

RANCANG BANGUN PROTOTIPE BMS (*BATTERY MANAGEMENT SYSTEM*) UNTUK BATERAI LITHIUM-ION

Cantika Wila Mare, Almido Ginting, Wellem Galla, Hendrik Djahi

Teknik Elektro, Universitas Nusa Cendana
Jalan. Adisucipto, Kota Kupang, Indonesia
Cantikawm37@gmail.com_Cantika

ABSTRAK

Baterai lithium-ion merupakan perangkat penyimpan energi yang bekerja melalui konversi energi kimia menjadi energi listrik dan banyak digunakan pada perangkat elektronik, kendaraan listrik, serta sistem energi terbarukan karena kinerjanya yang stabil, ramah lingkungan, dan memiliki masa pakai panjang. Namun, baterai lithium-ion memiliki risiko seperti *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, *overheat*, dan ketidakseimbangan antar sel sehingga memerlukan sistem pengelolaan yang andal. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun prototipe *Battery Management System* (BMS) serta menguji kinerja sistem dalam melakukan *monitoring* parameter baterai, estimasi *State of Charge* (SoC) berbasis *coulomb counting*, *balancing*, dan proteksi. Metode yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan pengembangan sistem secara iteratif melalui tahapan studi pustaka, analisis kebutuhan, perancangan, pembuatan prototipe, serta pengujian dan evaluasi kinerja. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu bekerja dengan baik dengan rata-rata *error* pembacaan tegangan 0,754% dan arus 0,37%, serta seluruh fungsi *monitoring*, *balancing*, proteksi, dan estimasi SoC berjalan sesuai perancangan. Dengan demikian, prototipe BMS yang dikembangkan berhasil memenuhi tujuan penelitian.

Kata Kunci: *Battery Management System*, Baterai Lithium-Ion, *Monitoring* Baterai, *Balancing* Sel, *State Of Charge*, *Coulomb Counting*.

1. PENDAHULUAN

Baterai lithium-ion merupakan perangkat penyimpan energi yang bekerja melalui konversi energi kimia menjadi energi listrik dan banyak digunakan pada perangkat elektronik, kendaraan listrik, serta sistem energi terbarukan karena kinerjanya yang stabil, ramah lingkungan, dan memiliki masa pakai panjang [1][2]. Penggunaan baterai lithium-ion terus meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi energi terbarukan dan kendaraan listrik, yang ditunjukkan oleh pertumbuhan produksi dan pasar global baterai lithium-ion yang signifikan [2].

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, baterai lithium-ion memiliki risiko seperti *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, *overheat*, dan ketidakseimbangan antar sel yang dapat memperpendek umur pakai serta menimbulkan potensi kerusakan bahkan kebakaran [3]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengelolaan baterai atau *Battery Management System* (BMS) yang mampu melakukan *monitoring*, *balancing*, dan proteksi untuk menjaga baterai tetap beroperasi dalam batas aman [3].

BMS berfungsi untuk memantau parameter penting seperti tegangan, arus, suhu, serta keseimbangan antar sel baterai, dan secara otomatis melakukan tindakan perlindungan ketika terjadi kondisi abnormal seperti *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent* dan *overheat*. Dengan adanya BMS, kinerja baterai dapat menjadi lebih optimal, efisien, dan aman sehingga umur pakai baterai dapat diperpanjang [3].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan suatu perancangan dan pembangunan prototipe *Battery Management System* (BMS) yang terintegrasi dengan sistem *monitoring* parameter baterai secara *real-time*, estimasi *State of Charge* (SoC) berbasis metode *coulomb counting*, fitur *balancing* antar sel, serta mekanisme proteksi terhadap kondisi abnormal seperti *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, dan *overheat*. Pemilihan metode *coulomb counting* didasarkan pada kemampuannya dalam menghasilkan estimasi SoC yang lebih akurat selama baterai beroperasi dibandingkan metode konvensional.

Dengan pendekatan tersebut, diharapkan sistem BMS yang dikembangkan mampu meningkatkan keandalan, keamanan, dan efisiensi penggunaan baterai lithium-ion, khususnya pada aplikasi sistem penyimpanan energi seperti penerangan lampu jalan tenaga surya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terkait BMS telah dilakukan sebelumnya. Penelitian oleh Otong dkk. [4] menghasilkan modul BMS lithium-ion yang mampu melakukan *monitoring* dan proteksi baterai. Namun, estimasi SoC yang digunakan masih menggunakan metode *Open Circuit Voltage* (OCV), yang memiliki keterbatasan akurasi ketika baterai berada dalam kondisi pengisian maupun pengosongan.

Penelitian lain oleh Suhariningsih dkk. [5] mengembangkan sistem BMS yang mampu melakukan proteksi baterai secara adaptif berdasarkan parameter arus dan suhu. Meskipun demikian, sistem

yang dikembangkan belum dilengkapi dengan fitur *balancing* antar sel baterai, sehingga berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan yang dapat memengaruhi kinerja dan umur baterai.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa masih terdapat keterbatasan pada aspek estimasi SoC secara *real-time* dan penerapan *balancing* antar sel, sehingga diperlukan pengembangan sistem BMS yang lebih komprehensif.

