 with a 1.74% error and switches to charge mode if SoC falls below 40% with a 0.18% error.*

Keywords: *Safety factor, Battery Management System, State of Charge*

1. PENDAHULUAN

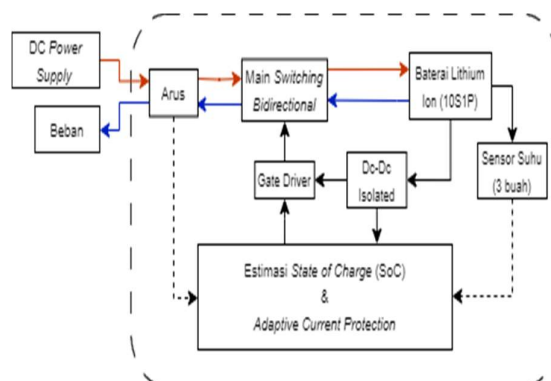
Peningkatan kebutuhan akan penyimpanan energi mengakibatkan permintaan terhadap baterai semakin meningkat **(Faqih, dkk, 2021)(Saputra, dkk, 2023)**. Baterai litium ion memiliki berbagai keunggulan seperti tingkat kerapatan energi yang tinggi, tidak berpengaruh oleh efek memori, dan kemudan dalam perawatannya (Faqih, dkk, 2021), **(Gismero, dkk, 2020)**. Sebagai penyimpan energi, baterai lithium ion yang tersusun secara seri dapat mengalami perbedaan karakteristik arus, tegangan, dan suhu dalam pengecasan maupun penggunaan **(Khaeruddin, dkk, 2021)**. Termasuk perbedaan suhu setiap sel yang mana memutuhkan sebuah sistem sebagai pusat kontrol baterai pack yang dikenal dengan istilah BMS untuk menjaga kapasitas baterai selama proses pengisian. Ketidakseimbangan tegangan sel juga menyebabkan salah satu sel mengalami *overcharge* dan *overdischarge* lebih cepat **(Farizy & Asfani, 2016)**. Ketika terjadi *overcharge*, baterai lithium ion kemungkinan bisa meledak sehingga akan sangat membahayakan manusia selaku pengguna. Tentu hal tersebut sangat perlu untuk dihindari dalam perihal pengisian. Kemudian ketika *overdischarge*, baterai lithium ion cenderung akan rusak akibat nilai dari kapasitas sel telah berkurang melewati batas kewajaran dan bahkan bernilai negatif yang artinya pola pembebanan muatan atau energinya telah berkebalikan. Hal ini dapat diatasi dengan sistem proteksi arus adaptif pada baterai ketika digunakan. Dengan demikian, permasalahan *overcharge* dan *overdischarge* setiap sel dalam baterai pack yang dihubungkan secara seri bisa diatasi dengan dua buah sistem yang akan dirancang yakni sistem *monitoring* dan proteksi arus adaptif yang mana keduanya merupakan bagian dari sebuah sistem utama yaitu BMS **(Khaeruddin, dkk, 2021)**.

Sistem *monitoring* dan proteksi arus adaptif yang dirancang akan diterapkan pada baterai pack dengan konfigurasi 10 seri 1 paralel. Kemudian sisttem *monitoring* dapat dilakukan dengan menghitung nilai estimasi *State of Charge* (SoC) guna membatasi pengisian dan penggunaan baterai pack dimana ketika mencapai nilai set point sistem akan mati sehingga terhindar dari *overcharge* dan *overdischarge*. Sistem proteksi arus adaptif dirancang untuk menjaga baterai dari keadaan yang menyebabkan baterai dalam kondisi berbahaya seperti *overcurrent* dan *overheating* pada setiap sel yang disebabkan oleh adanya hubung singkat atau kelebihan beban ketika proses *charge* atau *discharge* berlangsung. Sistem ini bekerja dengan menggunakan MOSFET sebagai *switching* untuk memutus aliran baterai ketika terjadi kondisi yang akan membahayakan baterai tersebut

Untuk merancang BMS, diperlukan sebuah metode yang nantinya akan diimplementasikan pada sistem *monitoring* dan proteksi arus adaptif pada baterai pack ketika proses pengisian atau pemakaian berlangsung. Metode yang akan digunakan yakni *coulomb counting*. Pada dasarnya, *coulomb counting* lebih diterapkan pada sistem *monitoring* yang nantinya diharapkan bisa membantu memperoleh data dalam menentukan SoC dari masing-masing sel baterai yang akan mempengaruhi kinerja *driver* mosfet. Parameter inputnya adalah nilai arus dan durasi waktu pengecasan yang akan diloah setiap satu detik untuk memeperoleh nilai SoC yang akurat.

2. METODE

Pengisian baterai pack dilakukan hingga nilai SoC mencapai nilai target dalam pada baterai dengan menggunakan arus konstan. Pada saat pengisian dilakukan pembacaan estimasi *State of Charge* untuk mengetahui tambahan ataupun berkurangnya jumlah muatan dalam baterai pack, sesuai sistem yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Battery Management System (BMS)

2.1 Baterai Lithium Ion

Baterai Li-ion atau lithium ion adalah salah satu tipe baterai yang saat ini populer karena memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan jenis baterai lainnya seperti Lead-Acid, NiCd dan Ni-MH. Baterai lithium ion memiliki keunggulan dalam fitur energi, kerapatan daya yang tinggi, durasi hidup yang tahan lama dan telah banyak digunakan pada peralatan elektronika yang tersedia di pasaran (**Stroe, dkk, 2018**). Baterai lithium ion harus dioperasikan pada area handal dan aman dengan memperhatikan faktor seperti *charge rate*, suhu, dan rentang tegangan. Jika melebihi batasan tersebut akan berdampak pada penurunannya kinerja baterai dan menyebabkan masalah pada keamanan seperti potensi ledakan baterai. Untuk memastikan operasi yang andal dari baterai lithium ion dan memprediksikan usia baterai yang tersisa selama digunakan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2. Baterai Lithium Ion INR18650-35E

