

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PENGENDALI PENGISIAN BATERAI DARI PANEL SURYA BERBASIS ARDUINO

Bambang Winardi^{*)}, Enda Wista Sinuraya^{*)}, Imam Santoso dan Alfani Yahya Al Ghifari

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: bwundip@gmail.com, sinuraya_enda@elektro.undip.ac.id

Abstrak

Pengisian daya baterai aki basah langsung dari panel surya dapat menyebabkan ketidaksesuaian tegangan dan arus akibat fluktuasi radiasi matahari, yang berpotensi mempercepat kerusakan baterai. Untuk mengatasi hal ini, dirancang dan diimplementasikan sistem pengendali pengisian baterai berbasis *Arduino* yang dilengkapi dengan *buck converter* untuk menyesuaikan tegangan dan sensor INA219 untuk pemantauan *real-time*. Pengujian menunjukkan bahwa sistem ini mampu menyesuaikan tegangan dan arus pengisian sesuai kebutuhan baterai aki basah 12V 80Ah, meningkatkan efisiensi pengisian, dan mengurangi risiko overcharging. Pada kondisi cerah dengan radiasi matahari di atas 500 W/m², sistem mencatat arus hingga 2049,50 mA pada pukul 08.00 tanggal 11 November 2024, sedangkan pada kondisi mendung dengan radiasi di bawah 100 W/m², arus turun hingga di bawah 300 mA. Implementasi *solar tracker* meningkatkan efisiensi pengisian dengan memungkinkan arus maksimum dicapai lebih awal, yakni 2049,50 mA pada pukul 08.00. Selain itu, penggunaan pembersih panel surya meningkatkan arus dari 330 mA pada kondisi kotor menjadi 570 mA pada kondisi bersih, dengan peningkatan hingga 72,72%. Hasil menunjukkan bahwa integrasi solar tracker dan pembersih panel surya meningkatkan performa sistem pengisian baterai secara signifikan. Sistem berbasis mikrokontroler ini memastikan pengendalian yang presisi, pemantauan *real-time*, dan proteksi otomatis, menjadikannya solusi efisien dalam pemanfaatan energi terbarukan.

Kata Kunci: Panel surya, sistem pengendali pengisian, baterai, sensor.

Abstract

Charging Accu batteries directly from solar panels can cause voltage and current mismatches due to fluctuations in sunlight, potentially accelerating battery degradation. To address this issue, a battery charging control system based on *Arduino* was designed and implemented. The system employs a *buck converter* to regulate the input voltage and an INA219 sensor for *real-time* monitoring of voltage and current. Testing demonstrated that the system could adjust the charging voltage and current to meet the requirements of a 12V 80Ah Accu battery, improving charging efficiency and minimizing overcharging risks. Under clear conditions with solar radiation exceeding 500 W/m², the system recorded a current of up to 2049.50 mA at 08:00 on November 11, 2024, while under cloudy conditions with radiation below 100 W/m², the current dropped to below 300 mA. The implementation of a solar tracker improved charging efficiency, allowing the maximum current of 2049.50 mA to be achieved earlier, at 08:00. Additionally, the use of a solar panel cleaner increased the current from 330 mA in dirty conditions to 570 mA in clean conditions, representing an increase of up to 72.72%. The results show that integrating a solar tracker and a solar panel cleaner significantly enhances the performance of the battery charging system. This microcontroller-based system ensures precise control, *real-time* monitoring, and automatic protection, making it an efficient solution for utilizing renewable energy.

Keywords: Solar panel, charging control system, battery, sensor.

1. Pendahuluan

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber daya alternatif semakin berkembang seiring dengan kebutuhan energi terbarukan yang ramah lingkungan [1][10]. Salah satu aplikasi utamanya adalah pengisian daya baterai menggunakan panel surya. Panel surya menghasilkan tegangan dan arus yang bervariasi tergantung pada intensitas cahaya matahari, sehingga pengisian daya

baterai secara langsung sering kali tidak efisien[15][16]. Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan *overcharging* atau pengisian yang tidak stabil, yang berpotensi merusak baterai dan mengurangi umur penggunaannya[5][6][7].

Baterai aki basah bisa lebih awet jika rajin mengecek kualitas dan kuantitas air aki tipe G Force 12V 80AH, yang banyak digunakan dalam sistem penyimpanan energi, memerlukan tegangan dan arus yang terkontrol dengan

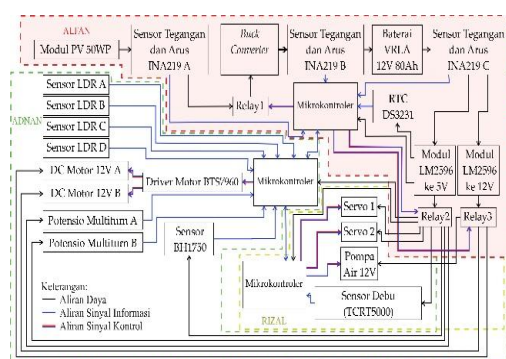
baik untuk menjaga performa dan durabilitasnya. Namun, pengisian langsung dari panel surya tanpa sistem pengendali sering kali mengabaikan kebutuhan tersebut, sehingga berisiko mempercepat kerusakan baterai[8][12]. Untuk mengatasi permasalahan ini, diperlukan sistem pengendali pengisian baterai yang mampu menyesuaikan tegangan dan arus dari panel surya secara otomatis[20]. Teknologi berbasis mikrokontroler, seperti Arduino, memberikan solusi yang efektif dengan memungkinkan pengendalian yang presisi dan integrasi fitur proteksi. Penggunaan *buck converter* dalam sistem ini memungkinkan pengaturan tegangan *input* dari panel surya agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai. Selain itu, sensor INA219 digunakan untuk memantau kondisi pengisian secara *real-time*, memberikan informasi yang akurat untuk mengoptimalkan kinerja pengendali[13].

Pengembangan sistem pengendali pengisian berbasis mikrokontroler ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi pengisian, mengurangi risiko *overcharging*, dan memperpanjang umur baterai. Selain itu, sistem ini memberikan keunggulan dibandingkan sistem manual, seperti pengendalian otomatis, proteksi lebih baik, dan pemantauan kondisi baterai secara kontinu, sehingga lebih andal untuk aplikasi berbasis energi terbarukan[9][14][17].

