e-ISSN 3062-8849
The 4th National Conference on Innovative Agriculture 2025
Jember, 26 - 27 September 2026

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

Rancang Bangun Prototipe Smart Greenhouse Berbasis IoT Terintegrasi Sistem Energi Surya dan Solar Tracker

(Design and Development of an IoT-Based Smart Greenhouse Prototype Integrating a Solar Energy System and a Solar Tracker)

Nurul Widadi[1], Fawait Afnani[1], Muhammad Ihsan Alfarizi[1], Shinta Widyaningtyas[1], Degita Fahmi Brillyansyah[1*]

[1]Program Studi Keteknikan Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember

*Email Koresponden: degita_fahmi@polije.ac.id

Received : 2 September 2026 | Accepted : 25 September 2026 | Published : 30 Oktober 2026

Kata Kunci

energi surya; ESP32; Internet of Things; *Smart Greenhouse*; solar tracker

ABSTRAK

Greenhouse konvensional masih membutuhkan pemantauan dan pengendalian kondisi lingkungan secara manual sehingga kurang efisien untuk pengelolaan jangka panjang. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan prototipe *Smart Greenhouse* yang mengintegrasikan *Internet of Things* (IoT), sistem kontrol otomatis, energi surya, dan *solar tracker*. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali dengan sensor DHT22, sensor kelembapan tanah kapasitif, BH1750, dan LDR. Aktuator terdiri atas pompa air DC, LED *grow light*, kipas DC, dan servo MG996R. Sumber energi menggunakan panel surya 100 Wp, *solar charge controller* 10 A, dan baterai VRLA 12 V 20 Ah. Pemantauan dilakukan melalui LCD I2C 16×2 dan *dashboard Blynk* pada smartphone. Pengujian dirancang sebagai uji verifikasi fungsional (functional verification test) pada tingkat komponen dan tingkat integrasi sistem, dengan kriteria keberhasilan yang ditetapkan untuk setiap subsistem sebelum pengujian dilakukan pada konfigurasi akhir prototipe. Hasil pengujian fungsional menunjukkan bahwa sensor mampu merespons perubahan kondisi pengujian, pompa dan LED dapat dikendalikan secara otomatis maupun manual, panel surya dapat melakukan pengisian baterai melalui *solar charge controller*, serta mekanisme *solar tracker* mampu mengubah orientasi panel berdasarkan perbedaan pembacaan LDR. Pengujian pada penelitian ini dibatasi pada keberfungsian sistem dan belum mencakup evaluasi peningkatan energi *solar tracker* dibandingkan panel statis. Prototipe berhasil mengintegrasikan sistem *monitoring*, kontrol otomatis, sumber energi surya, dan mekanisme pelacakan panel pada tingkat uji fungsional.

Keywords

ESP32; Internet of Things; Smart Greenhouse; solar energy; solar tracker

ABSTRACT

Conventional greenhouses still require manual monitoring and environmental control, which is inefficient for long-term management. This study aimed to design and implement a Smart Greenhouse prototype integrating the Internet of Things (IoT), automatic control, solar energy, and a solar tracker. The system used an ESP32 as the main controller with DHT22, capacitive soil-moisture, BH1750, and LDR sensors. The actuators consisted of a DC water pump, an LED grow light, a DC fan,

and an MG996R servo. Energy was supplied by a 100 Wp solar panel, a 10 A solar charge controller, and a 12 V 20 Ah VRLA battery. Monitoring was performed through a 16×2 I2C LCD and a Blynk dashboard on a smartphone. The tests were designed as a functional verification test at both the component and system-integration levels, with success criteria defined for each subsystem prior to testing on the final prototype configuration. The functional test results showed that the sensors responded to changes in the test conditions, the pump and the LED could be controlled both automatically and manually, the solar panel was able to charge the battery through the solar charge controller, and the solar tracking mechanism was able to change the panel orientation based on the difference between the LDR readings. Testing in this study was limited to system functionality and did not cover the evaluation of any energy gain of the solar tracker compared with a static panel. The prototype successfully integrated the monitoring system, automatic control, the solar energy source, and the panel tracking mechanism at the functional test level.

1. PENDAHULUAN

Greenhouse merupakan salah satu pendekatan budidaya yang memungkinkan kondisi lingkungan tanaman dikendalikan sehingga faktor seperti suhu, kelembapan, air, dan cahaya dapat dikelola lebih terarah. Namun, pengelolaan *greenhouse* secara manual mengharuskan pengguna melakukan pemeriksaan kondisi tanaman, penyiraman, pengaturan pencahayaan, dan pemantauan lingkungan secara berkala. Kondisi tersebut meningkatkan kebutuhan waktu dan tenaga, terutama ketika sistem digunakan dalam jangka panjang atau pada area yang cukup luas. Huda et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) pada *greenhouse* dapat membantu pemantauan kondisi budidaya secara *real-time*, sementara Ristian et al. (2022) menunjukkan bahwa parameter lingkungan yang terbaca dapat diolah untuk mengendalikan perangkat keluaran pada *smart greenhouse*.

IoT memungkinkan data sensor dikirim melalui jaringan sehingga kondisi *greenhouse* dapat dipantau dari jarak jauh. Penggunaan mikrokontroler yang memiliki konektivitas nirkabel, seperti ESP32, juga memungkinkan integrasi antara sensor, aktuator, dan antarmuka pengguna dalam satu perangkat. Berrios Gomez dan Rivera Herrera (2022) mengembangkan sistem berbasis ESP32 untuk pemantauan dan pengendalian kondisi *greenhouse* dengan komunikasi nirkabel dan aplikasi bergerak. Raihan dan Firmawati (2022) juga menunjukkan penerapan *Blynk* untuk pemantauan parameter lingkungan dan pengaktifan pompa berdasarkan kondisi parameter *greenhouse*. Dengan demikian, integrasi sensor dan kontrol berbasis IoT dapat menjadi pendekatan untuk mengurangi ketergantungan terhadap pemantauan manual.

Selain sistem kontrol, kebutuhan energi merupakan aspek penting pada penerapan *greenhouse* cerdas. Penggunaan panel surya dapat menjadi alternatif sumber daya untuk komponen kontrol dan aktuator, khususnya pada lokasi yang jauh dari jaringan listrik. Putri et al. (2025) menunjukkan bahwa sistem pembangkit tenaga surya dapat dirancang sebagai sumber energi alternatif untuk operasi *greenhouse*. Pada kegiatan ini, energi surya tidak hanya digunakan sebagai sumber daya, tetapi dipadukan dengan baterai sebagai penyimpanan energi agar sistem tetap memperoleh pasokan ketika intensitas matahari menurun.

