

Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Pengarah Panel Surya Berkbasis Sensor Cahaya Untuk Optimalisasi Daya PLTS

Siti Sofa*; Ahmad Darmawan S; Heru Abrianto

Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tama Jagakarsa, Jakarta

Email: sofasiti34@gmail.com, heruab@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan perlu didukung dengan sistem yang mampu mengoptimalkan penyerapan cahaya matahari. Panel surya yang dipasang secara statis memiliki keterbatasan dalam mengikuti pergerakan matahari sehingga daya yang dihasilkan belum optimal. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring serta pengarah panel surya (solar tracker) berbasis modul sensor cahaya KY-018 untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya. Sistem dirancang menggunakan Arduino Uno sebagai pengendali utama, dua sensor cahaya KY-018, motor servo MG996R sebagai penggerak panel, sensor tegangan, sensor arus ACS712, LCD 16×2 I2C, panel surya 20 WP, Solar Charge Controller (SCC), dan baterai. Pengujian dilakukan dengan membandingkan mode tracker dan mode statis berdasarkan parameter tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem solar tracker mampu bekerja dengan baik dalam mengikuti arah datangnya cahaya matahari secara otomatis. Pada mode tracker diperoleh rata-rata tegangan sebesar 13,17 Volt, arus 1,634 Ampere, dan daya 21,52 Watt. Dibandingkan dengan mode statis yang menghasilkan rata-rata daya 20,67 Watt, sistem solar tracker mampu meningkatkan daya keluaran panel surya sebesar 0,85 Watt atau sekitar 4,09%.

Kata Kunci: PLTS, panel surya, sistem pelacak matahari, sensor cahaya KY-018, Arduino Uno.

Abstract

The utilization of solar energy as a renewable energy source requires a system capable of optimizing sunlight absorption. Fixed-position solar panels have limitations in following the sun's movement, resulting in less optimal power generation. This research aims to design and implement a solar panel monitoring and solar tracking system based on KY-018 light sensor modules to optimize the output power of a solar panel. The system was developed using an Arduino Uno as the main controller, two KY-018 light sensors, an MG996R servo motor, a voltage sensor, an ACS712 current sensor, a 16×2 I2C LCD, a 20 WP solar panel, a Solar Charge Controller (SCC), and a battery. Performance testing was carried out by comparing the tracker mode with the fixed-position mode based on voltage, current, and output power measurements. The results show that the proposed solar tracking system successfully follows the direction of incoming sunlight automatically. The tracker mode produced an average voltage of 13.17 V, an average current of 1.634 A, and an average output power of 21.52 W. Compared with the fixed-position mode, which produced an average output power of 20.67 W, the proposed system increased the output power by 0.85 W or approximately 4.09%.

Keywords: Photovoltaic System, Solar Tracker, KY-018 Light Sensor, Arduino Uno, Solar Power Plant

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun seiring dengan pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, dan bertambahnya jumlah penduduk. Berdasarkan data yang dipublikasikan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, konsumsi listrik per kapita nasional pada tahun 2023 mencapai 1.337 kWh/kapita, mengalami kenaikan sebesar 13,98% dibandingkan tahun 2022 yang tercatat sebesar 1.173 kWh/kapita [1]. Pada tahun 2024, angka tersebut kembali meningkat dan mencapai rekor tertinggi sebesar 1.411 kWh/kapita, yang mencerminkan pertumbuhan kebutuhan energi sekitar 5,5% secara tahunan [2]. Kondisi ini menempatkan Indonesia sebagai salah satu negara dengan pertumbuhan konsumsi energi listrik tertinggi di kawasan Asia Tenggara, sekaligus menghadirkan tekanan yang semakin besar terhadap sistem penyediaan energi nasional.

Dalam konteks upaya transisi energi menuju sumber yang lebih bersih dan berkelanjutan, energi surya atau energi fotovoltaik muncul sebagai salah satu kandidat paling potensial untuk dikembangkan secara masif di Indonesia. Hal ini didukung oleh posisi geografis Indonesia yang sangat menguntungkan sebagai negara kepulauan yang terletak di sepanjang garis khatulistiwa. Berdasarkan data irradiasi matahari yang dihimpun oleh Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, wilayah Indonesia secara rata-rata menerima intensitas radiasi matahari sebesar 4,80 kWh/m²/hari sepanjang tahun, dengan variasi yang relatif kecil antara musim dibandingkan negara-negara di lintang tinggi [4]. Potensi sumber daya energi surya Indonesia bahkan mencapai lebih dari 3.200 Gigawatt, apabila seluruh area yang potensial dimanfaatkan secara optimal [5]. Namun demikian, realisasi pemanfaatan energi surya dalam bentuk kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya terpasang hingga saat ini baru mencapai sekitar 200 Megawatt, atau kurang dari satu persen total potensi yang tersedia. Kesenjangan yang sangat besar antara potensi dan