2. Perancangan Sistem

2.1. Arsitektur Keseluruhan Sistem

Dalam sistem energi ini, modul PV 50 WP berfungsi sebagai sumber daya utama yang menghasilkan tenaga listrik dari sinar matahari. Modul PV ini menangkap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik DC yang diperlukan untuk menyuplai beban. Namun, karena *output* dari modul panel surya dapat bervariasi tergantung pada intensitas cahaya matahari, diperlukan pengendali pengisian baterai untuk memastikan bahwa daya yang dialirkan dari modul panel surya ke baterai tetap stabil dan sesuai dengan kebutuhan. Pengendali pengisian baterai ini mengatur tegangan dan arus secara efisien, mengubah *input* yang mungkin tidak konsisten menjadi *output* yang stabil yang dapat diterima oleh baterai. Berikut merupakan rancang diagram blok Pengendali Pengisian Baterai yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Keseluruhan Sistem

Diagram blok yang ditandai oleh garis merah putus-putus dalam gambar sistem kendali ini menunjukkan beberapa komponen utama yang saling berinteraksi untuk menjalankan fungsi sistem *charge controller*. Komponen-komponen ini termasuk mikrokontroler, *Buck converter*, dan Sensor Tegangan.

Arus INA219, Modul PV 50WP, *Relay*, Baterai aki basah 12V 80Ah, dan Modul LM2596. Mikrokontroler berfungsi sebagai pusat pengendali utama dari seluruh sistem, menerima *input* dari berbagai sensor dan memberikan *output* untuk mengendalikan sistem kendali agar pengisian baterai lebih ideal.

INA219 digunakan sebagai sensor yang memantau tegangan dan arus secara *real-time*, memberikan data penting untuk pengendalian sistem. Data tersebut akan diolah oleh mikrokontroler sehingga dapat menentukan tahapan pengisian pada baterai.

Tahap pertama pengisian baterai adalah *bulk charging*. Pada tahap ini, tegangan dijaga konstan pada 14,6V untuk mengisi baterai hingga tahap tertentu. XL4005 diatur untuk menghasilkan *output* 14,6V. Setelah kondisi baterai sudah melewati tahap *bulk*, sistem harus dialihkan ke *absorption charging* dengan tegangan 14,4V untuk menjaga kondisi baterai tanpa risiko *overcharge*. Pada tahap ini, tegangan *output* diatur menjadi 14,4V. Pengaturan otomatis tersebut menggunakan pengendali tambahan melalui *relay*.

Selain membutuhkan informasi tegangan dan arus, informasi tentang waktu juga dibutuhkan dalam menentukan jadwal operasional sistem. Modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 digunakan untuk menyediakan waktu yang akurat kepada mikrokontroler.

Kombinasi empat sensor LDR (LDR A, B, C, D) yang terlihat pada diagram blok untuk menggerakkan motor DC dan servo. Algoritma aktivasi *wiper* berdasarkan jadwal waktu dari RTC DS3231 dan pembacaan sensor debu TCRT5000.

Aspek inovasi dari penelitian ini adalah penggunaan dua jenis buck converter yang berbeda (XL4005 dan XL7015) yang dikendalikan secara otomatis melalui *relay* untuk mengoptimalkan efisiensi pada setiap tahap pengisian (*Bulk*, *Absorption*, *Float*). Sistem ini secara cerdas memilih jalur konverter berdasarkan kebutuhan arus, ini merupakan optimasi efisiensi daya yang lebih spesifik dibandingkan pengisi daya standar yang hanya menggunakan satu konverter untuk seluruh tahap[18].

2.2. Identifikasi Masalah

Penggunaan energi surya sebagai alternatif sumber daya listrik semakin meningkat seiring dengan kebutuhan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Salah satu aplikasinya adalah dalam pengisian daya baterai yang

digunakan pada sistem panel surya untuk penerangan jalan. Namun, panel surya menghasilkan tegangan dan arus yang bervariasi tergantung pada intensitas cahaya matahari, sehingga pengisian daya baterai secara langsung sering kali kurang efisien. Fluktuasi tersebut dapat menyebabkan pengisian yang tidak stabil atau *overcharging*, yang pada akhirnya dapat merusak baterai dan mengurangi masa pakainya. Untuk mengatasi masalah tersebut, dirancang sebuah sistem pengendali pengisian baterai berbasis mikrokontroler. Sistem ini bertujuan untuk mengatur pengisian daya baterai agar sesuai dengan kebutuhan, sehingga tegangan dan arus dari panel surya dapat disesuaikan secara otomatis. Mikrokontroler seperti Arduino digunakan sebagai pengatur utama untuk memastikan proses pengisian yang presisi dan efisien.

Dalam perancangan sistem, diperlukan analisis yang mendalam terhadap nilai komponen dan parameter yang digunakan, seperti *buck converter* dan sensor tegangan. *Buck converter* dipilih karena mampu menurunkan tegangan input dari panel surya agar sesuai dengan spesifikasi baterai. Sensor INA219 juga diintegrasikan untuk memantau tegangan dan arus secara *real-time*, sehingga memungkinkan pengendalian berbasis data yang akurat. Setelah perancangan selesai, sistem pengendali ini diimplementasikan pada sistem panel surya yang digunakan untuk penerangan jalan. Sistem ini memastikan bahwa baterai aki basah tipe G Force 12V 80AH dapat terisi dengan efisien tanpa risiko *overcharging*. Dengan adanya sistem pengendali, masa pakai baterai dapat diperpanjang, dan keandalan sistem penerangan jalan berbasis energi surya meningkat.

Melalui pendekatan ini, sistem pengendali pengisian baterai berbasis mikrokontroler memberikan solusi yang lebih optimal dibandingkan metode manual, seperti pengendalian otomatis, proteksi lebih baik, dan pemantauan kondisi baterai yang berkelanjutan[19].

