



TUGAS AKHIR (EE33410)

**RANCANG BANGUN SISTEM *SMART CHARGE*
SWITCHING BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR
PZEM**

Ahmad Nawwal Izzul Khaq
NRP. 0422030039

Dosen Pembimbing
Hendro Agus Widodo, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D3 TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (EE33410)

**RANCANG BANGUN SISTEM SMART CHARGE
SWITCHING BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR
PZEM**

Ahmad Nawwal Izzul Khaq

NRP. 0422030039

Dosen Pembimbing

Hendro Agus Widodo, S.ST., M.T.

PROGRAM STUDI D3 TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL

JURUSAN TEKNIK KELISTRIKAN KAPAL

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

SURABAYA

2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN SISTEM *SMART CHARGE SWITCHING* BERBASIS ESP32
MENGUNAKAN SENSOR PZEM

Disusun Oleh:
Ahmad Nawwal Izzul Khaq
0422030039

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D3 Teknik Kelistrikan Kapal
Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 15 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Ryan Yudha Adhitya, S.ST., M.T.
2. Ir. Joessianto Eko Poetro, M.T.
3. Hendro Agus Widodo, S.ST., M.T.
4. Anggarjuna Puncak Pujiputra, S.T., M.T.

NIDN/NUPTK

(0016069101)
(0019116403)
(0013076902)
(6535772673130252)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Hendro Agus Widodo, S.ST., M.T.

NIDN

(0013076902)

Tanda Tangan

(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,



Isa Rachman, S.T., M.T.
NIP. 198008162008121001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,

Li Munadhif, S.ST., M.T.
NIP. 199107102018031001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

	<u>PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT</u>	No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	--	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Ahmad Nawwal Izzul Khaq

NRP : 0422030039

Jurusan/Prodi : Teknik Kelistrikan Kapal/D3 Teknik Kelistrikan Kapal

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**RANCANG BANGUN SISTEM *SMART CHARGE SWITCHING*
BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR PZEM**

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 20 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



(Ahmad Nawwal Izzul Khaq)
NRP. 0422030039

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul “Rancang Bangun Sistem *Smart Charge Switching* Berbasis ESP32 Menggunakan Sensor PZEM” sebagai salah satu syarat penyelesaian studi pada Program Diploma 3 Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Sebagai bentuk penghargaan, penulis dengan tulus menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Kedua orang tuaku tercinta, Alm Bapak Mustofa dan Ibu Sampini, adalah sosok yang selalu berusaha keras agar anak bungsunya dapat menempuh pendidikan setinggi mungkin. Beliau yang dengan penuh kasih sayang selalu mendoakan, mendukung, serta memberikan semangat dan nasihat berharga. Bapak dan Ibu adalah sumber kekuatan sekaligus pengingat yang paling berharga.
2. Kedua kakak kandung perempuan, Indah Musyafaroh dan Muzzaroh selalu memberikan perhatian, dukungan, semangat, nasihat, dan motivasi kepada adiknya ini. Terima kasih karena telah menjadi tempat berbagi cerita dan selalu memberikan dorongan ketika penulis menghadapi berbagai kesulitan selama proses pendidikan dan penyelesaian tugas akhir ini.
3. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Bapak Isa Rachman, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal.
5. Bapak Ii Munadhif, S.ST., M.T. selaku Koordinator Program Studi D3 Teknik Kelistrikan Kapal.
6. Bapak Hendro Agus Widodo, S.ST., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan serta banyak masukan dalam proses penyusunan Tugas Akhir.
7. Ibu Dr. Perwi Darmajanti, S.S., M.Pd. selaku dosen wali yang selalu memberikan bimbingan, support, serta arahan dari awal kuliah hingga wisuda serta penulisan Tugas Akhir.

8. Kepada alumni PE yang telah memberikan tenaga, ilmu, dan materi kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Kepada seluruh Teman – Teman D3 PE 2022 dan 2023 yang telah membantu dan memberi dukungan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Kepada Dian Ayu Ira Nur Fitri, seseorang sekaligus seseorang dalam perjalanan ini, terima kasih atas setiap tenaga, waktu, dan doa yang tercurah. Terima kasih telah menjadi telinga yang setia mendengar keluh kesah, sumber semangat saat lelah, dan cahaya yang menguatkan langkah penulis hingga tugas akhir ini terselesaikan.
11. Terakhir, terima kasih kuucapkan kepada diri sendiri, Nawwal. Terima kasih telah bertahan hingga sejauh ini, tetap berusaha meski sering merasa putus asa, dan tidak lelah untuk mencoba. Semoga selalu berbahagia di mana pun berada, dengan segala kekurangan dan kelebihan yang ada.

Penulis berharap selesainya penyusunan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi civitas akademika Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis juga menyadari bahwa laporan ini masih memiliki kekurangan, sehingga sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca agar laporan Tugas Akhir ini dapat menjadi lebih baik dan bermanfaat untuk pengembangan selanjutnya.

Surabaya 17 Agustus 2026

Penulis

RANCANG BANGUN SISTEM *SMART CHARGE* *SWITCHING* BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR PZEM

AHMAD NAWWAL IZZUL KHAQ

ABSTRAK

Sistem yang dikembangkan menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama, sensor PZEM-015 untuk mengukur tegangan, arus, daya, dan energi, relay sebagai aktuatur *smart charge switching*, serta kipas pendingin yang dikendalikan secara otomatis berdasarkan kondisi suhu baterai yang dideteksi oleh sensor temperatur. Algoritma kendali dirancang untuk memutus proses pengisian ketika tegangan baterai mencapai batas maksimum yang telah ditentukan dan mengaktifkan sistem pendingin saat suhu baterai melebihi nilai ambang batas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring parameter listrik baterai dengan baik menggunakan sensor PZEM-015, serta menjalankan fungsi smart charge switching secara otomatis sesuai nilai *setpoint* yang telah ditentukan dengan persentase rata-rata mencapai 95 %. Sistem kendali termal aktif juga mampu menjaga suhu baterai tetap berada pada rentang operasi yang aman dengan mengaktifkan kipas pendingin saat suhu mencapai 30,5°C. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil meningkatkan keamanan proses pengisian baterai, mengurangi risiko *overcharging*, serta membantu menjaga stabilitas suhu selama proses *charging* berlangsung.

Kata kunci: ESP32, PZEM-015, *Smart Charge Switching*, *Monitoring*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ESP32-BASED SMART CHARGE SWITCHING SYSTEM USING A PZEM SENSOR

AHMAD NAWWAL IZZUL KHAQ

ABSTRACT

The system was developed using an ESP32 as the main controller, a PZEM-015 sensor to measure voltage, current, power, and energy, a relay as a smart charge-switching actuator, and a cooling fan automatically controlled by the battery temperature detected by the temperature sensor. The control algorithm interrupts charging when the battery voltage reaches a predetermined maximum limit and activates the cooling system when the battery temperature exceeds a threshold value. Test results show that the system can effectively monitor battery electrical parameters using the PZEM-015 sensor and automatically perform smart charge switching according to predetermined setpoints, with an average accuracy of 95%. The active thermal control system can maintain the battery temperature within a safe operating range by activating the cooling fan when the temperature reaches 30.5°C. Based on the test results, the system successfully enhances battery charging safety, reduces the risk of overcharging, and helps maintain temperature stability throughout charging.

Keywords: ESP32, PZEM-015, Smart Charge Switching, Monitoring

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Penelitian	3
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Rangkaian Seri dan Paralel.....	6
2.2.1 Rangkaian Seri	6
2.2.1 Rangkaian Paralel	7
2.3 Hukum Ohm	7
2.4 Smart Charge	8
2.5 <i>Battery Management System 4S 30A</i>	9

2.6	ESP32	9
2.7	PZEM-015	11
2.8	DS18B20	13
2.9	ACS712	13
2.10	LCD 16x2	14
2.11	RS485	15
2.12	IRLZ44N	16
2.13	Kipas DV12V	16
2.14	Baterai 18650.....	17
2.15	<i>Power Supply</i>	18
2.16	<i>XL6009 Boost Converter</i>	19
BAB 3 METODE PENELITIAN		21
3.1	Konsep Penelitian.....	21
3.1.1	Blok Diagram	21
3.1.2	<i>Flowchart System</i>	23
3.1.3	Diagram Alir Penelitian.....	24
3.2	Perencanaan dan Desain	25
3.2.1	Desain <i>Hardware</i>	25
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		27
4.1	Pengujian <i>Hardware</i>	27
4.1.1	<i>Pengujian Charging dan Discharging</i>	27
4.1.2	Pengujian Integrasi	29
4.1.3	Pengujian Regresi Linear.....	31
4.1.4	Pengujian Perubahan Tegangan dan Suhu Baterai	33
4.1.5	Pengujian Akurasi Pengukuran Arus dengan Sensor PZEM-015	36

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA.....	41
LAMPIRAN	42
BIODATA	45

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi ESP-WROOM-32D	10
Tabel 2. 2 Spesifikasi PZEM-015	12
Tabel 4. 1 Pengujian Waktu Charge	28
Tabel 4. 2 Pengujian keadaan tidak Charge	28
Tabel 4. 3 Pengujian Hasil Integrasi	30
Tabel 4. 4 Pengujian Regresi Linear	31
Tabel 4. 5 Perbandingan sensor Arus tanpa regresi.....	36

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Battery Management System 4S 30A</i>	9
Gambar 2. 2 ESP32	10
Gambar 2. 3 PZEM-015	11
Gambar 2. 4 DS18B20	13
Gambar 2. 5 LCD 16x2	15
Gambar 2. 6 RS485	15
Gambar 2. 7 IRLZ44N.....	16
Gambar 2. 8 Kipas DC12V	17
Gambar 2. 9 Baterai 18650	18
Gambar 2. 10 <i>Power Supply</i>	18
Gambar 2. 11 XL6009.....	19
Gambar 3. 1 Blok Diagram	21
Gambar 3. 2 Diagram <i>Flowchart System</i>	24
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 3. 4 Desain <i>Hardware</i>	26
Gambar 4. 1 Blok Diagram	33
Gambar 4. 2 Diagram <i>Flowchart System</i>	34
Gambar 4. 3 Diagram Alir Penelitian	35

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR NOTASI

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$$

$$C_{total} = C_{sel}$$

$$V_{total} = V_{sel}$$

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi kini semakin cepat, terutama dalam penggunaan baterai sebagai media utama untuk menyimpan energi. Baterai sering digunakan dalam berbagai jenis aplikasi, seperti sistem tenaga surya, kendaraan listrik, perangkat yang bisa dibawa kemana-mana, serta sistem penjaga daya (UPS). Namun, jika baterai digunakan terus-menerus tanpa diatur dengan baik, bisa membuat performa baterai menurun, mengurangi daya tahan, dan bahkan berisiko menyebabkan kepanasan berlebih serta kerusakan yang tidak bisa pulih.

Masalah utama dalam penggunaan baterai adalah ketika proses pengisian daya tidak diatur dengan baik. Pengisian baterai berlebihan atau pengosongan terlalu dalam bisa merusak struktur kimia dalam baterai tersebut. Selain itu, suhu baterai juga menjadi faktor penting yang mempengaruhi efisiensi dan keamanannya. Kenaikan suhu yang tidak terkendali bisa membuat baterai rusak lebih cepat dan berisiko menyebabkan bahaya seperti api atau ledakan.