2.2. Battery Management System (BMS)

Battery Management System (BMS) merupakan sistem elektronik yang berfungsi untuk mengelola penggunaan energi baterai secara optimal serta meminimalkan risiko kerusakan, khususnya pada baterai lithium-ion [3] [5]. Secara umum, BMS memiliki fungsi utama yaitu *monitoring*, manajemen, dan estimasi kondisi baterai.

Fungsi *monitoring* bertugas memantau parameter penting baterai secara *real-time* seperti tegangan, arus, dan suhu [6]. Sementara itu, fungsi manajemen meliputi proteksi dan *balancing*. Proteksi bertujuan melindungi baterai dari kondisi berbahaya seperti *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, dan *overheat* akibat *overcharge* atau *overdischarge* [3]. Pada baterai lithium-ion, batas tegangan aman umumnya berada pada sekitar 4,2 V untuk *overvoltage* dan 3,0 V untuk *undervoltage*. Selain itu, performa baterai juga dipengaruhi oleh suhu operasi, dengan rentang kerja optimal sekitar 20–50 °C [7].

Selain proteksi, BMS juga menerapkan *cell balancing* untuk menjaga keseragaman tegangan antar sel dalam rangkaian baterai sehingga kinerja dan umur pakai baterai dapat dipertahankan [8]. Metode *balancing* yang umum digunakan adalah *active balancing* dan *passive balancing*, di mana *passive balancing* lebih sederhana dan banyak digunakan pada sistem baterai berkapasitas kecil [4] [9]. Proses *balancing* biasanya diaktifkan ketika selisih tegangan antar sel berada pada rentang 10–50 mV, tergantung pada desain sistem BMS [10] [11].

BMS juga melakukan estimasi SoC, yaitu parameter yang menunjukkan persentase kapasitas baterai yang tersisa dibandingkan kapasitas totalnya [3] [5] [12]. Metode yang umum digunakan untuk estimasi SoC adalah *Open Circuit Voltage* (OCV) dan *coulomb counting*. Metode OCV menentukan SoC berdasarkan hubungan antara tegangan baterai pada kondisi *steady state* dengan kurva karakteristik baterai [13]. Sementara itu, metode *coulomb counting* menghitung perubahan SoC dengan mengintegrasikan arus yang masuk dan keluar dari baterai terhadap waktu [14].

2.3. Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion merupakan salah satu jenis baterai isi ulang (*rechargeable battery*) yang memiliki kinerja stabil dan lebih ramah lingkungan dibandingkan jenis baterai lainnya [1]. Baterai ini umumnya memiliki tegangan nominal sekitar 3,6–3,7

V per sel, tegangan pengisian maksimum 4,2 V, kapasitas 2000–3500 mAh, serta siklus pengisian ulang sekitar 300–500 kali tergantung merek dan kondisi pemakaian [15].

2.4. Arduino Nano

Arduino Nano merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328 yang memiliki 14 pin *input/output* digital (6 mendukung PWM) dan 8 pin *input* analog. Arduino Nano dapat diberi tegangan melalui pin VIN pada rentang 7–12 V agar regulator internal menghasilkan tegangan 5 V yang stabil, sehingga kinerja perangkat tetap optimal [16].

2.5. Arduino IDE

Arduino IDE merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode program (*sketch*) ke papan Arduino. Perangkat lunak ini menjadi platform utama dalam proses pemrograman mikrokontroler sehingga mempermudah pengembangan proyek berbasis Arduino [17].

2.6. Thermistor Negative Temperature Coefficient (NTC)

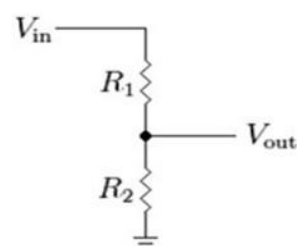
Thermistor NTC merupakan sensor suhu berbahan semikonduktor yang memiliki respon cepat dan ukuran kompak. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip penurunan resistansi saat suhu meningkat, sehingga perubahan suhu dapat dikonversi menjadi perubahan resistansi listrik yang kemudian dibaca oleh sistem elektronik sebagai data suhu [18].

2.7. Modul OLED SPI 0.96"

Modul OLED SPI 0.96" merupakan layar grafik beresolusi 128 × 64 piksel yang menggunakan teknologi *Organic Light-Emitting Diode* (OLED) sehingga menghasilkan tampilan dengan kontras tinggi. Modul ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui antarmuka *Serial Peripheral Interface* (SPI) menggunakan beberapa pin seperti GND, VCC, RES, D0, D1, CS, dan DC [19].