realisasi ini menunjukkan bahwa masih terdapat hambatan teknis maupun non-teknis yang perlu diatasi untuk mendorong adopsi teknologi PLTS secara lebih luas, termasuk pada skala kecil yang dapat diimplementasikan langsung oleh masyarakat.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada skala kecil, yang umumnya dikenal sebagai sistem PLTS off-grid atau mandiri, menawarkan solusi penyediaan energi listrik yang desentralisasi dan dapat diakses oleh berbagai kalangan masyarakat, termasuk di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Dalam sistem PLTS skala kecil, panel surya fotovoltaik merupakan komponen inti yang berperan mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah melalui efek fotovoltaik. Namun demikian, terdapat permasalahan mendasar yang secara umum dihadapi oleh sistem PLTS konvensional, yaitu bahwa panel surya pada umumnya dipasang secara statis dengan sudut dan orientasi yang tetap sepanjang waktu. Pemasangan statis ini mengakibatkan panel surya hanya mampu menyerap energi matahari secara optimal pada saat matahari berada tepat posisi yang berhadapan langsung dengan permukaan panel, yaitu pada sekitar tengah hari. Di luar waktu tersebut, terutama pada pagi hari ketika matahari baru terbit di ufuk timur dan pada sore hari ketika matahari menuju ufuk barat, sudut datang cahaya matahari terhadap permukaan panel menjadi sangat miring sehingga intensitas radiasi efektif yang diterima panel berkurang secara signifikan. Fenomena ini secara langsung menurunkan daya keluaran panel surya dan mengurangi total energi yang dapat diproduksi dalam satu siklus harian secara keseluruhan.

Permasalahan efisiensi penyerapan energi pada sistem panel surya statis telah mendorong pengembangan teknologi yang dikenal sebagai solar tracker atau sistem pengarah panel surya. Solar tracker adalah suatu sistem elektro-mekanik yang dirancang untuk menggerakkan panel surya secara otomatis mengikuti pergerakan posisi matahari sepanjang hari, sehingga permukaan panel selalu berada pada orientasi yang tegak lurus atau mendekati tegak lurus terhadap arah datangnya cahaya matahari. Dengan demikian, intensitas radiasi efektif yang diterima panel dapat dipertahankan pada nilai yang optimal sepanjang waktu operasional. Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan efektivitas penerapan solar tracker dalam meningkatkan produksi energi panel surya. [6] dalam penelitiannya berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem solar tracker single-axis menggunakan sensor LDR dan mikrokontroler berbasis Arduino yang secara konsisten menghasilkan daya lebih besar dibandingkan panel surya statis pada kondisi cuaca cerah. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan daya keluaran yang signifikan dapat dicapai bahkan dengan menggunakan konfigurasi satu sumbu gerak yang relatif sederhana. [7] dalam penelitiannya yang membandingkan sistem dual-axis solar tracker dengan panel statis juga membuktikan bahwa sistem pelacak matahari mampu menghasilkan daya yang lebih tinggi secara konsisten sepanjang hari,

dengan perbedaan paling menonjol terjadi pada periode pagi dan sore hari.

Aspek lain yang tidak kalah penting dalam pengelolaan sistem PLTS skala kecil adalah ketersediaan sistem monitoring atau pemantauan parameter kelistrikan secara real-time. Tanpa sistem monitoring yang memadai, pengguna tidak memiliki informasi yang cukup untuk mengetahui apakah sistem PLTS sedang beroperasi pada kondisi optimal, mengalami penurunan performa, atau terdapat gangguan pada rangkaian kelistrikan. Parameter kelistrikan utama yang perlu dipantau dalam sistem PLTS antara lain adalah tegangan keluaran panel surya, arus yang dihasilkan, serta daya total yang diproduksi pada setiap waktu. Pemantauan ketiga parameter ini secara bersamaan dan real-time memungkinkan pengguna untuk melakukan evaluasi performa sistem secara berkelanjutan dan mengambil tindakan perbaikan apabila diperlukan. [8] dalam penelitiannya tentang sistem monitoring PLTS off-grid berbasis mikrokontroler telah membuktikan bahwa monitoring parameter kelistrikan secara real-time dapat dilakukan dengan akurasi yang baik menggunakan komponen sensor yang terjangkau, dan informasi yang ditampilkan terbukti bermanfaat sebagai dasar evaluasi performa sistem secara keseluruhan.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid

Pembangkit Listrik Tenaga Surya atau yang umum disingkat PLTS merupakan suatu sistem pembangkit energi listrik yang memanfaatkan energi radiasi matahari sebagai sumber energi primer dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui proses konversi fotovoltaik. Proses konversi ini berlangsung di dalam sel surya yang tersusun dari bahan semikonduktor, umumnya silikon tipe-n dan tipe-p, yang membentuk sambungan p-n. Ketika foton dari radiasi matahari mengenai permukaan sel surya dengan energi yang cukup, foton tersebut akan mengeksitasi elektron-elektron dalam material semikonduktor sehingga melepaskan diri dari ikatan atomnya dan bergerak bebas. Adanya medan listrik internal pada sambungan p-n kemudian mendorong elektron-elektron bebas tersebut bergerak secara terarah, menghasilkan arus listrik searah atau DC yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya listrik. Proses inilah yang dikenal sebagai efek fotovoltaik, yang pertama kali diamati oleh fisikawan Perancis Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839.