Untuk menangani masalah tersebut, dibutuhkan suatu sistem pintar yang bisa mengatur pengisian daya secara otomatis dan mengendalikan suhu baterai secara langsung dalam waktu nyata. Sistem ini disebut Battery Management System (BMS), yang bertugas mengawasi parameter utama seperti tegangan, arus, daya, serta suhu dari baterai.

Dalam penelitian ini, mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai pusat pengendalian karena memiliki kemampuan pemrosesan yang bagus. Sensor PZEM-015 digunakan untuk mengukur parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya dengan cara yang tepat dan akurat. Dengan kombinasi ini, sistem diharapkan bisa melakukan pengalihan pengisian secara cerdas, yaitu mengatur sendiri proses pengisian dan memutus aliran listrik ketika kondisi tertentu terpenuhi, serta mengendalikan suhu baterai agar tetap dalam batas yang aman.

Sistem ini diharapkan bisa membuat penggunaan baterai lebih efisien, membuat baterai tahan lebih lama, serta meningkatkan keamanan dalam sistem penyimpanan energi.

Oleh karena itu, penulis berharap dari Tugas Akhir yang berjudul “RANCANG BANGUN SISTEM *SMART CHARGE SWITCHING* BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR PZEM” dapat berjalan sesuai yang direncanakan dan dapat membantu mengatasi masalah pengecasan secara otomatis dan dapat untuk monitoring.

1.2 Perumusan Masalah

Pertanyaan Penelitian berdasarkan pada latar belakang ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem smart charge switching berbasis ESP32 untuk mengontrol proses pengisian baterai secara otomatis?
2. Bagaimana mengimplementasikan sensor PZEM-025 untuk memonitor parameter listrik baterai secara *real-time*?
3. Bagaimana merancang sistem kendali termal untuk menjaga suhu baterai tetap dalam kondisi aman?

1.3 Tujuan Penelitian

Ditinjau dari rumusan masalah, maka tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana merancang sistem smart charge switching berbasis ESP32 untuk mengontrol proses pengisian baterai secara otomatis?
2. Bagaimana mengimplementasikan sensor PZEM-015 untuk memonitor parameter listrik baterai secara *real-time*?
3. Bagaimana merancang sistem kendali termal untuk menjaga suhu baterai tetap dalam kondisi aman?

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya Penelitian terdapat beberapa manfaat, diantaranya adalah :

1. Bagi Penulis
Penelitian ini menjadi wadah penerapan ilmu perkuliahan melalui perancangan dan pengujian prototipe, sekaligus memenuhi syarat Tugas Akhir untuk meraih gelar Ahli Madya pada Program Studi D3 Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

2. Bagi Institusi

Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dan bahan ajar tambahan bagi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, serta berkontribusi pada pengembangan inovasi maritim untuk meningkatkan keselamatan dan kepatuhan standar lingkungan internasional

3. Bagi Industri

Penelitian Meningkatkan efektivitas kinerja dari pengembangan teknologi kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini memiliki batasan masalah yaitu :

1. Sistem hanya difokuskan pada pengisian dan pemantauan jenis baterai *merk* Li-ion.
2. Parameter yang diukur terbatas pada tegangan, arus, daya dan suhu baterai.
3. Sensor yang digunakan untuk pengukuran listrik adalah PZEM-015

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Kajian Penelitian Terdahulu

Pada sub-bab ini menjelaskan penelitian terkait penelitian dan referensi terkait yang telah dilakukan mengenai tugas akhir ini.

“Design of Auto Cut Off Charging System for Electric Car Battery of Untan Electrical Car Team Based on ESP-32 Microcontroller” Muhammad Hasan Tanjungpura, (2024)

Penelitian ini merancang sistem auto cut-off pengisian baterai kendaraan listrik berbasis ESP32. Sistem menggunakan PZEM-017 untuk memantau parameter kelistrikan dan sensor suhu untuk meningkatkan keamanan proses charging. Sistem dapat menghentikan pengisian ketika kondisi tertentu tercapai sehingga dapat mengurangi risiko overcharging dan overcurrent. Penelitian ini memiliki keterkaitan yang sangat kuat dengan penelitian yang akan dilakukan karena sama-sama menggunakan ESP32, PZEM-017, serta konsep pengendalian proses pengisian baterai

“Rancang Bangun Monitoring Kondisi Baterai dan Lokasi Kendaraan Listrik Berbasis Mikrokontroler ESP32” Resa Falentino & Rizki Priya Pratama, (2025)

Penelitian Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kondisi baterai kendaraan listrik menggunakan ESP32 dan PZEM-017. PZEM-017 digunakan untuk memperoleh data tegangan, arus, daya, energi, kapasitas baterai, dan kondisi baterai, sedangkan data ditampilkan secara real-time melalui aplikasi Android. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa ESP32 dan PZEM-017 dapat digunakan secara efektif untuk memperoleh informasi kondisi baterai secara real-time.

“Rancang Bangun Kontrol dan Monitoring Beban Satu Fasa Berbasis Android dengan Sensor PZEM-004T” Asry Nathania Ardelia Sihite, Catra Indra Cahyadi & Suherman, (2025)

Penelitian ini membangun sistem monitoring dan kontrol beban satu fasa menggunakan PZEM-004T, ESP32, dan aplikasi Blynk. Sensor digunakan untuk membaca parameter tegangan, arus, dan daya, sedangkan ESP32 digunakan untuk

mengirimkan data melalui Wi-Fi dan mengendalikan beban. Penelitian ini relevan dengan konsep *smart switching*, terutama dalam proses pengambilan keputusan berdasarkan parameter listrik yang dibaca sensor.

2.2 Baterai Seri dan Paralel

Baterai merupakan komponen utama dalam sistem penyimpanan energi listrik. Baterai digunakan untuk menyimpan energi kimia dan mengubahnya menjadi energi listrik saat diperlukan. Baterai lithium-ion tipe 18650 dalam sistem Smart Charge Switching dan Active Thermal Control memiliki konfigurasi 4S (4 seri). Konfigurasi baterai ini memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap tegangan, kapasitas, dan kemampuan penyaluran daya sistem. Secara umum, terdapat dua cara untuk menghubungkan baterai, yaitu secara seri dan paralel.

2.2.1 Rangkaian Seri Baterai

Menggunakan rangkaian seri untuk menghubungkan baterai dari kutub positif satu baterai ke kutub negatif baterai berikutnya dalam rangkaian seri tersebut untuk membentuk satu jalur arus. Dalam konfigurasi ini, arus listrik pada setiap baterai sama, dan tegangan totalnya merupakan penjumlahan tegangan masing-masing sel baterai. Konfigurasi seri biasanya diterapkan pada aplikasi yang memerlukan tegangan operasi tinggi. Hal ini mencakup kendaraan listrik, sistem tenaga surya, sistem UPS, drone, dan sistem penyimpanan energi.

Secara matematis, tegangan total baterai seri dinyatakan sebagai:

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

Sedangkan kapasitas baterai tetap sama dengan kapasitas satu buah sel.

$$C_{total} = C_{sel}$$

Keuntungan dari rangkaian seri adalah tegangan keluaran meningkat sehingga dapat menyalurkan daya ke beban yang membutuhkan tegangan lebih tinggi. Arus yang mengalir melalui sistem juga relatif lebih rendah dibandingkan dengan kasus tegangan yang lebih rendah untuk daya yang sama. Hal ini mengurangi kerugian daya pada kabel. Namun, konfigurasi seri juga memiliki beberapa kelemahan. Jika satu sel baterai rusak, seluruh rangkaian dapat

terpengaruh. Hal ini disebabkan oleh arus yang sama mengalir melalui semua sel. Selain itu, jika terjadi ketidakseimbangan tegangan antar sel, diperlukan Sistem Manajemen Baterai (BMS) untuk melakukan penyeimbangan guna memastikan bahwa setiap sel dipertahankan pada tegangan yang relatif konsisten selama siklus pengisian dan pengosongan.

2.2.2 Rangkaian Paralel Baterai

Rangkaian paralel dari kutub positif disambungkan ke satu sirkuit, dan semua kutub negatif ke sirkuit lainnya. Jika disambungkan secara paralel, tegangan keluaran sama dengan tegangan satu sel, tetapi kapasitas penyimpanan energi totalnya sebanding dengan jumlah baterai yang dipasang.

Persamaan tegangan total baterai paralel adalah

$$V_{total} = V_{sel}$$

Sedangkan kapasitas total dihitung menggunakan persamaan

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

Rangkaian paralel umumnya digunakan pada power bank, UPS, dan perangkat yang membutuhkan waktu pengoperasian yang lebih lama. Manfaat pertama dari rangkaian paralel adalah peningkatan kapasitas energi baterai yang mampu menyuplai listrik ke beban dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, arus maksimum yang disuplai oleh rangkaian tersebut juga meningkat karena arus tersebut mengalir melalui beberapa sel sekaligus. Meskipun memiliki kelebihan, rangkaian paralel juga memiliki beberapa kelemahan: semua baterai harus serupa dalam hal kapasitas, tingkat tegangan, masa pakai, dan tingkat pengisian daya. Jika terdapat perbedaan tegangan antar baterai, arus sirkulasi akan muncul yang menyebabkan panas berlebih dan penurunan kinerja sel-sel baterai.

2.3 Hukum Ohm

Hukum Ohm merupakan hukum dasar dalam ilmu kelistrikan yang dikemukakan oleh ilmuwan Jerman Georg Simon Ohm pada tahun 1827. Hukum ini menjelaskan hubungan antara tegangan listrik, arus listrik, dan hambatan dalam suatu rangkaian. Menurut Hukum Ohm, besar arus listrik yang mengalir melalui

suatu penghantar sebanding dengan tegangan yang diberikan dan berbanding terbalik terhadap hambatan penghantar tersebut.

Persamaan Hukum Ohm

$$R = \frac{V}{I} \quad I = \frac{V}{R} \quad V = I \times R$$

2.4 *Smart Charge*

Smart charging merupakan suatu metode pengisian baterai yang menggunakan sistem kendali dan pemantauan secara otomatis untuk mengatur proses pengisian berdasarkan kondisi baterai dan parameter kelistrikan yang terukur. Berbeda dengan sistem pengisian konvensional yang umumnya bekerja secara tetap, smart charging mampu mengambil keputusan berdasarkan informasi seperti tegangan, arus, daya, energi, dan kondisi tertentu selama proses pengisian. Dengan adanya sistem kendali tersebut, proses charging dapat dilakukan secara lebih terkontrol, efisien, dan aman.

Pada penerapannya, smart charging dapat menggunakan mikrokontroler sebagai pusat pengolahan data dan pengendalian. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat kendali yang menerima data hasil pengukuran dari sensor PZEM. Parameter kelistrikan yang diperoleh kemudian diproses oleh ESP32 untuk menentukan kondisi proses pengisian. Berdasarkan batas atau kondisi yang telah ditentukan dalam program, ESP32 dapat memberikan perintah kepada perangkat switching untuk menghubungkan atau memutuskan proses pengisian baterai.