2.8. Sensor Tegangan Direct Current

Sensor tegangan DC digunakan untuk mengukur tegangan searah dengan prinsip pembagi tegangan, yaitu menurunkan tegangan sumber menggunakan dua resistor yang disusun seri sehingga tegangan keluaran dapat dibaca oleh sistem [20]. Prinsip dasar rangkaian pembagi tegangan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian pembagi tegangan

Berdasarkan rangkaian pada Gambar 1, besarnya tegangan *output* dapat ditentukan dengan persamaan berikut: [20]

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (1)$$

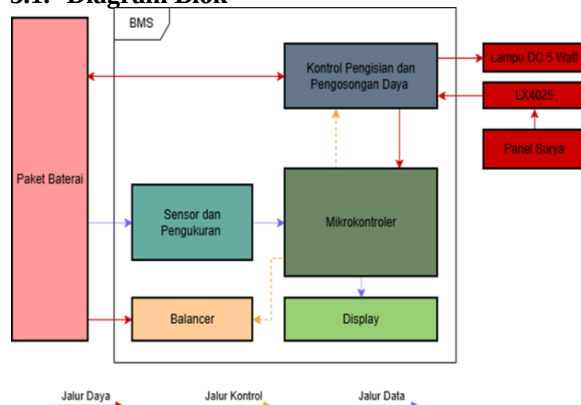
2.9. Sensor Arus INA219

INA219 merupakan sensor arus sisi tinggi (*high-side current sensor*) yang digunakan untuk mengukur arus dan tegangan melalui resistor *shunt* 0,1 Ω dengan ADC internal 12-bit. Sensor ini mampu mengukur tegangan hingga ± 320 mV atau setara dengan arus sekitar $\pm 3,2$ A, dengan resolusi pengukuran hingga sekitar 0,8 mA. Modul INA219 berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui antarmuka I²C menggunakan pin SCL dan SDA, sedangkan VIN+ dan VIN- berfungsi sebagai jalur arus melalui resistor *shunt* untuk proses pengukuran arus [21].

3. METODE PENELITIAN

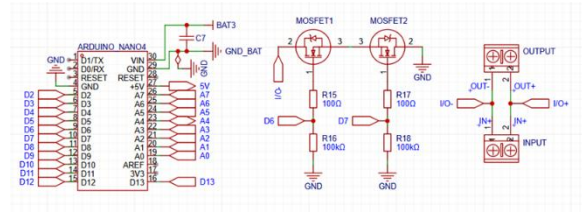
Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan sistem secara iteratif. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu studi pustaka, analisis kebutuhan, perancangan, pembuatan prototipe, serta pengujian dan evaluasi. Studi pustaka dilakukan untuk memahami prinsip kerja BMS dan teknologi yang digunakan melalui referensi jurnal, buku, dan dokumen terkait. Analisis kebutuhan bertujuan menentukan spesifikasi sistem, termasuk parameter pemantauan seperti tegangan, arus, dan suhu. Tahap perancangan meliputi desain *hardware* dan *software* sistem BMS. Selanjutnya dilakukan pembuatan prototipe berdasarkan rancangan yang telah dibuat. Tahap terakhir adalah pengujian dan evaluasi untuk memastikan sistem bekerja sesuai desain, termasuk pengujian proteksi *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, *overheat*, serta ketidakseimbangan sel pada baterai.

3.1. Diagram Blok



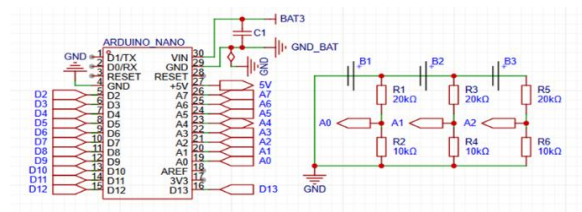
Gambar 2. Diagram blok keseluruhan sistem

Berdasarkan Gambar 2, BMS yang dirancang terdiri dari lima bagian utama, yaitu kontrol daya, sensor, mikrokontroler, *balancer*, dan *display*.



Gambar 3. Skematik rangkaian proteksi dan regulator daya

Berdasarkan rancangan rangkaian proteksi dan regulator daya yang ditunjukkan pada Gambar 3, kontrol pengisian/pengosongan daya pada sistem menggunakan MOSFET untuk mengatur aliran daya serta menjalankan proteksi terhadap kondisi *overvoltage* ketika tegangan $\geq 4,30$ V, *undervoltage* ketika tegangan sel $\leq 3,00$ V, *overcurrent* ketika arus $\geq 1,50$ A, serta *overheat* ketika suhu $\geq 45^\circ\text{C}$. Sistem juga menerapkan *fault lock* apabila kondisi *overcurrent* berlangsung lebih dari 3 detik.