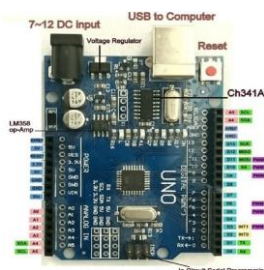
Berdasarkan koneksi nya terhadap jaringan distribusi listrik, sistem PLTS dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama. Pertama adalah sistem PLTS on-grid atau grid-connected, yaitu sistem yang terhubung secara paralel dengan jaringan dan kekurangannya dapat dipasok dari jaringan. Kedua adalah sistem PLTS off-grid atau stand-alone, yaitu sistem yang berdiri sendiri dan tidak terhubung dengan jaringan listrik umum, sehingga memerlukan sistem

penyimpanan energi berupa baterai untuk memastikan ketersediaan daya listrik pada saat panel surya tidak dapat berproduksi seperti pada malam hari atau mendung. Penelitian ini berfokus pada optimalisasi komponen panel surya dalam konteks sistem PLTS off-grid skala kecil dengan kapasitas panel 20 WP yang menjadi sumber energi primer sistem.

2.2 Mikrokontroler Arduino Uno

Arduino Uno adalah sebuah board pengembangan mikrokontroler berbasis chip ATmega328P buatan Microchip Technology yang dikemas dalam form factor yang kompak dan mudah digunakan. Dikembangkan oleh tim Arduino .cc dan dirilis pertama kali pada tahun 2010, Arduino Uno telah berkembang menjadi salah satu platform mikrokontroler paling populer di dunia, digunakan secara luas dalam pendidikan, penelitian akademik, pembuatan prototipe, dan pengembangan sistem embedded skala kecil hingga menengah. Popularitas Arduino Uno tidak terlepas dari filosofi desainya yang mengutamakan kemudahan penggunaan, keterbukaan perangkat keras dan perangkat lunak, serta dukungan ekosistem yang sangat kaya mencakup ribuan library siap pakai dan dokumentasi yang komprehensif.

Fitur pin yang sangat relevan dengan penelitian ini adalah fungsi ganda pin A4 sebagai SDA dan pin A5 sebagai SCL untuk protokol komunikasi I2C atau Inter-Integrated Circuit. Protokol I2C ini digunakan untuk komunikasi dengan modul LCD 16×2 berbasis PCF8574 yang memungkinkan antarmuka display hanya dengan dua kabel data. Pada penelitian ini, pin A0 dan A1 digunakan untuk membaca sinyal analog dari dua modul KY-018, pin A2 digunakan untuk membaca output sensor arus ACS712, pin A3 digunakan untuk membaca output modul sensor tegangan, pin A4 dan A5 digunakan untuk komunikasi I2C dengan modul LCD 16×2, serta pin digital D9 digunakan sebagai output sinyal PWM untuk mengendalikan motor servo MG996R. Keenam pin analog A0 hingga A5 terpakai seluruhnya tanpa konflik, menunjukkan kesesuaian yang optimal antara jumlah komponen sistem dengan kapasitas pin Arduino Uno. Pemrograman Arduino Uno dilakukan melalui Arduino IDE menggunakan bahasa C++ dengan library bawaan Servo.h dan Wire.h yang mendukung langsung kebutuhan pengendalian motor servo dan komunikasi I2C tanpa instalasi tambahan.



Gambar 1. Pin I/O Arduino Uno

2.3. Sensor Cahaya

Sensor berbasis komponen LDR atau Light Dependent Resistor yang telah dikemas dalam sebuah PCB modul KY-018 telah mengintegrasikan LDR dan resistor pendamping dalam satu modul yang kompak sehingga dapat langsung dihubungkan ke pin analog mikrokontroler tanpa memerlukan rangkaian tambahan. Modul ini memiliki tiga pin koneksi yaitu VCC untuk sumber tegangan 5 Volt, pin GND untuk ground, dan pin AO atau analog Output yang menghasilkan tegangan analog proporsional terhadap intensitas cahaya yang mengenai permukaan LDR.

Material semikonduktor sensitif cahaya pada permukaan LDR mengalami peningkatan konduktivitas ketika dieksitasi oleh foton dari cahaya yang mengenai permukaannya. Pada kondisi cahaya terang, resistansi LDR turun secara signifikan sehingga tegangan output pada pin AO yang dihasilkan dari rangkaian pembagi tegangan internal juga ikut berubah secara proporsional. Sebaliknya, pada kondisi gelap atau cahaya redup, resistansi LDR meningkat drastis dan tegangan output bergeser ke arah yang berlawanan.