Adapun kelebihan dan kekurangan dari baterai jenis lithium ion dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Kelebihan dan Kekurangan Baterai Lithium ion

Kelebihan	Kekurangan
Memiliki kapasitas yang tinggi, resistansi internal rendah, efisiensi muatan yang baik	Membutuhkan sirkuit pelindung untuk mencegah pelarian termal ketika terjadi peningkatan suhu
Siklus panjang dan memperpanjang umur simpan, bebas perawatan	Kerentanan akan kerusakan pada suhu tinggi dan saat disimpan pada tegangan tinggi
Sistem pengisian sederhana dan waktu pengisian yang cukup singkat	Proses pengisian lambat pada suhu beku ($<0^{\circ}C$, $<32^{\circ}F$)

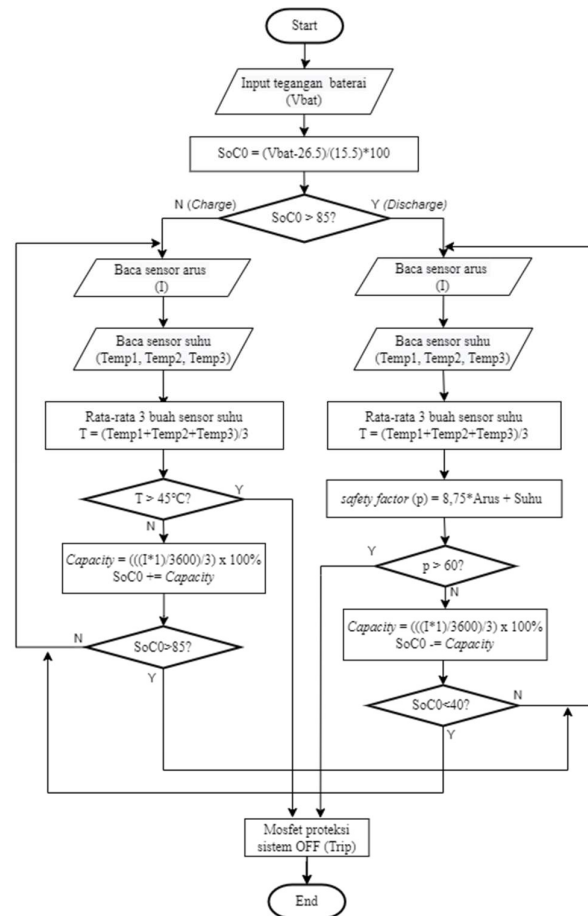
2.2 Battery Management System (BMS)

BMS adalah suatu sistem yang dapat mengelola pengisian dan pemakaian baterai sekaligus *monitoring* atas status unit baterai tersebut. Hal tersebut tentunya sangat penting dalam memastikan setiap sel di dalam baterai dioperasikan sesuai *Servis Oriented Architecture* (SOA). Pemantauan yang berkelanjutan untuk memeriksa parameter operasional utama selama proses pengisian dan pengosongan termasuk tegangan, arus, dan suhu (internal dan ambien). Biasanya BMS bertindak sebagai *input* ke dalam perangkat perlindungan yang memberikan peringatan atau memutuskan pasokan daya baterai saat salah parameternya melampaui batas yang ditentukan. Tujuan utama dari BMS adalah untuk melindungi sel atau baterai agar tidak mengalami kerusakan, meningkatkan masa pakai baterai, dan memastikan baterai tetap dalam kondisi yang sesuai dengan kebutuhan fungsional dari aplikasi yang sedang digunakan. Dengan demikian, BMS dapat menggabungkan satu atau lebih dari fungsi berikut: perlindungan sel, kontrol muatan, manajemen permintaan, penentuan SoC, penentuan *State of Health* (SoH), keseimbangan sel, komunikasi, dan lain-lain **(Wey & Jui, 2013)**.

Berdasarkan fungsi dari BMS, terdapat beberapa kategori yang diantaranya :

1. Fungsi *Monitor*
Modul monitoring mencakup sebagian besar fungsi yang diperlukan untuk *memonitor* baterai dalam proses *charging* ataupun *discharging*
2. Fungsi Manajemen
Fungsi ini meliputi beberapa hal yaitu:
 - a. Proteksi
Proteksi baterai adalah sistem elektronik yang dirancang untuk menjaga baterai dari kondisi yang berpotensi membahayakan baterai seperti *overcharging* dan *overdischarging* yang dapat terjadi akibat cell *unbalance*, *overcurrent* dan *overheating*. *Protector* lebih cenderung berfungsi mematikan sistem pengecasan ataupun pemakaian **(Farizy & Asfani, 2016)**.
 - b. Balancing
Melakukan penyeimbangan muatan setiap sel dalam baterai pack guna mempertahankan kesehatan dan umur baterai. Dalam hal ini terdapat kombinasi dari penggunaan sistem proteksi dengan kontrol utama yang dijumpai oleh LTC6804 dalam melakukan *master slave* yang nantinya akan bertukar informasi dan kemudian mengirimkan perintah ke mosfet selaku saklar yang telah dirangkai di setiap sel dengan sistem ini bekerja dengan membuang muatan baterai ke resistor atau sesama sel baterai ketika terdeteksi kondisi yang berpotensi membahayakan atau dengan memperkecil terjadinya *overcharging* dan *overdischarging* dengan melakukan balancing pada tiap sel baterai **(Ismail, dkk, 2022)**.
 - c. *Thermal Management*
Pengelolaan suhu sangat penting untuk baterai pack lithium-ion dikarenakan pada siklus pemakaian keamanan sangat bergantung pada suhu operasional (Omariba et al., 2019). Kenaikan dan penurunan suhu yang berlebihan memberikan ancaman bagi pengguna sehingga diperlukan pengelolaan suhu pada baterai pack.
3. Estimasi *State of Charge* (SoC)
State of Charge (SoC) merupakan ukuran perbandingan kapasitas baterai terakhir atau sisa dengan total dari kapasitasnya setelah penuh. Secara umum, SoC berbentuk nominal persentase yang 0% menunjukkan keadaan kosong dan 100% menunjukkan keadaan penuh **(Chandratre, dkk, 2011)(Rakhmawati, dkk, 2023)(Saji, dkk, 2019)**.

