

IMPLEMENTASI SISTEM MONITORING IoT UNTUK ANALISIS KINERJA SOLAR TRACKER SINGLE AXIS PADA GREENHOUSE

Evan Adicandra¹, Ratna Dewi², Silfia Rifka³

^{1,2,3}Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Padang
Email: evancandraaaa@gmail.com¹

Corresponding Author : Evan Adicandra

Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Padang
Email: evancandraaaa@gmail.com

Abstrak – Kinerja panel surya statis pada *greenhouse* sering kali tidak optimal karena posisinya yang tetap tidak mampu mengikuti perubahan sudut datang sinar matahari sepanjang hari, sehingga penyerapan energi menjadi kurang maksimal. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk menganalisis kinerja *solar tracker single axis* dibandingkan panel surya statis pada *greenhouse*. Sistem dibangun menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali, sensor LDR sebagai acuan pergerakan panel, serta sensor BH1750 dan INA219 untuk mengukur intensitas cahaya, tegangan, dan arus. Data dikirim melalui protokol MQTT dengan *broker* Mosquitto, diproses menggunakan Node-RED, disimpan pada InfluxDB dan MySQL, serta divisualisasikan secara *real-time* melalui *dashboard* Grafana. Metode yang digunakan adalah *experimental comparative*, di mana kedua sistem diuji bergantian selama enam hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *solar tracker single axis* meningkatkan intensitas cahaya sebesar 10,83%, tegangan 8,57%, arus 39,25%, dan daya 51,45% dibandingkan panel surya statis, dengan rata-rata peningkatan performa keseluruhan sebesar 27,52%. Verifikasi menggunakan Wireshark membuktikan komunikasi MQTT berjalan stabil. Dapat disimpulkan bahwa integrasi *solar tracker single axis* dengan sistem *monitoring* IoT efektif mengoptimalkan penyerapan energi surya sekaligus memudahkan pemantauan kinerja panel secara *real-time* pada lingkungan *greenhouse*.

Kata-kata kunci: *Solar Tracker Single Axis, IoT, Node-RED, MQTT, Greenhouse.*

Abstract – The performance of static solar panels in greenhouses is often suboptimal because their fixed position cannot follow the changing angle of sunlight throughout the day, resulting in less-than-maximum energy absorption. This study aims to implement an Internet of Things (IoT)-based monitoring system to analyze the performance of a single-axis solar tracker compared to a static solar panel in a greenhouse. The system was built using an ESP32 as the control center, an LDR sensor as the panel movement reference, and BH1750 and INA219 sensors to measure light intensity, voltage, and current. Data were transmitted via the MQTT protocol with a Mosquitto broker, processed using Node-RED, stored in InfluxDB and MySQL, and visualized in real time through a Grafana dashboard. An experimental comparative method was applied, in which both systems were tested alternately over six days. The results show that the single-axis solar tracker increased light intensity by 10.83%, voltage by 8.57%, current by 39.25%, and power by 51.45% compared to the static panel, with an overall average performance improvement of 27.52%. Verification using Wireshark confirmed stable MQTT communication. It can be concluded that integrating a single-axis solar tracker with an IoT monitoring system effectively optimizes solar energy absorption while enabling real-time performance monitoring in a greenhouse environment.

Keywords: *Single-Axis Solar Tracker, IoT, Node-RED, MQTT, Greenhouse.*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan sektor pertanian modern, termasuk budidaya di dalam *greenhouse*, semakin bergantung pada dukungan teknologi untuk mewujudkan proses produksi yang efisien dan berkelanjutan. Sebuah *greenhouse* umumnya memerlukan pasokan daya listrik untuk

mengoperasikan perangkat penunjang seperti irigasi otomatis, ventilasi, pencahayaan, dan sensor lingkungan. Biaya energi tercatat sebagai salah satu komponen biaya operasional terbesar pada usaha *greenhouse*, di mana konsumsi listrik menyumbang sekitar 10–15% dari total kebutuhan energi operasional, sementara kebutuhan listrik untuk pencahayaan tambahan saja dapat mencapai

hingga 30% dari total biaya operasional [1], [2]. Apabila kebutuhan tersebut terus dipenuhi dari sumber listrik konvensional, biaya operasional cenderung meningkat dan beban terhadap lingkungan pun bertambah. Kondisi ini mendorong pemanfaatan energi terbarukan khususnya energi surya sebagai alternatif catu daya yang lebih ramah lingkungan.