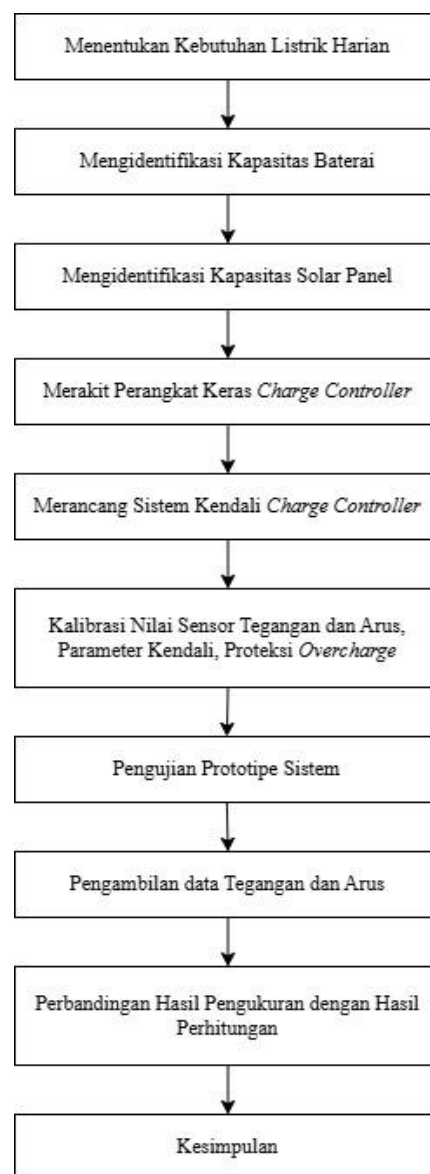
2.3. Perancangan

2.3.1. Diagram

Diagram atau biasa disebut sebagai alir, adalah diagram yang menunjukkan tahapan maupun keputusan yang diambil untuk menjalankan proses suatu program. Dalam konteks ini, Diagram dirancang untuk menggambarkan logika dan mekanisme kerja sistem yang sedang dikembangkan, sehingga memudahkan proses analisis, perancangan, dan implementasi. Pada perancangan sistem ini, diagram dibuat untuk memberikan gambaran visual tentang bagaimana sistem bekerja secara keseluruhan, mulai dari langkah awal hingga tahap akhir. Diagram yang menjelaskan tahapan-tahapan dalam sistem dapat dilihat pada Gambar 2.

Diagram di bawah menunjukkan alur kerja pengembangan dan pengujian sistem pengendali pengisian baterai panel surya. Menghitung total kebutuhan energi harian dari

keseluruhan alat yang akan dibebankan pada panel surya. Perhitungan ini harus mempertimbangkan kebutuhan fungsional dan operasional sistem. Mengidentifikasi kapasitas baterai, langkah ini termasuk efisiensi alat dan menyiapkan waktu kerja otonom alat selama beberapa waktu sehingga pada saat penyinaran matahari kurang, alat tetap dapat bekerja, dan daya panel surya berdasarkan data iradiasi matahari. Selanjutnya, sistem kendali pengisian dirancang menggunakan *relay* yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino, dengan kalibrasi sensor untuk memastikan pengukuran akurat. Nilai parameter tersebut yang dipakai dalam menentukan kendali melalui relay serta proteksi *overcharge*.



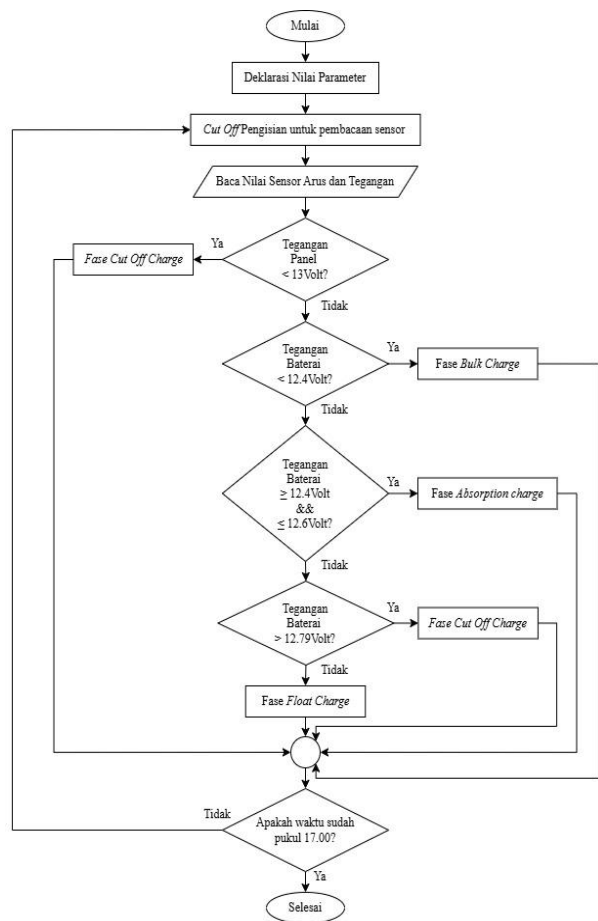
Gambar 2. Diagram Alat Secara Keseluruhan Subsistem

Prototipe diuji untuk memantau tegangan dan arus secara *real-time* menggunakan layer LCD 16x2. Hasil pembacaan sensor ditampilkan secara *real-time* pada layar LCD 16x2

dan hasil pengujian dibandingkan dengan perhitungan teoritis. Jika ditemukan kesalahan, perbaikan dilakukan, dan pengujian diulang hingga sistem bekerja sesuai pada rencana. Proses diakhiri dengan membuat kesimpulan dan memberikan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut. Langkah-langkah ini memastikan sistem pengendali bekerja secara optimal dan sesuai kebutuhan.

2.3.2. Algoritma dan Flowchart Sistem Pengendali Pengisian Baterai

Pada bagian perancangan diagram elektronik ini bertujuan untuk memudahkan pengerjaan rangkaian yang akan disusun ke dalam keseluruhan sistem nantinya. Berikut merupakan algoritma dan flowchart sistem pengendali pengisian baterai. Flowchart yang disajikan menggambarkan algoritma pengisian baterai dan pengaturan tegangan untuk mencegah *overcharging*. Proses dimulai dengan inisiasi proyek, yang menandai awal pengembangan sistem pengisian. Pada tahap awal, dilakukan deklarasi nilai parameter kendali dan pengukuran berdasarkan hasil kalibrasi untuk memastikan akurasi sesuai dengan standar. Selanjutnya, nilai tegangan dan arus dibaca dari sensor untuk dianalisis lebih lanjut.