Solar tracker merupakan salah satu pendekatan untuk mengatur orientasi panel surya terhadap arah datangnya cahaya. Sistem berbasis sensor cahaya dapat menggunakan perbedaan

intensitas yang diterima dua sensor sebagai dasar penggerakan aktuator (Koli et al., 2021; Septiawan et al., 2022). Pengembangan *smart greenhouse* berbasis Internet of Things telah banyak dilakukan dengan mengintegrasikan sensor lingkungan, mikrokontroler, aktuator, dan sistem pemantauan jarak jauh. Huda et al. (2023), misalnya, mengembangkan *smart greenhouse* berbasis IoT untuk membantu monitoring dan pengendalian kondisi budidaya, sedangkan Ristian et al. (2022) mengembangkan sistem monitoring *greenhouse* dengan beberapa parameter lingkungan sebagai dasar pengendalian perangkat. Pemanfaatan aplikasi *Blynk* untuk monitoring dan pengendalian *greenhouse* juga telah diterapkan oleh Raihan dan Firmawati (2022). Pada penelitian lain, sistem *solar tracking* telah dilaporkan mampu meningkatkan penerimaan energi dibandingkan panel statis (Fathoni et al., 2020). Namun, penelitian ini tidak ditujukan untuk mengevaluasi peningkatan energi tersebut. *Solar tracker* digunakan sebagai salah satu subsistem pada prototipe, dan pengujian dibatasi pada kemampuan sensor LDR mendeteksi perbedaan arah cahaya serta kemampuan servo mengubah orientasi panel sesuai logika kontrol.

Kontribusi teknis penelitian ini bukan pada pengembangan masing-masing teknologi secara terpisah, tetapi pada implementasi dan integrasi tiga subsistem dalam satu prototipe skala laboratorium, yaitu: sistem monitoring dan kontrol *greenhouse* berbasis ESP32, sistem penyediaan daya menggunakan panel surya dan baterai, serta mekanisme solar tracker berbasis dua LDR dan servo. BH1750 digunakan secara khusus untuk memonitor pencahayaan *greenhouse* dan sebagai input pengendalian LED grow light, sedangkan dua LDR digunakan secara independen sebagai sensor diferensial untuk menentukan arah gerak solar tracker. Penelitian difokuskan pada rancang bangun dan validasi fungsi prototipe. Oleh karena itu, pengujian tidak dimaksudkan untuk menentukan peningkatan produksi energi solar tracker dibandingkan panel statis maupun untuk menilai peningkatan produktivitas tanaman.

2. METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Kegiatan

Kegiatan dilaksanakan pada Mei 2026 di Laboratorium Logam dan Kayu, Politeknik Negeri Jember, dalam rangkaian *Project Based Learning* (PBL) Program Studi Keteknikan Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian. Tahapan kegiatan meliputi desain rangka, perakitan sistem kontrol, perakitan sistem energi, integrasi sistem, pemrograman, dan pengujian prototipe.

2.2 Desain Sistem

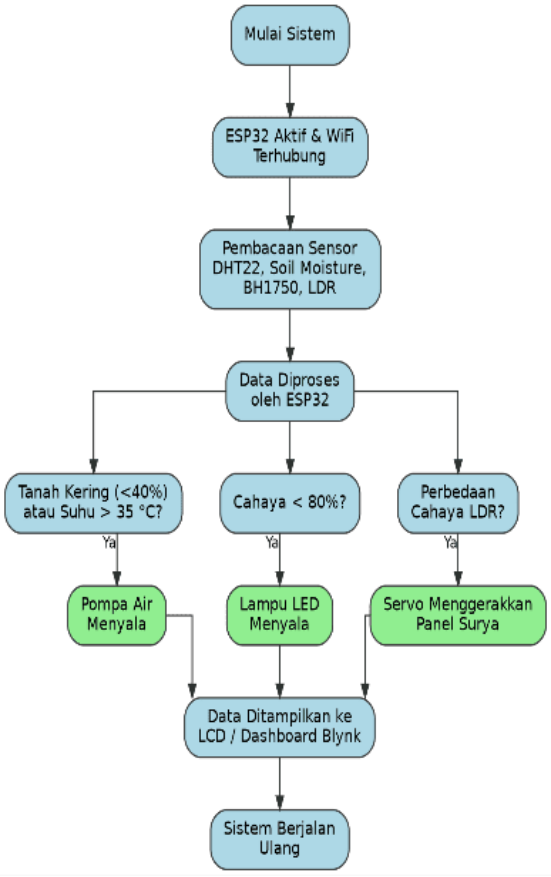
Prototipe final menggunakan satu ESP32 DevKit V1 sebagai pusat pengolahan dan komunikasi. Satu DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara, satu sensor kelembapan tanah kapasitif digunakan untuk memantau kondisi media tanam, dan satu BH1750 digunakan untuk mengukur intensitas pencahayaan *greenhouse*. Dua sensor LDR ditempatkan pada mekanisme solar tracker dan digunakan secara khusus untuk memperoleh perbedaan pembacaan cahaya dari dua arah.

Jumlah tersebut merupakan jumlah komponen yang terpasang pada konfigurasi akhir prototipe. Jumlah beberapa komponen yang lebih dari satu pada daftar alat dan bahan kegiatan PBL menunjukkan komponen yang tersedia selama kegiatan dan tidak seluruhnya digunakan secara bersamaan pada prototipe final. Diagram alir sistem kontrol disajikan pada Gambar 1, sedangkan alur sistem energi disajikan pada Gambar 2. Spesifikasi komponen yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Konfigurasi yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan konfigurasi akhir prototipe setelah tahap perakitan dan troubleshooting. Komponen yang tercantum dalam daftar alat dan

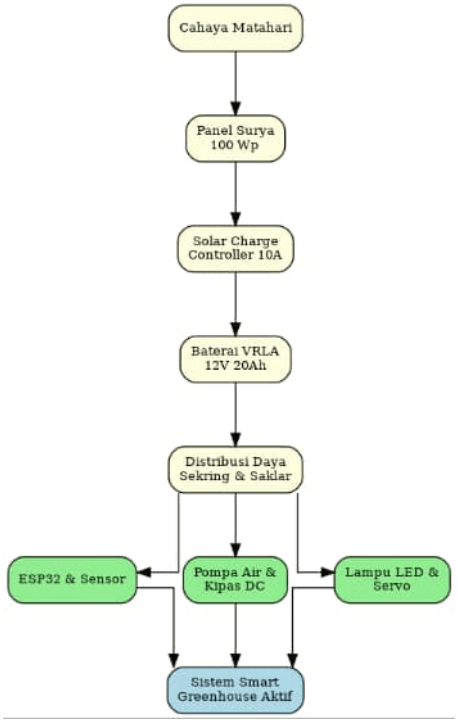
doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

bahan pada tahap perencanaan awal PBL tetapi tidak digunakan pada konfigurasi akhir, termasuk modul Micro SD Data Logger dan layar OLED, tidak dimasukkan sebagai bagian dari sistem yang diuji pada penelitian ini. Konfigurasi akhir yang dianalisis terdiri atas satu ESP32, satu DHT22, satu sensor kelembapan tanah kapasitif, satu BH1750, dua LDR untuk solar tracker, satu LCD I2C 16×2, satu modul relai dua kanal, dua LED grow light, satu pompa DC, satu kipas DC, satu servo MG996R, serta sistem panel surya 100 Wp–solar charge controller 10 A–baterai VRLA 12 V 20 Ah.



