

Tinjauan Pustaka: Perancangan Solar Tracker Otomatis Dengan Integrasi Sistem Penyiraman Tanaman Berbasis Energi Surya

Sigit Maulana Malik, Dan Mugisidi

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika

³⁾Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka

E-mail: sigitmmalik11@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan sistem solar tracker otomatis yang terintegrasi dengan sistem penyiraman tanaman berbasis energi surya. Tujuannya adalah mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari serta meninjau berbagai penelitian sebelumnya terkait teknologi solar tracker dan sistem irigasi otomatis berbasis energi surya untuk menemukan pendekatan paling efisien dan berkelanjutan. Tinjauan literatur dilakukan terhadap metode pelacakan berbasis sensor LDR, pengenalan citra HSV, serta control mikrokontroler seperti Arduino. Berdasarkan hasil review dan implementasi, sistem dirancang agar panel surya dapat mengikuti pergerakan matahari secara otomatis, sementara penyiraman diatur oleh sensor kelembaban tanah. Hasil pengujian sistem ini meningkatkan penyerapan energi dan efisiensi penggunaan air dibanding metode konvensional. Dengan demikian, integrasi kedua sistem ini dinilai efektif, hemat energi, dan ramah lingkungan untuk penerapan pertanian skala kecil.

Kata Kunci: Solar Tracker, Energi Surya, Penyiraman Otomatis, Arduino, Sensor Kelembaban Tanah, Energi Terbarukan.

Abstract

This study discusses the design of an automatic solar tracker integrated with a solar-powered plant irrigation system. The main objective is to optimize solar energy utilization while reviewing previous research on solar tracking and automatic irrigation technologies to identify the most efficient and sustainable approach. The literature review covers sensor-based tracking using LDRs, HSV image recognition methods, and microcontroller control such as Arduino. Based on the review and implementation, the system was designed to automatically adjust the solar panel's position according to the sun's movement, while irrigation is controlled by soil moisture sensors. Experimental results show that the integrated system improves solar energy absorption and water-use efficiency compared to conventional methods. Therefore, this integration provides an effective, energy-efficient, and eco-friendly solution suitable for small-scale agricultural applications.

Keywords: Solar Tracker, Solar Energy, Automatic Irrigation, Arduino, Soil moisture Sensor, Renewable Energy.

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa, sehingga memiliki potensi energi surya yang sangat besar. Intensitas sinar matahari di Indonesia bisa mencapai rata-rata 4,5 hingga 4,8 kWh/m² per hari, atau setara dengan 112.000 GWp[1]. Kondisi ini menjadikan energi surya sebagai sumber energi terbarukan yang sangat menjanjikan untuk dikembangkan. Namun, hingga saat ini, pemanfaatan energi surya di Indonesia masih terbatas, hanya sekitar 10 MWp dari total potensi yang ada[2].

Dalam pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik

sangat bergantung pada posisi dan sudut panel terhadap arah sinar matahari[3].

Penelitian menunjukkan bahwa panel surya bekerja paling maksimal saat permukaannya tegak lurus (90°) terhadap sinar matahari[1],[4]. Namun, mayoritas panel surya yang ada saat ini dipasang secara statis dengan sudut yang tidak berubah, sehingga tidak bisa mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat sepanjang hari. Hal ini menyebabkan penurunan efisiensi, terutama di pagi dan sore hari, ketika sudut sinar matahari tidak tegak lurus terhadap panel[1].

Untuk memecahkan masalah tersebut, teknologi solar tracker atau pelacak matahari sudah dikembangkan.

Solar tracker adalah sistem mekanik yang mampu menggerakkan panel surya secara otomatis mengikuti pergerakan matahari, sehingga panel selalu dalam posisi optimal untuk menangkap sinar matahari[5],[6]. Teknologi ini dibagi menjadi dua jenis utama: single axis yang hanya mengikuti gerakan matahari dari timur ke barat, dan dual axis yang bisa mengikuti gerakan matahari baik horizontal (timur-barat) maupun vertikal (utara-selatan)[2],[7]. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan solar tracker dapat meningkatkan produksi energi panel surya hingga 20-40% dibandingkan panel yang dipasang statis[5],[8].