Meskipun panel surya menjanjikan sebagai sumber energi bersih, keluaran dayanya sangat dipengaruhi oleh sudut jatuh sinar matahari yang berubah sepanjang hari. Panel yang dipasang pada posisi tetap kerap tidak berada pada sudut ideal, sehingga energi yang dihasilkan belum maksimal. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkan mekanisme *solar tracker single axis* yang menggerakkan panel secara otomatis mengikuti lintasan matahari agar penyerapan cahaya lebih optimal [3]. Penelitian terdahulu menunjukkan peningkatan performa yang cukup signifikan akibat penerapan *solar tracker*. Efisiensi panel dalam kondisi dinamis (mengikuti pergerakan matahari) tercatat mencapai 40,97% dibandingkan hanya 28,12% pada kondisi statis [4]. Sementara studi lain melaporkan energi harian yang dihasilkan sistem *single-axis tracking* sebesar 0,255 kWh, lebih tinggi dibandingkan 0,198 kWh pada sistem statis [5].

Di sisi lain, kemajuan *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk memantau kinerja sistem energi surya secara *real-time* dan jarak jauh. Dengan dukungan sensor, mikrokontroler, dan jaringan komunikasi data, parameter penting seperti tegangan, arus, daya, serta intensitas cahaya dapat direkam secara berkelanjutan [6]. Beberapa penelitian telah membahas *solar tracker* berbasis IoT maupun sistem monitoring energi surya berbasis IoT secara terpisah: [4] merancang *solar tracker dual-axis* dengan monitoring IoT namun tanpa membandingkan kinerjanya terhadap panel statis dan tidak diterapkan pada konteks *greenhouse*; [6] mengembangkan sistem monitoring panel surya berbasis IoT namun tanpa mekanisme *solar tracker*; [7] merancang *solar tracker dual-axis* dengan monitoring parameter kelistrikan dan sudut kemiringan namun tanpa perbandingan eksperimental terhadap panel statis; sementara [5] melakukan perbandingan sistem statis dan *single-axis* berbasis IoT namun di luar konteks *greenhouse*. Dengan demikian, kajian yang secara khusus mengintegrasikan *solar tracker single axis* dengan sistem monitoring IoT terpadu, serta membandingkan kinerjanya terhadap panel statis secara eksperimental langsung pada lingkungan *greenhouse*, masih terbatas.

Berdasarkan celah tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi perbandingan kinerja panel *solar tracker single axis* dan panel statis dalam satu platform monitoring IoT, yang diuji secara eksperimental langsung pada lingkungan *greenhouse* dengan pengukuran simultan terhadap intensitas cahaya dan parameter kelistrikan (tegangan, arus, daya). Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan sistem monitoring berbasis IoT untuk merekam parameter tersebut secara *real-time*, sekaligus menganalisis peningkatan daya

keluaran dan kinerja pembangkitan listrik yang dicapai oleh *solar tracker single axis* dibandingkan panel statis pada penerapan di *greenhouse*.