Terkait perencanaan BMS yang akan dilakukan penelitian dapat digambarkan oleh diagram alir berikut secara menyeluruh pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Diagram Alir *Battery Management System (BMS)*

Gambar 3 merupakan *flowchart* sistem keseluruhan yang akan menggambarkan jalannya sistem dari *supply* tegangan, menuju baterai melewati sistem utama ataupun dari baterai menuju beban juga demikian. Secara umum, menjelaskan sistem secara keseluruhan dimana proses pertama inialisasi sistem ketika dilakukan proses *charge* atau *discharge*. Apabila baterai sedang proses *charge*, maka akan dilakukan estimasi SoC guna memperoleh tingkat muatan baterai yang ditambahkan dengan muatan awal. Perhitungan sederhana dilakukan dengan menggunakan metode *coulomb counting* yang mana membutuhkan nilai arus yang mengalir ketika proses *charging* berlangsung (Movassagh, dkk, 2019). Dengan mengintegrasikan arus listrik yang mengalir ke baterai terhadap waktu maka dapat diperoleh muatan listrik total yang masuk atau keluar dari baterai (Ningrum et al., 2019). Apabila nilai SoC telah mencapai 85% maka akan dilakukan proteksi oleh mosfet sebagai *switching* untuk memutuskan aliran sistem. Kemudian untuk proses *discharging*, akan dilakukan pembacaan nilai arus dan suhu guna memperoleh nilai SoC yang berkurang dan menghitung nilai *safety factor*. Apabila nilai SoC mencapai 40% atau nilai *safety factor* telah melewati batas zona aman, maka proteksi akan menyala dengan menonaktifkan mosfet sebagai *switching* sistem utama.

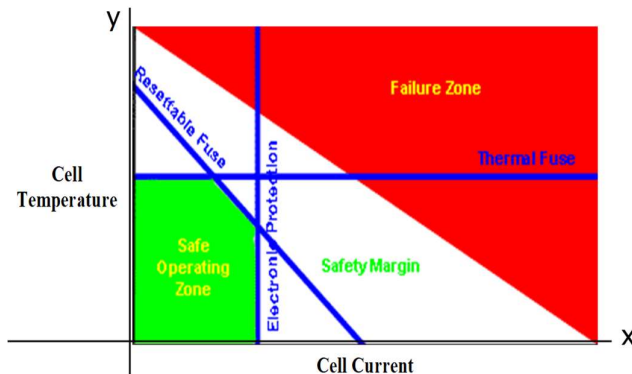
2.3 Adaptive Current Protection

Tujuan dari perlindungan sel adalah untuk menyediakan pengamatan dan kontrol yang diperlukan untuk melindungi sel baterai pada kondisi lingkungan atau operasional yang tidak

dapat ditoleransi dan untuk melindungi pengguna dari konsekuensi kegagalan baterai. Perlindungan sel dapat berada di luar baterai dan ini adalah salah satu fungsi utama BMS. Secara umum perlindungan sel harus mengatasi kejadian atau kondisi yang tidak diinginkan berikut ini:

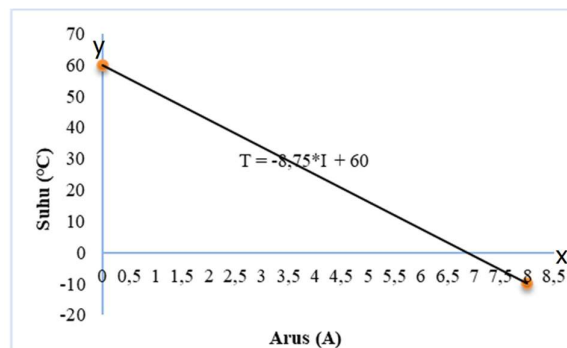
- a. *Overcurrent* dan *overvoltage* selama pengisian atau pemakaian.
- b. *Overdischarge* melebihi batas penggunaan
- c. *Overtemperature* yakni melebihi batas suhu sel

Diagram di bawah ini menggambarkan bagaimana sistem proteksi ditentukan untuk melindungi sel dari kondisi di luar toleransi dengan membatasi sel ke zona kerja yang aman. Area merah ditentukan oleh produsen sel sebagai area "tidak boleh digunakan" dimana sel kemungkinan besar akan mengalami kerusakan permanen. Secara teoritis sel dapat bekerja di salah satu ruang operasi yang tersisa, namun ini tidak memungkinkan margin kesalahan dan dalam praktiknya perangkat perlindungan membatasi kondisi operasi sel ke zona "aman" yang lebih kecil yang ditunjukkan di sini dalam warna hijau. Area putih antara zona aman dan zona bahaya mewakili margin keamanan desain. Berikut diagram terkait proteksi arus yang dapat ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Adaptive Current Protection (Adaptive Current Protection, n.d.)