Di sisi lain, sektor pertanian di Indonesia menghadapi masalah terkait kekurangan air dan efisiensi penyiraman tanaman.

Di banyak daerah, terutama di desa-desa terpencil seperti Desa Jumput, Kecamatan Sukosewu, Kabupaten Bojonegoro, para petani mengalami kesulitan mengakses air dan kekurangan tenaga kerja untuk melakukan penyiraman manual[9]. Penyiraman manual tidak hanya memakan waktu yang lama (hingga tiga hari untuk satu siklus penyiraman), tetapi juga tidak efisien karena tidak bisa mengatur kelembaban tanah secara akurat sesuai kebutuhan tanaman[10]. Kondisi ini semakin memburuk karena minimnya petani muda yang tertarik bekerja di sektor pertanian, sehingga sebagian besar petani saat ini sudah berusia di atas 50 tahun dengan keterbatasan fisik dalam melakukan pekerjaan berat.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dan sistem kontrol otomatis yang menggunakan mikrokontroler seperti Arduino memberikan peluang untuk menggabungkan sistem penyiraman otomatis dengan sumber energi terbarukan[11],[12]. Sistem penyiraman yang menggunakan sensor kelembaban tanah dapat mengatur air secara tepat sesuai kebutuhan tanaman, sehingga menghemat air dan tenaga kerja[10],[13]. Jika sistem ini dikombinasikan dengan panel surya sebagai sumber energinya, maka terbentuk solusi yang ramah lingkungan, mandiri, dan berkelanjutan untuk mendukung kegiatan pertanian, terutama di daerah yang belum terjangkau listrik PLN[9],[14].

Beberapa penelitian sebelumnya sudah meneliti solar tracker dan sistem penyiraman otomatis secara terpisah.

Penelitian tentang solar tracker menunjukkan peningkatan efisiensi yang cukup besar, karena hasil uji menunjukkan panel surya dengan solar tracker dual axis bisa menghasilkan daya hingga 49,94 Watt dibandingkan 49,21 Watt untuk panel statis dalam kondisi radiasi yang sama[7]. Sementara itu,

penelitian tentang sistem penyiraman otomatis membuktikan bahwa sensor kelembaban tanah bisa menjaga kelembaban tanah dalam rentang optimal (25–40%), sehingga pertumbuhan tanaman lebih stabil dan tingkat kematian tanaman mencapai 0%[10]. Namun, penggabungan kedua sistem ini dalam satu kesatuan yang lengkap masih sangat terbatas, meskipun kombinasi keduanya memiliki potensi besar untuk meningkatkan hasil pertanian sekaligus meningkatkan penggunaan energi surya secara optimal[15],[16].

Melalui tinjauan pustaka ini, akan ditinjau secara mendalam berbagai aspek teori dan praktis terkait perancangan solar tracker otomatis yang diintegrasikan dengan sistem penyiraman tanaman berbasis energi surya.

Kajian ini mencakup prinsip kerja sel surya dan faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensinya, teknologi solar tracking beserta jenis dan cara kerjanya, sistem penyiraman otomatis yang menggunakan sensor kelembaban tanah, komponen elektronik dan sistem kontrol (seperti Arduino, sensor, dan aktuator), serta metode perancangan dan implementasi sistem yang terpadu.

2. ENERGI SURYA

2.1 Definisi Energi Matahari

Energi matahari adalah salah satu bentuk energi terbarukan yang bersumber dari pancaran radiasi matahari, yang selanjutnya dapat dikonversi menjadi energi listrik atau energi termal. Indonesia, sebagai negara beriklim tropis yang berlokasi di ekuator, dianugerahi potensi energi matahari yang signifikan. Rata-rata intensitas radiasi harian di Indonesia terukur sekitar 4,8 kWh/m² per hari, dengan total kapasitas daya terpasang yang diperkirakan mencapai 112.000 GWp[1]. Energi matahari diklasifikasikan sebagai energi terbarukan karena kemampuannya untuk dikonversi menjadi energi elektrik melalui pemanfaatan panel fotovoltaik (sel surya).