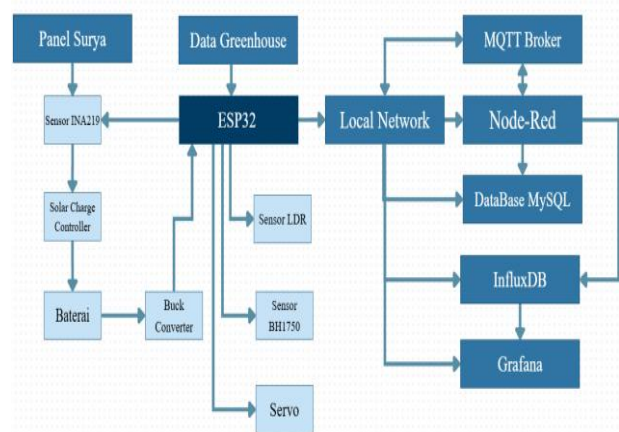
II. METODOLOGI

A. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan *experimental comparative method* dengan skema pengujian bertahap (*sequential testing*). Pendekatan ini dipilih untuk membandingkan performa dua sistem, yaitu panel surya dengan *solar tracker single axis* dan panel surya statis secara terukur berdasarkan data pengujian langsung di lapangan. Karena keterbatasan perangkat, kedua sistem tidak diuji bersamaan, melainkan berurutan. Pengujian berlangsung selama enam hari pada pukul 09.00–15.00 WIB: tiga hari pertama untuk sistem *solar tracker* dan tiga hari berikutnya untuk panel statis, sehingga kondisi penyinaran relatif setara dan perbandingannya lebih objektif. Parameter yang dibandingkan meliputi intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya keluaran panel. Kedua kondisi pengujian menggunakan perangkat fisik yang identik, dengan perbedaan hanya pada aktif tidaknya mekanisme penggerak: pada kondisi *solar tracker*, servo digerakkan mengikuti pembacaan sensor LDR, sedangkan pada kondisi statis servo tidak digerakkan sehingga panel tetap berada pada posisi sudut tetap. Penggunaan perangkat fisik yang identik pada kedua kondisi pengujian dimaksudkan untuk mengeliminasi variabel pengganggu akibat perbedaan spesifikasi atau kalibrasi antar-perangkat, sehingga perbedaan performa yang teramati dapat diatribusikan secara langsung pada ada tidaknya mekanisme solar tracking.

B. Arsitektur Sistem

Secara garis besar, sistem tersusun atas perangkat keras serta perangkat lunak untuk pemrosesan data dan visualisasi monitoring. Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pusat kendali yang membaca data sensor, menggerakkan aktuator, sekaligus mengirim data ke platform IoT melalui Wi-Fi [8]. Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gbr. 1 Arsitektur Sistem

Dua sensor LDR yang dipasang pada sisi kiri dan kanan panel dengan sekat pemisah digunakan untuk mendeteksi arah datangnya cahaya; selisih nilai keduanya menjadi dasar pergerakan panel. Intensitas cahaya diukur secara digital dalam satuan lux oleh sensor BH1750 melalui antarmuka I2C [9], sedangkan tegangan, arus, dan daya panel diukur oleh sensor INA219 yang dipasang seri pada jalur positif panel [10]. Berdasarkan selisih pembacaan LDR, ESP32 mengatur motor servo melalui sinyal PWM sehingga panel bergerak pada satu sumbu mengikuti posisi cahaya tertinggi. Sistem dicatu oleh panel surya yang mengisi baterai 12 V melalui *solar charge controller*, lalu tegangannya diturunkan menggunakan *buck converter* menjadi 5 V untuk menyuplai ESP32 dan komponen lainnya.

C. Arsitektur Monitoring IoT

Data hasil pembacaan dikirim ESP32 sebagai *publisher* ke *broker* MQTT menggunakan protokol MQTT yang ringan dan hemat sumber daya sehingga sesuai untuk komunikasi data IoT [11]. *Broker* Mosquitto berfungsi sebagai *server* dalam topologi bintang yang menghubungkan ESP32 dengan Node-RED [12]. Node-RED bertindak sebagai *subscriber* yang mengolah dan meneruskan data [13], kemudian menyimpannya ke dua *database*, yaitu MySQL untuk data relasional [14] dan InfluxDB untuk data deret waktu (*time-series*) [15]. Seluruh parameter selanjutnya divisualisasikan pada *dashboard* Grafana secara *real-time* dalam bentuk *gauge* dan grafik agar pemantauan lebih mudah [16].

D. Skenario Pengujian

Data dikumpulkan pada rentang pukul 09.00–15.00 WIB selama periode pengujian untuk menangkap variasi penyinaran sepanjang hari. Dari seluruh data yang terhimpun, dipilih satu hari dengan kualitas data terbaik pada masing-masing sistem sebagai dasar perbandingan.