Konsep *smart charging* pada penelitian ini diwujudkan melalui mekanisme *smart charge switching*, yaitu proses pengendalian hubungan antara sumber daya dan baterai secara otomatis berdasarkan parameter hasil pengukuran sensor PZEM. Ketika kondisi pengisian masih berada dalam batas yang ditentukan, sistem mempertahankan kondisi *charging*. Sebaliknya, apabila parameter pengisian telah mencapai batas yang ditentukan, ESP32 dapat memberikan perintah kepada perangkat *switching* untuk menghentikan atau memutuskan proses *charging*. Dengan demikian, sistem tidak hanya berfungsi untuk melakukan pengisian, tetapi juga mampu melakukan pengawasan dan pengendalian terhadap proses tersebut.

Penggunaan *smart charging* diharapkan dapat meningkatkan keamanan dan efisiensi proses pengisian baterai. Sistem dapat membantu mencegah kondisi pengisian yang tidak diinginkan, seperti tegangan atau arus yang melebihi batas

pengoperasian yang telah ditentukan. Selain itu, data hasil pengukuran PZEM dapat digunakan untuk mengetahui kondisi kelistrikan selama proses *charging* sehingga proses pengisian dapat dipantau secara lebih terukur.

2.5 *Battery Management System 4S 30A*

Battery Management System (BMS) didefinisikan sebagai sistem elektronik yang didesain khusus untuk melakukan pengawasan dan kendali terhadap parameter operasional baterai. Menurut penelitian terdahulu, fungsi utama BMS tidak hanya terbatas pada pemantauan tegangan, tetapi juga mencakup perlindungan sel dari kondisi ekstrem yang dapat memperpendek usia pakai baterai (*cycle life*). Sistem yang dirancang dalam penelitian ini mengadopsi arsitektur BMS berbasis mikrokontroler ESP32 untuk mengintegrasikan pembacaan data sensor secara real-time dengan algoritma pengambilan keputusan yang presisi.



Gambar 2. 1 *Battery Management System 4S 30A*

(Sumber: circuitdigest.com)

Teknologi elektronik yang berfungsi sebagai unit pengendali pusat untuk memantau dan mengelola parameter operasional baterai secara real-time. Tugas utama BMS meliputi pengawasan tegangan, arus, suhu, serta estimasi status pengisian. (Gazabi 2024)

2.6 *ESP32*

ESP32-WROOM-32D merupakan inti modul yang dilengkapi *mikroprosesor* Tensilica Xtensa LX6 inti ganda dengan kemampuan *Wi-Fi* dan *Bluetooth* terintegrasi. Chip “WROOM-32D” secara khusus menunjukkan bahwa perangkat tersebut menyertakan *Bluetooth* LE (Energi Rendah) untuk peningkatan efisiensi daya dalam komunikasi nirkabel. Menyediakan beberapa pin Input/Output Serbaguna untuk menghubungkan ke sensor *eksternal*, *aktuator*, dan *periferal* lainnya. Mendukung *Wi-Fi* (802.11 b/g/n) dan *Bluetooth* (termasuk *Bluetooth* LE) untuk konektivitas nirkabel. Berikut gambar dari pinout ESP32 DevKitC V4:

2.7 PZEM-015

PZEM-015 merupakan DC *multifunction battery tester* atau alat ukur multifungsi untuk sistem baterai DC yang digunakan untuk memantau berbagai parameter kelistrikan pada baterai. Perangkat ini dapat digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya, energi, impedansi, kapasitas baterai, *State of Charge* (SOC), serta waktu operasi. Hasil pengukuran ditampilkan melalui layar LCD sehingga kondisi baterai dapat diamati secara langsung. PZEM-015 dirancang khusus untuk pengukuran sistem DC dan menggunakan *external shunt* sebagai elemen pengukuran arus.

Dalam sistem *smart charging*, PZEM-015 dapat digunakan sebagai perangkat pemantauan parameter baterai selama proses pengisian. Nilai tegangan dan arus yang terukur dapat digunakan untuk mengetahui kondisi pengisian, sedangkan nilai daya dan energi dapat digunakan untuk mengetahui besarnya energi yang masuk atau digunakan oleh sistem. Data tersebut dapat menjadi parameter pendukung dalam proses pengambilan keputusan pada sistem *smart charge switching*.

Pada penelitian ini, PZEM-015 dapat ditempatkan pada jalur DC antara sumber pengisian dan baterai sehingga parameter kelistrikan selama proses *charging* dapat dipantau. Data pengukuran tersebut kemudian dapat digunakan sebagai dasar pemantauan dan pengendalian sistem. Apabila sistem dikombinasikan dengan ESP32, hasil pengukuran dapat diproses lebih lanjut untuk menentukan kondisi *switching* sesuai batas parameter yang telah ditentukan dalam program.



Gambar 2. 3 PZEM-015

(Sumber: <https://manuals.plus/>)

Prinsip kerja PZEM-015 dalam melakukan pengukuran arus dan tegangan ialah pada pembacaan arus terdapat transformator arus yang berbentuk seperti cincin dipasang mengelilingi kabel penghantar. Ketika arus listrik mengalir melalui kabel, medan magnet yang diinduksi akan menginduksi arus pada kumparan di

dalam transformator arus. Arus induksi ini sebanding dengan arus yang mengalir pada kabel. Pembacaan tegangan pada PZEM ini dikarenakan terdapat transformator tegangan. Komponen ini berupa sebuah kumparan yang dihubungkan secara paralel dengan beban.

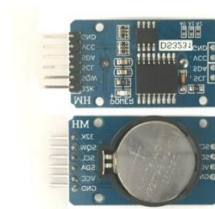
Parameter	Spesifikasi
Tipe Sensor	PZEM-025 DC Multifunction Battery Monitor
Tegangan Kerja	8 – 120 VDC
Rentang Pengukuran Tegangan	0 – 200 VDC
Resolusi Tegangan	0,01 V
Akurasi Tegangan	±1%
Rentang Pengukuran Arus	0 – 300 A (menggunakan shunt eksternal)
Resolusi Arus	1 mA
Akurasi Arus	±1%
Rentang Pengukuran Daya	0 – 60.000 W
Resolusi Daya	0,01 W
Akurasi Daya	±1%
Rentang Pengukuran Energi	0 – 9.999 kWh
Rentang Pengukuran Kapasitas	0 – 1.000 Ah
Rentang Pengukuran Resistansi Internal	0 – 999 mΩ
Rentang Pengukuran Impedansi	0 – 1.000 Ω
Tampilan	LCD Digital
Metode Pengukuran Arus	External Shunt
Suhu Operasi	-10°C sampai 50°C
Dimensi Modul	89,6 × 49,6 × 24,25 mm
Akurasi Keseluruhan	±1%

Tabel 2.2 Spesifikasi PZEM-015

2.8 DS18B20

DS18B20 merupakan komponen elektronik yang berfungsi sebagai jam waktu nyata. Dengan menggunakan teknologi kristal osilator yang sangat akurat, modul ini mampu menjaga waktu secara tepat. Bahkan ketika daya utama terputus, baterai internal akan mengambil alih untuk memastikan waktu tetap berjalan. Selain itu, DS3231 juga mampu menyimpan informasi tanggal, bulan, dan tahun. Dilengkapi dengan *Temperature Compensated Crystal Oscillator* (TCXO), DS3231 menawarkan akurasi waktu yang tinggi. Kemampuannya untuk beroperasi dengan atau tanpa daya utama menjadikannya solusi yang handal untuk aplikasi yang membutuhkan pencatatan waktu yang presisi. RTC mampu memberikan informasi waktu yang akurat secara *real-time*, termasuk detik, menit, jam, tanggal, bulan, dan tahun (Rahmanto et al., 2021).

Modul ini juga memiliki fitur-fitur tambahan seperti *alarm*, sensor suhu terintegrasi, dan kemampuan untuk menghasilkan sinyal gelombang persegi. Modul ini sangat ideal untuk aplikasi yang memerlukan pencatatan waktu yang akurat dan andal, seperti data *logger*, sistem kontrol, dan perangkat *wearable*.



Gambar 2. 4 DS18B20

(Sumber: www.analog.com)

2.9 ACS712

ACS712 merupakan sensor arus berbasis *Hall Effect* yang diproduksi oleh *Allegro MicroSystems*. Sensor ini mampu mengukur arus AC maupun DC tanpa kontak langsung dengan rangkaian pengukuran karena menggunakan prinsip medan magnet yang dihasilkan oleh aliran arus listrik. ACS712 banyak digunakan pada sistem monitoring energi, proteksi arus, pengendali motor, sistem baterai, dan aplikasi *Internet of Things* (IoT). Sensor ini menyediakan isolasi listrik hingga sekitar 2,1 kVRMS antara jalur arus dan rangkaian pengukuran sehingga aman

digunakan pada berbagai aplikasi. ACS712 bekerja berdasarkan Efek Hall (*Hall Effect*). Ketika arus listrik mengalir melalui konduktor internal sensor, akan terbentuk medan magnet di sekitar konduktor tersebut. Medan magnet ini dideteksi oleh elemen Hall yang berada di dalam IC, kemudian dikonversi menjadi tegangan analog yang proporsional terhadap besar arus yang mengalir.

Karakteristik utama sensor adalah:

- Arus = 0 A $\rightarrow$ *Output* sekitar 2,5 V
- Arus positif $\rightarrow$ Tegangan *output* meningkat
- Arus negatif $\rightarrow$ Tegangan *output* menurun

2.10 LCD 16x2

LCD (*Liquid Crystal Display*) 16x2 merupakan perangkat keluaran yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter atau teks. Angka 16x2 menunjukkan bahwa LCD memiliki 16 karakter pada setiap baris dan terdiri dari 2 baris, sehingga secara keseluruhan dapat menampilkan hingga 32 karakter secara bersamaan. Setiap karakter umumnya dibentuk menggunakan matriks titik berukuran 5x8 dot. LCD 16x2 yang kompatibel dengan pengendali HD44780 merupakan salah satu jenis LCD karakter yang banyak digunakan pada sistem *mikrokontroler*. LCD 16x2 berfungsi sebagai perangkat antarmuka (*display interface*) yang memungkinkan pengguna melihat informasi yang telah diproses oleh *mikrokontroler*. Dalam sistem berbasis ESP32, LCD dapat digunakan untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor maupun status sistem secara langsung.

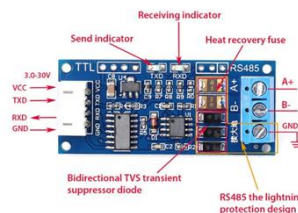
Pada konfigurasi antarmuka paralel, LCD dapat menggunakan jalur data 8-bit atau 4-bit. Penggunaan mode 4-bit dapat mengurangi jumlah pin yang diperlukan karena data dikirim melalui empat jalur data. LCD 16x2 juga dapat digunakan bersama modul I2C. Modul I2C berfungsi sebagai antarmuka tambahan sehingga komunikasi antara ESP32 dan LCD dapat dilakukan dengan jumlah pin yang lebih sedikit dibandingkan koneksi paralel secara langsung. Hal tersebut bermanfaat dalam perancangan sistem karena ESP32 memiliki banyak perangkat yang harus dihubungkan, seperti sensor PZEM dan rangkaian *switching*.