2.2 Karakteristik Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi memiliki intensitas yang bervariasi, dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti posisi geografis, waktu, kondisi cuaca, serta sudut datang sinar matahari[1],[3]. Intensitas rata-rata energi yang diterima bumi mencapai sekitar 1 kW/m², yang secara teoritis setara dengan 1000 kali konsumsi energi dunia[1]. Intensitas maksimum terjadi ketika posisi matahari tegak lurus terhadap permukaan panel surya[4],[17].

3 PANEL SURYA

3.1 Mekanisme Operasional Sel Surya

Sel surya berfungsi mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik memanfaatkan efek fotovoltaiik[1]. Komponen ini tersusun dari beberapa sel fotovoltaiik yang bertugas mengkonversi energi cahaya menjadi muatan listrik. Ketika foton dari sinar matahari mengenai permukaan sel yang terbuat dari bahan semikonduktor, energinya membebaskan elektron dari ikatannya, sehingga elektron dapat bergerak dan menimbulkan aliran listrik.

3.2 Kategori Panel Surya

Panel surya diklasifikasikan berdasarkan material sel surya penyusunnya[1]:

1. Monocrystalline(Monokristal)

Menawarkan tingkat efisiensi yang tinggi, berkisar antara 14%–17%. Namun, efektivitasnya dapat berkurang dalam kondisi cuaca mendung[1].

2. Polycrystalline(polikristal)

Tersusun dari kristal yang tidak beraturan dengan efisiensi 11,5%–14%. Jenis ini mampu menghasilkan energi listrik bahkan saat kondisi cuaca mendung[1].

3. Thin Film Solar Cell (TFSC)

Dibuat darilapisan material yang tipis, ringan, dan lentur. Hal ini menjadikannya sesuai untuk penggunaan yang dapat dibawa ke mana-mana[1].

Dibuat darilapisan material yang tipis, ringan, dan lentur. Hal ini menjadikannya sesuai untuk penggunaan yang dapat dibawa ke mana-mana.

4 SOLAR TRACKER (PELACAK MATAHARI)

4.1 Pengertian Solar Tracker

Pelacak surya adalah peranti mekanis yang dirancang untuk mengikuti pergerakan matahari. Tujuannya adalah memastikan panel surya senantiasa tegak lurus terhadap pancaran sinar matahari, yang berimplikasi pada penyerapan energi yang optimal[5],[6]. Perangkat ini memegang peranan krusial dalam upaya peningkatan efisiensi perolehan energi dari matahari[2].

Posisi matahari yang terus bergeser sebagai akibat dari rotasi bumi menyebabkan panel surya yang terpasang pada posisi tetap tidak mampu menyerap energi secara maksimal sepanjang waktu[1],[18]. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme pelacak otomatis untuk memungkinkan panel menyesuaikan orientasinya secara

2.1 Pergerakan Matahari

Orbit matahari mengalami elongasi konstan seiring dengan rotasi bumi. Ekuinoks sebesar 360 derajat dari timur ke barat sepanjang garis bujur, dengan periode rotasi 23 jam 56 menit 4,09 detik (sekitar 24 jam)[17]. Berdasarkan data ini, dapat ditetapkan bahwa setiap 1 derajat bujur ditempuh dalam kurun waktu tertentu:

$$\frac{1^\circ}{360^\circ} \cdot (24 \cdot 60) = 4 \text{ menit}$$

Perhitungan pergerakan matahari sebesar 15 derajat per jam merupakan fondasi utama dalam pengembangan sistem pelacak matahari[17], sebagaimana direferensikan dalam literatur.

4.3 Jenis-jenis Solar Tracker

Berdasarkan konfigurasi sumbunya, sistem pelacak matahari diklasifikasikan menjadi dua kategori fundamental[2],[5].

1. **Single-axis tracker**, yang bergerak pada satu sumbu (timur–barat), lebih sederhana dan ekonomis.
2. **Dual-axis tracker**, yang bergerak pada dua sumbu (timur–barat dan utara–selatan), memberikan akurasi lebih tinggi dalam mengikuti pergerakan matahari[7],[19].