Gambar 4. Skematik rangkaian pembagi tegangan

Berdasarkan rangkaian pembagi tegangan pada Gambar 4, sensor tegangan menggunakan metode pembagi tegangan dengan resistor 20 k Ω dan 10 k Ω , sehingga diperoleh:

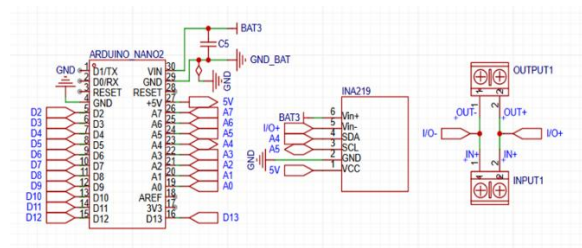
$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{10k\Omega}{20k\Omega + 10k\Omega} = V_{in} \times \frac{1}{3} \quad (3)$$

Dengan konfigurasi ini, tegangan maksimum 12,6 V dapat diturunkan menjadi sekitar 4,2 V sehingga berada dalam batas aman pembacaan ADC Arduino Nano. Nilai resistansi ekuivalen pada titik keluaran dapat dihitung menggunakan:

$$R_{th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

$$R_{th} = \frac{20k \cdot 10k}{30k} = 6,67 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

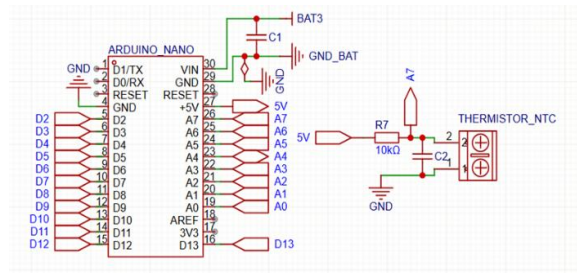


Gambar 5. Skematik rangkaian sensor arus INA219

Nilai resistansi tersebut masih sesuai dengan karakteristik *input* ADC, sehingga pembacaan

tegangan tetap stabil tanpa memerlukan rangkaian buffer tambahan. Selain itu, penggunaan nilai resistor yang seragam pada setiap kanal mempermudah proses kalibrasi dan meningkatkan konsistensi hasil pengukuran antar sel baterai.

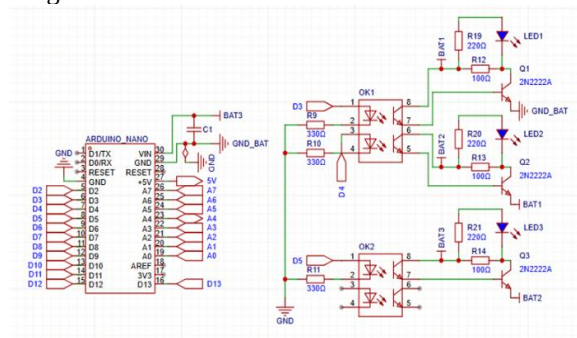
Rangkaian sensor arus pada Gambar 5 menggunakan modul INA219 dengan resistor shunt $0,1\ \Omega$ untuk mengukur arus secara digital melalui antarmuka I²C, sehingga meningkatkan akurasi dan memudahkan integrasi sistem. Pada konfigurasi ini, pin VIN+ dihubungkan ke sisi positif sumber baterai, sedangkan VIN- terhubung ke jalur menuju beban, sehingga arus masuk dan keluar baterai dapat dipantau secara langsung. Data hasil pengukuran kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk keperluan *monitoring*, proteksi *overcurrent*, serta perhitungan SoC.



Gambar 6. Skematik rangkaian sensor thermistor NTC 10k Ω

Rangkaian sensor suhu pada Gambar 6 menunjukkan bahwa pengukuran suhu menggunakan thermistor NTC 10 k Ω yang dikombinasikan dengan resistor tetap 10 k Ω sebagai pembagi tegangan, sehingga perubahan suhu menghasilkan perubahan tegangan yang dapat dibaca oleh ADC mikrokontroler.

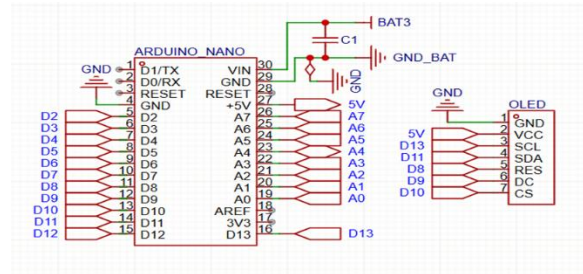
Sementara itu, bagian mikrokontroler menggunakan Arduino Nano sebagai pusat kendali yang memproses data sensor, menghitung SoC menggunakan metode *coulomb counting*, serta mengendalikan fungsi proteksi dan balancing sesuai dengan kondisi baterai.



Gambar 7. Skematik rangkaian *passive balancing*

Berdasarkan rangkaian pada Gambar 7, bagian *balancer* menerapkan metode *passive balancing* untuk menjaga keseragaman tegangan antar sel. Rangkaian ini menggunakan optokopler LTV-827 dan transistor 2N2222 sebagai saklar. Dengan resistor *input* sebesar 330 Ω , arus LED pada optokopler dihitung sekitar 11,5 mA, yang masih berada dalam batas aman pin