Gambar 2. KY-018

2.3 Motor Servo

Motor servo adalah jenis motor listrik yang dirancang khusus untuk kontrol posisi. Motor servo memiliki mekanisme umpan balik internal berupa potensiometer yang terhubung ke poros output. Potensiometer ini secara terus-menerus mengukur posisi sudut aktual poros dan mengirimkan informasi tersebut ke rangkaian kontrol internal servo. Rangkaian kontrol kemudian membandingkan posisi aktual dengan posisi yang diperintahkan melalui sinyal PWM dari mikrokontroler, dan menggerakkan motor untuk meminimalkan selisih atau error antara keduanya. Mekanisme umpan balik tertutup inilah yang memungkinkan motor servo mencapai posisi yang diperintahkan dengan akurasi yang tinggi dan dapat mempertahankan posisi tersebut meskipun terdapat beban mekanik yang bekerja pada porosnya.

Pengendalian motor servo dilakukan melalui sinyal PWM dengan periode tetap sebesar 20 milidetik atau frekuensi 50Hz. Posisi sudut yang diinginkan dikodekan dalam lebar pulsa atau duty cycle dari sinyal PWM tersebut. Secara umum, lebar pulsa sebesar 1 milidetik mengkodekan posisi 0 derajat, lebar pulsa 1,5 milidetik mengkodekan posisi 90 derajat atau posisi tengah, dan lebar pulsa 2 milidetik mengkodekan posisi 180 derajat. Rentang sudut bergerak standar motor

servo adalah 0 hingga 180 derajat, meskipun beberapa tipe servo memiliki rentang yang berbeda).



Gambar 3. Motor Servo MG996 R

2.4 Sensor Tegangan

Pengukuran tegangan keluaran panel surya dalam sistem monitoring yang dikembangkan pada penelitian ini menggunakan modul sensor tegangan berbasis rangkaian pembagi tegangan resistif dengan kapasitas pengukuran hingga 25 Volt DC. Modul ini secara prinsip bekerja dengan memanfaatkan hukum pembagi tegangan, di mana dua buah resistor dengan nilai yang telah dirancang secara spesifik dihubungkan seri antara terminal input tegangan yang akan diukur dengan titik ground. Tegangan yang terukur pada titik pertemuan antara kedua resistor, yang merupakan sebagian kecil dari tegangan input, kemudian dikirimkan ke pin analog ADC Arduino Uno untuk dikonversi menjadi nilai digital.

Faktor pembagi tegangan atau gain sensor ini biasanya sekitar 5:1, artinya tegangan output sensor adalah seperlima dari tegangan input yang sebenarnya. Nilai tegangan aktual kemudian dihitung kembali oleh program Arduino menggunakan persamaan konversi yang mempertimbangkan faktor pembagi tersebut beserta nilai tegangan referensi ADC. Perhitungan tegangan yang digunakan :

$$V_{out} = V_{adc} \times R_2 / (R_1 + R_2) / R_2 \dots (1)$$

$$V_{adc} = (Nilai ADC / 1023) \times 5 \dots (2)$$

$$V_{aktual} = V_{adc} \times (R_1 + R_2) / R_2 \dots (3)$$

2.5 Sensor Arus

Sensor arus yang bekerja berdasarkan prinsip efek Hall, yaitu fenomena fisika yang pertama kali ditemukan oleh Edwin Herbert Hall pada tahun 1879. Efek Hall terjadi ketika arus listrik mengalir melalui sebuah konduktor yang ditempatkan dalam medan magnet, sehingga terbentuk beda potensial yang tegak lurus terhadap arah arus dan arah medan magnet. Sinyal tegangan Hall yang sangat kecil kemudian diperkuat oleh rangkaian amplifier internal dan dikondisikan sehingga menghasilkan tegangan output analog yang proporsional terhadap arus input. Mengacu pada karakteristik tersebut, nilai arus yang mengalir pada jalur yang diukur dapat diperoleh melalui Persamaan 3.

$$I = (V_{sensor} - 2,5) / 0,185 \dots (4)$$

Pada penelitian ini digunakan varian ACS712 dengan kapasitas pengukuran arus 5 Ampere, yang

dipilih berdasarkan pertimbangan bahwa arus maksimum yang dapat dihasilkan panel surya 20 WP pada kondisi short circuit dalam kondisi iradiasi penuh 1,3 hingga 1,5 Ampere, Nilai arus yang diperoleh kemudian digunakan bersama nilai tegangan untuk menghitung daya aktual yang dihasilkan panel surya menggunakan persamaan

$$P = V \times I \dots (5)$$



Gambar 4. Modul Sensor ACS712 5A

2.6 Display LCD

LCD atau *Liquid Crystal Display* adalah perangkat penampil visual yang bekerja berdasarkan sifat optis kristal cair yang dapat mengubah polarisasi cahaya yang melewatinya ketika diberikan tegangan listrik LCD 16x2 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis LCD karakter alfanumerik yang mampu menampilkan hingga 32 karakter dalam susunan dua baris dengan masing-masing 16 kolom per baris, sehingga total kapasitas tampilan adalah 32 karakter sekaligus.