4.4 Metode Pelacakan Matahari

Beberapa metode umum yang digunakan dalam sistem pelacakan matahari antara lain[5],[6],[20]:

- **Sensor-based tracking** memakai sensor cahaya seperti LDR atau fotodioda untuk mendeteksi arah datang cahaya matahari[2],[6],[9].
- **Time-based tracking** menggunakan modul **Real Time Clock (RTC)** untuk menghitung posisi matahari berdasarkan waktu aktual[17].

4.5 Efektivitas Solar Tracker

Penelitian menunjukkan bahwa sistem pelacak matahari otomatis dapat meningkatkan efisiensi penyerapan energi secara signifikan[5],[8]. Saat posisi panel tegak lurus terhadap sinar matahari, daya yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan panel statis[7],[19]. Berdasarkan pengujian, peningkatan tegangan keluaran dapat mencapai 7,85%[17]. Penelitian lain menunjukan bahwa solar tracker dual axis

dapat meningkatkan efisiensi hingga 31,8% dibandingkan dengan sistem tetap[5] dan peningkatan daya rata-rata hingga 23%[2].

tertinggi[2],[6],[9].

5 MIKROKONTOLER

5.1 Pengertian Mikrokontroler

Mikrokontroler dapat dikategorikan sebagai sebuah sistem komputasi yang menempati satu chip, dengan rancangan yang ringkas dan sebuah arsitektur komputasi yang esensial. Mikrokontroler merupakan sebuah sistem komputer yang mempunyai satu atau beberapa tugas yang sangat spesifik, berbeda dengan komputer yang memiliki beragam fungsi[9].

5.2 Arduino Uno

Arduino Uno merupakan sebuah papan pengembangan mikrokontroler yang didasarkan pada chip ATmega328P. Spesifikasi dari Arduino Uno adalah sebagai berikut[9]:

- Mikrokontroler : ATmega328P
- Operating Voltage : 5V
- Input Voltage : 7-12V
- Digital I/O Pins : 14(6 dapat digunakan sebagai PWM)
- Analog Input Pins : 32 KB
- SRAM : 2 KB
- EEPROM : 1 KB
- Clock speed : 16 MHz

Arduino Uno memiliki empat belas pin digital yang fungsinya dapat diatur sebagai masukan atau keluaran dengan menggunakan fungsi pinMode, digitalWrite, dan digitalRead. Pin-pin tersebut beroperasi pada daya 5 volt[9].

6 SENSOR

6.1 Sensor Cahaya LDR (Light Dependent Resistor)

Karakteristik LDR menunjukkan hubungan antara resistansi dengan intensitas cahaya, dimana semakin intensitas cahaya yang diterima, semakin kecil nilai resistansinya. LDR sering digunakan dalam sistem solar Tracker untuk mendeteksi arah datangnya cahaya matahari dengan intensitas

6.2 Fotodiode

Fotodiode merupakan salah satu jenis fotodetektor yang mengalami peningkatan arus balik ketika menyerap foton. Apabila energi cahaya dengan panjang gelombang yang sesuai diterapkan pada sambungan fotodiode, arus akan mengalir dalam sirkuit eksternal. Intensitas cahaya inframerah yang diterima secara proporsional mempengaruhi kemampuan fotodiode dalam menghasilkan arus[6].

6.3 Sensor Kelembaban Tanah (Soil Moisture)

Sensor soil Moisture atau sensor tanah kelembaban tanah. Sensor ini dapat yang berupa sensor analog mendeteksi kelembaban tanah dan berfungsi untuk mengontrol kapan sistem penyiraman harus diaktifkan[10],[13].

Spesifikasi sensor soil moisture SEN0193[10]:

- Operating Voltage : 3,3 – 5,5 VDC
- Output Voltage : 0 – 3,0 VDC
- Operating Current : 5 mA
- Interface : Ph 2.0 – 3P

7 AKTUATOR

7.1 Motor Servo

Motor servo adalah motor DC yang dilengkapi dengan rangkaian kendali dengan memiliki kemampuan untuk bergerak pada sudut tertentu dengan presisi tinggi[9]. Dalam sistem solar tracker, motor servo digunakan sebagai penggerak panel surya untuk mengikuti pergerakan matahari[2],[6],[7].