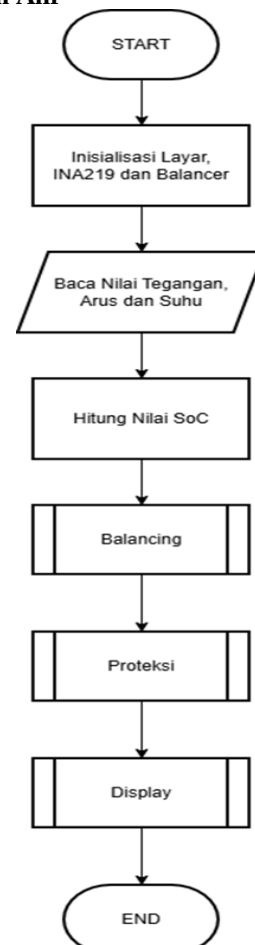
mikrokontroler [16]. Arus ini menghasilkan arus kolektor optokopler yang kemudian digunakan sebagai arus basis transistor 2N2222 untuk mengendalikan proses penyeimbangan. Konfigurasi ini menghasilkan arus penyeimbang sekitar 44 mA, dengan daya disipasi resistor sebesar 0,16 W, sehingga rangkaian dapat beroperasi dalam batas aman komponen.



Gambar 8. Skematik rangkaian *display* modul OLED SPI

Berdasarkan Gambar 8, bagian *display* menggunakan modul OLED 0,96 inci beresolusi 128×64 berbasis SPI untuk menampilkan parameter baterai secara *real-time*, seperti tegangan, arus, suhu, SoC, serta status sistem.

3.2. Diagram Alir

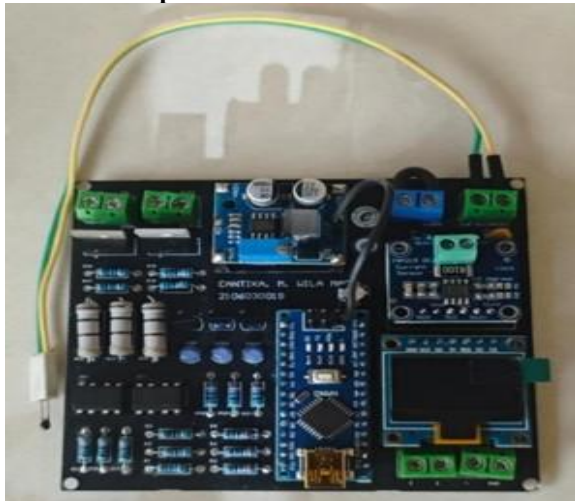


Gambar 9. Diagram alir proses kerja sistem BMS

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 9, proses kerja BMS diawali dengan inisialisasi sistem untuk menyiapkan perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian dilanjutkan dengan pembacaan sensor berupa tegangan sel, arus, dan suhu baterai sebagai parameter utama. Data hasil pembacaan digunakan untuk menghitung SoC, selanjutnya sistem menjalankan proses *balancing* untuk mengurangi ketidakseimbangan tegangan antar sel sesuai ambang batas. Sistem kemudian mengevaluasi kondisi baterai berdasarkan parameter yang diperoleh untuk menentukan status keamanan, yang digunakan sebagai dasar pengendalian MOSFET *charge* dan *discharge* sebagai bentuk proteksi. Tahap akhir adalah menampilkan informasi kondisi baterai dan status sistem secara *real-time* melalui modul *display*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Implementasi Sistem



Gambar 10. Tampilan implementasi rangkaian BMS

Pada Gambar 10 ditunjukkan hasil implementasi rangkaian sistem dalam bentuk *Printed Circuit Board* (PCB) yang telah dirakit. Pada tahap ini, seluruh komponen dan jalur koneksi telah dipasang secara terintegrasi sesuai dengan kebutuhan sistem, sehingga kinerja rangkaian dapat berjalan dengan optimal.

4.2. Pengujian Rangkaian Pembagi Tegangan

Pengujian ini bertujuan mengukur tegangan pada baterai yang disusun seri 3 sel melalui pembacaan pembagi tegangan oleh Arduino Nano, yang kemudian dikonversi menjadi nilai tegangan aktual. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pada setiap sel baterai.

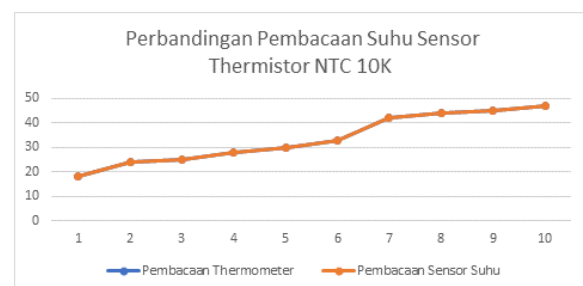
Tabel 1. Rata-rata hasil pengujian pembacaan tegangan sensor terhadap multimeter

Sel Baterai	Tegangan Referensi (V)	Tegangan Sensor (V)	Presentase Error
1	3,767	3,779	0,28%
2	3,511	3,540	0,83%
3	3,694	3,737	1,16%
Rata-Rata Presentase Error			0,75%

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata persentase *error* yang diperoleh sebesar 0,754%, yang menunjukkan bahwa sensor tegangan memiliki tingkat akurasi yang baik. Nilai *error* rata-rata terbesar terjadi pada sel baterai ke-3, yaitu sekitar 1,16%, dibandingkan dengan sel lainnya. Hal ini dipengaruhi oleh akumulasi *error* pada rangkaian pembagi tegangan dalam konfigurasi seri. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengukuran tegangan masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima.