Gambar 2. 5 LCD 16x2
(Sumber: www.electronicsforu.com)

2.11 RS485

Komunikasi serial 485 merupakan komunikasi yang interface serial yang bisa menempuh jarak 1,2 km berbeda dengan komunikasi RS232 yang hanya mampu berkomunikasi one to one dan mempunyai jarak hanya 15 meter, RS485 juga memiliki keunggulan untuk komunikasi multi drop yaitu berhubungan secara one to many dengan jarak yang jauh ini juga bisa digunakan untuk menghubungkan 32 unit beban sekaligus dengan kabel yang berjumlah dua tanpa memerlukan ground antara unit satu dengan unit lainnya.



Gambar 2. 6 Modul RS485
(Sumber: www.circuitstate.com)

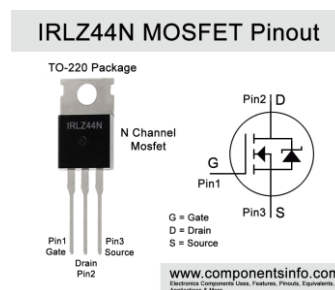
RS485 menjadi bagian penting dalam integrasi PZEM-015 dengan ESP32. PZEM-015 berfungsi sebagai perangkat pengukuran, sedangkan ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama. Data yang diperoleh PZEM-025 dikirimkan melalui komunikasi RS485 menuju ESP32 sehingga parameter kelistrikan dapat dipantau secara *real-time*.

Dengan adanya komunikasi RS485, ESP32 tidak hanya berfungsi sebagai pengendali *switching*, tetapi juga dapat memperoleh informasi kondisi kelistrikan dari PZEM-015. Informasi tersebut dapat digunakan untuk menentukan kondisi sistem, misalnya mengetahui perubahan tegangan dan arus selama proses pengisian baterai. Dengan demikian, penggunaan RS485 mendukung terciptanya sistem *Smart Charge Switching* yang mampu melakukan monitoring dan pengendalian secara terintegrasi.

2.12 IRLZ44N

IRLZ44N merupakan komponen Power MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) kanal-N yang digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengendalikan aliran arus pada suatu rangkaian. MOSFET ini termasuk jenis logic-level MOSFET, sehingga dapat dikendalikan menggunakan tegangan gate yang relatif rendah. IRLZ44N memiliki tiga terminal utama, yaitu *Gate* (G), *Drain* (D), dan *Source* (S). *Terminal Gate* digunakan sebagai terminal pengendali, sedangkan arus utama mengalir melalui terminal *Drain* dan *Source*. Berdasarkan data dari Infineon, IRLZ44N memiliki tegangan *Drain-Source* maksimum sebesar 55 V dan kemampuan arus Drain maksimum sebesar 47 A pada kondisi tertentu.

Prinsip kerja IRLZ44N sebagai saklar ditentukan oleh tegangan yang diberikan pada terminal *Gate* terhadap *Source* atau VGS. Ketika tegangan *Gate* diberikan sehingga MOSFET berada pada kondisi ON, resistansi antara Drain dan *Source* menjadi rendah sehingga arus dapat mengalir menuju beban. Sebaliknya, ketika tegangan *Gate* berada pada kondisi OFF, MOSFET menghambat aliran arus antara *Drain* dan *Source*. Dengan prinsip tersebut, IRLZ44N dapat digunakan sebagai saklar elektronik yang dikendalikan oleh mikrokontroler.



Gambar 2.7 IRLZ44N

(Sumber: www.infineon.com)

2.13 Kipas DC 12V (*Activate Cooling*)

Kipas DC adalah perangkat pendingin aktif yang mengubah energi listrik searah (DC) menjadi energi mekanik berupa putaran bilah kipas. Dalam proyek Anda, kipas ini bertindak sebagai *Active Cooling* (Pendinginan Aktif). Motor di dalam kipas (biasanya tipe *brushless* untuk daya tahan lama) berputar dan menciptakan aliran udara (*airflow*). Aliran udara ini berfungsi membuang panas

yang terjebak di dalam *box* panel atau panas yang menempel pada permukaan baterai dan komponen. Fungsinya untuk Memaksa udara panas keluar dari sistem dan menggantinya dengan udara dingin dari luar. Karena dikendalikan oleh ESP32, kipas hanya akan menyala saat suhu kritis terdeteksi, sehingga menghemat energi dan mengurangi kebisingan.



Gambar 2.8 Kipas DC 12V

(Sumber: resources.pcb.cadence.com)

2.14 Baterai 18650

Baterai *Lithium-ion* (Li-ion) 18650 merupakan salah satu jenis baterai isi ulang (*rechargeable battery*) yang banyak digunakan sebagai sumber energi pada perangkat elektronik, sistem penyimpanan energi, kendaraan listrik, dan berbagai aplikasi portabel. Istilah 18650 menunjukkan ukuran fisik sel baterai, yaitu diameter sekitar 18 mm dan panjang sekitar 65 mm. Baterai jenis ini memiliki karakteristik kepadatan energi yang cukup tinggi, bobot relatif ringan, dan dapat digunakan berulang kali melalui proses pengisian dan pengosongan.

Sel Li-ion 18650 pada umumnya memiliki tegangan nominal sekitar 3,6–3,7 V dan tegangan maksimum pengisian sekitar 4,2 V per sel. Tegangan aktual dapat berbeda berdasarkan jenis kimia sel dan spesifikasi produsen. Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan mAh (*milliampere-hour*) 3000 mAh, dan sebagainya. Kapasitas tersebut menunjukkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan menyediakan muatan listrik. Selain kapasitas, kemampuan baterai dalam menyediakan arus juga dipengaruhi oleh *continuous discharge current* yang ditetapkan oleh produsen.



Gambar 2.9 Baterai 18650 (3000mAh)

(Sumber: battix.id)

2.15 *Power Supply*

Power supply merupakan perangkat elektronik yang berfungsi sebagai sumber energi bagi berbagai komponen yang membutuhkan daya, seperti *receiver*, *transmitter*, *alarm*, dan perangkat pendukung lainnya. Perangkat ini menerima input berupa arus listrik AC 220 volt, kemudian mengonversinya menjadi arus DC 12 volt, sehingga sinyal listrik bolak-balik (AC) dapat diubah menjadi sinyal listrik searah (DC) yang stabil.

Selain berperan sebagai pengubah tegangan, *power supply* juga memiliki fungsi penting dalam menjaga kestabilan arus listrik agar perangkat yang terhubung dapat beroperasi dengan optimal. Tanpa adanya *power supply* yang andal, risiko kerusakan pada rangkaian elektronik akan meningkat akibat tegangan yang tidak sesuai atau fluktuasi daya. Oleh karena itu, keberadaan *power supply* tidak hanya sekadar penyedia daya, tetapi juga sebagai pengaman yang memastikan sistem bekerja secara efisien dan berkelanjutan.



Gambar 2.10 *Power Supply* 12V 10A

(Sumber: www.machpower.it)

2.16 XL6009 Boost Converter

Merupakan modul DC-DC *Step-Up Converter* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan DC input menjadi tegangan DC *output* yang lebih tinggi. Modul ini menggunakan IC *switching regulator* XL6009 yang bekerja dengan prinsip *switching frequency* tinggi, sehingga memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan *regulator linear*. Modul XL6009 digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran *power supply* agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai *lithium-ion* 18650 konfigurasi 4S yang memerlukan tegangan pengisian sekitar 16,8 Volt.



Gambar 2.11 XL6009 Boost Converter

(Sumber: <https://components101.com>)

Boost converter bekerja dengan cara menyimpan energi pada induktor saat *transistor switching* dalam kondisi ON, kemudian melepaskan energi tersebut ke beban saat transistor OFF. Proses ini menghasilkan tegangan *output* yang lebih tinggi dibandingkan tegangan input.

Secara sederhana:

- Saat saklar ON → induktor menyimpan energi.
- Saat saklar OFF → energi induktor dilepaskan ke *output*.
- Kapasitor *output* berfungsi meratakan tegangan sehingga lebih stabil.

Hubungan tegangan *input* dan *output* dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

Keterangan:

- V_{out} = Tegangan *output* (Volt)
- V_{in} = Tegangan *input* (Volt)
- D = *Duty Cycle* PWM

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa semakin besar *duty cycle*, maka tegangan *output* akan semakin tinggi.

BAB 3

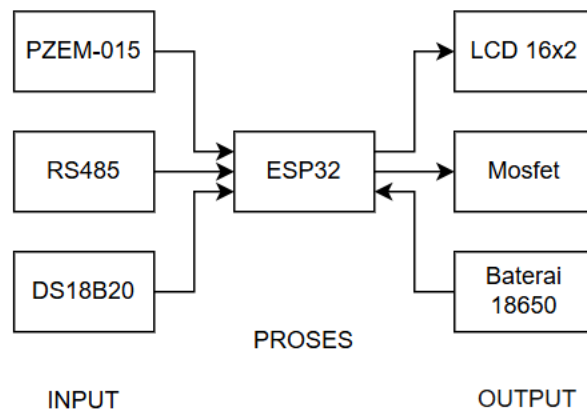
METODE PENELITIAN

3.1 Konsep Penelitian

Pada sub bab ini menjelaskan mengenai konsep penelitian dalam pengerjaan Tugas Akhir. Konsep ini menguraikan secara rinci tahapan-tahapan dalam pengembangan sistem, mulai dari identifikasi masalah hingga analisis data. Sehingga pada tugas akhir ini memiliki kerangka kerja yang berfokus pada pemrosesan dan *monitoring* data, selanjutnya dilakukan analisis data untuk acuan dalam perancangan *smart charge*

3.1.1 Blok Diagram

Pada Gambar 3.1 merupakan diagram sistem yang digunakan pada penelitian tugas akhir. Diagram ini menjelaskan hubungan antar variabel dan komponen secara visual.



Gambar 3. 1 Blok Diagram

Pada blok diagram diatas terdiri dari tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output. Pada bagian input terdapat sensor PZEM-015 berfungsi untuk mengukur parameter kelistrikan pada sisi DC selama proses pengisian baterai. Parameter yang dapat dipantau antara lain tegangan, arus, daya, energi, dan parameter baterai lainnya sesuai kemampuan modul. Data hasil pengukuran tersebut digunakan sebagai salah satu dasar bagi ESP32 dalam menentukan kondisi proses *charging*. RS485 digunakan sebagai jalur komunikasi antara perangkat yang mendukung komunikasi serial RS485 dengan ESP32. Pada rancangan ini, RS485 berfungsi sebagai media komunikasi data dari PZEM

menuju ESP32. Data hasil pengukuran PZEM dikirim melalui jalur komunikasi tersebut sehingga dapat diterima dan diproses oleh ESP32. DS18B20 merupakan sensor suhu digital yang digunakan untuk mengukur temperatur pada bagian yang dipantau, misalnya baterai atau area sekitar sistem charging. Data temperatur dari DS18B20 dikirimkan ke ESP32 untuk mengetahui kondisi suhu selama proses pengisian. Informasi suhu dapat digunakan sebagai parameter tambahan untuk meningkatkan keamanan sistem.