Dengan menggunakan modul I2C, koneksi LCD ke Arduino Uno hanya membutuhkan empat kabel saja yaitu VCC, GND, SDA, dan SCL, di mana SDA terhubung ke pin A4 dan SCL ke pin A5 yang memang telah didedikasikan sebagai pin I2C hardware pada Arduino Uno. Efisiensi penggunaan pin ini sangat krusial dalam penelitian ini mengingat semua pin analog A0 hingga A3 telah digunakan untuk sensor LDR dan sensor kelistrikan.



Gambar 5. LCD 16x2 dengan Modul I2C

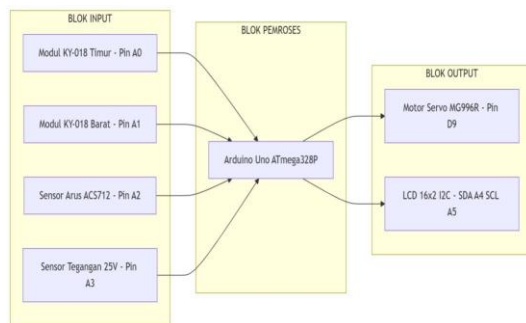
3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan pendekatan rancang bangun (design and construction). Spesifikasi komponen utama yang diimplementasikan dalam prototipe ini meliputi panel surya 20 WP monokristalin, Solar Charge Controller PWM 10A, baterai Lead-Acid 12V 12Ah, inverter 300 Watt, dan relay elektromagnetik MK2P-I (220V AC coil). Berdasarkan perhitungan kebutuhan daya beban aerator sebesar 20 Watt dengan target backup selama 5 jam, kapasitas energi minimum yang diperlukan adalah 100 Wh. Melalui rumus kapasitas baterai ($E = V \times Ah \times DoD$) dengan batas Depth of Discharge (DoD) sebesar 80%,

baterai 12V 12Ah yang digunakan memiliki kapasitas energi total sebesar 115,2 Wh, sehingga secara teoritis mencukupi untuk menyuplai beban aerator.

3.1. Blok Diagram Sistem

Blok diagram sistem menggambarkan arsitektur keseluruhan prototipe sistem monitoring dan pengarah panel surya yang dikembangkan dalam penelitian ini, mulai dari blok input berupa sensor-sensor, blok pemroses berupa mikrokontroler Arduino Uno, hingga blok output berupa aktuator servo dan display LCD. Blok diagram sistem secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Blok Diagram Sistem Monitoring dan Pengarah Panel Surya

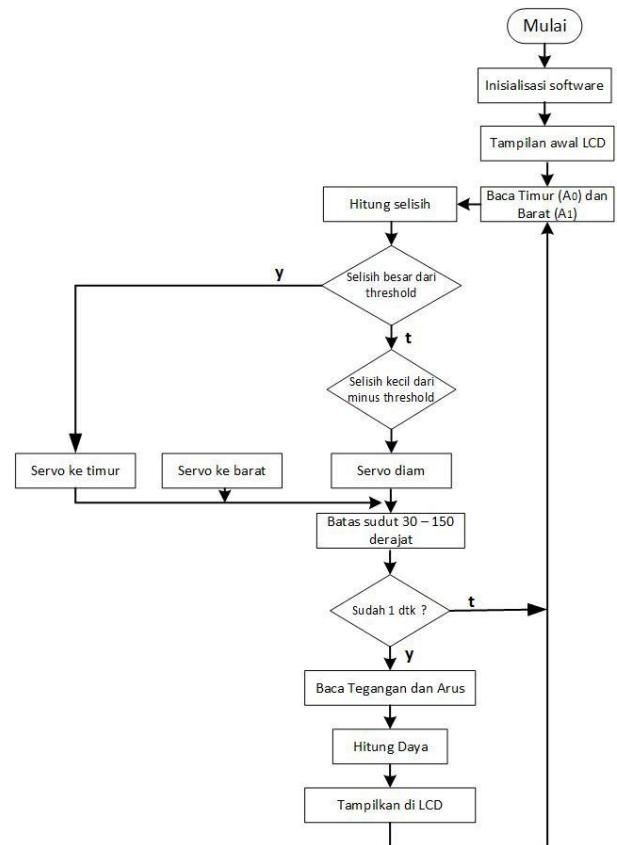
Modul KY-018 sisi timur yang terhubung ke pin A0 dan modul KY-018 sisi barat yang terhubung ke pin A1 merupakan sensor utama sistem pengarah, masing-masing dengan sekat opaque terpasang di antara keduanya untuk meningkatkan sensitivitas deteksi arah matahari. Sensor arus ACS712 yang terhubung ke pin A2 menghasilkan tegangan analog yang merepresentasikan arus keluaran panel, sementara modul sensor tegangan yang terhubung ke pin A3 menghasilkan nilai tegangan analog yang merepresentasikan tegangan keluaran panel surya.