4.3. Pengujian Sensor Suhu

Pengujian sensor suhu menggunakan thermistor NTC 10 k Ω dilakukan dengan variasi suhu, kemudian tegangan keluaran dikonversi menjadi suhu menggunakan persamaan Steinhart-Hart dan dibandingkan dengan termometer referensi untuk mengetahui akurasinya.



Gambar 11. Perbandingan pengujian sensor thermistor NTC 10K

Grafik pada Gambar 11 menunjukkan bahwa keluaran sensor thermistor NTC 10 k Ω meningkat seiring kenaikan suhu referensi secara konsisten, dengan karakteristik yang mendekati linear.

4.4. Pengujian Sensor Arus

Pengujian sensor arus dilakukan melalui 10 kali percobaan dengan memberikan variasi arus pada rangkaian. Hasil pembacaan sensor kemudian dibandingkan dengan pengukuran menggunakan multimeter sebagai acuan.

Tabel 2. Hasil pengujian pembacaan arus sensor terhadap multimeter

Pengujian Ke-	Hasil Pembacaan Multimeter (A)	Hasil Pembacaan Sensor (A)	Presentase Error
1	0,103	0,103	0,00%
2	0,104	0,104	0,00%
3	0,104	0,105	0,96%
4	0,105	0,105	0,00%
5	0,105	0,106	0,95%
6	0,11	0,11	0,00%
7	0,11	0,111	0,91%
8	0,112	0,112	0,00%
9	0,113	0,113	0,00%
10	0,113	0,114	0,88%
Rata-Rata Presentase Error			0,37%

Berdasarkan Tabel 2, rata-rata persentase *error* pembacaan arus oleh sensor INA219 sebesar 0,37%, dengan *error* maksimum 0,96% dan minimum 0%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengukuran arus oleh sensor telah mendekati nilai acuan dari multimeter.

4.5. Pengujian Sistem *Balancing*

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan logika *balancing* pada sistem BMS bekerja sesuai ketentuan. *Balancing* aktif saat tegangan sel $\geq 4,00$ V dengan selisih antar sel ≥ 50 mV atau saat salah satu sel $> 4,20$ V, dan akan berhenti ketika tegangan sel $< 4,00$ V atau selisih antar sel < 25 mV, di mana selisih antar sel merupakan perbedaan tegangan masing-masing sel terhadap sel dengan tegangan paling rendah.

Tabel 3. Pengujian skenario *balancing*

Skenario	Kondisi Tegangan Sel	Status <i>Balancing</i> yang Diharapkan	Hasil yang Diperoleh
1	Semua sel $< 4,00$ V	Tidak aktif	Sesuai

Skenario	Kondisi Tegangan Sel	Status <i>Balancing</i> yang Diharapkan	Hasil yang Diperoleh
2	Salah satu sel $\geq 4,00$ V dan $\Delta V \geq 50$ mV	Aktif	Sesuai
3	$\Delta V > 25$ mV dan tegangan sel $< 4,00$ V	Tidak aktif	Sesuai
4	Salah satu sel $> 4,20$ V	Aktif	Sesuai

Berdasarkan Tabel 3, sistem *balancing* menunjukkan respons yang sesuai pada setiap skenario pengujian, sehingga logika *balancing* dapat berjalan dengan baik.

4.6. Pengujian Sistem Proteksi

Pengujian sistem proteksi dilakukan untuk memastikan BMS mampu melindungi baterai dari kondisi operasi yang tidak aman. Pengujian dilakukan dengan mengaktifkan setiap fungsi proteksi saat parameter melebihi batas aman. Pengujian meliputi proteksi *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, dan *overheat*.

Tabel 4. Hasil pengujian sistem proteksi

Jenis Proteksi	Kondisi Uji	Respons Sistem	Hasil
<i>Overvoltage</i>	Tegangan sel $\geq 4,30$ V	MOSFET <i>charge off</i> , status "HIGH"	Berhasil
	Tegangan sel $\leq 4,00$ V	MOSFET <i>charge on</i> , status "Normal"	Berhasil
Jenis Proteksi	Kondisi Uji	Respons Sistem	Hasil
<i>Undervoltage</i>	Tegangan sel $\leq 3,00$ V	MOSFET <i>discharge off</i> , status "LOW"	Berhasil
	Tegangan sel $\geq 3,20$ V	MOSFET <i>discharge on</i> , status "Normal"	Berhasil
<i>Overcurrent</i>	Arus $\geq 1,50$ A (< 3 detik)	MOSFET <i>off</i> , status "AMP"	Berhasil
	Arus $\geq 1,50$ A (≥ 3 detik)	MOSFET <i>off</i> , status "SHORT"	Berhasil
	Arus $\leq 1,25$ A	MOSFET <i>on</i> , status "Normal"	Berhasil
<i>Overheat</i>	Suhu $\geq 45^{\circ}\text{C}$	MOSFET <i>off</i> , status "HOT", <i>Balancing off</i>	Berhasil
	Suhu $\leq 40^{\circ}\text{C}$	MOSFET <i>on</i> , status "Normal"	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4, seluruh fungsi proteksi yang meliputi *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, dan *overheat* menunjukkan respons yang sesuai dengan kondisi yang diuji. Sistem mampu memutus jalur daya dengan menonaktifkan MOSFET saat parameter melebihi batas aman, serta mengaktifkannya kembali ketika kondisi kembali normal. Pada proteksi *overcurrent*, sistem juga berhasil membedakan kondisi arus lebih sesaat dan berkelanjutan melalui indikator status "AMP" dan "SHORT". Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem proteksi bekerja sesuai dengan logika dan ambang batas yang telah dirancang.