Pada bagian proses ESP32 menerima data dari PZEM-015 melalui komunikasi RS485 dan menerima data temperatur dari sensor DS18B20. Data tersebut kemudian diproses berdasarkan program atau algoritma yang telah dibuat. Pada sistem *smart charge switching*, ESP32 berfungsi menentukan kondisi proses pengisian berdasarkan parameter yang telah ditetapkan. Sebagai contoh, apabila tegangan, arus, dan suhu masih berada dalam batas operasi yang ditentukan, ESP32 dapat mempertahankan kondisi charging. Sebaliknya, apabila parameter tertentu telah mencapai batas yang ditentukan, ESP32 dapat memberikan perintah untuk menghentikan proses *charging* melalui MOSFET. Dengan demikian, ESP32 berperan sebagai pusat pengolahan data dan pengambilan keputusan. ESP32 tidak hanya menerima data dari sensor, tetapi juga mengolah data tersebut menjadi perintah kendali untuk perangkat *output*.

Pada bagian *output* LCD 16×2 digunakan sebagai media tampilan untuk memberikan informasi kondisi sistem kepada pengguna. Data yang dapat ditampilkan antara lain tegangan baterai, arus *charging*, daya, suhu, serta status proses *charging*. Dengan adanya LCD, kondisi sistem dapat dipantau secara langsung tanpa membutuhkan perangkat tambahan. MOSFET berfungsi sebagai perangkat *switching elektronik* yang mengatur hubungan antara sumber pengisian dan baterai. ESP32 memberikan sinyal kendali pada MOSFET berdasarkan hasil pengolahan data dari sensor. Ketika kondisi charging masih memenuhi batas yang ditentukan, MOSFET dapat berada pada kondisi ON sehingga proses pengisian berlangsung. Apabila kondisi tertentu telah mencapai batas yang ditetapkan, ESP32 mengubah kondisi MOSFET menjadi OFF sehingga proses pengisian dapat dihentikan. Baterai Li-ion 18650 merupakan media penyimpanan energi yang menjadi objek utama dalam proses *charging*. Energi listrik dari sumber pengisian disalurkan ke baterai melalui rangkaian switching. Kondisi baterai selama proses pengisian dipantau melalui parameter

kelistrikan yang dibaca oleh PZEM-015.

3.1.2 Flowchart System

Tahap pembuatan *flowchart* sistem merupakan tahap yang menjelaskan tentang gambaran umum dari sistem kerja alat agar dapat memahami setiap proses-proses yang dilakukan. *Flowchart* ini berfungsi sebagai panduan visual yang membantu identifikasi alur data, pengambilan keputusan, dan potensi masalah dalam sistem.



Gambar 3. 2 Flowchart Sistem

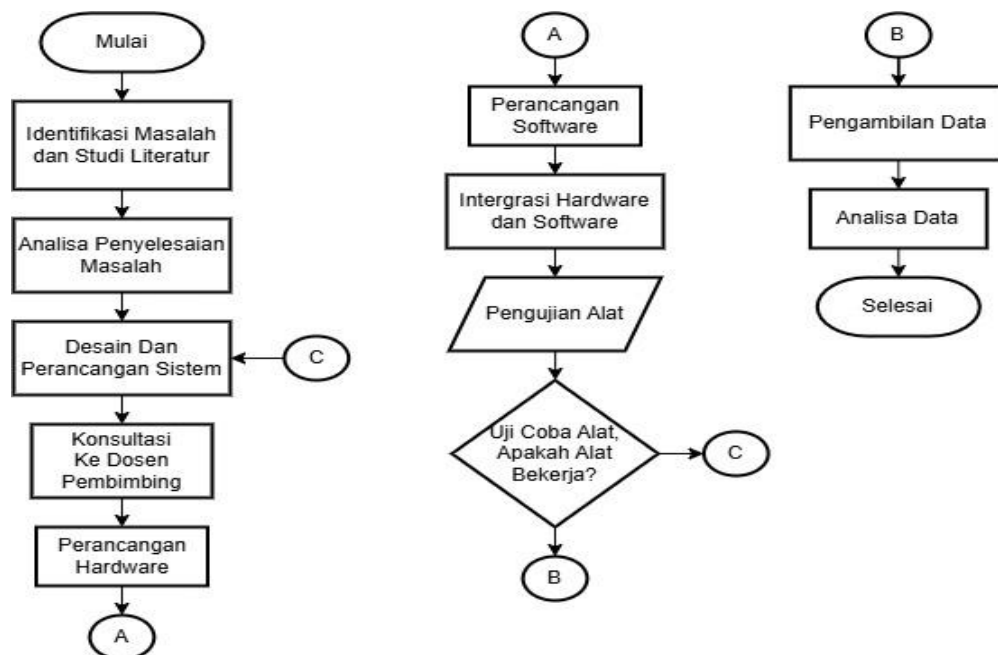
Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 3.2, alur kerja sistem *smart charge switching* diawali ketika perangkat pertama kali dinyalakan dan mikrokontroler ESP32 melakukan inisialisasi terhadap seluruh komponen yang terhubung, yaitu sensor PZEM-015, sensor suhu DS18B20, dan layar LCD 16x2. Setelah sistem siap, ESP32 akan langsung membaca data kelistrikan secara *real-time* dari sensor PZEM-015, yang mencakup parameter tegangan, arus, dan daya. Pada saat yang bersamaan, ESP32 juga membaca data suhu fisik baterai melalui sensor DS18B20. Seluruh data pembacaan dari kedua sensor tersebut kemudian diproses dan ditampilkan pada layar LCD sebagai bentuk *monitoring* baterai

agar mudah dipantau oleh pengguna.

Setelah proses pembacaan data, sistem akan melakukan pengecekan ketersediaan sumber daya. Jika tegangan AC tidak terhubung, sistem akan menginstruksikan pengguna untuk menghubungkan arus AC terlebih dahulu. Namun, jika tegangan AC sudah terdeteksi, sistem akan otomatis masuk ke tahapan *BMS Mode Charging* untuk memulai proses pengisian daya baterai. Selama proses pengisian berlangsung, sistem terus memantau apakah kapasitas tegangan baterai sudah penuh atau belum. Apabila tegangan belum mencapai batas maksimal, proses pengisian akan terus berjalan (melakukan *looping*). Sebaliknya, jika sistem mendeteksi bahwa tegangan baterai telah penuh, ESP32 akan langsung memicu fitur *BMS Cut Off* untuk menghentikan aliran listrik, sehingga baterai terlindungi dari risiko kelebihan muatan (*overcharge*).

3.1.3 Kinerja Diagram Alir Penelitian

Pada sub bab ini diperlukan adanya rancangan yang sistematis secara keseluruhan melalui diagram alir pada gambar 3. 3. Pembuatan diagram alir ini bertujuan untuk mempermudah dan memahami tahapan-tahapan dalam perencanaan serta pembuatan tugas akhir. Diagram alir penelitian digunakan sebagai acuan dalam menentukan urutan proses penelitian agar setiap tahapan dapat dilakukan secara terstruktur dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan.



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan serta melakukan studi literatur sesuai dengan topik tugas akhir yang telah diangkat oleh penulis untuk mengetahui penyebab permasalahan dan mencari serta menemukan solusinya dari pemahaman konsep penelitian terdahulu. Setelah dilakukan analisa penyelesaian masalah, maka akan dilakukan perancangan terhadap sistem *monitoring running hour*. Setelah disetujui, maka akan dilakukan analisa untuk kebutuhan alat untuk perancangan hardware dan perancangan software untuk mendesain alat tersebut. Setelah itu integrasi perangkat keras dan lunak, dilakukan pengujian fungsionalitas sistem. Tahap akhir selanjutnya setelah integrasi, yaitu dilakukan pengujian alat dan jika berhasil maka dilakukan pengambilan data dan analisa data yang telah diambil. Setelah itu, dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian

3.2 Perencanaan dan Desain

Rancangan perangkat keras pada sistem ini bertujuan untuk membangun infrastruktur fisik yang memungkinkan pengumpulan data secara akurat dan real-time. Komponen hardware yang akan digunakan meliputi mikrokontroler ESP32 sebagai otak sistem, sensor untuk membaca data, modul komunikasi untuk mengirimkan data, serta sumber daya listrik. Rancangan hardware ini akan menjadi fondasi bagi pengembangan perangkat lunak yang akan mengolah dan menganalisis data. Berikut gambar dari rancangan hardware yang akan dibuat.

3.2.1 Desain Hardware

Seluruh komponen ditempatkan di dalam *box* dengan memperhatikan aspek keamanan, kemudahan akses, dan sirkulasi udara. Jarak antar komponen dibuat cukup untuk mengurangi penumpukan panas selama proses pengisian berlangsung. Selain itu, penggunaan panel tertutup juga memberikan perlindungan terhadap debu, benturan ringan, serta sentuhan langsung yang dapat menyebabkan gangguan pada sistem.

Secara keseluruhan, desain hardware yang telah dibuat menunjukkan bahwa sistem Smart Charge Switching memiliki susunan komponen yang ringkas, terintegrasi, dan mudah dioperasikan. Integrasi antara ESP32, sensor PZEM-015, baterai *lithium-ion*, BMS, *relay*, konverter tegangan, dan LCD memungkinkan sistem melakukan proses monitoring parameter kelistrikan dan pengendalian pengisian baterai secara otomatis. Desain ini juga mendukung

pengembangan lebih lanjut, seperti penambahan fitur Internet of Things (IoT), penyimpanan data (data logging), maupun sistem kendali termal aktif untuk meningkatkan performa dan keamanan proses pengisian baterai.



Gambar 3.4 Desain *Hardware*

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi hasil pengujian dan pembahasan dari penyusunan alat penelitian tugas akhir beserta analisisnya. Sehingga pada bab ini dilakukan beberapa pengujian untuk memastikan bahwa komponen atau sistem yang terdapat pada Tugas Akhir mampu berjalan sesuai perencanaan yang telah dibuat. Pengujian ini dibagi menjadi beberapa bagian yaitu:

1. Pengujian *hardware* yang berupa pengujian terhadap komponen sensor, kontrol, maupun aktuator.
2. Pengujian *software* dan pengujian sistem.

4.1 Pengujian Hardware

Pada Pengujian *hardware* dilakukan untuk mengetahui kinerja seluruh perangkat yang telah dirancang, mulai dari proses pembacaan sensor PZEM-015, ESP32 sebagai pengendali utama, *relay smart switching*, *modul converter*, hingga proses pengisian dan pengosongan baterai lithium-ion. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem dapat bekerja sesuai dengan perancangan, yaitu melakukan monitoring parameter kelistrikan secara *real-time* serta mengendalikan proses pengisian baterai secara otomatis berdasarkan nilai tegangan yang telah ditentukan.