Gambar 1. Diagram alir kerja sistem kontrol *Smart Greenhouse*.

doi: 10.25047/nacia.v4i1.516



Gambar 2. Alur distribusi energi dari panel surya menuju beban sistem.

Tabel 1. Spesifikasi dan fungsi komponen pada konfigurasi akhir prototipe *Smart Greenhouse*

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
ESP32 DevKit V1	Mikrokontroler, Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth, 30 GPIO	Pusat kontrol dan komunikasi IoT
DHT22 (AM2302)	Suhu −40–80 °C; kelembapan udara 0–100% RH; keluaran digital	Pemantauan suhu dan kelembapan udara
Sensor kelembapan tanah kapasitif v1.2	Keluaran analog 0–3,3 V	Pemantauan kelembapan media tanam
BH1750 (modul GY-302)	Sensor intensitas cahaya digital, antarmuka I2C	Pemantauan pencahayaan *greenhouse*
LDR 5 mm + resistor	2 unit, keluaran analog	Deteksi arah cahaya untuk *solar tracker*
LCD I2C 16×2	Modul tampilan karakter, antarmuka I2C	Tampilan lokal data sensor
Panel surya	100 Wp	Sumber energi utama
Solar charge controller	10 A, 12/24 V	Pengatur pengisian baterai
Baterai VRLA	12 V, 20 Ah	Penyimpanan energi
Pompa air DC	12 V	Penyiraman tanaman
LED *grow light* DC	12 V, 10–20 W	Pencahayaan tambahan
Kipas DC	12 V	Sirkulasi udara *greenhouse*
Servo MG996R	Torsi ±11 kg·cm pada 6 V; rotasi 180°	Penggerak *solar tracker*
Arduino IDE	Versi 2.x, perangkat lunak pemrograman	Pengembangan program ESP32

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Blynk IoT	Platform *dashboard* IoT	Pemantauan dan kendali jarak jauh
Relai 2 kanal	2 kanal, kendali ON/OFF	Saklar elektronik untuk pompa air dan LED grow light
Sprayer dan selang	Sistem distribusi air	Menyalurkan dan menyebarkan air ke area tanaman

2.3 Desain Struktural *Greenhouse*

Rancang bangun struktur *greenhouse* merupakan tahapan awal yang menentukan penempatan seluruh subsistem monitoring, kontrol, energi, dan solar tracker pada prototipe. Rangka utama *greenhouse* dibuat menggunakan besi hollow galvanis berukuran 4×2 cm dengan tinggi penyangga sekitar 150 cm, sedangkan dudukan panel surya dan mekanisme solar tracker dibuat menggunakan besi hollow galvanis berukuran 2×2 cm dengan dimensi sekitar 91×30 cm. Pemilihan hollow galvanis didasarkan pada kebutuhan struktur yang ringan namun cukup kaku untuk menopang beban panel surya, bracket servo, serta box panel kontrol dan sistem energi yang dipasang pada bagian bawah rangka.

Proses pembuatan struktur diawali dengan pengukuran material menggunakan meteran dan penandaan titik potong menggunakan spidol besi, dilanjutkan dengan pemotongan besi hollow menggunakan gerinda potong sesuai ukuran yang telah ditentukan. Potongan besi kemudian disambung membentuk rangka utama *greenhouse*, dudukan panel surya, serta kaki penyangga struktur. Dudukan panel surya dilengkapi bracket servo pada bagian atas rangka untuk memungkinkan mekanisme solar tracker menggerakkan orientasi panel, sedangkan box panel kontrol dan sistem energi ditempatkan pada bagian bawah rangka agar dekat dengan jalur distribusi daya menuju aktuator. Penempatan tersebut memudahkan penelusuran keterkaitan antara struktur mekanik dan subsistem elektronik pada tahap perakitan dan integrasi berikutnya. Struktur rangka hasil rancang bangun ditunjukkan pada Gambar 3.

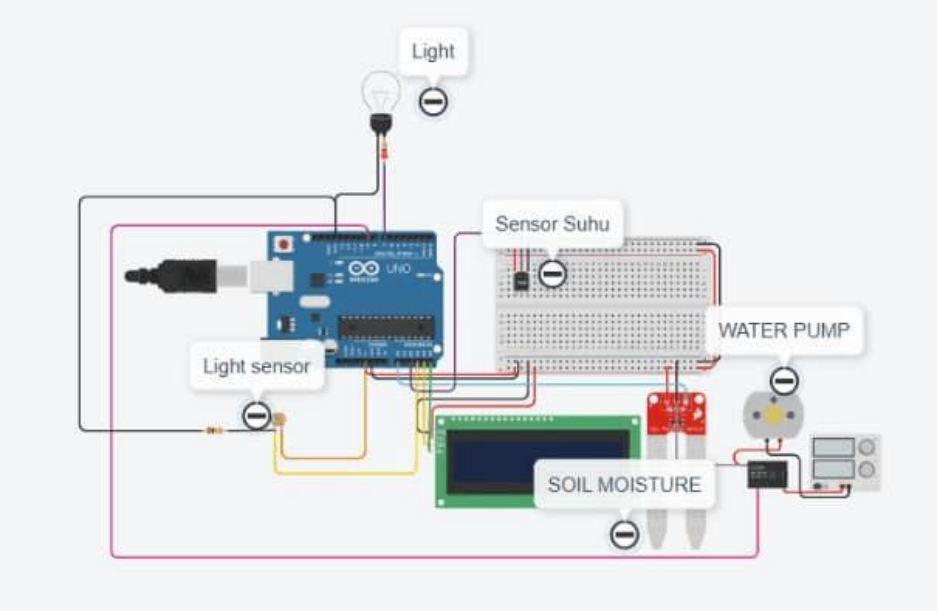


Gambar 3. Struktur rangka *Smart Greenhouse* hasil rancang bangun, dengan dudukan panel surya pada bagian atas dan box panel kontrol beserta sistem energi pada bagian bawah rangka.

doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

2.4 Perancangan dan Perakitan Sistem Kontrol

Secara arsitektur (Gambar 4), rangkaian sistem kontrol disusun dengan menempatkan mikrokontroler sebagai pusat pemrosesan tunggal yang menerima sinyal dari beberapa sensor sebagai jalur masukan dan mengendalikan beberapa aktuator sebagai jalur keluaran. Sensor cahaya (LDR), sensor suhu, dan sensor kelembapan tanah dihubungkan langsung ke jalur masukan mikrokontroler, sedangkan lampu indikator, layar LCD, dan pompa air dikendalikan melalui modul driver atau relai yang terhubung pada jalur keluaran. Seluruh komponen dirakit pada papan breadboard dengan jalur catu daya (*power rail*) yang dibagikan secara bersama, sehingga mikrokontroler, sensor, dan aktuator dapat memperoleh suplai tegangan yang seragam dalam satu rangkaian terintegrasi. Susunan ini memudahkan penelusuran jalur sinyal maupun jalur daya pada tahap perakitan dan pengujian awal sebelum rangkaian dipindahkan secara permanen ke PCB.