Gambar 4 menunjukkan tiga skema proteksi yang menyediakan dua tingkat proteksi dari arus lebih dan suhu lebih yang mana kedua kondisi ideal yakni zona aman dan zona bahaya. Hal ini dilakukan pendekatan dengan memantau karakteristik baterai ketika proses *discharge* berlangsung sehingga jika dihubungkan dengan *datasheet* baterai diperoleh batasan sebagai berikut yang dapat ditunjukkan seperti Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Grafik Penurunan Arus Terhadap Kenaikan Suhu Berdasarkan Waktu Discharge

Pada kedua grafik menunjukkan hubungan arus *discharge* dengan suhu baterai yang naik seiring bertambahnya durasi *discharging*. Dari nilai parameter arus maksimum dan range suhu pada baterai ketika digunakan diperoleh nilai persamaan linear yang ditunjukkan pada Persamaan (1) yang menjadi batas atau safety factor antara zona aman dan zona bahaya dimana persamaannya yakni:

$$T = -8.75 \cdot I + 60 \quad (1)$$

$$\text{safety factor (p)} = 8.75 \cdot I + T$$

$$\text{safety factor (p)} = 8.75 \cdot \text{Arus (A)} + \text{Suhu (}^\circ\text{C)} \quad (2)$$

Nilai sumbu I menunjukkan nilai arus yang terbaca sedangkan nilai T menunjukkan pemcaan suhu baterai pack. Sehingga ini menjadi batas dari zona aman apabila nilai *safety factor* kurang dari 60 (pers. 2). Apabila perkalian arus dan suhu dengan persamaan melebihi nilai 60 maka, bisa dikatakan sudah memasuki zona berbahaya bagi baterai. Untuk penggunaan sensor arus adalah sensor arus ACS712-10A. Sensor ini digunakan untuk membaca arus pengisian baterai ketika kondisi *charging* dan *discharging*. Hasil pembacaan sensor arus akan digunakan untuk menghitung nilai proteksi. Pemilihan sensor arus ACS712-10A didasarkan pada pertimbangan nilai arus pengosongan baterai maksimal, yaitu 8A sehingga dipilih sensor arus 10A.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian *Adaptive Current Protection*

Pada penelitian ini, diperoleh hasil dilakukan proses *discharging* baterai pack untuk memperhatikan karakteristik arus *discharge* yang bernilai konstan. Selain itu, juga akan diperhatikan nilai suhu baterai pack dari waktu ke waktu selama proses *discharging*. Pengujian yang dilakukan yaitu menggabungkan pembacaan sensor arus, sensor suhu, dan proses *discharge* yang mana fitur *adaptive current protection* dapat berjalan dengan baik.

Pengujian dilakukan sebanyak dua kali dengan pengujian pertama yaitu pengujian fitur *adaptive current protection* pada kondisi aman dan yang kedua pengujian fitur *adaptive current protection* pada kondisi bahaya.

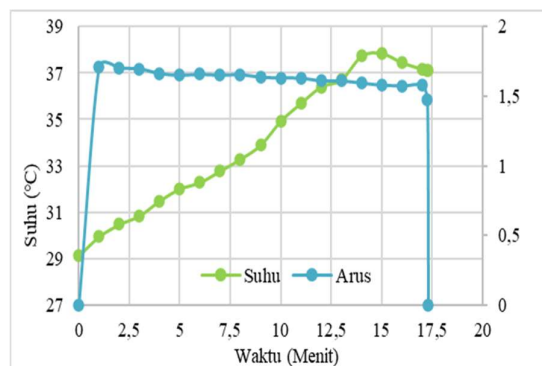
3.1.1 Pengujian *Adaptive Current Protection* Pada Zona Aman

Pada pengujian pertama digunakan beban resistor yang yaitu 23.3 ohm yang mana kondisi ini berdasarkan kapasitas baterai pack saat dilakukan pengujian dengan nilai tegangan 35.88 volt diperoleh nilai arusnya yaitu 1.63 Ampere. Untuk data pengujian selanjutnya yang diperoleh dengan ditunjukkan pada Tabel 12 berikut.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Fitur *Adaptive Current Protection* dengan Estimasi *State of Charge (SoC)*

Waktu (Menit)	Arus (A)	Suhu (°C)	SoC (%)	<i>Safety factor</i> (LCD)	<i>Safety factor</i>
0	0	29.128	60.516	29	29.128
2	1.702	30.477	58.115	45	45.370
4	1.664	31.493	55.523	46	46.053
6	1.659	32.285	53.264	47	46.801
8	1.656	33.288	50.849	48	47.778
10	1.633	34.931	48.543	49	49.220
12	1.612	36.402	46.276	51	50.507
14	1.596	37.728	43.849	52	51.693
16	1.575	37.438	41.646	51	51.219
17.25	1.476	37.11	40.182	50	50.025
17.30	0	37.11	39.989	37	37.110

Dari hasil yang diperoleh, dapat dilihat bahwa disaat nilai arus yang mengalir bernilai konstan sekitar 1.63 A dengan perubahan nilai naik turun sekitar 0.09 A. Kemudian perubahan suhu juga terjadi peningkatan dari kondisi awal 29.128 °C menjadi 37.11°C seiring berkurangnya kapasitas baterai dan perubahan durasi pemakaian sehingga dapat ditunjukkan karakteristik suhu dan arus ketika proses pemakaian dilakukan seperti pada Gambar 7 berikut.