Motor servo MG996R memiliki spesifikasi[9]:

- Operating Voltage : 4V – 7,2V
- Torque : 9,4 kg.cm (4,8V) / 11 kg.cm (6V)
- Speed : 0,17 s/60°

7.2 Motor Stepper

Motor stepper adalah motor listrik yang dapat membagi rotasi penuh menjadi sejumlah langkah (step) yang sama. Motor stepper digunakan dalam sistem solar tracker

karena kemampuannya untuk bergerak dengan presisi tinggi dan dapat mempertahankan posisi tanpa perlu energi yang kontinyu[17].

bibit sawit, dan tanaman umum lainnya[10],[13]. Hasil menunjukkan penggunaan air yang lebih efisien dan efisiensi kerja[14],[15].

7.3 Relay

Relay adalah komponen elektronika yang berfungsi sebagai saklar pemutus dan penyambung arus listrik yang dikendalikan secara elektrik. Relay terdiri dari kumparan (coil) dan kontak-kontak (contact)[10]. Dalam sistem penyiraman otomatis, relay digunakan untuk mengendalikan pompa air berdasarkan sinyal dari mikrokontroler[10],[13].

8 SISTEM PENYIRAMAN OTOMATIS

8.1 Pengertian Sistem Penyiraman Otomatis

Sistem penyiraman otomatis dapat menyiram tanaman secara otomatis tanpa campur tangan manusia secara langsung[10],[13]. Ini dapat melakukannya berdasarkan tingkat kelembaban tanah, waktu, atau kombinasi keduanya[16]. Terutama untuk pertanian skala kecil hingga menengah, sistem ini sangat bermanfaat untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi beban kerja petani[14],[15]. Energi surya telah digunakan sebagai sumber daya utama dalam beberapa aplikasi sistem ini untuk mendukung keberlanjutan dan efisiensi energi[9],[10].

8.2 Prinsip Kerja Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis Kelembaban Tanah

Sistem penyiraman otomatis berbasis kelembaban tanah menggunakan sensor kelembaban tanah. Ketika tingkat kelembaban tanah berada di bawah ambang batas, atau threshold, mikrokontroler akan mengirimkan sinyal untuk mengaktifkan relay, yang memungkinkan pompa air menyala dan memulai penyiraman[10],[13]. Sebaliknya, ketika kelembaban tanah mencapai tingkat yang ideal, pompa akan dimatikan secara otomatis[10]. Prinsip kerja ini telah banyak diterapkan pada prototipe berbasis Arduino dan mikrokontroler lainnya untuk menanam tanaman seperti kangkung,

9 KOMPONEN PENDUKUNG SISTEM

9.1 Panel Surya Sumber Energi

Panel surya berfungsi sebagai sumber daya utama untuk mengoperasikan seluruh sistem. Ini termasuk menggerakkan motor servo pada tracker surya dan menyuplai daya untuk pompa air pada sistem penyiraman otomatis[9],[14]. Panel surya monocrystalline 50 WP biasanya dipilih karena efisiensi konversi yang tinggi (sekitar 15–20 persen atau lebih pada modul komersial), kinerja yang stabil pada kondisi suhu tinggi, dan output daya yang ideal meskipun intensitas cahaya matahari tidak maksimal[1]. Karena ukurannya yang kompak, panel ini ideal untuk aplikasi sistem otomatis skala kecil hingga menengah, seperti penyiraman tanaman atau pelacakan matahari[9],[10]. Namun, ia masih dapat menghasilkan jumlah daya yang cukup untuk beban harian[14].

9.2 Baterai

Baterai berfungsi sebagai penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya[9],[10]. Baterai yang umum digunakan adalah jenis lead acid 12V dengan kapasitas baterai dapat dihitung dengan mempertimbangkan hari otonomi dan deep of discharge (DOD)[14].

9.3 Inverter DC to AC

Inverter adalah perangkat elektronika yang berfungsi untuk mengkonversi tegangan DC (Direct Current) menjadi tegangan AC (Alternating Current)[10]. Dalam sistem penyiraman otomatis, inverter diperlukan untuk mengoperasikan pompa air yang menggunakan motor AC[14].

