

Rancang Bangun Smart Greenhouse Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP32 dengan Monitoring dan Kontrol Otomatis

Adi Permana^{1*}, Fenty Ariani², Ari Mardiansyah³, Nurdianita⁴

^{1,3} Informatika, Universitas Bandar Lampung, Lampung, Indonesia

² Sistem Informasi, Universitas Bandar Lampung, Lampung, Indonesia

⁴ Ilmu Hukum, Universitas Bandar Lampung, Lampung, Indonesia

^{1*} adi.permana@ubl.ac.id, ² fenty.ariani@ubl.ac.id, ³ arimardiansyah66@gmail.com, ⁴ nurdianita02@gmail.com

ABSTRACT – Sustained supervision together with environmental regulation becomes an essential requirement within greenhouse operation to preserve optimum plant development. Delayed reactions toward fluctuations involving temperature, atmospheric humidity, soil moisture, and illumination commonly originate from manually executed observation activities. This work seeks the design together with construction of an Internet of Things based Smart Greenhouse prototype employing an ESP32 microcontroller capable of executing real-time environmental Monitoring alongside automatic actuator operation. Prototype development was adopted through requirement identification, architectural design, hardware software realization, verification procedures, and overall system assessment. Integrated implementation combined DHT22, soil moisture, and BH1750 sensors with relay modules, a cooling fan, and a water pump connected through Wi-Fi toward a web dashboard. Average temperature deviation reached 0.26°C, atmospheric humidity deviation averaged 1%, pump activation required 1.82 seconds, cooling fan activation required 1.2 seconds, transmission latency averaged 0.82 seconds, while every functional scenario achieved 100% operational success. Altogether, the developed platform enables automatic real-time greenhouse Monitoring together with environmental regulation, improving management effectiveness while reducing reliance upon manual supervisory activities.

Keywords: Automation, ESP32, Internet of Things, Monitoring System, Smart Greenhouse.

ABSTRAK – Keberlangsungan pengelolaan greenhouse menuntut pemantauan berkesinambungan disertai pengaturan kondisi lingkungan demi mempertahankan pertumbuhan tanaman pada keadaan optimum. Keterlambatan merespons perubahan suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, serta intensitas cahaya kerap muncul akibat aktivitas pemantauan yang masih dikerjakan manual. Riset ini memiliki objektif merancang sekaligus membangun prototype Smart Greenhouse berbasis Internet of Things memakai mikrokontroler ESP32 yang sanggup menjalankan Monitoring lingkungan secara real-time beserta pengoperasian aktuator otomatis. Pendekatan Prototype diterapkan melalui identifikasi kebutuhan, penyusunan rancangan sistem, realisasi perangkat keras maupun perangkat lunak, verifikasi, lalu penilaian menyeluruh sistem. Implementasi mengombinasikan sensor DHT22, soil moisture, BH1750, modul relay, pompa air, serta kipas pendingin yang terhubung menuju dashboard berbasis web menggunakan jaringan Wi-Fi. Rerata galat suhu mencapai 0,26°C, galat kelembapan udara mencapai 1%, respons pompa memerlukan 1,82 detik, respons kipas berlangsung 1,2 detik, keterlambatan pengiriman data menuju dashboard mencapai 0,82 detik, sedangkan seluruh skenario fungsional memperoleh keberhasilan 100%. Keseluruhan capaian tersebut menegaskan kemampuan sistem dalam mendukung Monitoring serta pengendalian lingkungan greenhouse secara otomatis dan real-time sehingga efisiensi pengelolaan meningkat sementara ketergantungan terhadap pemantauan manual berkurang.

Kata Kunci: ESP32, Internet of Things, Monitoring, Otomasi, Smart Greenhouse.