**Gambar 6. Grafik Karakteristik Suhu dan Arus Ketika Proses *Discharging* Zona Aman**

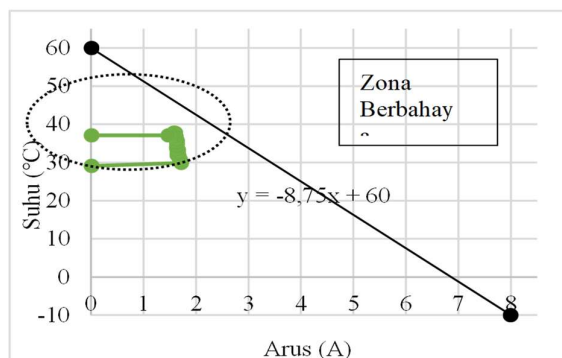
Pada grafik, terlihat nilai arus di akhir pengujian bernilai 0 A yang menunjukkan sistem mati dengan adanya perintah trip dari sistem kontrol baterai. Kemudian nilai suhu dan arus yang diperoleh apabila dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai *safety factor* nya yaitu:

$$\text{Safety factor (p)} = 8.75 \cdot (1.476) + (37.11)$$

$$\text{Safety factor (p)} = 50.025$$

$$\text{Safety factor (p)} < 60 \text{ (Kurang dari safety factor)}$$

Ketika perhitungan untuk mengetahui *safety factor* telah dilakukan diperoleh hasil aman yang artinya sistem mati bukan dikarenakan oleh perintah proteksi arus adaptif, melainkan adanya perintah mematikan sistem akibat nilai SoC telah melebihi nilai minimum untuk penggunaan. Maka dari itu, pin *output* mosfet yang berperan sebagai *switching* mati. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada grafik data hasil pengujian berikut dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Grafik Data Hasil Pengujian Fitur *Adaptive Current Protection* Zona Aman

Terlihat pada grafik tersebut nilai suhu nya naik secara perlahan tanpa ada pengaruh dari luar seperti solder atau peralatan lain yang menghasilkan panas kemudian setelah dilakukan perhitungan oleh sistem nilai arus dan suhu yang terukur dikategorikan berada pada zona aman. Itu membuktikan sistem mati karena memang telah mencapai kondisi *fulldischarge*.

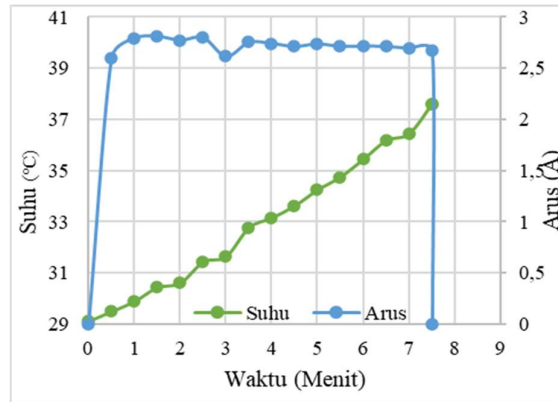
3.1.2 Pengujian *Adaptive Current Protection* Pada Zona Bahaya

Pada pengujian kedua digunakan beban resistor 13.8 ohm yang mana kondisi ini berdasarkan kapasitas baterai pack saat dilakukan pengujian dengan nilai tegangan 37.94 volt. Berdasarkan teori tentang arus apabila diketahui nilai tegangan dan tahanan maka bisa diperoleh nilai arusnya yaitu 2.75 Ampere. Untuk data pengujian selanjutnya yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Fitur *Adaptive Current Protection* dengan Estimasi *State of Charge* (SoC)

Waktu (Menit)	Arus (A)	Suhu (°C)	SoC (%)	Safety factor (LCD)	Safety factor (Teori)
0	0	29.113	73.871	29	29.113
0.5	2.601	29.493	60.581	52	52.252
1	2.792	29.889	59.355	54	54.319
1.5	2.812	30.43	58.581	55	55.035
2	2.773	30.603	57.742	55	54.867
2.5	2.798	31.431	57.161	56	55.914
3	2.614	31.636	56.516	55	54.509
3.5	2.753	32.766	55.677	57	56.855
4	2.741	33.147	55.419	57	57.131
4.5	2.712	33.617	54.452	57	57.347
5	2.737	34.24	53.806	58	58.189
5.5	2.713	34.744	53.097	58	58.483
6	2.715	35.433	52.452	59	59.189
6.5	2.712	36.169	51.806	60	59.899
7	2.693	36.432	51.097	60	59.996
7.5	2.669	37.601	50.581	61	60.955
7.51	0	37.601	50.581	38	37.601

Darib data yang diperoleh, dapat dilihat bahwa disaat nilai arus yang mengalir bernilai konstan sekitar 2.6 A dengan perubahan nilai naik turun sekitar 0.1 A. Kemudian perubahan suhu juga terjadi peningkatan dari kondisi awal 29.113 °C menjadi 37.601°C seiring berkurangnya kapasitas baterai dan durasi pemakaian sehingga dapat ditunjukkan karakteristik suhu dan arus ketika proses pemakaian dilakukan seperti pada Gambar 9 berikut.

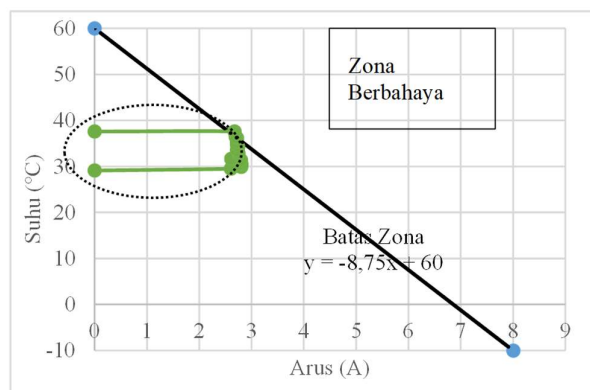


Gambar 8. Grafik Karakteristik Suhu dan Arus Ketika Proses *Discharging* Zona Bahaya