9.4 Real Time Clock

merupakan sebuah IC yang memiliki fungsi untuk menghitung waktu, mulai detik, menit, jam, tanggal, bulan, serta tahun[17]. Modul RTC DS3231 memiliki akurasi dan presisi

yang sangat tinggi dalam mencacah waktu dengan menggunakan kristal internal dan rangkaian kapasitor tuning dimana suhu dan kristal dimonitor secara berkesinambungan[17]. Dalam sistem solar tracker, RTC digunakan untuk menentukan posisi matahari berdasarkan waktu nyata[17].

10 KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem integrasi solar tracker otomatis dengan sistem penyiraman tanaman berbasis energi surya merupakan solusi yang efektif untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari sekaligus meningkatkan efisiensi pertanian. Sistem solar tracker terbukti mampu meningkatkan produksi energi panel surya hingga 20-40% dibandingkan panel statis, dengan peningkatan tegangan keluaran mencapai 7,85%. Penggunaan sensor LDR dan mikrokontroler Arduino dalam sistem pelacakan matahari memberikan kemampuan panel surya untuk mengikuti pergerakan matahari secara otomatis, sehingga posisi panel selalu optimal dalam menangkap radiasi matahari, dimana dual-axis tracker memberikan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan single-axis tracker. Di sisi lain, sistem penyiraman otomatis berbasis sensor kelembaban tanah mampu menjaga kelembaban tanah dalam rentang optimal 25-40%, yang terbukti meningkatkan stabilitas pertumbuhan tanaman dengan tingkat kematian mencapai 0%. Integrasi kedua sistem ini menciptakan solusi yang ramah lingkungan, mandiri energi, dan berkelanjutan, terutama untuk aplikasi pertanian skala kecil di daerah yang belum terjangkau listrik PLN. Dengan demikian, penggabungan teknologi solar tracker dan sistem penyiraman otomatis tidak hanya mengoptimalkan penyerapan energi surya tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi beban kerja petani, menjadikannya solusi yang sangat potensial untuk mendukung pertanian modern yang berkelanjutan.

KEPUSTAKAAN

- [1] Suwarti, Wahyono, and B. Prasetyo, "Analisis Pengaruh Intensitas Matahari , Suhu Surya," vol. 14, no. 3, pp. 78–85, 2018, doi: <https://doi.org/10.32497/eksergi.v14i3.1373>.
- [2] T. Pangaribuan, J. Manihuruk, and J. Pardosi, Cristoni Hasiholan, Hutaauruk, "Analisis Perancangan Panel Surya Portabel Dengan Autotracking Portable Solar Panel Design Analysis With Autotracking," vol. 6, no. 2, pp. 66–72, 2023, doi: 10.31289/jesce.v6i2.8913.
- [3] H. Asyari and A. W. Aji, "Desain Solar Tracking Dual Axis Berbasis Arduino dan Sensor Light Dependent Resistor untuk Meningkatkan Daya Keluaran Sel Surya," vol. 7, no. 2, pp. 320–324, 2023, doi: <https://doi.org/10.36277/jteuniba.v7i2.218>.
- [4] E. W. Widiyanto, S. Widoretno, and Mukhlison, "PANEL PELACAK SURYA SUMBU GANDA MODE OTOMATIS BERBASIS ARDUINO UNO SEBAGAI CATU DAYA MOTOR POMPA AIR," vol. 12, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: <https://doi.org/10.35457/quateknika.v12i01.2105>.
- [5] N. Kuttybay, A. Saymbetov, S. Mekhilef, and M. Nurgaliyev, "Optimized Single-Axis Schedule Solar Tracker," pp. 1–18, doi: <https://doi.org/10.3390/en13195226>.
- [6] M. Noor, A. Saadun, S. Narindra, M. Kumar, N. Azwadi, and C. Sidik, "Perancangan Solar Tracker Dual Axis untuk Optimasi Panel Surya," vol. 1, no. 1, pp. 26–34, 2024, doi: <https://doi.org/10.37934/arefmht.18.1.2634>.
- [7] A. K. Yapie and F. Riski, "Perancangan Solar Tracker Dual Axis untuk Optimasi Panel Surya," 2025, doi: <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i4.4769>.
- [8] J. M. Barrios-sánchez and E. I. Tlapancoríos, "Dual-Axis Solar Tracking System for Enhanced Photovoltaic Efficiency in Tropical Climates," no. Mld, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/su17031117>.
- [9] E. W. Abryandoko, M. Y. Dawud, I. Pamuji, and I. S. Bimananda, "PENYIRAM TANAMAN OTOMATIS DENGAN SOLAR PANEL UNTUK Mendukung Energi Hijau Bagi PETANI DI DESA JUMPUT