Pada pengujian ini digunakan baterai *lithium-ion* yang dipantau menggunakan sensor PZEM-015. Data tegangan, arus, daya, serta energi dibaca oleh PZEM-015 dan dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi RS485. Selanjutnya ESP32 mengolah data tersebut untuk menentukan status pengisian baterai dan mengendalikan *relay smart charge switching*. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu pengujian selama proses *charging* dan pengujian selama proses *discharging*, sehingga dapat diketahui karakteristik perubahan tegangan baterai pada kedua kondisi tersebut.

4.1.1 Proses Pengujian Charging dan Discharging

Pengujian *charging* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan proses pengisian baterai secara otomatis menggunakan metode *Smart Charge Switching*. Selama proses pengujian, tegangan baterai

diukur secara berkala menggunakan sensor PZEM-015. Pengambilan data dilakukan setiap interval waktu tertentu hingga baterai mendekati tegangan penuh.

NO	WAKTU	TEGANGAN AWAL	TEGANGAN AKHIR	SELISIH	KETERANGAN
1	20MENIT	13.1	14.7	1.6	MENGISI
2	30MENIT	14.1	14.5	0.4	MENGISI
3	30MENIT	14.5	14.8	0.3	MENGISI
4	30MENIT	14.7	15	0.2	MENGISI

Tabel 4.1 Waktu *Charge*

Berdasarkan Tabel 4.1 terlihat bahwa selama proses pengisian terjadi peningkatan tegangan baterai secara bertahap. Pada pengujian pertama, tegangan meningkat dari 13,1 Volt menjadi 14,7 Volt dengan kenaikan sebesar 1,6 Volt dalam waktu 20 menit. Kenaikan tegangan yang cukup besar pada tahap awal menunjukkan bahwa baterai masih berada pada kondisi kapasitas rendah sehingga mampu menerima arus pengisian lebih besar. Selanjutnya pada pengujian kedua hingga keempat, kenaikan tegangan mulai berkurang menjadi 0,4 Volt, 0,3 Volt, dan 0,2 Volt. Penurunan laju kenaikan tegangan ini merupakan karakteristik normal baterai *lithium-ion* ketika mendekati kondisi penuh (*full charge*). Semakin tinggi tingkat pengisian baterai, semakin kecil perubahan tegangan yang terjadi karena arus pengisian mulai menurun.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PZEM-015 mampu melakukan pembacaan tegangan secara stabil sehingga ESP32 dapat memonitor kondisi baterai secara *real-time*. Informasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk menghentikan proses pengisian ketika tegangan telah mencapai nilai batas (*cut-off*) yang ditentukan. Dengan demikian, sistem *Smart Charge Switching* dapat membantu mencegah terjadinya *overcharge* yang berpotensi merusak baterai.

NO	WAKTU	TEGANGAN AWAL	TEGANGAN AKHIR	SELISIH	KETERANGAN
1	30MENIT	14	14.54	0.54	BERKURANG
2	30MENIT	14.54	14.48	-0.06	BERKURANG
3	30MENIT	14.48	14.46	-0.02	BERKURANG
4	30MENIT	14.6	14.55	-0.05	MENGISI

Tabel 4.2 Dalam Keadaan tidak *Charge*

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, tegangan baterai mengalami penurunan secara bertahap selama proses pelepasan energi ke beban. Pada pengujian awal terlihat adanya perubahan pembacaan tegangan sebesar 0,54 Volt yang menunjukkan adanya penyesuaian kondisi baterai terhadap beban yang terhubung. Pada pengujian berikutnya, penurunan tegangan relatif kecil yaitu sekitar 0,06 Volt, 0,02 Volt, dan 0,05 Volt. Hal ini menunjukkan bahwa baterai masih berada dalam kondisi yang baik dan mampu mempertahankan tegangan keluaran selama proses pemakaian. Perubahan tegangan yang kecil juga menunjukkan kestabilan pembacaan sensor PZEM-015 dalam melakukan *monitoring secara continue*.

Data hasil pengujian memperlihatkan bahwa ESP32 mampu menerima informasi tegangan dari PZEM-015 secara *real-time* sehingga kondisi baterai dapat dipantau secara terus-menerus. Apabila tegangan baterai turun hingga mencapai batas minimum yang telah ditentukan, sistem dapat memberikan peringatan atau melakukan pemutusan beban sebagai bentuk perlindungan terhadap kondisi *overdischarge*.

4.1.2 Pengujian Integrasi

Pada Pengujian integrasi *hardware* dilakukan untuk mengetahui kinerja keseluruhan sistem setelah seluruh komponen diintegrasikan menjadi satu kesatuan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap perangkat keras, seperti ESP32, sensor PZEM-025, sensor suhu, *relay smart charge switching*, serta rangkaian pengisian baterai, dapat bekerja secara sinkron sesuai dengan fungsi yang telah dirancang. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan monitoring tegangan baterai dan suhu secara bersamaan selama proses pengisian berlangsung.

NO	WAKTU	TEGANGAN AWAL	TEGANGAN AKHIR	SUHU AWAL	SUHU AKHIR	SELISIH TEGANGAN
1	10menit	8.99	9.44	28.9	29.3	0.45
2	10menit	9.44	9.71	29.3	29.5	0.27
3	10menit	9.71	10.22	29.5	29.8	0.51
4	10menit	10.22	10.37	29.8	29.9	0.15
5	10menit	10.37	10.49	29.9	30.1	0.12
6	10menit	10.49	10.57	30.1	30.3	0.08
7	10menit	10.57	10.61	30.3	30.4	0.04
8	10menit	10.61	10.66	30.4	30.5	0.05

9	10menit	10.61	10.68	30.5	30.6	0.07
10	10menit	10.68	10.72	30.6	30.6	0.04
11	10menit	10.72	10.81	30.6	30.6	0.09

Tabel 4.3 Hasil Integrasi

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3, sistem *Smart Charge Switching* berbasis ESP32 menggunakan sensor PZEM-015 mampu menjalankan proses *monitoring* dan pengisian baterai secara otomatis dengan baik. Pengambilan data dilakukan setiap interval 10 menit untuk mengetahui perubahan tegangan baterai serta suhu selama proses pengisian berlangsung. Pada awal pengujian, tegangan baterai sebesar 8,99 Volt meningkat menjadi 9,44 Volt dengan kenaikan sebesar 0,45 Volt. Selanjutnya tegangan baterai terus mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai 10,81 Volt pada akhir pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengisian bekerja dengan baik dan mampu mengalirkan energi ke baterai secara kontinu.

Perubahan tegangan terbesar terjadi pada interval ketiga dengan kenaikan sebesar 0,51 Volt, sedangkan pada *interval* berikutnya kenaikan tegangan mulai menurun menjadi 0,15 Volt, 0,12 Volt, 0,08 Volt, hingga berkisar antara 0,04–0,09 Volt pada tahap akhir pengujian. Kondisi tersebut merupakan karakteristik normal baterai *lithium-ion*, di mana laju kenaikan tegangan akan semakin kecil ketika kapasitas baterai mulai mendekati kondisi penuh. Penurunan laju pengisian ini menunjukkan bahwa proses *charging* berlangsung secara stabil dan sesuai dengan karakteristik baterai. Selain melakukan *monitoring* tegangan, sistem juga memantau perubahan suhu baterai selama proses pengisian. Berdasarkan hasil pengujian, suhu baterai mengalami peningkatan secara perlahan dari 28,9 °C pada awal pengujian menjadi 30,6 °C pada akhir pengujian. Dengan demikian, terjadi kenaikan suhu sebesar sekitar 1,7 °C selama kurang lebih 110 menit proses pengisian. Kenaikan suhu yang relatif kecil menunjukkan bahwa proses pengisian berlangsung dalam kondisi aman dan tidak menyebabkan peningkatan temperatur yang berlebihan. Suhu maksimum sebesar 30,6 °C masih berada jauh di bawah batas suhu kerja baterai *lithium-ion* yang umumnya berada pada kisaran 45–60 °C. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *Smart Charge Switching* mampu menjaga proses pengisian tetap stabil tanpa menimbulkan panas berlebih yang dapat mempercepat degradasi baterai.

Selama proses pengujian, sensor PZEM-015 mampu membaca perubahan tegangan secara *real-time* dengan hasil yang stabil, kemudian mengirimkan data tersebut ke ESP32 melalui komunikasi RS485. ESP32 selanjutnya memproses informasi tersebut untuk menentukan status pengisian baterai dan mengendalikan *relay* sesuai algoritma *Smart Charge Switching*. Bersamaan dengan itu, sensor suhu juga bekerja dengan baik dalam memantau temperatur baterai sehingga sistem memiliki dua parameter utama, yaitu tegangan dan suhu, sebagai dasar pengambilan keputusan. Integrasi antara ESP32, sensor PZEM-125, sensor suhu, *relay*, serta rangkaian pengisian menunjukkan bahwa seluruh perangkat keras mampu bekerja secara sinkron tanpa mengalami gangguan komunikasi maupun kesalahan pembacaan data selama proses pengujian berlangsung.

4.1.3 Pengujian Regresi Linear

Pengujian hardware sensor PZEM-015 dilakukan untuk mengetahui hubungan antara data hasil pembacaan *Analog to Digital Converter* (ADC) pada ESP32 dengan nilai pengukuran aktual (*Data Real*). Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik pembacaan sensor, mengetahui tingkat linearitas data, serta memperoleh persamaan kalibrasi yang dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi sistem monitoring.

ADC	DATA REAL
3120	0
3125	0.04
3135	0.12
3140	0.16
3144	0.24
3148	0.26
3151	0.27
3152	0.28

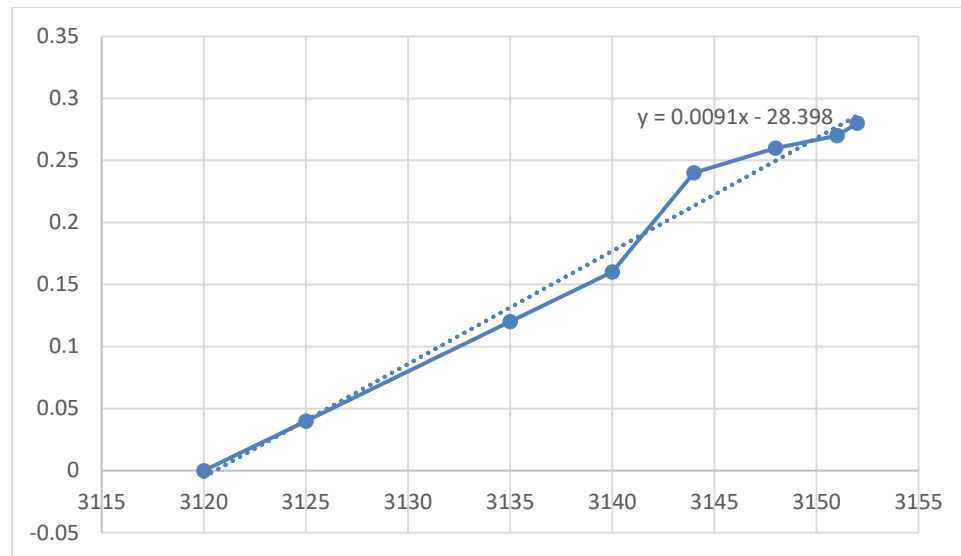
Tabel 4.4 Regresi Linear

Terlihat bahwa terdapat hubungan yang searah antara nilai ADC dengan nilai pengukuran sebenarnya (*Data Real*). Ketika nilai ADC mengalami peningkatan dari 3120 menjadi 3152, nilai *Data Real* juga meningkat secara bertahap dari 0,00 menjadi 0,28. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem pembacaan sensor memiliki karakteristik yang bersifat linier, yaitu semakin