Pada grafik, terlihat nilai arus di akhir pengujian bernilai 0 Ampere yang meunjukkan sistem mati dengan adanya perintah trip dari sistem manajemen baterai. Kemudian nilai suhu dan arus yang diperoleh apabila dilakukan perhitungan :

$$Safety\ factor(p) = 8.75 \cdot (2.669) + (37.601) = 60.95475 \text{ artinya } p > 60 \text{ (Melebihi } safety\ factor)$$

Maka, pin *output* mosfet yang berperan sebagai *switching* akan mati. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada grafik data hasil pengujian berikut untuk memperhatikan pada arus dan suhu yang melebihi set point akan memproteksi sistem dengan ditandai nilai arus menjadi 0 A. Proteksi aktif setelah adanya nilai arus yang mengalir ketika nilai suhu melebihi suhu yang masih diperbolehkan atau menjadi titik kritis. Untuk grafik data hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 10 berikut.

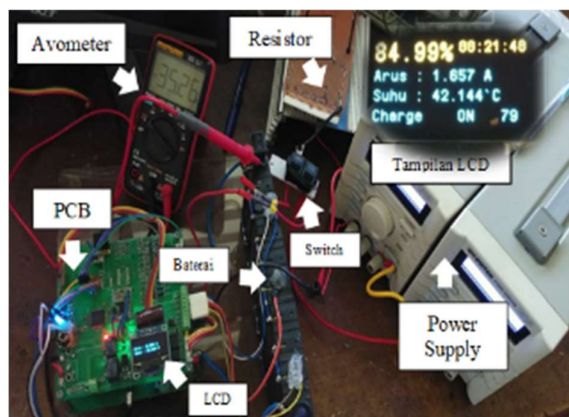


Gambar 9. Grafik Dta Hasil Pengujian dengan Estimasi SoC Zona Bahaya

3.2 Pengujian Proses *Charge* dan *Discharge* Baterai Pack dengan Batas Suhu Maksimum Ketika Proses *Charge*

Pengujian selanjutnya yakni dengan kondisi baterai pack siap pakai dengan nilai SoC awal diinputkan dalam bentuk tegangan lepas *charging* menggunakan keypad. Setiap proses peralihan yang terjadi baik dari proses *charge* ke proses *discharge* akan beralih otomatis

apabila nilai SoC pada kondisi penuh dalam hal ini dibatasi SoC penuh yakni 85% dan bernilai kosong yakni 40%. Berikut perlengkapan yang diperlukan ketika pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 12 berikut ini.



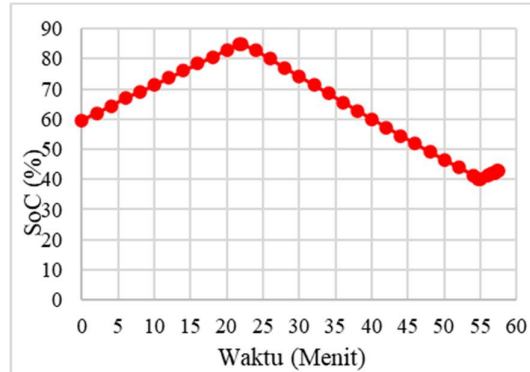
Gambar 10. Pengujian Integrasi *Charging* dan *Discharging* dengan Batasan Suhu Maksimum Ketika Proses *Charge*

Kemudian pengujian dilakukan dengan SoC awal dimulai dari 59.68%. Pengujian dimulai dengan proses *charging* dengan tegangan set point yaitu 42 volt, dan arus *charging* 1.5 ampere. Untuk beban yang digunakan ketika proses *discharge* yang beralih otomatis setelah SoC melebihi 85% yaitu beban resistor 18 ohm dengan arus yang mengalir sekitar 2.01 ampere. Berikut data hasil pengujian yang diperoleh dengan SoC awal yaitu 59.68% ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Integrasi *Charging* dan *Discharging* dengan Batasan Suhu Maksimum Ketika Proses *Charge*

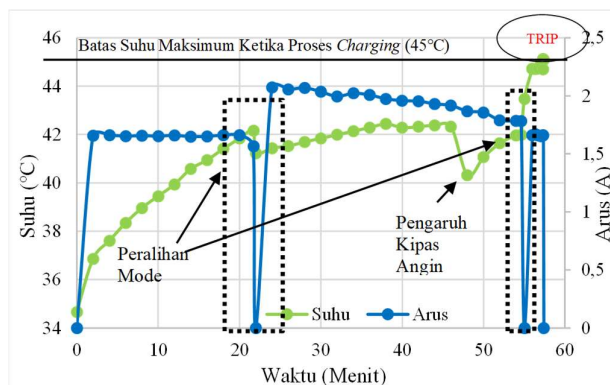
Waktu (Menit)	Arus (A)	Suhu (°C)	SoC (%)	Safety factor (LCD)	Mode
0	0	34.661	59.68	-	<i>Charge</i>
10	1.653	39.45	71.35	-	<i>Charge</i>
20	1.66	41.834	83.02	-	<i>Charge</i>
21.67	1.565	42.163	85.01	-	<i>Charge</i>
22	0	41.223	85	-	Peralihan
30	2.035	41.841	74.19	60	<i>Discharge</i>
40	1.958	42.285	60.03	58	<i>Discharge</i>
50	1.857	41.064	46.46	57	<i>Discharge</i>
54.6	1.783	41.988	39.97	58	<i>Discharge</i>
55	0	43.468	40	43	Peralihan
57.34	1.658	45.123	42.68	-	<i>Charge</i>
57.4	0	45.091	42.68	-	Proteksi

Ketika pengujian dilakukan pengambilan data dari kenaikan dan penurunan nilai SoC yang mana menunjukkan kondisi terjadinya perubahan kapasitas baterai termasuk peralihan otomatis mode *charging* ke mode *discharging* seperti pada Gambar 12 berikut.