Arduino Uno menerima empat sinyal analog dari blok input melalui ADC internalnya, mengeksekusi algoritma perbandingan nilai ADC kedua modul KY-018 untuk menentukan arah gerak servo, menghitung nilai tegangan aktual dan arus aktual dari nilai ADC yang terbaca menggunakan persamaan konversi yang sesuai, serta menghitung nilai daya sebagai perkalian tegangan dan arus.

Motor servo MG996R menerima sinyal PWM dari pin D9 Arduino Uno dan menggerakkan panel surya ke posisi sudut yang sesuai dengan perintah program. LCD 16x2 melalui modul I2C menerima data yang dikirimkan oleh Arduino Uno melalui pin A4 sebagai SDA dan A5 sebagai SCL, dan menampilkan informasi tegangan, arus, daya, dan posisi servo kepada pengguna secara real-time.

3.2. Diagram Alir Sistem

Pada tahap inisialisasi, program melakukan konfigurasi komunikasi, serial untuk keperluan debugging, inisialisasi objek LCD dan pengaktifan backlight, inisialisasi objek servo dan pengarah ke posisi awal 90 derajat yang merupakan posisi tengah menghadap lurus ke depan, serta menampilkan pesan pembuka pada LCD selama beberapa detik sebagai konfirmasi bahwa sistem siap beroperasi.



Gambar 7. Diagram Alir sistem

Setelah inisialisasi selesai, program masuk ke dalam fungsi loop() yang berulang secara terus-menerus. Setiap siklus loop dimulai dengan pembacaan nilai ADC dari pin A0 dan A1 untuk kedua modul KY-018. Nilai ADC modul KY-018 sisi timur dan modul KY-018 sisi barat kemudian dibandingkan untuk menghitung selisihnya. Apabila selisih nilainya melebihi nilai threshold yang telah ditetapkan dan modul timur menghasilkan nilai ADC lebih besar, program akan mengurangi nilai posisi servo satu langkah sehingga panel bergerak ke arah timur, mengikuti sumber cahaya. Sebaliknya, apabila modul barat lebih besar, program akan menambah nilai posisi servo satu langkah untuk menggerakkan panel ke arah barat. Apabila selisih nilai kedua modul berada di dalam rentang threshold, servo diperintahkan untuk mempertahankan posisi saat ini karena panel sudah berorientasi optimal menghadap matahari. Nilai posisi servo dibatasi dalam rentang 30 hingga 150 derajat menggunakan fungsi constrain() untuk mencegah pergerakan mekanik yang melampaui batas aman struktur dudukan.

Setelah proses pengendalian servo selesai pada setiap siklus, program melanjutkan ke pembacaan dan pemrosesan data monitoring. Nilai ADC dari pin A2 dikonversi menjadi nilai arus menggunakan persamaan karakteristik, ACS712 5A dengan offset 2,5 Volt dan sensitivitas 185 mV per Ampere. Nilai ADC dari pin A3 dikonversi menjadi tegangan aktual panel menggunakan persamaan konversi yang mempertimbangkan faktor pembagi 5:1 dari modul sensor tegangan. Daya dihitung sebagai hasil perkalian tegangan dan arus menggunakan persamaan $P = V \times I$. Ketiga nilai tersebut bersama posisi sudut servo kemudian ditampilkan pada LCD 16x2 menggunakan metode setCursor() tanpa memanggil clear() pada setiap siklus untuk menghindari efek flicker pada layar. Siklus ini berulang terus-menerus dengan interval pembaruan LCD yang diatur menggunakan fungsi millis() dalam progra.

3.3. Perhitungan Sensor Tegangan

Sensor tegangan 0-25V yang digunakan memiliki nilai $R_1 = 30k\Omega$ dan $R_2 = 7,5 k\Omega$ yang sudah terpasang permanen di dalam modul. Dengan mengacu pada Persamaan (1), (2) dan (3), tegangan output yang masuk ke pin ADC dapat dihitung sebagai berikut.

$$V_{\text{aktual ut}} = V_{\text{adc}} \times (R_1 + R_2)/R_2 \\ = 4,48 \text{ V}$$

3.4. Penentuan Sensor Arus

Sensor yang digunakan memiliki sensitivitas 185 mV per Ampere dengan tegangan offset 2,5 Volt pada kondisi arus nol. Panel surya 20 WP memiliki arus hubung singkat (I_{sc}) sebesar 1,11 Ampere berdasarkan spesifikasi teknis panel. Dengan mengacu pada Persamaan 4, tegangan output sensor ACS712 pada kondisi arus maksimum tersebut dapat dihitung sebagai berikut.

$$V_{\text{sensor}} = 2,5 + (I \times 0,185) \\ = 2,705 \text{ Volt}$$

3.5. Perhitungan Daya Maksimum

Berdasarkan spesifikasi teknis panel surya monokristalin 20 WP, tegangan operasi maksimum (V_{mp}) adalah 18 Volt dan arus operasi maksimum (I_{mp}) adalah 1,11 Ampere. Dengan mengacu pada Persamaan 5, daya maksimum teoritis panel pada kondisi ideal dihitung sebagai berikut.

$$P = V \times I \\ = 19,98 \text{ Watt} \approx 20 \text{ Watt}$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian modul sensor tegangan yang berfungsi membaca tegangan keluaran panel surya secara real-time sebagai bagian dari sistem monitoring yang dikembangkan. Tujuan pengujian ini adalah memverifikasi kemampuan sensor dalam mengukur tegangan keluaran panel surya serta memastikan bahwa proses konversi nilai ADC menjadi tegangan aktual.