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian modern di wilayah tropis menghadapi tantangan yang sangat signifikan akibat ketidakstabilan iklim global dan fluktuasi cuaca ekstrem [1]. Greenhouse atau rumah tanaman menjadi solusi struktural yang sangat diandalkan untuk melindungi tanaman hortikultura dari paparan lingkungan

luar yang tidak menguntungkan [2]. Namun, greenhouse konvensional sering kali mengalami fenomena perangkap panas (heat trap effect), di mana akumulasi radiasi matahari menyebabkan lonjakan suhu ekstrem di dalam ruangan [1]. Tanpa adanya intervensi pengelolaan lingkungan yang dinamis, kondisi tersebut dapat menyebabkan stres fisiologis pada tanaman, peningkatan



laju transpirasi, penguapan kelembapan tanah yang tidak terkendali, dan penurunan kualitas serta kuantitas hasil panen secara drastis.

Pada sistem greenhouse tradisional, proses pemantauan dan pengendalian lingkungan masih bergantung sepenuhnya pada operator manusia secara manual [2]. Keterbatasan pengawasan berkala ini menyebabkan keterlambatan respons dalam mengantisipasi perubahan iklim mikro. Sebagai contoh, kipas pendingin terlambat dinyalakan saat suhu ruangan mulai melampaui batas kritis, atau pompa air terlambat diaktifkan ketika kelembapan tanah telah menurun drastis di bawah titik layu tanaman [3]. Keterlambatan respons tersebut secara langsung berdampak buruk pada pertumbuhan vegetatif maupun generatif tanaman. Oleh karena itu, diperlukan sebuah teknologi terintegrasi yang mampu melakukan monitoring parameter lingkungan sekaligus mengendalikan aktuator secara otomatis dan real-time.

Transformasi pengelolaan greenhouse konvensional menuju smart agriculture memperoleh kesempatan luas melalui perkembangan Internet of Things (IoT) [4]. Berbagai publikasi ilmiah nasional bertema sistem cerdas telah mengulas implementasi IoT guna mendorong efisiensi operasional dari beragam sudut pembahasan. Contohnya meliputi penerapan pemantauan temperatur berbasis IoT pada inkubator penetasan telur maupun mitigasi banjir memakai sensor ultrasonik. Adaptasi arsitektur sepadan menuju greenhouse dapat direalisasikan memakai ESP32 yang menawarkan biaya ekonomis disertai kemampuan komputasi tinggi [1]. Prosesor dual-core bersama konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth bawaan menjadikan ESP32 andal mengelola masukan banyak sensor sekaligus meneruskan informasi menuju cloud platform secara langsung.

Implementasi Internet of Things (IoT) pada Smart Greenhouse telah banyak diterapkan melalui beragam karya ilmiah guna mendukung Monitoring serta pengaturan lingkungan berlangsung otomatis. Simangunsong dkk. [1] memanfaatkan logika fuzzy sebagai mekanisme pengendalian greenhouse, sedangkan Perman dkk. [2] bersama RABIT [3] merealisasikan Smart Greenhouse berbasis IoT untuk menunjang pertumbuhan tanaman otomatis. Kendati demikian, sebagian besar karya tersebut lebih menitikberatkan mekanisme kontrol tertentu ataupun penerapan sistem pada kondisi lingkungan khusus. Evaluasi terukur mencakup ketepatan sensor, kecepatan respons aktuator, keberhasilan komunikasi data, serta integrasi Monitoring real-time menggunakan ESP32 pada prototype Smart Greenhouse sederhana berbiaya rendah masih relatif terbatas. Oleh sebab itu diperlukan riset yang bukan sekadar membangun sistem Monitoring beserta kontrol otomatis, melainkan pula mengkaji performa fungsional melalui verifikasi sensor, aktuator, serta komunikasi data secara terpadu.

Kebaruan riset ini berada pada pengembangan prototype Smart Greenhouse berbasis Internet of Things menggunakan ESP32 yang memadukan sensor suhu dan kelembapan udara DHT22, sensor kelembapan tanah soil