E. Metode Analisis Data

Data intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya yang diperoleh dari kedua sistem dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung persentase peningkatan performa *solar tracker single axis* terhadap panel statis sebagai *baseline*. Perhitungan dilakukan dengan membandingkan selisih nilai rata-rata yang dihasilkan sistem solar tracker terhadap nilai rata-rata panel statis, menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Peningkatan (\%)} = \left[\frac{P_{\text{rata-rata tracker}} - P_{\text{rata-rata statis}}}{P_{\text{rata-rata statis}}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

Di mana P merepresentasikan masing-masing parameter yang diukur (intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya). Untuk memperoleh gambaran peningkatan performa secara keseluruhan, dihitung pula nilai rata-rata dari keempat persentase peningkatan tersebut sebagai berikut:

$$\text{Total Peningkatan (\%)} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4)}{4} \quad (2)$$

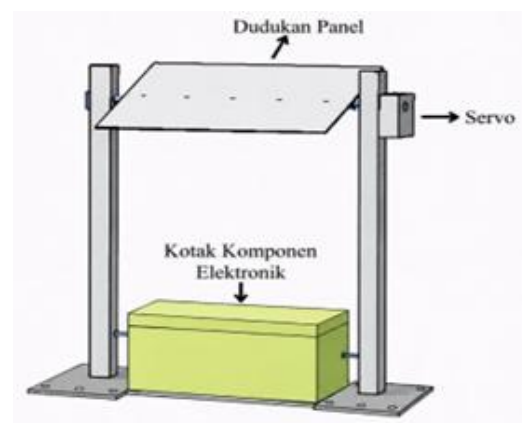
di mana P_1 , P_2 , P_3 , dan P_4 berturut-turut merupakan persentase peningkatan pada parameter intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini memaparkan hasil pengujian sistem monitoring IoT pada *solar tracker single axis* di *greenhouse* beserta analisisnya, mencakup verifikasi aliran data pada platform monitoring, pengujian konektivitas IoT, serta perbandingan kinerja antara panel dengan *solar tracker* dan panel statis.

A. Perangkat Pengujian Solar Tracker dan Panel Statis

Pengujian *solar tracker* dan panel statis dilakukan menggunakan perangkat fisik yang sama, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Perangkat terdiri atas tiga bagian utama: (1)udukan panel yang menopang panel surya dan dapat bergerak pada satu sumbu secara vertikal, (2) motor servo yang berfungsi sebagai aktuator penggerak panel, dan (3) kotak komponen elektronik yang menampung ESP32, sensor BH1750, sensor INA219, rangkaian LDR, serta modul catu daya.



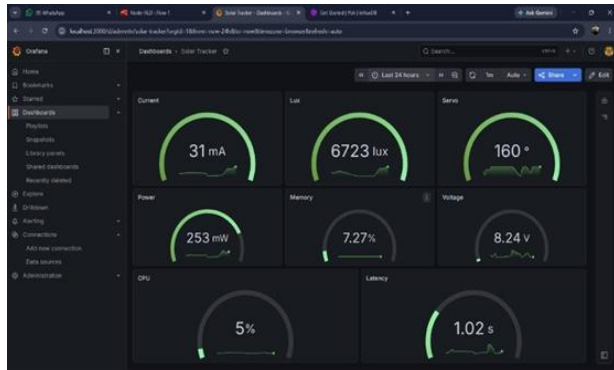
Gbr. 2 Bagian-Bagian Sistem Solar Tracker

Pada kondisi pengujian *solar tracker*, servo bergerak secara dinamis mengikuti selisih pembacaan dua sensor LDR yang dipasang pada sisi kiri dan kanan panel, sehingga panel terus menyesuaikan posisinya mengarah ke sumber cahaya dengan intensitas tertinggi. Sebaliknya, pada kondisi pengujian panel statis, perangkat yang sama digunakan namun servo tidak digerakkan sehingga panel tetap berada pada posisi sudut yang tetap sepanjang pengujian. Dengan menggunakan perangkat fisik yang identik pada kedua skenario, perbedaan performa yang teramati murni disebabkan oleh ada tidaknya mekanisme *tracking*, bukan oleh perbedaan spesifikasi perangkat keras.