Berdasarkan hasil pengujian, nilai ADC yang terbaca pada pin A3 secara konsisten berada pada angka 501 selama lima kali pengambilan data. Nilai ADC tersebut dikonversi menjadi tegangan keluaran sensor V_{adc} sebesar 2,449 Volt berdasarkan Persamaan 2.3, kemudian dengan mengacu pada Persamaan 2.2 menggunakan faktor pembagi 5:1 diperoleh tegangan aktual panel surya sebesar 12,24 Volt. Hasil pengukuran menggunakan multimeter digital menunjukkan tegangan keluaran panel pada kisaran 12,29 hingga 12,30 Volt. Selisih antara pembacaan sensor dan referensi multimeter berkisar antara 0,05 hingga 0,06 Volt dengan rata-rata persentase kesalahan sebesar 0,46 persen. Hasil pengukuran didapat selisih rata-rata sebesar 0,056 V. Hasil lengkap pengujian disajikan pada Tabel

Tabel 1 Pengukuran Sensor Tegangan

No	Tegangan Aktual Program (V)	Tegangan aktual Multimeter (V)	Selisih (V)
1.	12,24	12,30	0,06
2.	12,24	12,30	0,06
3.	12,24	12,29	0,05
4.	12,24	12,29	0,05
5.	12,24	12,30	0,06
Rata-rata	12,24	12,296	0,056

4.2. Pengujian Sensor Arus

Pengujian subsistem kelima dilakukan terhadap modul sensor arus ACS712 tipe 5A yang berfungsi mengukur arus keluaran panel surya secara real-time sebagai komponen sistem monitoring.

Berdasarkan hasil. Hasil pengukuran multimeter digital menunjukkan arus pada kisaran 0,296 hingga 0,302 Ampere. Selisih antara pembacaan sensor dan referensi multimeter hanya berkisar 0,001 hingga 0,002 Ampere dengan rata-rata persentase kesalahan sebesar 0,40 persen. Tingkat kesalahan yang sangat kecil ini membuktikan bahwa sensor ACS712 bekerja dengan akurasi yang baik dan layak digunakan sebagai komponen pengukur arus dalam sistem monitoring PLTS yang dikembangkan. Hasil lengkap pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengukuran Sensor Arus

No	Arus Program (A)	Arus Multimeter (A)	Selisih (A)
1.	0,304	0,302	0,002
2.	0,301	0,300	0,001
3.	0,300	0,299	0,001
4.	0,298	0,297	0,001
5.	0,297	0,296	0,001
Rata-rata	0,300	0,299	0,001

4.3. Pengujian Motor Servo MG996R

Program pengujian menjalankan lima skenario gerak secara berurutan dengan jeda tiga detik di antara setiap perpindahan posisi. Posisi pertama yang diuji adalah sudut 90 derajat sebagai titik tengah yang menjadi referensi awal sistem. Selanjutnya servo diperintahkan bergerak ke sudut 40 derajat yang merepresentasikan posisi panel menghadap ke arah timur, kemudian kembali ke posisi tengah 90 derajat. Skenario berikutnya adalah menggerakkan servo ke sudut 140 derajat yang merepresentasikan posisi panel menghadap ke arah barat. Skenario terakhir adalah pengujian gerak sweep dua arah, yaitu servo bergerak bertahap dari sudut 40 derajat naik menuju 128 derajat kemudian berbalik arah turun kembali ke 40 derajat untuk mensimulasikan pola pelacakan lintasan matahari dari timur ke barat.

Tabel 3 Hasil pengujian posisi motor servo

No	Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Posisi
1.	Posisi tengah sebagai referensi awal	bergerak ke 90°	posisi 90°
2.	Posisi timur (simulasi arah matahari pagi)	Servo bergerak ke posisi 40°	Bergerak ke 40°
3.	Kembali ke posisi tengah	Kembali tepat ke 90°	bergerak kembali ke 90°
4.	Posisi barat	Servo bergerak ke posisi 140°	dari 90° ke 140°
5.	Sweep dua arah 40° naik ke 128° lalu turun ke 40°	Servo bergerak bertahap sesuai urutan sudut tanpa macet	Servo naik bertahap dari 40° ke 128° lalu berbalik turun ke 40° mulai