moisture, serta sensor intensitas cahaya BH1750 bersama mekanisme Monitoring real-time dan kontrol otomatis berbasis threshold. Selain merealisasikan sistem, riset ini turut mengevaluasi ketepatan sensor, kecepatan respons aktuator, keterlambatan komunikasi data, beserta keberhasilan fungsional sistem secara utuh sehingga gambaran performa implementasi Smart Greenhouse berbasis Internet of Things pada skala prototype dapat diperoleh. Fokus utama diarahkan kepada perancangan, implementasi, serta verifikasi performa prototype Smart Greenhouse otomatis berbasis ESP32. Lingkup pembahasan tidak mencakup pembangunan greenhouse berskala besar, komoditas tanaman, ataupun kajian biologis tanah, melainkan menitikberatkan keandalan sistem elektronik, ketepatan sensor, kecepatan kontrol otomatis, beserta kestabilan transmisi data Internet of Things. Integrasi DHT22, soil moisture, BH1750 dengan aktuator kipas pendingin serta pompa air melalui modul relay diharapkan mampu mengurangi ketergantungan operator, mengoptimalkan efisiensi air maupun energi, serta mempertahankan stabilitas iklim mikro greenhouse secara konsisten.

2. DASAR TEORI

A. INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM PERTANIAN PRESISI

Internet of Things (IoT) dipahami sebagai jaringan yang menghubungkan berbagai perangkat fisik dengan akses internet sehingga pertukaran informasi, pemrosesan jarak jauh, serta Automation fungsi control dapat berlangsung secara terpadu [5]. Pada ranah pertanian presisi, keberadaan IoT menempati fungsi infrastruktur untuk memantau parameter ekologis berskala mikro secara periodik. Seluruh informasi yang ditangkap sensor lapangan diteruskan menuju cloud server agar divisualisasikan melalui dashboard interaktif. Berkat integrasi Internet of Things, kondisi tanaman dapat diawasi kapan pun serta dari lokasi mana pun tanpa kehadiran langsung di greenhouse, disertai penerimaan notifikasi dini ketika anomali lingkungan terdeteksi.

B. MIKROKONTROLER ESP32

Sebagai mikrokontroler 32-bit, ESP32 diproduksi oleh Espressif Systems dengan pembekalan prosesor Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 serta memori SRAM internal berkapasitas 520 KB. Dukungan Wi-Fi 802.11 b/g/n bersama Bluetooth v4.2 telah tersedia langsung pada board sehingga komunikasi data terlaksana tanpa penambahan modul eksternal. Berlimpahnya pin GPIO (General Purpose Input Output), dukungan antarmuka I2C, SPI, UART, beserta konverter analog-ke-digital (ADC), menjadikan ESP32 memadai dalam menerima sinyal berbagai sensor lingkungan secara paralel [6].

C. SENSOR DHT22, SOIL MOISTURE, DAN BH1750/LDR

Sensor digital DHT22 dimanfaatkan untuk memperoleh informasi suhu udara beserta kelembapan

relatif (RH) [7]. Dibandingkan pendahulunya, yakni DHT11, perangkat tersebut menyediakan cakupan pengukuran lebih luas meliputi suhu minus 40 derajat celcius hingga 80 derajat celcius dan kelembapan 0% sampai 100%, disertai ketelitian pembacaan yang lebih tinggi. Sementara itu, sensor soil moisture kapasitif difungsikan mendeteksi kandungan air dalam media tanah. Dibandingkan sensor resistif konvensional, rancangan kapasitif lebih dipilih karena elektroda tidak mudah mengalami korosi akibat elektrolisis tanah sehingga konsistensi pembacaan jangka panjang tetap terpelihara [8].

Dibandingkan sensor resistif FC-28, sensor kapasitif memperlihatkan performa lebih unggul melalui nilai kesalahan paling rendah, yakni MAE 6,4% serta MAPE 7%, sementara FC-28 memiliki kestabilan lebih rendah [9]. Pengindraan intensitas cahaya matahari dapat memanfaatkan BH1750 ataupun LDR (Light Dependent Resistor). Keluaran digital berbentuk satuan Lux melalui komunikasi I2C dihasilkan BH1750 [4], [10], sedangkan perubahan resistansi akibat fluktuasi cahaya direpresentasikan LDR menjadi tegangan analog. Sebagai ambient light sensor beresolusi 16-bit, BH1750 mendukung rentang pembacaan mulai 1 hingga 65535 lux [11].