Gambar 4. Arsitektur rancangan sistem kontrol.

Seluruh sensor dihubungkan ke pin masukan ESP32. DHT22 dihubungkan ke pin digital GPIO 27 dan sensor kelembapan tanah kapasitif ke pin analog GPIO 34, sedangkan BH1750 dihubungkan melalui jalur I2C bersama LCD. Dua LDR dihubungkan ke pin masukan analog ESP32, salah satunya pada GPIO 35. Modul relai dua kanal digunakan untuk mengendalikan pompa air melalui GPIO 26 dan LED *grow light* melalui GPIO 12. LCD I2C 16×2 dipasang pada jalur I2C ESP32 sebagai tampilan lokal. Perakitan awal dilakukan menggunakan *breadboard* dan kabel *jumper*, kemudian dipindahkan secara permanen ke PCB. Program dikembangkan menggunakan Arduino IDE dan diintegrasikan dengan platform *Blynk* untuk pemantauan serta kendali jarak jauh.

Kedua jenis sensor cahaya pada sistem ini memiliki peran yang berbeda dan tidak saling menggantikan. BH1750 digunakan untuk pemantauan intensitas pencahayaan *greenhouse*, sedangkan dua LDR digunakan secara khusus untuk mendeteksi perbedaan arah cahaya pada mekanisme *solar tracker*. Nilai intensitas cahaya yang ditampilkan pada sistem pemantauan dinyatakan sebagai persentase ternormalisasi terhadap rentang pembacaan sensor, sehingga tidak dinyatakan dalam satuan lux.

Tidak seluruh aktuator terhubung pada logika kendali otomatis berbasis *Blynk*. Relai dua kanal yang tersedia dialokasikan untuk pompa air dan LED *grow light*, sehingga kipas DC

dihubungkan langsung ke jalur distribusi daya 12 V dan dioperasikan melalui saklar DC. Servo MG996R dijalankan oleh rutin kendali *solar tracker* yang terpisah dari program pemantauan *Blynk*. Konfigurasi tersebut merupakan batasan pada tahap prototipe, dan integrasi kipas serta servo ke dalam satu program kendali menjadi salah satu agenda pengembangan berikutnya.

Algoritma kontrol menggunakan nilai ambang yang ditetapkan pada program. Pompa air aktif ketika kelembapan tanah kurang dari 40% atau suhu udara melebihi 35 °C. Ambang kelembapan tanah berperan sebagai pemicu utama penyiraman, sedangkan ambang suhu berperan sebagai pemicu tambahan yang mengaktifkan pompa air sebagai respons terhadap kondisi suhu tinggi, mengingat kipas DC belum terintegrasi ke dalam kendali otomatis. Respons ini tidak dinyatakan sebagai efek pendinginan evaporatif (evaporative cooling) karena tidak dilakukan pengukuran suhu maupun kelembapan udara sebelum dan sesudah penyiraman. Pembacaan BH1750 digunakan sebagai parameter pengendalian otomatis LED grow light. Nilai pencahayaan dinyatakan sebagai indeks pencahayaan ternormalisasi pada rentang 0–100%. LED grow light diaktifkan ketika indeks pencahayaan berada di bawah 80% dan dinonaktifkan ketika nilai berada pada atau di atas nilai ambang tersebut. Nilai ambang 80% merupakan set-point perangkat lunak pada prototipe dan belum dikalibrasi berdasarkan kebutuhan pencahayaan komoditas tertentu. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak ditafsirkan sebagai batas agronomis kebutuhan fotosintesis tanaman. Nilai keluaran sensor analog dikonversi menjadi persentase menggunakan fungsi map() dan dibatasi dengan fungsi constrain(). Sistem menyediakan mode otomatis dan mode manual yang dapat dipilih melalui *dashboard Blynk*. Untuk menjaga kestabilan pembacaan, konfigurasi ADC ESP32 diatur menggunakan analogReadResolution(12) dan analogSetAttenuation(ADC_11db), disertai penambahan jeda pembacaan, perbaikan jalur kabel, dan penguatan sambungan.

Seluruh nilai ambang tersebut ditetapkan sebagai nilai awal pada tahap prototipe dan belum dikalibrasi terhadap kebutuhan komoditas tertentu. Ambang cahaya 80% khususnya menyebabkan LED *grow light* menyala pada hampir seluruh kondisi selain cahaya matahari langsung, sehingga penetapan ambang yang lebih rendah dan berbasis kebutuhan fotosintesis tanaman diperlukan sebelum sistem digunakan pada budidaya sesungguhnya.

2.5 Perancangan Sistem Energi dan Solar Tracker

Sistem energi menggunakan panel surya 100 Wp yang dihubungkan ke *solar charge controller* 10 A dan baterai VRLA 12 V 20 Ah. Energi dari baterai didistribusikan melalui terminal *block*, saklar DC, dan sekring menuju ESP32, sensor, relai, pompa, lampu, kipas, dan servo. Instalasi panel kontrol dan komponen sistem energi ditunjukkan pada Gambar 5. Pengujian sistem energi dilakukan dengan menempatkan panel di bawah sinar matahari langsung dan mengukur tegangan menggunakan *multimeter*, kemudian memeriksa berlangsungnya proses pengisian baterai serta kemampuan baterai menyuplai beban.