B. Pengujian Monitoring Real-Time Berbasis IoT

Data hasil pembacaan sensor yang dikirim ESP32 melalui protokol MQTT berhasil diterima Node-RED secara berkala dalam format JSON, memuat parameter sudut servo, intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya. Data tersebut tersimpan dengan baik pada dua *database*, yaitu InfluxDB untuk data *time-series* dan MySQL untuk

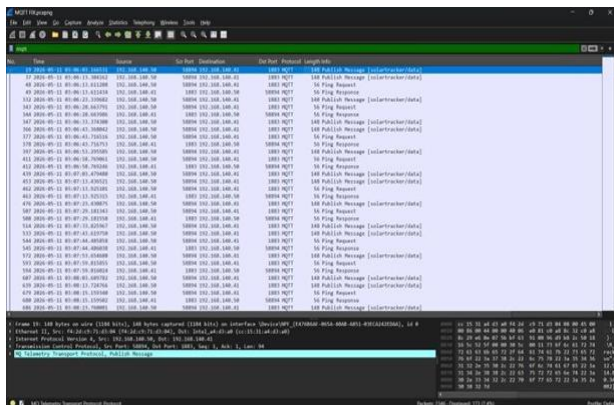
data relasional, sehingga dapat diakses kembali untuk analisis historis. Seluruh parameter selanjutnya divisualisasikan pada *dashboard* Grafana secara *real-time* dalam bentuk *gauge* dan grafik, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pada pengujian, sistem ESP32 terpantau stabil dengan penggunaan memori 7,27% dan beban CPU 5%, yang menunjukkan beban komputasi masih ringan dan sistem mampu berjalan berkelanjutan.



Gbr. 3 Tampilan Dashboard Grafana

C. Pengujian Konektivitas IoT

Pengujian konektivitas dilakukan dengan menangkap lalu lintas jaringan menggunakan Wireshark, difilter dengan kata kunci *mqtt*. Hasilnya menunjukkan komunikasi berlangsung antara ESP32 sebagai *publisher* dan *broker* Mosquitto melalui port MQTT 1883 pada topik *solartracker/data*. Dari total 2.346 paket yang tertangkap, sebanyak 173 paket (7,4%) teridentifikasi sebagai paket MQTT, terdiri atas paket *Publish Message* yang dikirim periodik serta paket *Ping Request/Response* sebagai mekanisme *keep-alive*. Hal ini membuktikan protokol MQTT bekerja stabil dan koneksi antara *publisher* dan *broker* tetap terjaga selama sistem beroperasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gbr. 4 Hasil Packet Capture Wireshark

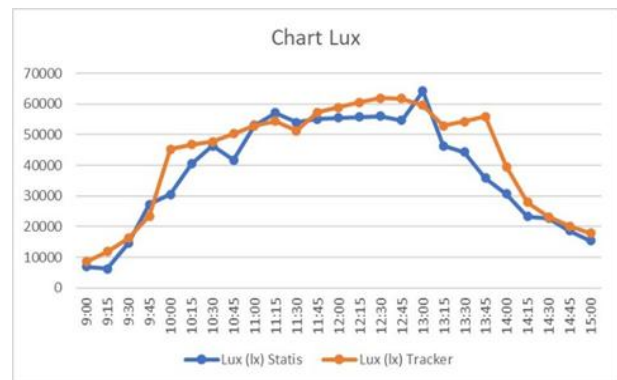
D. Perbandingan Kinerja Solar Tracker Single Axis dan Panel Statis

Perbandingan performa kedua sistem diperoleh dari rata-rata data pengujian dan dirangkum pada Tabel 1. Persentase peningkatan dihitung dengan Persamaan (1).