Gambar 11. Grafik Estimasi *State of Charge* (SoC) Ketika Proses *Charge* dan *Discharge* Berlangsung

Pada awal proses *charge* yakni pada tabel data ke-1 hingga data ke-4 menunjukkan perubahan SoC baterai pack naik secara perlahan dari 60% secara linear. Dapat dilihat bahwa disaat nilai arus ketika proses *charge* yang mengalir bernilai konstans sekitar 1.63 A dengan perubahan nilai *error* sekitar 0.09 A. Pada suhu juga terjadi peningkatan dari kondisi awal 34.661°C menjadi 42.163°C. Kemudian setelah mencapai SoC diatas 85% (data ke-4), maka sistem akan secara otomatis berubah mode menuju *discharging* seperti pada data ke-5 dan ke-6 hingga data ke-10. Ketika berubah mode, suhu sempat mengalami penurunan dalam skala kecil kemudian naik kembali dari 41.223°C menjadi 43.468°C seiring dengan arus *discharging* yang mengalir yakni 1.9 A. Pada data ke-8 terdapat penurunan suhu diakibatkan adanya kipas angin yang menyala di sekitar baterai pack guna menurunkan suhu agar tidak terproteksi oleh *adaptive current protection* dan bisa menyelesaikan proses *discharge* sampai selesai yakni SoC minimum bernilai 40%. Setelah SoC bernilai dibawah 40%(data ke-9), mode berubah menjadi *charging* kembali guna memperhatikan proteksi suhu maksimum ketika *charging*. Suhu mengalami kenaikan dari 44.723°C menjadi 45.091°C. Apabila suhu melebihi batas maksimum 45°C seperti pada data ke-11, maka sistem akan mati seiring berkurangnya kapasitas baterai dan durasi pemakaian sehingga dapat ditunjukkan karakteristik suhu dan arus ketika proses pemakaian dilakukan seperti pada Gambar 13 berikut.



Gambar 12. Karakteristik Arus dan Suhu Ketika Proses *Charge* dan *Discharge* Berlangsung

Terlihat pada grafik tersebut nilai suhu nya naik secara perlahan tanpa ada pengaruh dari luar seperti solder atau peralatan lain yang menghasilkan panas kemudian setelah dilakukan pengolahan pada sistem terkait proteksi suhu maksimum ketika *charging* oleh sistem nilai suhu yang terukur dikategorikan berada pada zona bahaya atau melebihi batas yang diizinkan sehingga sangat perlu dilakukan pemutusan aliran sistem untuk sistem berhenti beroperasi.

3.3 Persentase *Error* Pada Setiap Batas Soc, Suhu, dan Arus Ketika Proses *Charge* dan *Discharge*

Pada proses pengambilan data ketika *charging*, diperoleh data SoC dan suhu maksimum sebagai indikator untuk beralih otomatis atau melakukan proteksi. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali dimana pada pengujian ketiga nilai suhu tidak melebihi ambang batas proteksi. Berikut persentase error dalam menentukan batasan SoC maksimum untuk sistem beralih menuju mode discharge serta batasan suhu maksimum ketika proses *charge* berlangsung pada Tabel 5 dan Tabel 6 berikut.

Tabel 5. Presentase *Error* Pada Batasan Suhu Ketika Proses *Charge*

Data Ke-	Suhu (°C)	Suhu Maksimum (°C)	<i>Error</i> (%)	Keterangan
1	45.123	45	0.27	Proteksi aktif
2	45.26	45	0.58	Proteksi aktif
3	42.163	45	0	Kondisi aman

Tabel 6. Presentase *Error* Pada Batasan SoC Maksimum Ketika Proses *Charge*

Data ke-	SoC (%)	SoC Maksimum (%)	<i>Error</i> (%)	Keterangan
1	84.99	85	0.01	Peralihan ke mode <i>discharge</i>
2	84.99	85	0.01	Peralihan ke mode <i>discharge</i>
3	85.01	85	0.01	Peralihan ke mode <i>discharge</i>

Pada data tersebut diperoleh persentase *error* rata-rata untuk pembacaan suhu yakni 0.43%. Sedangkan untuk perhitungan SoC diperoleh persentase *error* yakni 0.01%. Hal ini menunjukkan sistem dapat bekerja secara optimal ketika dilakukan proses *charge*.

Pada saat *discharging*, terdapat beberapa error dalam menentukan target SoC minimum sebagai indikator beralih otomatis dan pembacaan suhu dan atau arus yang diwakili dengan perhitungan *safety factor* dalam menentukan target dalam melakukan proteksi.

Tabel 7. Presentase *Error* Pada Batasan Perhitungan Nilai *Safety Fctor* Maksimum Ketika Proses *Discharge*

Data Ke-	<i>Safety factor</i>	<i>Safety factor</i> Maksimum	<i>Error</i> (%)	Keterangan
1	60.955	60	1.59	Proteksi aktif
2	61.377	60	2.30	Proteksi aktif
3	60.796	60	1.33	Proteksi aktif

Tabel 8. Presentase *Error* Pada Batasan SoC Minimum Ketika Proses *Discharge*

Data ke-	SoC (%)	SoC Minimum (%)	<i>Error</i> (%)	Keterangan
1	39.97	40	0.08	Peralihan ke mode <i>discharge</i>
2	39.99	40	0.02	Peralihan ke mode <i>discharge</i>
3	40,182	40	0.45	Peralihan ke mode <i>discharge</i>