Gambar 3. Flowchart Alat Secara Keseluruhan Subsistem Fase pengisian

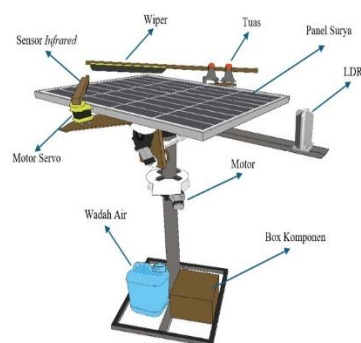
Tahapan berikutnya adalah pengambilan keputusan berdasarkan tegangan panel dan baterai. Jika tegangan panel kurang dari 13V, sistem masuk ke fase *Cut Off Charge* untuk menghentikan pengisian sementara. Jika tidak, proses berlanjut ke pemeriksaan tegangan baterai. Apabila tegangan baterai kurang dari 12.4V, pengisian dilakukan dalam fase *Bulk Charge*, di mana baterai menerima arus penuh untuk pengisian cepat. Jika tegangan baterai berada dalam rentang 12.4V hingga 12.6V, sistem masuk ke fase *Absorbsi Charge* untuk menyelesaikan pengisian dengan tegangan tetap hingga baterai mendekati kapasitas penuh.

Setelah itu, keputusan lain diambil berdasarkan tegangan baterai. Jika tegangan baterai melebihi 12.79V, sistem masuk ke fase *Cut Off Charge* untuk mencegah *overcharging*. Jika tidak, baterai dijaga dalam kondisi penuh melalui fase *Float Charge*, yang menggunakan arus pengisian minimal untuk menjaga daya baterai tanpa risiko *overcharging*. Proses ini diakhiri dengan langkah *Cut Off Pengisian*, memastikan pengisian dihentikan jika baterai telah penuh. Setelah selesai, siklus kembali dimulai dengan membaca nilai sensor secara berkala untuk memantau kondisi baterai.

Alur kerja ini dirancang untuk memastikan pengisian baterai berlangsung aman, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan sistem.

2.3.3. Perancangan Hardware Alat Keseluruhan

perancangan perangkat keras mencakup dua aspek utama: perancangan sistem pengendali pengisian dan perancangan sistem kendali. Untuk sistem pengendali pengisian, fokusnya adalah pada perhitungan parameter dan pemilihan komponen yang tepat untuk memastikan kinerja yang optimal. Sedangkan dalam perancangan sistem kendali, penekanan diletakkan pada perhitungan dan pemilihan komponen yang sesuai untuk rangkaian guna mencapai efisiensi dan efektivitas dalam pengendalian. Berikut merupakan perangkat keras alat secara keseluruhan subsistem prototipe Pengendali Pengisian Baterai yang ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah.



Gambar 4. Perangkat Keras Keseluruhan

Baterai aki basah 12V 80Ah menyimpan energi berlebih dari modul PV selama sinar matahari optimal dan menyediakan cadangan daya saat modul PV tidak dapat menyuplai daya, seperti pada malam atau cuaca buruk. Baterai ini memastikan ketersediaan daya terus-menerus untuk beban yang terhubung. Sensor tegangan dan arus digunakan untuk memantau sistem, dengan sensor tegangan mengukur tegangan dari baterai dan modul PV, serta sensor arus mengukur aliran arus, menjaga sistem dalam batas aman.

Relay bertindak sebagai saklar otomatis yang dikendalikan oleh mikrokontroler, yang mengatur semua operasi sistem berdasarkan data dari sensor. Mikrokontroler ini memproses informasi dan mengontrol *relay* untuk menjaga sistem tetap berfungsi dengan aman. Modul LM2596 menyediakan tegangan DC yang diperlukan untuk komponen lainnya, memastikan tegangan yang sesuai dan stabil. Modul XL4005 dan XL7015 digunakan untuk mengatur tegangan pada setiap fase pengisian (*bulk*, *absorption*, dan *float*), dikendalikan oleh mikrokontroler berdasarkan data sensor INA219, membentuk sistem pengendali pengisian yang efisien.

2.3.4. Perancangan sistem pengendali pengisian

Sistem pengendali pengisian dirancang untuk mengatur aliran daya dari modul panel surya ke baterai. Sistem ini dipilih karena efisiensinya dibandingkan dengan *buck converter* konvensional. Perancangan melibatkan lima komponen utama: XL4005, XL7015, INA219, *relay*, dan mikrokontroler. XL4005 dan XL7015 berfungsi sebagai *buck converter* untuk mengatur tegangan dan arus dari panel surya sesuai kebutuhan pengisian baterai [2],[3]. INA219 memantau tegangan dan arus secara real-time [4], *relay* mengatur aliran daya ke baterai, dan mikrokontroler mengelola pengisian secara efisien. Spesifikasi teknis XL4005 dan XL7015 dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

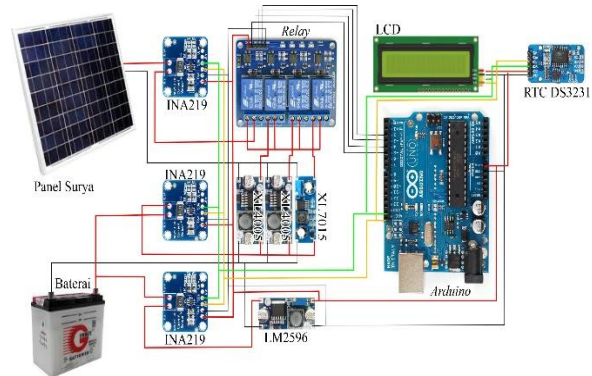
Tabel 1. Spesifikasi XL4005.

Parameter	Nilai
Input Voltage	5V – 32V DC
Output Voltage	0.8V – 30V DC
Output Current	Maksimum 5A (Disarankan <= 4A)
Efisiensi	Hingga 90%
Proteksi	Overheat dan short-circuit protection

Tabel 2 Spesifikasi XL7015.