besar nilai ADC yang diterima oleh ESP32 maka semakin besar pula nilai hasil pengukuran yang diperoleh. Pada kondisi awal, nilai ADC sebesar 3120 menghasilkan nilai *Data Real* sebesar 0,00, yang dapat dianggap sebagai titik referensi atau kondisi awal sebelum terjadi perubahan besaran yang diukur. Selanjutnya, setiap kenaikan nilai ADC diikuti oleh peningkatan nilai *Data Real*, meskipun besar kenaikannya tidak selalu sama pada setiap *interval*. Perbedaan ini merupakan karakteristik yang umum terjadi pada sensor akibat adanya toleransi komponen elektronik, resolusi ADC, serta pengaruh noise selama proses akuisisi data. Data hasil pengujian menunjukkan bahwa rentang perubahan ADC relatif kecil, yaitu hanya sekitar 32 digit ADC, namun mampu menghasilkan perubahan nilai pengukuran hingga 0,28. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki sensitivitas yang cukup baik dalam mendeteksi perubahan parameter yang diukur. Sensitivitas tersebut sangat penting agar ESP32 mampu melakukan monitoring secara akurat dan merespons perubahan kondisi sistem dengan cepat.

Analisis regresi linear dilakukan untuk memperoleh hubungan matematis antara nilai ADC dan *Data Real*. Persamaan regresi yang diperoleh dapat digunakan sebagai persamaan kalibrasi sehingga setiap nilai ADC yang dibaca oleh ESP32 dapat dikonversi menjadi nilai pengukuran yang lebih akurat. Dengan adanya proses kalibrasi menggunakan regresi linear, kesalahan pembacaan sensor dapat dikurangi sehingga data monitoring yang ditampilkan oleh sistem *Smart Charge Switching* menjadi lebih presisi.

Selain itu, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa proses pembacaan data berlangsung secara stabil tanpa adanya lonjakan nilai yang signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sensor dan rangkaian akuisisi data bekerja dengan baik sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh ESP32 dalam proses monitoring maupun pengendalian sistem *Smart Charge Switching*.



Gambar 4. 1 Grafik Regresi Linear

Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa data pengujian membentuk pola yang cenderung meningkat secara linier. Hal ini menunjukkan bahwa setiap kenaikan nilai ADC diikuti oleh kenaikan nilai pengukuran sebenarnya, sehingga terdapat hubungan yang sebanding antara kedua variabel tersebut. Pada grafik terlihat bahwa garis regresi linear memiliki persamaan:

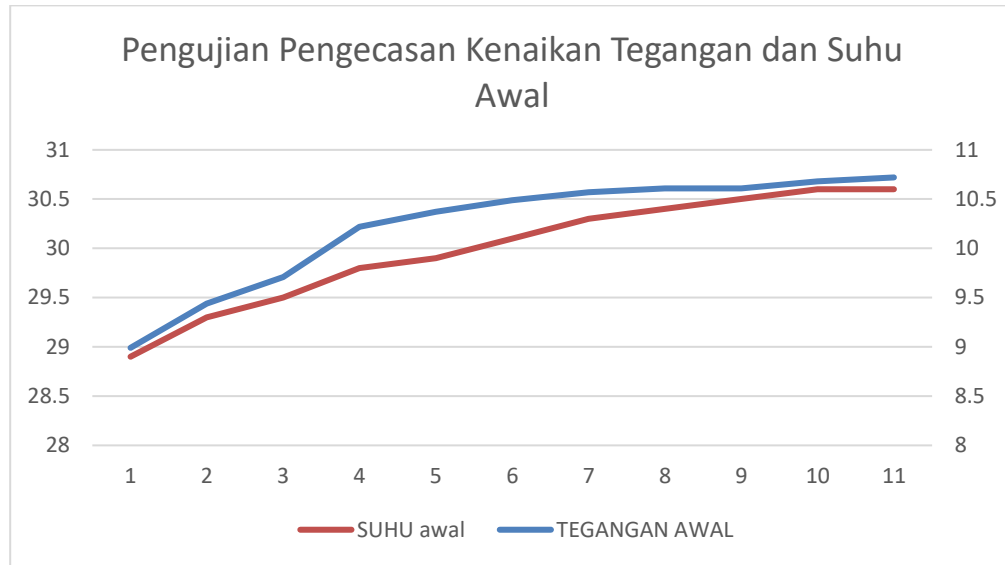
$$y = 0,0091x - 28,398$$

Persamaan tersebut merupakan hasil pendekatan matematis yang menggambarkan hubungan antara nilai ADC sebagai variabel bebas (x) dengan Data Real sebagai variabel terikat (y). Nilai koefisien 0,0091 menunjukkan bahwa setiap kenaikan satu satuan ADC akan meningkatkan nilai hasil pengukuran sekitar 0,0091 satuan. Sementara itu, konstanta $-28,398$ merupakan titik potong garis regresi terhadap sumbu vertikal yang digunakan dalam proses perhitungan regresi. ada rentang nilai ADC sekitar 3120 hingga 3140, kenaikan Data Real berlangsung hampir mengikuti garis regresi. Memasuki nilai ADC sekitar 3144, terlihat peningkatan Data Real yang sedikit lebih besar dibandingkan garis regresi.

4.1.4 Pengujian Perubahan Tegangan dan Suhu Baterai

Selama proses pengisian baterai dengan memantau dua parameter utama, yaitu tegangan baterai yang diukur menggunakan sensor PZEM-015 dan suhu baterai yang diukur menggunakan sensor suhu. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan monitoring kondisi baterai

secara *real-time* serta mengetahui hubungan antara kenaikan tegangan dengan perubahan suhu selama proses *charging* berlangsung. Data hasil pengujian diperoleh melalui pembacaan sensor setiap interval waktu yang telah ditentukan. Selanjutnya data ditampilkan dalam bentuk grafik agar perubahan karakteristik tegangan dan suhu baterai lebih mudah dianalisis.

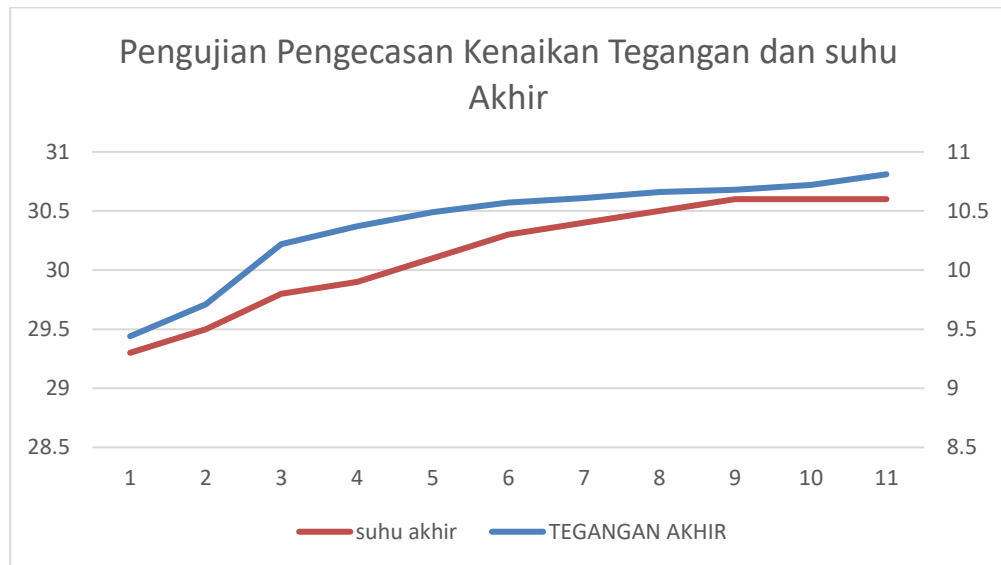


Gambar 4. 2 Grafik Pengisian Kenaikan Tegangan dan Suhu awal

Memperlihatkan hubungan antara kenaikan tegangan baterai dan perubahan suhu pada tahap awal proses pengisian. Garis berwarna biru menunjukkan perubahan tegangan baterai hasil pembacaan sensor PZEM-015, sedangkan garis merah menunjukkan perubahan suhu baterai yang diperoleh dari sensor suhu. Berdasarkan grafik terlihat bahwa sejak awal proses pengisian kedua parameter mengalami peningkatan secara bertahap. Tegangan baterai meningkat dari sekitar 8,99 Volt hingga mendekati 10,72 Volt, sedangkan suhu baterai meningkat dari 28,9°C menjadi sekitar 30,6°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi dari *charger* berhasil disimpan oleh baterai sehingga tegangan mengalami peningkatan secara kontinu.

Pada *interval* pertama hingga ketiga terlihat kenaikan tegangan yang relatif cepat dibandingkan kenaikan suhu. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada saat kapasitas baterai masih rendah, baterai mampu menerima arus pengisian lebih besar sehingga peningkatan tegangan berlangsung lebih cepat. Sementara itu, suhu baterai meningkat secara perlahan karena panas yang dihasilkan selama proses *charging* masih relatif kecil. Memasuki *interval*

pengujian berikutnya, laju kenaikan tegangan mulai melambat. Hal ini merupakan karakteristik normal baterai *lithium-ion*, di mana ketika kapasitas baterai bertambah, proses pengisian menjadi lebih stabil sehingga perubahan tegangan semakin kecil. Grafik suhu juga menunjukkan kecenderungan meningkat secara perlahan tanpa adanya lonjakan temperatur yang signifikan.



Gambar 4. 3 Grafik Pengecasan Kenaikan Tegangan dan Suhu akhir

Menunjukkan kondisi perubahan tegangan dan suhu pada tahap akhir proses pengisian baterai. Berdasarkan grafik terlihat bahwa tegangan baterai terus mengalami peningkatan hingga mencapai sekitar 10,81 Volt, sedangkan suhu baterai meningkat secara perlahan hingga berada pada kisaran 30,6°C. Dibandingkan dengan tahap awal pengisian, kenaikan tegangan pada tahap akhir terlihat lebih lambat. Hal ini menunjukkan bahwa baterai mulai mendekati kondisi penuh sehingga arus pengisian secara alami mulai berkurang. Fenomena tersebut sesuai dengan karakteristik metode pengisian baterai *lithium-ion*, yaitu semakin tinggi tegangan baterai maka laju kenaikan tegangan akan semakin kecil. Sementara itu, perubahan suhu juga cenderung stabil. Setelah mencapai sekitar 30,6°C, suhu baterai hampir tidak mengalami peningkatan yang berarti hingga akhir proses pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pengisian mampu bekerja dengan efisien tanpa menghasilkan panas berlebih.