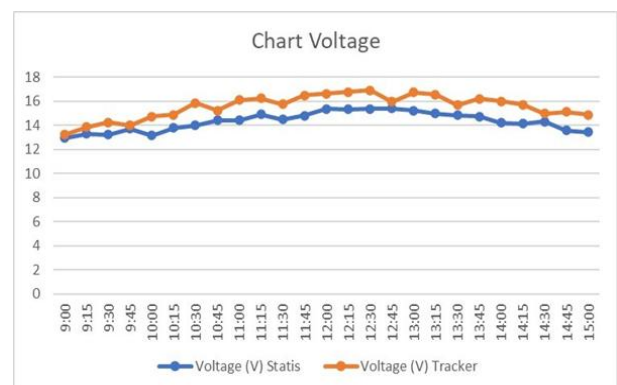
TABEL I
Persentase Peningkatan Performa Solar Tracker terhadap Panel Statis

No	Parameter	Panel Statis	Solar Tracker	Peningkatan
1	Intensitas Cahaya (lux)	38.255,24	42.396,80	10,83%
2	Tegangan (V)	14,31	15,54	8,57%
3	Arus (A)	0,2404	0,3348	39,25%
4	Daya (W)	3,4745	5,2621	51,45%
5	Rata-rata Total			27,52%

Berdasarkan Tabel 1, sistem *solar tracker single axis* meningkatkan performa panel surya pada seluruh parameter. Pada tegangan, *solar tracker* menghasilkan rata-rata 15,54 V dibandingkan 14,31 V pada panel statis (naik 8,57%), sedangkan intensitas cahaya yang diterima meningkat dari 38.255,24 lux menjadi 42.396,80 lux (naik 10,83%). Keunggulan ini bersumber dari kemampuan sistem menjaga sudut datang cahaya tetap mendekati tegak lurus terhadap permukaan panel sepanjang hari, melalui sensor LDR yang membandingkan intensitas cahaya sisi kiri dan kanan panel lalu memerintahkan servo bergerak ke arah cahaya tertinggi.



Gbr. 5 Grafik Perbandingan Intensitas Cahaya

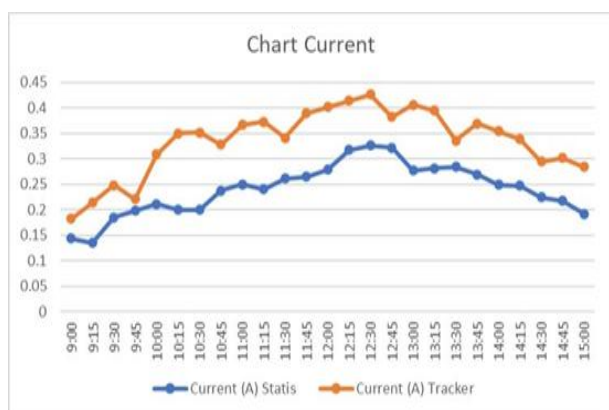


Gbr. 6 Grafik Perbandingan Tegangan

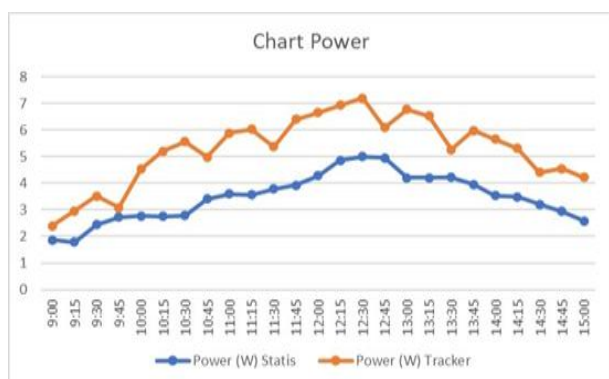
Peningkatan paling menonjol terjadi pada arus dan daya. Arus keluaran naik dari 0,2404 A menjadi 0,3348 A (naik 39,25%), sementara daya mencatat lonjakan terbesar sebesar 51,45%, dari 3,4745 W menjadi 5,2621 W. Peningkatan daya yang paling besar disebabkan oleh akumulasi kenaikan tegangan dan arus secara bersamaan, sehingga dampaknya berlipat. Hal ini sejalan dengan

prinsip sel fotovoltaik, yaitu arus keluaran panel berbanding lurus dengan irradiansi cahaya yang diterima; semakin besar cahaya yang ditangkap, semakin besar pula arus dan daya yang dihasilkan. Temuan ini juga selaras dengan studi perbandingan terdahulu yang menunjukkan keunggulan sistem pelacak surya satu sumbu terhadap panel statis [5].