D. RELAI DAN AKTUATOR PENGENDALI

Sebagai sakelar elektromagnetik, relay bertugas memisahkan rangkaian kontrol bertegangan rendah 3.3V atau 5V DC pada mikrokontroler dari rangkaian beban berdaya tinggi 12V DC hingga 220V AC milik aktuator [12]. Demi mencegah interferensi elektromagnetik atau electromagnetic interference (EMI) akibat lonjakan arus balik motor induktif seperti pompa air maupun kipas pendingin, pemanfaatan relay opto-isolated memiliki arti sangat penting [13]. Pada sistem ini, pompa air DC menjalankan penyiraman otomatis, sedangkan kipas DC menangani sirkulasi udara beserta pendinginan termal. Kelengkapan greenhouse mencakup pompa air, kipas angin, dan irigasi otomatis yang beroperasi mengikuti informasi berasal dari sensor-sensor [14].

E. SMART GREENHOUSE

Smart Greenhouse merepresentasikan penerapan sensor, aktuator, mikrokontroler, beserta Internet of Things (IoT) guna mewujudkan Monitoring dan pengaturan lingkungan secara otomatis agar kondisi tumbuh tanaman senantiasa berada pada taraf optimum [15]. Seluruh informasi lingkungan terlebih dahulu dihimpun sensor, selanjutnya diproses mikrokontroler guna menetapkan tindakan sesuai aturan yang telah ditentukan. Saat parameter melampaui ataupun berada di bawah batas yang ditetapkan, aktuator berupa pompa air, kipas pendingin, maupun sistem pencahayaan akan beroperasi otomatis. Melalui mekanisme tersebut, efisiensi pemanfaatan air meningkat, ketergantungan terhadap pemantauan manual berkurang, serta kestabilan lingkungan budidaya mampu dipertahankan secara berkesinambungan.

F. MONITORING REAL-TIME

Monitoring real-time dimaknai sebagai aktivitas mengawasi keadaan sistem tepat ketika informasi dihasilkan. Pada lingkungan Internet of Things, data keluaran sensor diteruskan melalui jaringan internet menuju server ataupun dashboard Monitoring agar dapat ditampilkan kepada pengguna dengan jeda yang sangat kecil. Implementasi Monitoring real-time pada Smart Greenhouse memungkinkan perubahan kondisi lingkungan diketahui secara cepat beserta tingkat ketelitian memadai. Informasi mengenai suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, hingga intensitas cahaya dapat diakses dari lokasi berbeda menggunakan komputer ataupun smartphone [16]. Kehadiran mekanisme tersebut menjadikan proses pengawasan lebih efektif sekaligus menyediakan informasi yang dibutuhkan guna mendukung penetapan keputusan.

G. SISTEM KONTROL BERBASIS AMBANG BATAS (THRESHOLD-BASED CONTROL)

Threshold-based control merupakan teknik pengendalian sederhana yang mengoperasikan aktuator melalui perbandingan nilai sensor terhadap batas minimum maupun maksimum yang telah ditentukan [1]. Dalam sistem ini, ESP32 melakukan pencocokan setiap pembacaan sensor dengan nilai ambang yang sudah ditetapkan sebelumnya. Ketika suhu udara melampaui batas maksimum, kipas pendingin segera diaktifkan otomatis. Sebaliknya, apabila kelembapan tanah turun melewati batas minimum, pompa air akan bekerja melaksanakan penyiraman. Setelah seluruh parameter kembali berada pada kisaran normal, seluruh aktuator dinonaktifkan secara otomatis. Pendekatan tersebut memungkinkan respons lingkungan berlangsung cepat sekaligus efisien.

H. DASHBOARD MONITORING BERBASIS WEB

Dashboard berbasis web dimanfaatkan sebagai media visualisasi informasi sensor beserta kondisi aktuator sehingga greenhouse tetap dapat dipantau dari lokasi berbeda melalui jaringan internet [17]. Melalui antarmuka tersebut, pengguna memperoleh akses terhadap informasi suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, intensitas cahaya, disertai status pompa maupun kipas secara real-time. Selain menghadirkan kemudahan Monitoring, dashboard turut memfasilitasi evaluasi kondisi greenhouse sekaligus performa sistem otomatis yang sedang dioperasikan.