Solar tracker menggunakan dua LDR dan satu servo MG996R yang dipasang pada rangka besi *hollow* galvanis. Dudukan panel surya dibuat menggunakan hollow galvanis berukuran 2×2 cm dengan dimensi sekitar 91×30 cm, sedangkan rangka utama *greenhouse* menggunakan hollow 4×2 cm dengan tinggi penyangga sekitar 150 cm; dudukan panel dilengkapi bracket servo untuk memungkinkan perubahan orientasi panel. Mekanisme solar tracker menggunakan dua LDR sebagai sensor diferensial untuk mendeteksi arah datangnya cahaya. Kedua sensor dibaca melalui ADC ESP32 dengan resolusi 12 bit (0–4095). Selisih relatif pembacaan dihitung berdasarkan persamaan 1.

$$D = \frac{|LDR_L - LDR_R|}{\max(LDR_L, LDR_R)} \times 100\%$$

Jurusan Teknologi Pertanian
Politeknik Negeri Jember
doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

Deadband sebesar 5% digunakan untuk mengurangi pergerakan servo akibat perbedaan pembacaan yang kecil. Apabila D ≤ 5%, servo mempertahankan posisinya. Apabila D > 5%, servo MG996R digerakkan secara bertahap sebesar 1° menuju sisi LDR dengan pembacaan lebih tinggi. Sudut servo dibatasi pada rentang operasional mekanisme untuk mencegah pergerakan melampaui batas dudukan panel. Nilai *deadband* digunakan sebagai parameter kontrol awal pada prototipe dan belum diperoleh melalui optimasi eksperimental. Metode ini sejalan dengan prinsip tracker berbasis LDR yang telah digunakan pada sistem pelacakan panel surya (Koli et al., 2021; Septiawan et al., 2022) serta rancangan rangkaian penggerak motor *solar tracker* yang dilaporkan Yasa et al. (2022).



Gambar 5. Instalasi panel kontrol dan komponen sistem energi surya.

2.6 Metode Uji Fungsional dan Analisis Data

Pengujian pada penelitian ini merupakan uji fungsional (*functional verification test*) yang bertujuan memastikan setiap subsistem dapat bekerja sesuai rancangan dan dapat diintegrasikan menjadi satu prototipe. Pengujian tidak ditujukan untuk mengevaluasi efisiensi energi, peningkatan keluaran panel akibat *solar tracker*, maupun performa agronomis tanaman. Kriteria keberhasilan setiap subsistem disajikan pada Tabel 2.

Pengujian dilakukan secara fungsional pada tingkat komponen dan integrasi sistem. Sensor DHT22 diuji untuk pembacaan suhu dan kelembapan, sensor kelembapan tanah diuji pada media kering dan basah, sedangkan BH1750 dan LDR diuji pada kondisi terang, redup, serta arah cahaya yang berbeda. Relai diuji untuk mengendalikan pompa dan lampu. Pompa, *sprayer*, LED, dan kipas diuji berdasarkan respons terhadap sumber daya dan perintah kontrol. Panel surya, *solar charge controller*, dan baterai diuji untuk memastikan berlangsungnya proses pembangkitan, pengisian, dan penyediaan daya. Servo diuji melalui program *tracker*, sedangkan *dashboard* dan tampilan lokal diuji berdasarkan kemampuannya menampilkan data sensor.

Tabel 2. Kriteria keberhasilan uji fungsional setiap subsistem

Subsistem	Kriteria keberhasilan
DHT22	Dapat memberikan pembacaan suhu dan kelembapan udara (RH)
Sensor kelembapan tanah	Nilai berubah antara kondisi kering dan basah
BH1750	Nilai berubah pada kondisi terang dan redup
LDR *tracker*	Menghasilkan perubahan atau selisih pembacaan sesuai arah cahaya
Pompa air	ON/OFF sesuai perintah

doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

Subsistem	Kriteria keberhasilan
LED *grow light*	ON/OFF sesuai perintah
Blynk	Data dapat dikirim dan ditampilkan
Panel surya–SCC	Proses pengisian baterai dapat berlangsung
Baterai	Mampu menyuplai sistem
Servo *tracker*	Bergerak menuju sisi dengan pembacaan LDR lebih tinggi
Integrasi	Semua subsistem dapat bekerja dalam konfigurasi prototipe

Analisis hasil dilakukan secara deskriptif berdasarkan status keberfungsian setiap komponen dan kesesuaian respons terhadap kondisi pengujian. Data pemantauan yang tercatat pada saat pengujian digunakan sebagai contoh keluaran sistem. Pendekatan ini dipilih karena data kegiatan belum mencakup pengujian performa jangka panjang, efisiensi energi, akurasi sensor, maupun perbandingan kuantitatif antara *solar tracker* dan panel statis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem

Pengujian sistem monitoring dilakukan untuk mengetahui kemampuan prototipe dalam membaca dan menampilkan parameter lingkungan *greenhouse*. Parameter yang diamati meliputi suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, dan intensitas pencahayaan. Data sensor direkam melalui sistem berbasis ESP32 dan ditampilkan melalui LCD serta platform *Blynk*.

Sebanyak 17 pembacaan suhu berhasil tercatat selama jendela waktu 203 s, meskipun terdapat jeda pencatatan antardata. Suhu berada pada rentang 28,7–29,1 °C dengan rata-rata 28,75 ± 0,13 °C dan koefisien variasi sekitar 0,46%. Nilai tersebut menunjukkan variasi pembacaan yang relatif kecil selama periode pengujian yang singkat. Namun, hasil ini tidak dapat digunakan untuk menyatakan akurasi DHT22 karena pengujian tidak menggunakan termometer referensi dan durasi pengamatan terbatas.

Prototipe *Smart Greenhouse* berhasil dirakit dengan mengintegrasikan struktur *greenhouse*, sistem kontrol, sistem energi, dan *solar tracker*. ESP32 berperan sebagai pusat pemrosesan yang menerima data sensor dan mengirimkan perintah ke aktuator. Pemantauan dapat dilakukan melalui LCD I2C 16×2 pada *greenhouse* dan *dashboard Blynk* pada *smartphone*, sehingga pengguna dapat melihat kondisi lingkungan tanpa harus berada di dekat prototipe.

Sistem kontrol juga mendukung operasi otomatis dan manual. Pada mode otomatis, pompa dikendalikan berdasarkan kondisi kelembapan tanah dan suhu, sedangkan LED *grow light* dikendalikan berdasarkan intensitas cahaya. Pada mode manual, pengguna dapat mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat melalui *dashboard*. Konsep ini konsisten dengan pengembangan *smart greenhouse* berbasis IoT yang menggunakan sensor lingkungan untuk menentukan tindakan aktuator (Berrios Gomez & Rivera Herrera, 2022; Huda et al., 2023). Hasil pengujian fungsional seluruh komponen disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian fungsional komponen sistem

Komponen	Metode pengujian	Hasil	Status
ESP32	Dinyalakan dan dihubungkan dengan program	Program dapat dijalankan	Berfungsi
DHT22	Membaca suhu dan kelembapan udara	Data suhu dan kelembapan tampil	Berfungsi