Selama periode pengujian, servo bergerak pada rentang sudut 78° – 117° mengikuti posisi matahari. Perbedaan performa paling terlihat pada pagi dan sore hari, saat matahari berada pada sudut rendah pada kondisi tersebut panel statis mengalami penurunan performa yang cukup tajam karena sudut datang cahaya jauh dari tegak lurus, sedangkan *solar tracker* tetap stabil karena panel terus menyesuaikan sudutnya mengikuti matahari. Nilai tertinggi pada seluruh parameter intensitas cahaya 61.840 lux, tegangan 16,88 V, arus 0,426 A, dan daya 7,191 W tercatat pada pukul 12:30 WIB saat servo berada pada sudut 133° , mendekati posisi tegak lurus terhadap matahari pada tengah hari. Secara keseluruhan, sistem *solar tracker single axis* meningkatkan penyerapan energi surya dengan rata-rata total 27,52% dibandingkan panel statis pada penerapannya di *greenhouse*.



Gbr. 7 Grafik Perbandingan Arus



Gbr. 8 Grafik Perbandingan Daya

Grafik pada Gambar 7 dan Gambar 8 memperkuat pola tersebut, dengan sistem *solar tracker* konsisten menghasilkan arus dan daya yang lebih tinggi dibandingkan panel statis sepanjang periode pengujian, terutama pada jam-jam dengan sudut datang cahaya rendah di pagi dan sore hari.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *monitoring* IoT untuk menganalisis kinerja *solar tracker single axis* pada *greenhouse*, dengan mengintegrasikan ESP32, sensor LDR, BH1750, dan INA219, motor servo sebagai aktuator, serta sistem manajemen daya berbasis baterai 12 V dan *buck converter*. Sinergi sensor LDR, ESP32, dan motor servo membentuk sistem kendali tertutup yang secara otomatis mengarahkan panel ke arah cahaya dengan intensitas tertinggi, dengan servo bergerak dinamis pada rentang sudut 20° – 160° mengikuti pergerakan matahari selama enam hari pengujian keseluruhan.

Berdasarkan pengujian selama enam hari, sistem *solar tracker single axis* secara konsisten unggul dibandingkan panel surya statis, yaitu meningkatkan intensitas cahaya sebesar 10,83%, tegangan 8,57%, arus 39,25%, dan daya 51,45%, atau rata-rata peningkatan performa keseluruhan sebesar 27,52%, dengan keunggulan paling nyata pada pagi dan sore hari. Sistem *monitoring* berbasis IoT yang dibangun menggunakan protokol MQTT dengan *broker* Mosquitto, Node-RED, InfluxDB, MySQL, dan Grafana terbukti mampu mengakuisisi, menyimpan, dan memvisualisasikan seluruh parameter secara *real-time*; verifikasi menggunakan Wireshark menunjukkan komunikasi MQTT berjalan stabil melalui topik *solartracker/data*, sementara data tersimpan dengan baik pada InfluxDB untuk data deret waktu dan MySQL untuk penyimpanan jangka panjang.

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan penambahan algoritma berbasis perhitungan astronomis atau modul GPS dan RTC agar akurasi pelacakan tidak sepenuhnya bergantung pada sensor LDR, fitur notifikasi otomatis pada Node-RED untuk mendeteksi anomali sistem, pengujian dalam rentang waktu yang lebih panjang, serta penerapan algoritma kecerdasan buatan seperti *machine learning* atau *fuzzy logic* untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pergerakan panel.