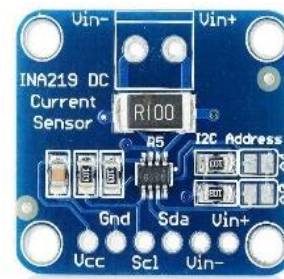
Parameter	Nilai
Input Voltage	5V – 80V DC
Output Voltage	1.25V – 60V DC
Output Current	Maksimum 0.8A (Disarankan lebih rendah)
Efisiensi	Hingga 96%
Proteksi	Overheat dan short-circuit protection

Berdasarkan parameter yang diinginkan. Implementasi pengisian baterai ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian perangkat keras pengisian baterai

Pada implementasi rangkaian tersebut digunakan komponen XL4005, XL7015, *relay*, dan pada sisi keluaran terdapat sensor INA219 sebagai komponen *feedback* sistem untuk mendapatkan nilai perhitungan sehingga pengendalian *relay* dapat sesuai dengan tahapan pengisian baterai.



Gambar 6. INA219

2.3.5. Perancangan Skema Koneksi Sistem

Dalam perancangan ini, XL4005 dan XL7015 akan menurunkan tegangan dari panel surya 50WP (yang memiliki $V_{mp} \sim 17-18V$) menjadi tegangan yang sesuai untuk proses pengisian baterai aki basah, yaitu 13,8V - 14,6V. Pengisian baterai memiliki tiga tahap utama yaitu *bulk charging*, *absorption charging*, dan *float charging*.

A. Bulk Charging

Pada tahap *bulk*, baterai diisi dengan tegangan konstan sebesar 14,6V hingga tegangan pengisian mendekati tahapan selanjutnya. Pada tahap ini menggunakan XL4005 yang diatur agar *outputnya* berada tepat pada 14,6V. Pengaturan dapat menggunakan potensiometer pada XL4005 untuk menyesuaikan tegangan *output*.

B. Absorption Charging

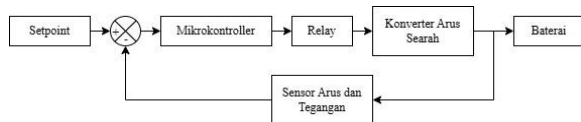
Setelah pengisian baterai mencapai tahapan *absorption*, baterai diisi dengan tegangan konstan 14,4V hingga pengisian mendekati tahapan selanjutnya. Pada tahap ini menggunakan XL4005 yang diatur agar *outputnya* berada tepat pada 14,4V. Pengaturan dapat menggunakan potensiometer pada XL4005 untuk menyesuaikan tegangan *output*[11].

C. Float Charging

Ketika baterai sudah mendekati penuh, tegangan pengisian diturunkan untuk mempertahankan daya agar baterai selalu siap digunakan tanpa overcharge. Pada tahap *float charging* baterai diisi dengan tegangan konstan 13.6V hingga baterai penuh. Pada tahap ini menggunakan XL7015 yang diatur agar *output*nya berada tepat pada 13.6V. Penggunaan XL7015 pada tahap ini karena arus *output* maksimalnya adalah 0,8A, dan efisiensinya sampai 96%. Dengan batas arus 0,8A, modul ini lebih cocok untuk tahap float charging karena arus yang dibutuhkan relatif kecil. Dalam tahap *float charging* membantu menjaga kesehatan baterai dalam jangka panjang, terutama untuk aplikasi yang memerlukan penyimpanan energi dalam waktu lama.

2.3.6. Perancangan Pengendali Relay pada pengendali pengisian baterai

Dalam penelitian ini, pengendali tegangan keluaran pengendali yang digunakan adalah *relay* 4 channel. Penggunaan pengendali dengan *relay* dipilih karena jenis pengendali ini mampu memberikan respons yang cepat dan stabil pada jalur rangkaian yang akan digunakan. Diagram blok untuk pengendalian tegangan keluaran dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram blok pengendalian tegangan keluaran

Kontrol mikrokontroler membantu menjaga kestabilan sistem pengisian baterai dengan mengatur jalur dari pengisian yang melalui *relay*. Dengan mengatur *relay* secara dinamis, mikrokontroler memastikan bahwa konverter tetap pada tegangan keluaran yang diinginkan meskipun ada perubahan beban atau fluktuasi *input*.

Perancangan pengendali *relay* membutuhkan parameter berupa nilai tegangan dan arus dari sensor INA219. Nilai tegangan disesuaikan dengan perhitungan yang sudah ditetapkan yaitu pada tahap *bulk charging*, *absorption charging*, *float charging*, dan *cut off charging*. Tahap *cut off charging* digunakan pada dua kondisi, yaitu tegangan panel rendah dan tegangan baterai penuh. Adanya kemampuan untuk menyesuaikan tegangan dan arus secara dinamis memastikan baterai tidak hanya terisi penuh tetapi juga awet dan siap digunakan kapan saja

2.3.7. Perancangan Software atau Coding Arduino

Pada perancangan perangkat lunak (*software*) ini terdiri dari penjelasan mengenai program pembacaan nilai arus dan tegangan, penentuan tahap pengisian, sistem pengendali *relay*, serta program logika utama.

```
coding-arduino-no
1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 #include <Servo.h>
4
5 #define LCD_ADDRESS 0x28
6 LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDRESS, 16, 2);
7
8 unsigned long last_leftAverage = 0;
9 unsigned long last_middleAverage = 0;
10 unsigned long last_rightAverage = 0;
11 unsigned long last2_leftAverage = 0;
12 unsigned long last2_middleAverage = 0;
13 unsigned long last2_rightAverage = 0;
14
15 int nextIcd = 1;
16 unsigned long previousMillis_lcd = 0;
17 unsigned long previousMillis_lihatIcd = 0;
18 const long interval_lcd = 5000; // 5 detik
19 const long interval_lihatIcd = 500; // 0.5 detik
20
21 // Define pin numbers
22 const int leftSensor = A0; // Pin connected to OUT1 (analog input)
23 const int middleSensor = A1; // Pin connected to OUT3 (analog input)
24 const int rightSensor = A2; // Pin connected to OUT5 (analog input)
25
26 const int relayPin = 7; // Pin connected to relay for water pump
27
28 // Servo objects representing the MG996R servos
29 Servo servo1; // Servo for scanning
30 Servo servo2; // Servo for wiper
31
32 unsigned long previousMillis = 0;
33 const long interval = 5000; // 5 detik
34 bool isServo2Active = false; // Flag to check if Servo 2 is active
35 bool hasScanned = false; // Flag to ensure only 1 scan per operation
36
```

Gambar 8. Halaman awal coding arduino

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Rangkaian Kendali

Pengujian sistem dilakukan dengan tujuan mengamati dan menganalisis keandalan kerja sistem.. Pengujian pada penelitian ini meliputi pengujian rangkaian kendali, pengujian sensor tegangan, pengujian sensor arus, pengujian *relay*, pengujian pengendali pengisian baterai.