Komponen	Metode pengujian	Hasil	Status
Sensor kelembapan tanah	Diuji pada media kering dan basah	Nilai berubah sesuai kondisi	Berfungsi
BH1750	Diuji pada kondisi terang dan redup	Nilai intensitas cahaya berubah	Berfungsi
LDR	Diberi cahaya dari arah berbeda	Nilai berubah sesuai arah cahaya	Berfungsi
Relai 2 kanal	Menghidupkan lampu dan pompa	Relai aktif dan nonaktif	Berfungsi
Pompa air DC	Dihubungkan ke relai dan sumber 12 V	Air dapat dialirkan	Berfungsi
Sprayer dan selang	Diuji saat pompa menyala	Air tersebar ke area tanaman	Berfungsi
LED DC	Dihubungkan ke sistem 12 V	Lampu menyala	Berfungsi
Kipas DC	Dihubungkan ke sistem 12 V	Kipas berputar normal	Berfungsi
Panel surya	Diuji di bawah cahaya matahari	Menghasilkan tegangan	Berfungsi
Solar charge controller	Diuji saat panel mengisi baterai	Proses pengisian berjalan	Berfungsi
Baterai VRLA	Diuji sebagai sumber daya sistem	Menyuplai beban	Berfungsi
Servo MG996R	Diuji dengan program *tracker*	Bergerak sesuai perintah	Berfungsi
Dashboard dan LCD	Diuji menampilkan data sensor	Data dapat dipantau	Berfungsi

3.2 Kinerja Sistem Kontrol dan IoT

perubahan kondisi pengujian. Sensor DHT22 dapat menampilkan data suhu dan kelembapan, sensor kelembapan tanah menunjukkan perubahan nilai ketika media berubah dari kering ke basah, sedangkan BH1750 dan LDR merespons perubahan intensitas cahaya. Respons tersebut menjadi dasar bagi ESP32 untuk menjalankan logika kontrol. Penggunaan beberapa parameter lingkungan dalam satu sistem sejalan dengan penelitian *smart greenhouse* yang memantau suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, dan cahaya secara terpadu (Ristian et al., 2022). Berdasarkan pengujian fungsional, logika kontrol dapat dijalankan sesuai kondisi pemicu yang diprogram, yaitu kelembapan tanah kurang dari 40%, suhu udara melebihi 35 °C, dan indeks pencahayaan di bawah 80%, meskipun pencatatan nilai ambang pada setiap kondisi belum dilakukan secara sistematis dan terpisah untuk setiap skenario pengujian.

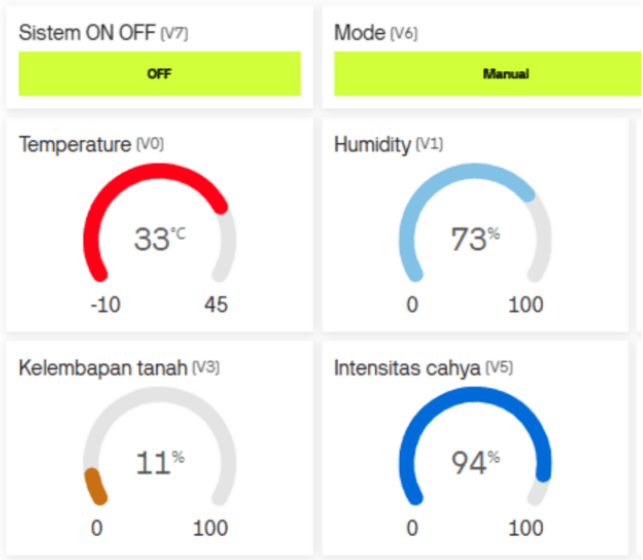
Contoh keluaran pemantauan yang tercatat pada 20 Mei 2026 disajikan pada Tabel 4. Suhu terbaca 29,1 °C pada pukul 15:05:54 dan 15:06:00, kemudian 28,7 °C mulai pukul 15:09:03 hingga 15:09:17. Nilai indeks pencahayaan yang tersimpan pada data pemantauan tercatat sebesar 100% pada seluruh data yang tersedia. Nilai tersebut berasal dari variabel pencahayaan *greenhouse* yang diperoleh melalui sistem berbasis BH1750 dan bukan merupakan pembacaan kedua LDR solar tracker. Nilai 100% yang berulang menunjukkan bahwa keluaran telah mencapai batas atas skala normalisasi yang digunakan dalam perangkat lunak. Oleh karena itu, data tersebut hanya menunjukkan keberfungsian proses akuisisi dan pencatatan data dan belum dapat digunakan untuk mengevaluasi variasi pencahayaan secara kuantitatif.

doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

Tabel 4. Contoh data pemantauan yang tercatat pada pengujian

Waktu	Suhu (°C)	Intensitas cahaya (%)
20-05-2026 15:05:54	29,1	100
20-05-2026 15:06:00	29,1	100
20-05-2026 15:09:03	28,7	100
20-05-2026 15:09:10	28,7	100
20-05-2026 15:09:17	28,7	100

Integrasi *Blynk* memberikan dua fungsi utama, yaitu pemantauan jarak jauh dan kendali manual. *Dashboard Blynk* menyediakan pemantauan data sensor serta kendali manual perangkat melalui virtual pin (Gambar 6), dan sistem menyediakan dua mode operasi, yaitu otomatis dan manual, sehingga pengguna dapat menyerahkan keputusan aktuasi kepada logika program atau memberikan perintah secara langsung melalui *dashboard*. Sistem dapat mengirim data melalui Wi-Fi dan menampilkan kondisi *greenhouse* pada smartphone. Hasil ini mendukung temuan penelitian sebelumnya bahwa aplikasi berbasis IoT dapat memudahkan pemantauan dan pengendalian *greenhouse* tanpa pengamatan langsung (Raihan & Firmawati, 2022; Shanto et al., 2023). Pada prototipe ini gangguan Wi-Fi baru dievaluasi secara observasional dan belum menggunakan metrik *Quality of Service* seperti *delay*, *packet loss*, atau *uptime*. Oleh karena itu, hasil hanya menunjukkan bahwa komunikasi IoT dapat berfungsi dan tidak digunakan untuk menyimpulkan reliabilitas jaringan secara kuantitatif. Berikut kendala dan tindakan koreksi yang dilakukan seperti pada Tabel 5.



Gambar 6. Tampilan *dashboard* Blynk pada smartphone, menampilkan status sistem ON/OFF, mode operasi, serta pembacaan suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya secara real-time.