4.7. Pengujian *State of Charge* (SoC)

Pengujian SoC berbasis *coulomb counting* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menghitung perubahan kapasitas baterai berdasarkan integrasi arus terhadap waktu. Pengujian dilakukan pada kondisi pengisian, tanpa arus (*standby*), dan pengosongan untuk memastikan nilai

SoC berubah secara konsisten sesuai kondisi operasi baterai.

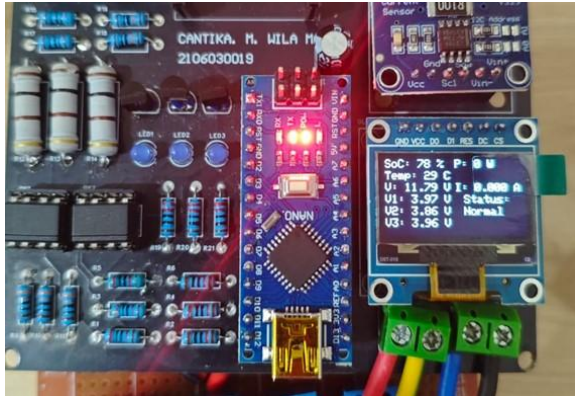
Tabel 5. Evaluasi perilaku sistem SoC

Skenario	Perilaku Diharapkan	Hasil Aktual	Status
<i>Charging</i>	SoC meningkat	SoC meningkat 4% per 30 menit	Valid
<i>Standby</i>	SoC stabil	SoC stabil	Valid
<i>Discharge</i>	SoC menurun	SoC menurun	Valid
<i>Charger dilepas</i>	Tegangan turun, SoC tetap	Sesuai	Valid

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel, metode *coulomb counting* mampu memperkirakan nilai SoC secara konsisten terhadap durasi pengisian dan pengosongan baterai. Nilai SoC meningkat sekitar 4% setiap 30 menit selama pengisian dan tetap stabil pada kondisi tanpa arus. Dengan demikian, metode ini layak digunakan sebagai estimasi utama SoC pada sistem BMS.

4.8. Pengujian Sistem Monitoring

Pengujian sistem *monitoring* dilakukan untuk memastikan tampilan OLED 0,96 inci mampu menampilkan parameter sistem secara lengkap dan akurat. Parameter yang ditampilkan meliputi tegangan tiap sel, SoC, tegangan total baterai, suhu, arus, daya, serta status proteksi.