3.1.1. Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian sensor tegangan dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan oleh sensor tegangan dan multimeter digital Sanwa. Data hasil perbandingan antara pembacaan sensor tegangan yang digunakan dalam sistem dengan pembacaan menggunakan multimeter Sanwa sebagai alat referensi. Dari perbandingan ini, diperoleh rata-rata selisih nilai sebesar 0,04 Volt, yang mencerminkan bahwa perbedaan antara kedua metode pengukuran cukup kecil. Selain itu, tingkat kesalahan (*error*) yang dihasilkan dari perbandingan tersebut hanya sebesar 0,39%, menunjukkan bahwa tingkat akurasi sensor cukup tinggi. Hasil ini memberikan indikasi bahwa sensor tegangan yang digunakan dalam sistem telah berfungsi dengan baik dan mampu memberikan data yang mendekati nilai sebenarnya.

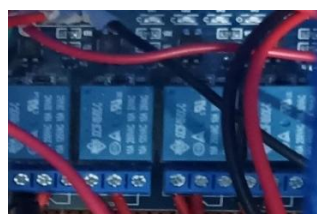
3.1.2. Pengujian Sensor Arus

Pengujian sensor arus INA219 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan oleh sensor arus dengan multimeter digital Sanwa. Data hasil perbandingan

pembacaan sensor arus dengan *Clamp meter* memiliki rata-rata selisih sebesar 20,33 mA dan *error* sebesar 1,68 %. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor arus yang digunakan telah berfungsi dengan baik.

3.1.3. Pengujian Pengaturan Relay

Pengujian pengaturan *relay* dilakukan dengan menguji kondisi *relay* berdasarkan tegangan baterai. Pada perancangan *relay* pengisian pada kondisi *open* ketika tegangan ketika sedang menilai tahap pengisian dan dalam kondisi *close* ketika sudah menentukan tahap pengisian. Data pengujian ditunjukkan pada Gambar 9.



(a)



(b)

Gambar 9.(a) Data pengujian kondisi *relay* dalam keadaan *open*. (b) Data pengujian kondisi *relay* dalam keadaan *close*.

Pada Gambar 9, ditampilkan ilustrasi kondisi *relay* pada dua keadaan yang berbeda, yaitu keadaan *open* dan *close*, sebagai bagian dari mekanisme pengendalian pengisian daya sistem. Bagian (a) dari gambar menunjukkan kondisi *relay* dalam keadaan *open*. Dalam kondisi ini, sistem berada pada tahap evaluasi awal untuk menilai parameter yang diperlukan sebelum menentukan langkah selanjutnya dalam proses pengisian baterai. Keadaan ini mencerminkan bahwa sistem belum memulai proses pengisian daya, melainkan sedang memonitor tegangan dan arus sebagai bagian dari tahap pengujian.

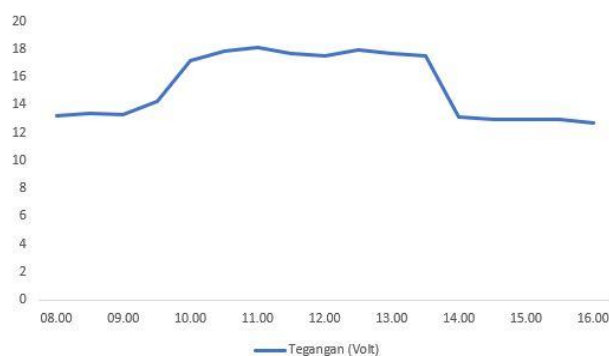
Sementara itu, bagian (b) menunjukkan kondisi *relay* dalam keadaan *close*. Kondisi ini terjadi ketika sistem telah menyelesaikan evaluasi dan menentukan bahwa pengisian daya dapat dilakukan. *Relay* yang berada dalam keadaan *close* menandakan bahwa aliran daya dari panel surya ke baterai telah diaktifkan, dan sistem sedang berada dalam tahap pengisian. Indikator lampu yang terintegrasi pada sistem memberikan visualisasi proses yang sedang berlangsung, baik saat terjadi pengisian daya maupun saat tidak ada proses pengisian.

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, pengaturan *relay* terbukti berfungsi dengan baik. *Relay* dapat secara otomatis beralih antara kondisi *open* dan *close* sesuai dengan parameter yang telah ditentukan oleh algoritma kontrol pada mikrokontroler. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendali pengisian mampu bekerja secara optimal untuk mengatur aliran daya ke baterai dengan akurasi dan efisiensi yang tinggi.

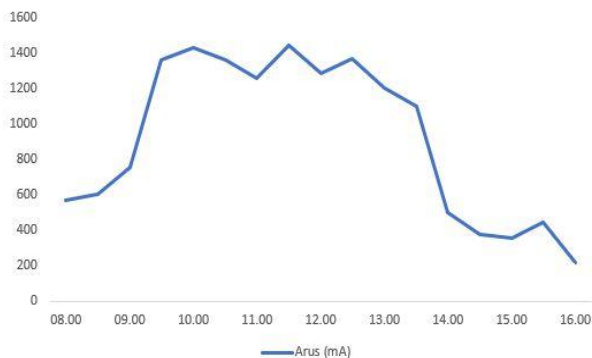
3.2. Pengujian Pengendali Pengisian untuk Baterai

Pengujian ini bertujuan menguji keandalan pengisian untuk pengisian baterai. Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan keluaran baterai. Baterai yang digunakan untuk pengisian adalah baterai *G Force* 12V 80Ah dengan Tegangan awal 12.3V. Data pengujian diambil setiap 30 menit sekali selama 8 jam. Nilai terendah tercatat pada pukul 16.00 dengan tegangan 12.68V dan arus 217,48 mA, hal ini disebabkan oleh posisi matahari yang sudah condong ke arah barat serta kondisi alam yang mendung. Nilai tertinggi tercatat pada pukul 12.00 dengan tegangan 17,50 V dan arus 1281,72 mA, nilai tersebut disebabkan oleh posisi matahari yang berada di atas sehingga mengenai wilayah permukaan panel. Nilai awal Tegangan baterai adalah 12.3V dan mencapai nilai tegangan 12.47V setelah dilakukan pengisian selama 7 jam. Pada pengujian ini diperoleh perubahan nilai tegangan selama pengisian 8 jam sebesar 0.17V. Jumlah nilai arus ketika pengisian adalah sekitar 7807,5 mA, hal ini berarti perlu 10 hari pengisian dalam kondisi berawan untuk mengisi penuh baterai 80Ah. Meskipun kapasitas baterai dan besar daya panel surya sudah diperhitungkan namun ketika keadaan banyak berawan membuat daya yang tertangkap hanya sedikit.