REFERENSI

- [1] Sanford, S. (2011). Reducing greenhouse energy consumption—An overview. *Energy*, 39(7)(01).
- [2] Watson, R. T., Boudreau, M. C., & van Iersel, M. W. (2018). Simulation of greenhouse energy use: An application of energy informatics. *Energy Informatics*, 1(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42162-018-0005-7>.
- [3] Shahrier, S. N., Haider, M. B., Murad, M. M. K., & Bhuyan, M. H. (2023). Enhancing Photovoltaic Power Generation through a Microcontroller-Driven Single-Axis Solar Tracker. *Journal of Energy Research and Reviews*, 15(3), 103–115. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v15i3319>.
- [4] Syahtuta, Z., & Haryanti, M. (2023). Rancang Bangun Solar Tracker Dual Axis Berbasis IoT

- (Internet of Things). *Jurnal Teknologi Industri*, 12(2). <https://doi.org/10.35968/jti.v12i2.1118>.
- [5] INDRA, I., Mamodiya, U., & Keswani, B. (2025). Energy efficiency and practical implications of IoT-based static vs. single-axis solar tracking systems: A comparative analysis. *Journal of Intelligent Systems*, 15(2), 164-182. <https://doi.org/10.54216/JISIoT.150212>.
- [6] Kassim, M. & Lazim, F. (2022). Adaptive photovoltaic solar module based on internet of things and web-based monitoring system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(1), 924-935. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp924-935>.
- [7] Soedjangi, M. A. F. A.-A. (2025). Perancangan Solar Tracker Dual Axis Dengan Monitoring Intensitas Cahaya, Arus, Tegangan, Daya, dan Sudut Kemiringan Panel Surya Berbasis IOT. *Infomatek*, 27(1), 59-70. <https://doi.org/10.23969/infomatek.v27i1.23992>.
- [8] Datasheet, S. (2021). ESP32 Series Datasheet. *Espr. Syst*, 1-65. [Online].
- [9] Pane, R. R. P., Nengsih, S., & Morsin, M. (2024). Solar Panel Light Intensity and Voltage Measurement System using ATmega328. *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 8(2), 234-242.
- [10] Fitri Puspasari, F. P., & Trias Prima Satya, T. P. S. (2025). Analysis of The Ina219 Sensor System And Voltage Divider on A Calibrate Multimeter: Fitri Puspasari, Trias Prima Satya. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 20(2). <https://doi.org/10.12962/j24604682.v20i2.2973>
- [11] Agyemang, J. O., Kponyo, J. J., Gadze, J. D., Nunoo-Mensah, H., & Yu, D. (2022). A Lightweight Messaging Protocol for Internet of Things Devices. *Technologies*, 10(1), 21. <https://doi.org/10.3390/technologies10010021>.
- [12] Light, R. A. (2017). Mosquitto: Server and Client Implementation of The MQTT Protocol. *Journal of Open Source Software*, 2(13), 265. <https://doi.org/10.21105/joss.00265>.
- [13] N. K. Giang, M. Blackstock, R. Lea, and V. C. M. Leung, "Developing IoT Applications in The Fog: A Distributed Dataflow Approach," in *2015 5th International Conference on the Internet of Things (IOT)*, IEEE, Oct. 2015, pp. 155-162. doi: 10.1109/IOT.2015.7356560.
- [14] Suster, I., & Ranisavljevic, T. (2023). Optimization of MySQL Database. *Journal of process management and new technologies*, 11(1-2), 141-151. <https://doi.org/10.5937/jpmnt11-44471>.
- [15] Grzesik, P., & Mrozek, D. (2020, June). Comparative Analysis of Time Series Databases in The Context of Edge Computing for Low Power Sensor Networks. In *International Conference on Computational Science* (pp. 371-383). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50426-7_28.
- [16] Elradi, M. D. (2025). Prometheus & Grafana: A Metrics-focused Monitoring Stack. *Journal of Computer Allied Intelligence(JCAI, ISSN: 2584-2676)*, 3(3), 28-39. <https://doi.org/10.69996/jcai.2025015>.