Tabel 5. Kendala, dampak, tindakan koreksi, dan status hasil perbaikan

Kendala	Dampak	Tindakan koreksi	Status
Pembacaan DHT22 tidak stabil	Data suhu dan kelembapan berfluktuasi	Memeriksa sambungan dan menambah interval pembacaan	Pembacaan lebih stabil
Fluktuasi sensor analog	Nilai kelembapan tanah dan LDR berubah tanpa perubahan kondisi nyata	Konfigurasi ADC dan penguatan koneksi	Pembacaan lebih konsisten

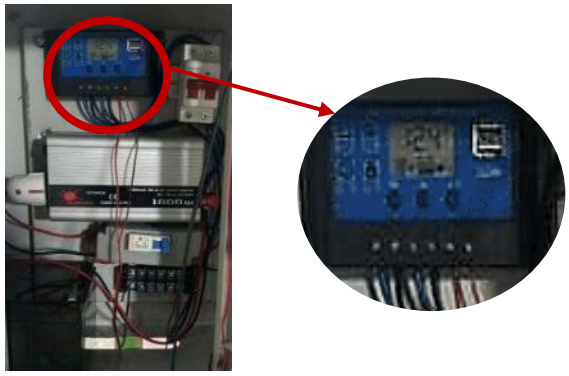
doi: 10.25047/nacia.v4i1.516

Kendala	Dampak	Tindakan koreksi	Status
Breadboard/kabel longgar	Pembacaan sensor terputus atau tidak konsisten	Penguatan sambungan dan pemindahan ke PCB	Koneksi lebih andal
Wi-Fi tidak stabil	Pengiriman data ke *dashboard Blynk* terganggu	Pemeriksaan jaringan dan konektivitas	Komunikasi tersambung kembali
Distribusi daya kurang stabil	Risiko gangguan kerja komponen akibat tegangan tidak sesuai	Pemeriksaan jalur dan penambahan proteksi/regulator	Sistem dapat beroperasi
Sambungan kabel energi kurang kuat	Berpotensi menyebabkan kabel terlepas atau kontak tidak stabil	Penyolderan dan penataan kabel	Sambungan lebih kuat
Orientasi panel kurang optimal	Penerimaan cahaya matahari oleh panel belum maksimal	Penyesuaian dudukan panel	Posisi panel lebih sesuai arah cahaya

Kendala tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan prototipe *Smart Greenhouse* ditentukan tidak hanya oleh pemilihan komponen, tetapi juga oleh kualitas integrasi perangkat keras, perangkat lunak, distribusi daya, dan struktur mekanik, sejalan dengan pendekatan integrasi sensor-aktuator pada penelitian *smart greenhouse* sebelumnya (Mellit et al., 2021; Ridwan Mas et al., 2022).

3.3 Uji Fungsional Sistem Energi Surya

Pengujian sistem energi dilakukan dengan menempatkan panel surya 100 Wp di bawah sinar matahari langsung, kemudian tegangan baterai diperiksa menggunakan multimeter serta dipantau melalui layar solar charge controller selama proses pengisian berlangsung. Pengukuran ini menunjukkan layar solar charge controller mencatat tegangan baterai pada kisaran 12,4–12,9 V saat pengujian dilakukan (Gambar 7), yang mengonfirmasi bahwa proses charging berlangsung sebagaimana dirancang dan memberikan titik data terukur di luar spesifikasi nominal komponen. Baterai VRLA 12 V 20 Ah memiliki kapasitas energi nominal sebesar 240 Wh. Dua LED grow light yang digunakan memiliki daya total 20–40 W sehingga, jika diasumsikan hanya lampu yang menjadi beban dan seluruh kapasitas nominal baterai dapat digunakan, waktu operasi teoritis berada pada rentang 6–12 jam. Nilai aktual diperkirakan lebih rendah karena baterai juga menyuplai ESP32, sensor, relay, pompa, kipas, dan servo, serta terdapat rugi-rugi pada sistem. Dengan panel 100 Wp, batas minimum teoritis waktu pengisian kapasitas 240 Wh adalah 2,4 jam pada kondisi ideal. Pengujian pada penelitian ini membuktikan bahwa proses pengisian baterai oleh panel surya berfungsi, tetapi belum mencakup pencatatan arus charging, state of charge, maupun efisiensi konversi secara berkelanjutan sepanjang waktu, sehingga nilai waktu operasi dan waktu pengisian di atas tidak dapat dianggap sebagai data charging aktual. Ringkasan hasil pengujian fungsional ketiga komponen sistem energi surya disajikan pada Tabel 6. Studi Putri et al. (2025) menunjukkan bahwa evaluasi kinerja pembangkitan tenaga surya memerlukan pengukuran kuantitatif tersendiri ketika sistem digunakan sebagai sumber energi *greenhouse*.



Gambar 7. Tampilan layar solar charge controller pada panel kontrol saat pengujian, menunjukkan pembacaan tegangan baterai pada kisaran 12,4–12,9 V.

Tabel 6. Ringkasan hasil pengujian fungsional komponen sistem energi surya (diringkas dari Tabel 3).

No	Komponen yang Diuji	Cara Pengujian	Hasil	Keterangan
1	Panel surya	Diuji di bawah cahaya matahari	Berfungsi	Panel menghasilkan tegangan
2	Solar charge controller	Diuji saat panel mengisi baterai	Berfungsi	Proses charging berjalan
3	Baterai VRLA	Diuji sebagai sumber daya sistem	Berfungsi	Baterai mampu menyuplai beban

3.4 Uji Fungsional Mekanisme Solar Tracker

Pengujian mekanisme solar tracker dilakukan dengan memberikan sumber cahaya secara bergantian dari sisi kiri dan sisi kanan panel, kemudian mengamati nilai ADC 12-bit (0–4095) pada kedua LDR beserta status pergerakan servo MG996R sebagai respons. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua LDR secara konsisten memberikan nilai ADC yang berbeda ketika sumber cahaya diberikan dari arah yang berbeda, dengan LDR yang menghadap langsung ke sumber cahaya selalu menghasilkan pembacaan lebih tinggi dibandingkan LDR pada sisi berlawanan. Sesuai dengan logika kontrol pada Persamaan 1, selisih pembacaan tersebut melampaui ambang *deadband* 5% sehingga ESP32 memerintahkan servo bergerak menuju sisi dengan pembacaan lebih tinggi, dan servo berhenti bergerak setelah orientasi panel mendekati arah sumber cahaya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme dasar pendeteksian arah cahaya dan penggerakan panel berfungsi sesuai rancangan. Nilai ADC dan selisih pembacaan pada setiap pengujian belum direkam sebagai deret data logging berkelanjutan, sehingga hasil pengujian ini bersifat verifikasi fungsional terhadap arah dan status pergerakan, bukan karakterisasi kuantitatif berkelanjutan terhadap kecepatan maupun akurasi tracking.