Gambar 10 dan 11 merupakan grafik tegangan dan arus pengisian baterai *G Force* 12 V 80 Ah. Pada Gambar 10 tegangan mengalami kenaikan dan berada pada puncaknya saat siang hari. Pada Gambar 11, arus pengisian baterai kenaikan di awal pengisian sampai pada puncaknya pada siang hari. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketika panel pada posisi statis, pengisian puncak berada pada waktu siang karena posisi matahari yang berada di atas.



Gambar 10. Nilai perubahan tegangan selama 8 jam

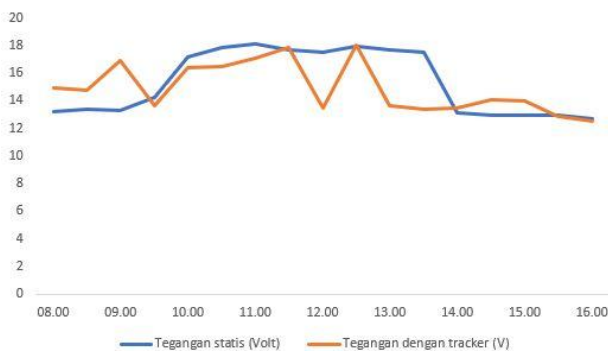


Gambar 11. Nilai perubahan arus selama 8 jam

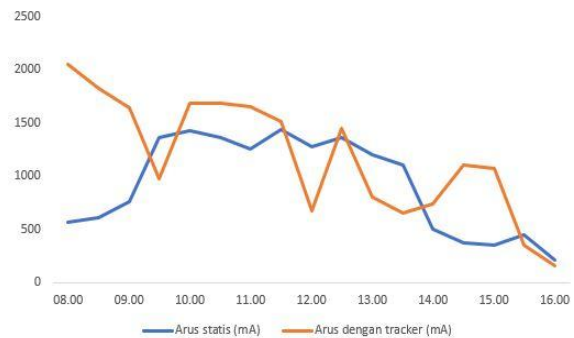
3.3. Pengujian Perbedaan Variasi Keadaan Panel

3.3.1. Pengujian Solar Tracker

Pengujian *solar tracker* dilakukan di Lapangan Futsal Teknik Elektro, Universitas Diponegoro. Dimulai pukul 08.00 WIB hingga 16.00 WIB, dengan pengambilan data dilakukan setiap setengah jam. awal Tegangan baterai adalah 12.25V dan mencapai nilai tegangan 12.5V setelah dilakukan pengisian selama 8 jam. Nilai terendah tercatat pada pukul 16.00 dengan tegangan 12.57V dan arus 158,59 Ampere, hal ini disebabkan oleh kondisi alam yang mendung. Nilai tertinggi tercatat pada pukul 08.00 dengan tegangan 14,95 V dan arus 2049,50 mA, nilai tersebut disebabkan oleh posisi matahari yang berada di atas sehingga mengenai wilayah permukaan panel. Pada pengujian ini diperoleh perubahan nilai tegangan selama pengisian 8 jam sebesar 0.25V. Jumlah nilai arus ketika pengisian adalah sekitar 10006,27 mA, hal ini berarti perlu 8 hari pengisian dalam kondisi berawan untuk mengisi penuh baterai 80Ah. Meskipun kapasitas baterai dan besar daya panel surya sudah diperhitungkan namun ketika keadaan banyak berawan membuat daya yang tertangkap hanya sedikit.



Gambar 12. Nilai perubahan tegangan selama 8 jam



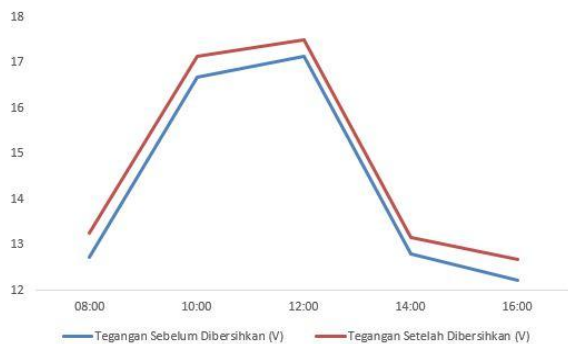
Gambar 13. Nilai perubahan arus selama 8 jam

Gambar 12 dan 13 merupakan grafik tegangan dan arus pengisian baterai G Force 12 V 80 Ah. Pada Gambar 12 tegangan *tracker* terlihat lebih stabil dibanding statis yang mengalami kenaikan dan berada pada puncaknya saat siang hari, namun karena terdapat kondisi alam yang banyak mendung maka terdapat fluktuasi pada keduanya. Pada Gambar 13, arus pengisian baterai pada statis juga terlihat lebih stabil dibanding statis yang memiliki kenaikan di awal pengisian sampai pada puncaknya pada siang hari, kondisi alam juga mempengaruhi besar arus yang diterima sehingga terdapat fluktuasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketika panel pada posisi statis, pengisian puncak berada pada waktu siang karena posisi matahari yang berada di atas, dan ketika posisi panel mengikuti matahari pengisian relatif lebih stabil dibuktikan ketika pada pagi hari tegangan dan arus sudah berada pada nilai yang biasanya hanya dapat diraih ketika siang hari oleh panel surya statis. sehingga penggunaan *solar tracker* juga sangat dibutuhkan untuk pembangkit panel surya.