Pada data tersebut diperoleh persentase error rata-rata untuk perhitungan safety factor diperoleh persentase error yakni 1.74%. Sedangkan untuk perhitungan SoC yakni 0.18%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan data yang diperoleh dari perencanaan dan pengujian integrasi serta mendapatkan analisis dari metode yang digunakan, baterai lithium ion dapat digunakan sebagai komponen penyimpanan energi dengan kerapatan energi yang tinggi. Nilai *safety factor* yang diperoleh yakni 60, dengan nilai titik kritis bergantung kepada arus yang mengalir dan kenaikan suhu baterai ketika baterai pack digunakan pada setiap kondisi yang berbeda. SoC minimum yang ditentukan ketika proses *discharge* yaitu 40% dan nilai maksimum yaitu 85%. Baterai pack dapat lebih terjaga dengan proteksi yang berhasil diterapkan berdasarkan perhitungan dan instruksi luaran dari estimasi SoC dan proteksi arus adaptif. Secara integrasi, sistem telah berhasil melakukan peralihan otomatis baik ketika baterai dalam proses pengisian (*charge*) kemudian akan beralih secara otomatis ke mode siap digunakan (*discharge*) dan begitu pun sebaliknya. Pada data tersebut diperoleh persentase error rata-rata untuk pembacaan suhu ketika proses *charge* yakni 0.43%. Sedangkan untuk perhitungan SoC diperoleh persentase error yakni 0.01%. Pada proses *discharge* diperoleh persentase error rata-rata untuk perhitungan SoC yakni 0.18%. Sedangkan untuk perhitungan *safety factor* diperoleh persentase error yakni 1.74%.

DAFTAR RUJUKAN

- Adaptive Current Protection*. (n.d.). <https://www.mpoweruk.com/protection.htm>
- Chandratre, A. A., Saini, H., Vemuri, S. H., & Srinivas, M. B. (2011). Battery management system for e-bike: A novel approach to measure crucial battery parameters for a VRLA battery. *India International Conference on Power Electronics, IICPE 2010*. <https://doi.org/10.1109/IICPE.2011.5728077>
- Faqih, M. R., Windarko, N. A., & Wahjono, E. (2021). Sistem Baterai Cell Balancing Pasif Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy Tipe Mamdani untuk Baterai Pack Lithium. *J-Innovation, 10*(2), 34–43. <https://doi.org/10.55600/jipa.v10i2.111>
- Farizy, A. F., & Asfani, D. A. (2016). Desain Sistem Monitoring State Of Charge Baterai Pada Charging Station Mobil Listrik Berbasis Fuzzy Logic Dengan Mempertimbangkan Temperature. *Jurnal Teknik ITS, 5*(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.16203>
- Gismero, A., Schaltz, E., & Stroe, D. I. (2020). Recursive state of charge and state of health estimation method for lithium-ion batteries based on coulomb counting and open circuit voltage. *Energies, 13*(7). <https://doi.org/10.3390/en13071811>
- Ismail, D., Anisah, M., Teknik Elektro, J., Studi Sarjana Terapan Teknik Elektro, P., Mekatronika, K., Negeri Sriwijaya, P., & Srijaya Negara Bukit Besar, J. (2022). Perancangan Sarung Tangan Menggunakan Sistem Discovery ID Berbasis Wireless Network untuk Mencegah Kehilangan Anggota dalam Pendakian. *Jurnal Teknika, 16*(x), 1–5.

- Khaeruddin, K., Wijono, W., & Hasanah, R. N. (2021). Desain Penyeimbangan Sel Baterai Lithium-Ion dengan Teknik Cell-to-Cell Charging Mode pada Battery Management System (BMS). *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, 8(1), 9–15. <https://doi.org/10.33019/jurnalecotipe.v8i1.2137>
- Movassagh, K., Raihan, S. A., & Balasingam, B. (2019). Performance analysis of coulomb counting approach for state of charge estimation. *2019 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2019*, 3(0), 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPEC47565.2019.9074781>
- Ningrum, P., Windarko, N. A., & Suhariningsih, S. (2019). Battery Management System (BMS) Dengan State Of Charge (SOC) Metode Modified Coulomb Counting. *INOVTEK - Seri Elektro*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.35314/ise.v1i1.1022>
- Omariba, Z. B., Zhang, L., & Sun, D. (2019). Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. *IEEE Access*, 7, 129335–129352. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940090>
- Rakhmawati, R., Sutedjo, S., Oktaviani, F. N., Irianto, I., Yanaratri, D. S., & Adila, A. F. (2023). Estimasi State of Charge pada Baterai Lead Acid menggunakan Elman Recurrent Neural Network. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 11(4), 864. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i4.864>
- Saji, D., Babu, P. S., & Ilango, K. (2019). SoC Estimation of Lithium Ion Battery Using Combined Coulomb Counting and Fuzzy Logic Method. *2019 4th IEEE International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication and Technology, RTEICT 2019 - Proceedings*, (pp. 948–952). <https://doi.org/10.1109/RTEICT46194.2019.9016956>
- Saputra, R. H., Mahmud, A., Marindra, J., Nursyeha, M. A., Kurnia, D., & Fariyani, A. (2023). Performance Degradation Evaluation of a Lithium- Ion Battery from Multiple SoC Measurements. *Jurnal Teknik Elektro (JTE)*, 14(2). <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jte/article/view/40226>
- Stroe, A. I., Knap, V., & Stroe, D. I. (2018). Comparison of lithium-ion battery performance at beginning-of-life and end-of-life. *Microelectronics Reliability*, 88–90(May), 1251–1255. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.077>
- Wey, C. L., & Jui, P. C. (2013). A unitized charging and discharging smart battery management system. *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2013 - Proceedings*, (pp. 903–909). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.6799924>