Pengujian ini terbatas pada verifikasi keberfungsian mekanisme *tracker*. Penelitian tidak melakukan pengukuran keluaran daya atau energi secara bersamaan pada panel *tracker* dan panel statis. Oleh karena itu, hasil penelitian ini tidak digunakan untuk menyimpulkan adanya peningkatan efisiensi, daya, maupun energi akibat penggunaan *solar tracker*.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem *solar tracking* berpotensi menghasilkan energi lebih tinggi dibandingkan panel statis (Fathoni et al., 2020; Koli et al., 2021; Septiawan et al., 2022). Namun, hasil tersebut tidak dapat secara langsung diasumsikan terjadi pada prototipe ini karena konfigurasi panel, aktuator, algoritma *tracking*, lokasi, *irradiance*, dan kondisi pengujian berbeda. Ringkasan hasil pengujian fungsional komponen mekanisme solar tracker disajikan pada Tabel 7. Pada penelitian ini, data hanya mendukung kesimpulan bahwa mekanisme *tracker* dapat mendeteksi arah cahaya dan menggerakkan

orientasi panel.

Tabel 7. Ringkasan hasil pengujian fungsional komponen mekanisme solar tracker (diringkas dari Tabel 3).

No	Komponen yang Diuji	Cara Pengujian	Hasil	Keterangan
1	LDR	Diuji dengan cahaya dari arah berbeda	Berfungsi	Nilai LDR berubah sesuai arah cahaya
2	Servo MG996R	Diuji dengan program tracker	Berfungsi	Servo bergerak sesuai perintah

3.5 Implikasi terhadap Teknologi Pertanian

Prototipe yang dikembangkan menunjukkan peluang penerapan teknologi tepat guna untuk mendukung pertanian cerdas pada skala kecil. Integrasi pemantauan *real-time*, penyiraman otomatis, pencahayaan tambahan, energi surya, dan *solar tracker* memungkinkan beberapa fungsi pengelolaan *greenhouse* dilakukan secara lebih terotomatisasi. Sistem juga dapat digunakan sebagai media pembelajaran karena proses pengembangannya mencakup desain mekanik, instalasi kelistrikan, pemrograman, komunikasi IoT, pengujian, dan *troubleshooting*.

Meskipun demikian, prototipe belum dapat digunakan sebagai dasar klaim peningkatan produktivitas tanaman atau penghematan air dan energi secara kuantitatif. Pengujian pertumbuhan tanaman, konsumsi air, produksi energi, efisiensi panel, kestabilan koneksi, dan keandalan sistem dalam operasi jangka panjang belum dilakukan. Batasan tersebut dinyatakan agar hasil kegiatan tidak melampaui data yang tersedia. Tahap berikutnya dapat diarahkan pada pengujian jangka panjang, pencatatan energi dan air, perbandingan *tracker* dengan panel statis, serta pengujian respons sistem terhadap kondisi lingkungan yang lebih beragam.

4. KESIMPULAN

Prototipe *Smart Greenhouse* berbasis Internet of Things berhasil dirancang dan diintegrasikan menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali, sensor DHT22, kelembapan tanah, dan BH1750 untuk pemantauan lingkungan, serta dua LDR dan servo MG996R sebagai mekanisme solar tracker. Uji fungsional menunjukkan seluruh sensor merespons perubahan kondisi pengujian, aktuator dapat dikendalikan secara otomatis maupun manual melalui LCD dan *dashboard* Blynk, rangkaian panel surya-solar charge controller-baterai mampu menyediakan dan mengisi daya, serta mekanisme solar tracker mampu mengubah orientasi panel berdasarkan perbedaan pembacaan LDR. Pengujian ini dibatasi pada validasi fungsi prototipe pada tingkat komponen dan integrasi, sehingga akurasi sensor, efisiensi energi, tracking error, peningkatan energi solar tracker terhadap panel statis, dan performa agronomis tanaman masih memerlukan penelitian lanjutan yang bersifat kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

Berrios Gomez, S., & Rivera Herrera, H. J. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. *Ingeniería Investiga, 4*, Artículo 624. https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.624

Fathoni, M., Haryudo, S. I., Kartini, U. T., & Agung, A. I. (2020). Optimasi penangkapan UV pada solar tracking single axis menggunakan metode backpropagation neural network. *Jurnal Teknik Elektro, 9*(3), 803–813. https://doi.org/10.26740/jte.v9n3.p803-813

Huda, C., Etikasari, B., & Puspitasari, P. S. D. (2023). A smart greenhouse production system utilizes

an IoT technology. *JUITA: Jurnal Informatika, 11*(1), 117–124. https://doi.org/10.30595/juita.v11i1.16191

Koli, V., Kokate, S., & Dagade, N. (2021). Single axis solar tracking system. *Journal of Science & Technology, 6*(Special Issue 1), 262–267. https://doi.org/10.46243/jst.2021.v6.i04.pp262-267

Mellit, A., Benghanem, M., Herrak, O., & Messalaoui, A. (2021). Design of a novel remote monitoring system for smart greenhouses using the Internet of Things and deep convolutional neural networks. *Energies, 14*(16), 5045. https://doi.org/10.3390/en14165045

Putri, R. E., Putri, I., Hasan, A., & Darajat, M. K. (2025). Design and performance testing of a solar power generation system (SPGS) for a smart greenhouse with tower hydroponic support. *International Journal of Energy Production and Management, 10*(2), 165–173. https://doi.org/10.18280/ijepm.100201

Raihan, A. A. R., & Firmawati, N. (2022). Rancang bangun prototype sistem smart greenhouse untuk sayur bayam (*Amaranthus hybridus* L.) berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Fisika Unand, 11*(4), 494–500. https://doi.org/10.25077/jfu.11.4.494-500.2022

Ridwan Mas, F. A., Suciyati, S. W., Pauzi, G. A., & Junaidi. (2022). Smart greenhouse on monitoring of soil temperature and humidity control of orchid plants using Internet of Things (IoT). *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology, 3*(3). https://doi.org/10.23960/jemit.v3i3.111

Ristian, U., Ruslianto, I., & Sari, K. (2022). Sistem monitoring smart greenhouse pada lahan terbatas berbasis Internet of Things (IoT). *JEPIN (Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika), 8*(1), 87–94. https://doi.org/10.26418/jp.v8i1.52770

Septiawan, Y. H., Alia, D., & Purnomo, H. (2022). Desain solar tracker pada solar cell berbasis Arduino. *Jurnal 7 Samudra, 7*(2), 17–26. https://doi.org/10.54992/7samudra.v7i2.121

Shanto, S. S., Rahman, M., Oasik, J. M., & Hamim, H. (2023). Smart greenhouse monitoring system using *Blynk* IoT app. *Journal of Engineering Research and Reports, 25*(2), 94–107. https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i2883

Yasa, I. W. S., Asna, I. M., & Sumartdiono, C. (2022). Rancang bangun rangkaian penggerak motor solar tracker. *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil dan Teknik Informasi, 5*(1), 65–71. https://doi.org/10.38043/telsinas.v5i1.3757