Pengujian berlangsung mulai pukul 13:11:41 hingga 13:12:03 WIB dengan total durasi sekitar 22,1 detik. Semua skenario terlaksana sesuai urutan yang diprogram. Pada skenario sweep, data yang terbaca pada Serial Monitor menunjukkan pergerakan sudut secara bertahap dan mulus dari 40 derajat naik melewati posisi tengah hingga mencapai 128 derajat, kemudian turun kembali secara bertahap ke sudut 40 derajat. Pola gerak dua arah yang terdokumentasi ini membuktikan bahwa motor servo mampu beroperasi dengan presisi ke

kedua arah rotasi tanpa hambatan mekanis apapun. Pengujian yang dilakukan sesuai dengan yang diharapkan

4.4. Perbandingan Daya Panel Surya Mode Statis dan Mode Tracker

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel 4, rata-rata daya keluaran panel surya pada mode statis sebesar 20,67 Watt, sedangkan pada mode solar tracker sebesar 21,52 Watt. Dengan demikian diperoleh peningkatan daya rata-rata sebesar 0,85 Watt atau sekitar 4,09% dibandingkan panel surya yang dipasang secara statis. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa sistem solar tracker mampu mempertahankan orientasi panel agar lebih optimal terhadap arah datangnya cahaya matahari sehingga energi yang diterima oleh panel surya menjadi lebih besar. Walaupun peningkatan daya yang diperoleh tidak terlalu tinggi, hasil penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan sistem pengarah berbasis sensor cahaya KY-018 memberikan peningkatan performa dibandingkan panel surya tanpa sistem pengarah.

Tabel 4 pengujian mode statis vs tracker

Pengujian	Mode Statis (W)	Mode Tracker (W)	Selisih (W)	Peningkatan (%)
ke-1	20,69	21,39	1,24	5,99
ke-2	20,63	21,36	0,73	5,43
ke-3	20,75	21,31	0,56	2,70
ke-4	20,67	21,46	0,84	4,07
Rata-rata	20,67	21,52	0,85	4,09

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, sistem monitoring dan pengarah panel surya berbasis sensor cahaya KY-018 berhasil direalisasikan dan mampu bekerja sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem dapat mengarahkan posisi panel surya secara otomatis mengikuti arah datangnya cahaya matahari serta melakukan monitoring parameter tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya secara real time.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan sistem solar tracker memberikan peningkatan daya keluaran panel surya dibandingkan dengan pemasangan panel secara statis. Pada mode tracker diperoleh rata-rata tegangan sebesar 13,17 Volt, arus sebesar 1,634 Ampere, dan daya sebesar 21,52 Watt. Sementara itu, pada mode statis diperoleh rata-rata daya sebesar 20,67 Watt. Dengan demikian, sistem yang dirancang mampu meningkatkan daya keluaran panel surya sebesar 0,85 Watt atau sekitar 4,09%.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem monitoring dan pengarah panel surya berbasis sensor cahaya efektif dalam mengoptimalkan

penyerapan energi matahari sehingga dapat meningkatkan performa sistem PLTS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Konsumsi Listrik Per Kapita Nasional 2023 Sebesar 1.337 kWh," Kementerian ESDM RI, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id>
- [2] Databoks, "Konsumsi Listrik Per Kapita Indonesia Capai Rekor Tertinggi 1.411 kWh pada 2024," Katadata.co.id, 2025. [Online]. Available: <https://databoks.katadata.co.id>
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Kapasitas Pembangkit Listrik Nasional 2025: 101 Gigawatt," Kementerian ESDM RI, 2025. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id>
- [4] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, "Potensi dan Irradiasi Matahari di Indonesia," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, 2023. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id>
- [5] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, "Potensi Energi Surya Indonesia Mencapai Lebih dari 3.200 Gigawatt," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI, 2023. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id>
- [6] E. E. Aung, "Single Axis Solar Tracking System," *International Journal of Science and Engineering Applications*, vol. 8, no. 8, pp. 283–286, 2019, doi: 10.7753/IJSEA0808.1006.
- [7] R. Saha, M. S. Islam, and S. Hossain, "Design and Implement of Dual-Axis Solar Tracker in Comparison to Fixed Panel System," *ESSUIR Sumy State University Institutional Repository*, 2021. [Online]. Available: <https://essuir.sumdu.edu.ua>
- [8] T. D. Lorobezy and Krismadinata, "Rancang Bangun Sistem Monitoring PLTS Off-Grid Berbasis IoT," *MSI Transaction on Education*, vol. 4, no. 2, pp. 71–84, Aug. 2023, doi: 10.46574/mted.v4i2.111.
- [9] S. A. Hidayatullah and Styawati, "Rancang Bangun Single-Axis Solar Tracker untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Kecil," *Jurnal Pepadun*, vol. 5, no. 1, pp. 64–71, 2024.
- [10] Allegro MicroSystems, "ACS712: Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor — Datasheet," Allegro MicroSystems, LLC, 2023. [Online]. Available: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-linear/acs712>