Gambar 12. Tampilan layar OLED Pada sistem BMS

Berdasarkan Gambar 12, seluruh parameter sistem BMS ditampilkan dengan jelas dan mudah dibaca. Informasi ditampilkan dalam bentuk SoC (%), suhu (°C), tegangan total (V), tegangan tiap sel (V1–V3), arus (A), daya (W), serta status sistem secara *real-time*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, prototipe BMS yang dikembangkan berhasil direalisasikan dan mampu menjalankan fungsi *monitoring*, *balancing*, serta proteksi pada baterai *lithium-ion* dengan baik. Sistem dapat menampilkan parameter utama baterai secara *real-time* dengan akurasi pembacaan yang memadai, sementara metode *Coulomb Counting* mampu merepresentasikan perubahan SoC secara konsisten sesuai kondisi operasi. Fungsi *passive balancing* serta proteksi terhadap kondisi *overvoltage*, *undervoltage*, *overcurrent*, dan *overheat* juga bekerja sesuai batas yang ditetapkan, sehingga sistem telah memenuhi tujuan penelitian. Untuk pengembangan lebih lanjut, akurasi pengukuran tegangan dapat ditingkatkan menggunakan metode ADC diferensial guna meminimalkan *noise* dan perbedaan referensi, serta estimasi SoC dapat diperbaiki melalui kalibrasi berkala berbasis metode *Open Circuit Voltage* (OCV) saat baterai dalam kondisi *idle* untuk mengurangi akumulasi error jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. N. Hilal, S. Pinandita, and E. Sadewa, "Penerapan BMS pada Baterai Lithium-ion sebagai Balancing Pengisian dari Panel Surya pada Siswa SMKN 1 Tenganan," *Muria Jurnal Layanan Masyarakat*, vol. 6, no. 1, pp. 61–64, Mar. 2024, [Online]. Available: <http://jurnal.umk.ac.id/index.php>
- [2] F. A. Perdana, "Baterai Lithium," *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*, vol. 9, no. 2, p. 113, Apr. 2021, doi: 10.20961/inkui.v9i2.50082.
- [3] Y. N. Hilal, P. Muliandhi, and E. N. Ardina, "Analisa Balancing BMS (Battery Management System) Pada Pengisian Baterai Lithium-Ion Tipe INR 18650 Dengan Metode Cut Off," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 14, no. 2, Nov. 2023.
- [4] M. Oton, D. Aribowo, and R. Wahyudi, "Perancangan Modular Baterai Lithium Ion (Li-Ion) Untuk Beban Lampu LED," *Jurnal Ilmiah Setrum Article In Press*, vol. 8, no. 2, pp. 260–273, Dec. 2021.
- [5] Suharningsih, F. Yulianda, E. Sunarno, and M. A. B. Nugroho, "Battery Management System dengan Fitur Adaptive Current Protection terhadap Suhu," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 12, no. 2, pp. 498–512, Apr. 2024, doi: 10.26760/elkomika.v12i2.498.
- [6] J. P. Siahaan, S. Handoko, and Darjat, "Perancangan Sistem Monitoring Dan Manajemen Baterai Dengan Metode Switching Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," *Transient*, vol. 10, no. 1, pp. 33–41, Mar. 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [7] S. Lv, X. Wang, W. Lu, J. Zhang, and H. Ni, "The Influence of Temperature on the Capacity of Lithium Ion Batteries with Different Anodes," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 1, p. 60, Dec. 2021, doi: 10.3390/en15010060.
- [8] A. G. Ramadhan, N. Hendrarini, and P. D. Ibnugraha, "Pemodelan Baterai Manajemen Sistem (BMS) Balancing Pada Baterai Li-ion," *e-Proceeding of Applied Science*, vol. 10, no. 3, pp. 752–758, Jun. 2024.
- [9] K. Khaeruddin, W. Wijono, and R. N. Hasanah, "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)*, vol. 8, no. 1, pp. 9–15, Apr. 2021, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v8i1.2137.
- [10] J. Liu, "Why the cell balancing in bms is necessary for your battery?," Moko Energy. Accessed: Jan. 08, 2026. [Online]. Available: <https://mokoenergy.com/cell-balancing-in-bms/>
- [11] A. Pamulu, D. Lelono, and A. Frisky, "Rancang Bangun Penyeimbang Tegangan Aktif Sel Baterai Lithium-Ion Berbasis Buck-Boost Converter," Universitas Gadj Mada, Yogyakarta, 2025.
- [12] R. Rakhamawati, Sutedjo, F. N. Oktaviani, Irianto, D. S. Yanaratri, and A. F. Adila, "Estimasi State of Charge pada Baterai Lead Acid menggunakan Elman Recurrent Neural

- Network,” *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 11, no. 4, pp. 864–878, Oct. 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11i4.864.
- [13] X. Wang, R. Gong, Z. Yang, and L. Kang, “State of Charge Estimation of Lithium-ion Batteries Based on Online OCV Curve Construction,” *Batteries*, vol. 10, no. 6, p. 208, Jun. 2024, doi: 10.3390/batteries10060208.
- [14] K. H. Wu, M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, P. Shrivastava, and A. Stojcevski, “Lithium-ion battery state of charge estimation using improved coulomb counting method with adaptive error correction,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 239, no. 2–3, pp. 693–705, Feb. 2025, doi: 10.1177/09544070231210562.
- [15] Panasonic, “Panasonic NCR18650B 3400mAh (Green) DataSheet.” Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.shoptronica.com/files/Panasonic-NCR18650.pdf>
- [16] Arduino, “Arduino Nano Datasheet,” May 2025. Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>
- [17] T. A. Fauzan, R. Arifuddin, and R. D. J. K. Sari, “Sistem Manajemen Baterai Pada Peralatan Catu Daya Di Equipment Room Stasiun Manggarai Dengan Aplikasi Blynk Berbasis Esp8266,” *Uranus : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika*, vol. 2, no. 3, pp. 174–195, Sep. 2024, doi: 10.61132/uranus.v2i3.270.
- [18] M. V. Nikolic, Z. Z. Vasiljevic, and M. P. Dojcinovic, “NTC Thermistor Ferrite Composite for Temperature Sensing with Reduced Humidity Influence,” in *2024 47th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, IEEE, May 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISSE61612.2024.10604149.
- [19] G. W. Nugroho and R. Effendi, “Rancang Bangun Sistem Pengukuran Luas Permukaan Kulit Menggunakan Konveyor dan Sensor Optik Berbasis Arduino,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 1, Apr. 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i1.82219.
- [20] T. Sutikno and T. Wahono, *Rangkaian Listrik 1*. Yogyakarta: Institute of Advanced Engineering and Science (IAES), 2021.
- [21] J. Lambert, R. Monahan, and K. Casey, “Power Consumption Profiling of a Lightweight Development Board: Sensing with the INA219 and Teensy 4.0 Microcontroller,” *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 775, Mar. 2021, doi: 10.3390/electronics10070775.