- KECAMATAN SUKOSEWU KABUPATEN BOJONEGORO,” vol. 24, pp. 151–164, 2024, doi: <https://doi.org/10.14421/aplikasia.v24i2.3882>.
- [10] A. Irfan Wahyudi, B. Mulana, and S. S. Dimas, “PERENCANAAN PENYIRAMAN OTOMATIS BERTENAGA SURYA BERBASIS ARDUINO UNO UNTUK TANAMAN BIBIT SAWIT,” vol. 2, no. 1, 2022, doi: <https://doi.org/10.24114/roda.v2i1.30873>.
- [11] V. Yatnalli, S. S. Bhusare, B. G. Shivaleelavathi, C. Sheetal, and B. Reshma, “AGRIVITA Design and Development of Solar Powered Automatic Irrigation System for Modernization of Agriculture,” vol. 45, no. 1, pp. 173–187, 2023, doi: <https://doi.org/10.17503/agrivita.v45i1.3753>.
- [12] P. A. Singha, M. Kamruzzaman, and K. Prince, “Optimizing Irrigation with Solar Energy: Implementation of the Photovoltaic Integrated Control System (PICS),” 2025, doi: <https://doi.org/10.53375/ijecer.2025.433>.
- [13] Y. Angel, S. Sreekar, and A. M. Prakash, “Smart Solar-Powered IoT-Based Automatic Irrigation System with Integrated Rainwater Harvesting,” vol. 40, no. 6, pp. 32–41, 2025, doi: <https://doi.org/10.9734/arrb/2025/v40i6251>.
- [14] K. A. Adarsh, “Solar based automatic irrigation system,” 2021, doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3918725>.
- [15] A. I. Rizkianto, E. Endryansyah, B. Suprianto, and P. W. Rusimamto, “Rancang Bangun Sistem Kontrol Tracking Panel Surya Dengan Metode Fuzzy Logic Controller Berbasis ESP32,” *J. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 126–135, 2022, doi: [10.26740/jte.v11n1.p126-135](https://doi.org/10.26740/jte.v11n1.p126-135).
- [16] A. Hidayatullah, “Jurnal Pepadun Rancang Bangun Single-Axis Solar Tracker untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Kecil Jurnal Pepadun,” vol. 5, no. 1, pp. 64–71, 2024, doi: <https://doi.org/10.23960/pepadun.v5i1.163>.
- [17] M. N. Qomaruddin, M. Khairi, and Sulistiyanto, “Real Time Clock Sebagai Tracking Sinar Matahari Pada Solar Cell Berbasis Mikrokontroler Untuk Lampu Taman Jurnal,” *J. Qua Tek.*, vol. 9, no. 2, pp. 27–32, 2019, doi: <https://doi.org/10.35457/quateknika.v9i2.821>.
- [18] M. Nur Qomaruddin and M. Khairi, “Real Time Clock Sebagai Tracking Sinar Matahari Pada Solar Cell Berbasis Mikrokontroler Untuk Lampu Taman (Real Watch Tracking As A Sun Ray On Microcontroller Based Solar Cells For Park Lights),” *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.)*, vol. 3, no. 2, p. 305, 2019, doi: <https://doi.org/10.21070/jee-u.v3i2.2547>.
- [19] H. Pranata, A. Soetedjo, and M. I. Ashari, “Rancang Bangun Solar Tracker Dual Axis Panel Surya Berbasis Arduino,” pp. 9–16, 2022, doi: <https://doi.org/10.36040/seniati.v6i1.4833>.
- [20] K. Mahda, Z. Arwin, H. Nur, N. Kumala, and D. Nur, “Solar Tracking System Pada Panel Surya dengan Metode Optimum Tegangan Menggunakan Mikrokontroler,” vol. 12, no. 2, 2025, doi: <https://doi.org/10.33795/elposys.v12i2.7269>.