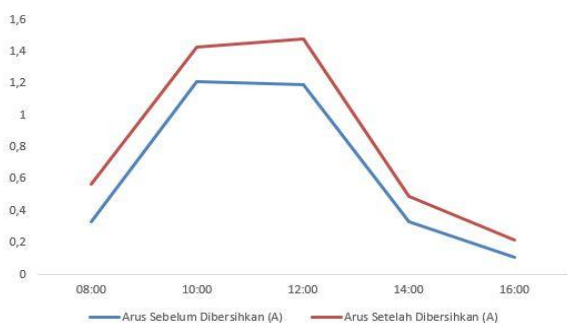
3.3.2. Pengujian Pembersih Panel

Pengujian Pembersih Panel dilakukan di Lapangan Futsal Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, dengan pengambilan data dilakukan setiap dua jam. Secara berurutan menunjukkan hasil pengukuran tegangan sebelum dibersihkan dan arus sebelum dibersihkan. Dilanjutkan dengan hasil pengukuran tegangan setelah dibersihkan dan arus setelah dibersihkan. Pengukuran arus listrik pada panel surya dilakukan untuk membandingkan nilai sebelum dan sesudah pembersihan.

Pengukuran tegangan panel surya dilakukan pada pukul 08.00, 10.00, 12.00, 14.00, dan 16.00 untuk membandingkan nilai sebelum dan sesudah pembersihan dengan servo wiper. Hasilnya disajikan dalam grafik untuk mempermudah analisis. Grafik menunjukkan tegangan setelah pembersihan selalu lebih tinggi di setiap waktu pengukuran. Kenaikan tersebut mampu menaikkan tegangan sebesar 4% lebih.



Gambar 14. Perubahan Tegangan Sebelum dan Sesudah Pembersihan



Gambar 15. Perubahan Arus Sebelum dan Sesudah Pembersihan

Pengukuran arus listrik pada panel surya dilakukan untuk membandingkan nilai sebelum dan sesudah pembersihan dengan menggunakan servo *wiper*. Data arus ini dicatat pada beberapa waktu tertentu, yaitu pukul 08.00, 10.00, 12.00, 14.00, dan 16.00. Nilai-nilai tersebut disajikan dalam dua tabel dan digambarkan dalam Gambar 15.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem pengendali pengisian baterai berbasis Arduino yang dikembangkan telah berhasil mencapai tujuan utama penelitian untuk menciptakan pengisian daya yang aman, efisien, dan terukur. Beberapa poin utama yang mengaitkan hasil dengan tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

- Efektivitas Pengendalian Tegangan dan Arus: Sistem berhasil mengatasi masalah fluktuasi radiasi matahari melalui integrasi *buck converter* dan algoritma kontrol mikrokontroler yang secara otomatis menyesuaikan profil pengisian. Penggunaan tahapan pengisian (*Bulk*, *Absorption*, dan *Float*) terbukti mampu memberikan tegangan yang tepat sesuai kebutuhan spesifikasi baterai aki basah 12V 80Ah, sehingga secara efektif mencegah risiko *overcharging* yang menjadi penyebab utama kerusakan baterai pada sistem pengisian langsung.

- Akurasi Pemantauan Real-Time: Implementasi sensor INA219 memberikan presisi tinggi dalam pemantauan kondisi pengisian secara *real-time*. Hal ini memungkinkan sistem pengendali untuk mengambil keputusan dinamis melalui *relay* berdasarkan data akurat, yang mendukung tujuan penelitian dalam meningkatkan keandalan sistem dibandingkan metode manual atau statis.
- Optimasi Pemanenan Energi: Integrasi teknologi *solar tracker* dan sistem pembersih panel secara signifikan meningkatkan performa sistem dalam menangkap energi matahari. *Solar tracker* memungkinkan sistem mencapai arus pengisian optimal lebih awal dibandingkan sistem statis, sementara mekanisme pembersihan memastikan hambatan akibat debu dapat diminimalisir, sehingga efisiensi pengisian tetap terjaga pada kondisi lingkungan yang suboptimal.

Referensi

- [1]. "Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik," Jakarta: Kementerian ESDM.
- [2]. XL7015 datasheet, "0.8A 150KHz 80V Buck DC to DC Converter," Sunrom Technologies
- [3]. XL4005 datasheet, "5A 300KHz 32V Buck DC to DC Converter," HandsOn Technology.
- [4]. INA219 datasheet, "High-Side Measurement, Bidirectional Current/Power Monitor," Texas Instruments.
- [5]. M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of the Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm," IEEE Transactions on Sustainable Energy.
- [6]. T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [7]. A. K. M. Sajjad, M. A. Hoque, and S. Rahman, "Design and implementation of a solar tracker with cleaning mechanism for optimizing PV module output," Renewable Energy and Power Quality Journal, vol. 16, no. 2, pp. 125–135, 2018.
- [8]. M. Patel, Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, 2nd ed., CRC Press, 2005, ch. 6, pp. 215–280.
- [9]. "ISO 50001: Energy Management Systems—Requirements with Guidance for Use," International Organization for Standardization, Geneva, 2018.
- [10]. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014, "Kebijakan Energi Nasional," Jakarta: Kementerian ESDM
- [11]. Addicore Electronics, "XL4005 Step-Down Adjustable DC-DC Switching Buck Converter,".
- [12]. H. T. Nguyen and M. R. Shadmand, "Battery State of Charge Estimation Using Model Predictive Control," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 8, pp. 3277–3285, Aug. 2018.
- [13]. P. G. Barbosa, "Integration of Renewable Energy Sources in Distribution Systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 92, pp. 1021–1034, 2021.

- [14]. Y. Baghzouz, "Efficiency Optimization of Solar Systems," *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 29, no. 3, pp. 234–242, 2020.
- [15]. A. F. Sherwani, J. A. Usmani, and V. Kumar, "Life Cycle Assessment of Solar PV Systems," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 641–647, Mar. 2009.
- [16]. "Analisis Potensi Energi Surya di Indonesia," Kementerian ESDM, Jakarta: 2021.
- [17]. D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed., Wiley, 2013.
- [18]. J. M. Rabaey, A. Chandrakasan, and B. Nikolic, *Digital Integrated Circuits: A Design Perspective*, 2nd ed., Prentice Hall, 2002.
- [19]. "ISO 14001: Environmental Management Systems—Requirements with Guidance for Use," International Organization for Standardization, Geneva, 2015.
- [20]. "Nationally Determined Contributions (NDCs): Indonesia's Commitments under the Paris Agreement," Indonesia Environment & Energy Center, 2022.