Stabilnya suhu baterai menunjukkan bahwa energi listrik yang diberikan sebagian besar digunakan untuk proses penyimpanan energi, bukan berubah menjadi energi panas. Sementara itu, perubahan suhu juga cenderung stabil.

Setelah mencapai sekitar 30,6°C, suhu baterai hampir tidak mengalami peningkatan yang berarti hingga akhir proses pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pengisian mampu bekerja dengan efisien tanpa menghasilkan panas berlebih.

4.1.5 Pengujian akurasi Pengukuran Arus Menggunakan Sensor PZEM-15

Pengujian *hardware* ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan arus oleh sensor PZEM-015 dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat ukur standar berupa multimeter digital. Selain itu, pada pengujian ini juga dilakukan perbandingan dengan sensor ACS712 sebagai pembanding untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran masing-masing sensor. Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi arus yang berbeda. Nilai arus yang dibaca oleh sensor PZEM-015, sensor ACS712, dan multimeter dicatat kemudian dihitung persentase kesalahannya (*Error Percentage/E%*). Pengujian ini dilakukan sebelum proses kalibrasi atau regresi linear sehingga dapat diketahui karakteristik awal sensor.

NO	ACS712	PZEM-015	MULTIMETER	E% ACS712	E% PZEM
1	0	0.23	0.236	100	2.542373
2	0	0.24	0.234	100	-2.5641
3	0	0.26	0.249	100	-4.41767
4	0	0.28	0.269	100	-4.08922
5	0	0.29	0.282	100	-2.83688

Tabel 4. 5 Perbandingan Sensor Arus tanpa Regresi

Terlihat bahwa hasil pembacaan sensor PZEM-015 memiliki nilai yang sangat mendekati hasil pengukuran menggunakan multimeter digital. Pada lima kali pengujian, nilai arus yang dibaca oleh PZEM-015 berada pada rentang 0,23 A hingga 0,29 A, sedangkan hasil pengukuran multimeter berada pada rentang 0,236 A hingga 0,282 A. Selisih pembacaan yang relatif kecil menunjukkan bahwa sensor PZEM-015 memiliki tingkat akurasi yang baik dalam melakukan pengukuran arus DC. Persentase kesalahan (*Error Percentage*) sensor PZEM-025 berada pada kisaran sekitar -4,42% hingga 2,54%. Nilai error yang kecil tersebut menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi *monitoring* sistem *Smart Charge Switching*. Perbedaan hasil pengukuran dapat dipengaruhi oleh toleransi

komponen elektronik, resolusi sensor, gangguan (*noise*) pada sistem, maupun ketelitian alat ukur pembanding.

Sebaliknya, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ACS712 menghasilkan nilai pembacaan 0 A pada seluruh kondisi pengujian. Akibatnya, nilai persentase kesalahan mencapai 100% untuk setiap pengukuran. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sensor ACS712 tidak mampu mendeteksi arus yang mengalir pada rentang pengujian atau belum bekerja sebagaimana mestinya. Penyebabnya dapat berasal dari kesalahan pemasangan rangkaian, konfigurasi perangkat lunak yang belum sesuai, sensitivitas sensor yang kurang memadai terhadap arus kecil, atau belum dilakukan proses kalibrasi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan simulasi bisa ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem *Smart Charge Switching* berbasis ESP32 berhasil dirancang dan direalisasikan dengan mengintegrasikan sensor PZEM-015 sebagai sensor utama untuk *monitoring* parameter kelistrikan, *relay* sebagai saklar pengisian otomatis, sensor suhu sebagai pemantau temperatur baterai, serta rangkaian pendukung lainnya seperti *buck converter*, *boost converter*, *Battery Management System* (BMS), dan baterai *lithium-ion* 18650. Seluruh komponen mampu bekerja secara terintegrasi sehingga sistem dapat menjalankan fungsi *monitoring* dan pengendalian pengisian baterai secara otomatis.
2. Hasil pengujian proses *charging* menunjukkan bahwa tegangan baterai mengalami peningkatan secara bertahap sesuai karakteristik pengisian baterai *lithium-ion*. Tegangan baterai meningkat dari kondisi awal hingga mendekati tegangan target pengisian, sedangkan laju kenaikan tegangan semakin kecil ketika baterai mulai mendekati kondisi penuh. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengisian bekerja secara stabil dan sesuai dengan karakteristik metode pengisian baterai *lithium-ion*.
3. Subsistem *Switching Relay* dan Pembacaan Arus memiliki tingkat keandalan tertinggi, yaitu mampu beroperasi tanpa error dengan persentase keberhasilan 100% dari 10 kali percobaan. Subsistem Pembacaan Tegangan dan proses *Monitoring Sistem* juga bekerja dengan baik dengan tingkat keberhasilan sebesar 90% (9 kali berhasil dan 1 kali gagal dari 10 percobaan). Sistem yang dirancang telah berhasil diimplementasikan dan beroperasi dengan sangat baik dengan rata-rata tingkat keberhasilan keseluruhan mencapai 95%.
4. Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, sistem *Smart Charge Switching* berbasis ESP32 menggunakan sensor PZEM-015 telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu mampu melakukan *monitoring*

kondisi baterai secara *real-time*, meningkatkan keamanan proses pengisian melalui pemantauan tegangan dan suhu, serta mendukung proses pengisian baterai yang lebih aman, efisien, dan andal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan algoritma *State of Charge* (SOC) sehingga persentase kapasitas baterai dapat diketahui secara lebih akurat selama proses *charging* maupun *discharging*.
2. Penelitian selanjutnya juga dapat mengembangkan sistem dengan menambahkan fitur data logging menggunakan kartu SD atau penyimpanan cloud untuk merekam data tegangan, arus, daya, energi, dan suhu secara kontinu. Data tersebut dapat dimanfaatkan untuk analisis performa baterai dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Battery University. (2023). *Charging Lithium-Ion Batteries*. Diakses dari <https://batteryuniversity.com>
- Espressif Systems. (2023). *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Shanghai: Espressif Systems.
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 62619: Secondary Cells and Batteries Containing Alkaline or Other Non-Acid Electrolytes – Safety Requirements*. Geneva: IEC.
- Kadir, A. (2018). *Pemrograman Internet of Things Menggunakan ESP32*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2016). *Electronic Principles* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- NXP Semiconductors. (2021). *RS-485 Communication Standard*. Eindhoven: NXP.
- PZEM. (2022). *PZEM-025 DC Multifunction Meter User Manual*. Peacefair Electronic Co., Ltd.
- Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson Education.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). *Microelectronic Circuits* (7th ed.). Oxford University Press.

LAMPIRAN

DATA HASIL PENGUJIAN CHARGING

Data berikut disusun dari hasil pengujian charging yang tercantum pada Bab 4.

No.	Waktu	Tegangan Awal (V)	Tegangan Akhir (V)	Selisih (V)	Keterangan
1	20 menit	13,1	14,7	1,6	Mengisi
2	30 menit	14,1	14,5	0,4	Mengisi
3	30 menit	14,5	14,8	0,3	Mengisi
4	30 menit	14,7	15,0	0,2	Mengisi

DATA HASIL PENGUJIAN DISCHARGING

No.	Waktu	Tegangan Awal (V)	Tegangan Akhir (V)	Selisih (V)	Keterangan
1	30 menit	14,00	14,54	0,54	Berkurang
2	30 menit	14,54	14,48	-0,06	Berkurang
3	30 menit	14,48	14,46	-0,02	Berkurang
4	30 menit	14,60	14,55	-0,05	Mengisi

DATA HASIL PENGUJIAN INTEGRASI SISTEM

No.	Waktu	Tegangan Awal (V)	Tegangan Akhir (V)	Suhu Awal (°C)	Suhu Akhir (°C)	Selisih Tegangan (V)
1	10 menit	8,99	9,44	28,9	29,3	0,45
2	10 menit	9,44	9,71	29,3	29,5	0,27
3	10 menit	9,71	10,22	29,5	29,8	0,51
4	10 menit	10,22	10,37	29,8	29,9	0,15
5	10 menit	10,37	10,49	29,9	30,1	0,12
6	10 menit	10,49	10,57	30,1	30,3	0,08
7	10 menit	10,57	10,61	30,3	30,4	0,04
8	10 menit	10,61	10,66	30,4	30,5	0,05
9	10 menit	10,61	10,68	30,5	30,6	0,07
10	10 menit	10,68	10,72	30,6	30,6	0,04
11	10 menit	10,72	10,81	30,6	30,6	0,09

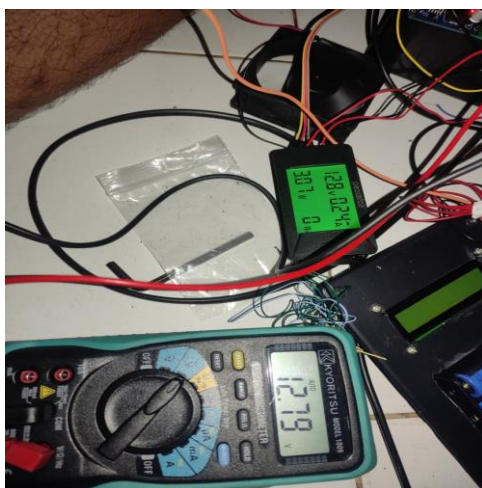
DATA PENGUJIAN REGRESI LINEAR

No.	ADC	Data Real
1	3120	0,00
2	3125	0,04
3	3135	0,12
4	3140	0,16
5	3144	0,24
6	3148	0,26
7	3151	0,27
8	3152	0,28

Data digunakan untuk mengevaluasi hubungan pembacaan ADC ESP32 dengan nilai pengukuran aktual.

PERBANDINGAN HASIL PENGUKURAN ARUS

No.	ACS712 (A)	PZEM-015 (A)	Multimeter (A)	Error ACS712 (%)	Error PZEM (%)
1	0	0,23	0,236	100	2,542373
2	0	0,24	0,234	100	-2,5641
3	0	0,26	0,249	100	-4,41767
4	0	0,28	0,269	100	-4,08922
5	0	0,29	0,282	100	-2,83688



```
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:16
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:18
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:21
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:24
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:35
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:38
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:41
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:43
Minggu, 28/06/2026 | Jam: 22:09:46
```

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



A. BIODATA PRIBADI

1. Nama : Ahmad Nawwal Izzul Khaq
2. Jenis kelamin : Laki-laki
3. Tempat Tanggal Lahir : Surabaya, 28 Mei 2001
4. Kebangsaan : Indonesia
5. Status : Pelajar
6. Tinggi, Berat badan : 165cm, 55kg
7. Agama : Islam
8. Alamat : Penjaringan 18 RT01/RW02, Penjaringan Sari, Rungkut
Kota. Surabaya
9. Nomor Telepon : 085191001694
10. Email : ahmadnawal68@gmail.com

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. SD : SDN PENJARINGANSARI 1/271
2. SMP/MTs : SMPN 30 SURABAYA
3. SMA/SMK : SMKN 5 SURABAYA
4. DIPLOMA III : PPNS (Teknik Kelistrikan Kapal)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)