I. SISTEM OTOMASI PERTANIAN (SMART AGRICULTURE)

Smart Agriculture merupakan konsep pertanian modern yang mengombinasikan Internet of Things, sensor, komunikasi data, serta kecerdasan buatan demi mengoptimalkan produktivitas, efisiensi SDM, dan mutu keluaran sektor pertanian [18]. Implementasinya pada greenhouse diarahkan untuk membentuk lingkungan tumbuh yang lebih stabil sehingga perkembangan

tanaman berlangsung optimum. Melalui keterpaduan sensor bersama aktuator, pemakaian air, energi, serta tenaga kerja dapat dimaksimalkan sehingga pengeluaran operasional menjadi lebih efisien. Di samping itu, Automation sistem turut menekan potensi kekeliruan yang bersumber dari campur tangan manusia selama Monitoring maupun pengendalian lingkungan.

3. METODOLOGI

A. Alur dan Arsitektur Sistem

Sistem operasional *prototype* ini bekerja dalam satu siklus tertutup (*closed-loop system*). Proses dimulai dari pembacaan kondisi fisik lingkungan secara real-time oleh tiga sensor utama, yaitu DHT22, *Soil Moisture*, dan BH1750/LDR. Data analog dan digital dari sensor dikirimkan ke pin GPIO ESP32. ESP32 bertindak sebagai unit pemrosesan pusat yang mengolah data tersebut dan membandingkannya dengan nilai ambang batas (*threshold*) yang telah diprogram di dalam memori mikrokontroler.

Arsitektur sistem terdiri atas empat bagian utama yaitu:

a. Subsistem Akuisisi Data

Berfungsi mengumpulkan data lingkungan menggunakan :

- Sensor DHT22
- Sensor Soil Moisture
- Sensor BH1750

b. Subsistem Pemrosesan

Menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama untuk membaca data sensor dan menjalankan logika kontrol otomatis

c. Subsistem Aktuator

Menggunakan:

- Pompa air
- Kipas

d. Relay Subsistem Monitoring

Menampilkan data sensor dan status aktuator pada dashboard berbasis web.

Seluruh informasi yang berasal dari sensor suhu dan kelembapan udara DHT22, sensor kelembapan tanah Soil Moisture Sensor, beserta sensor intensitas cahaya BH1750/LDR terlebih dahulu diterima oleh ESP32 untuk diproses. Sesudah itu, setiap data dicocokkan terhadap nilai threshold yang telah dikonfigurasi pada sistem. Ketika parameter lingkungan berada di luar

rentang ketetapan tersebut, sinyal kendali diteruskan ESP32 menuju modul relay agar aktuator terkait, yakni pompa air ataupun kipas, diaktifkan maupun dihentikan. Selain menjalankan fungsi Automation, ESP32 turut mengirimkan informasi sensor beserta status aktuator melalui jaringan Wi-Fi menuju dashboard Monitoring sehingga kondisi greenhouse dapat diamati secara real-time.

Alur kerja sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 1

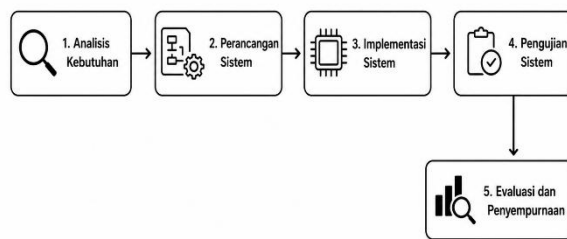
Tabel 1. Alur kerja sistem

Tahapan	Proses	Komponen	Output
1. Akuisisi Data	Proses akuisisi mencakup suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, beserta intensitas cahaya yang berasal dari lingkungan greenhouse.	DHT22, Soil Moisture Sensor, BH1750 /LDR	Data sensor lingkungan
2. Pemrosesan Data	Informasi keluaran sensor diproses sekaligus dikonversi menjadi nilai yang layak dimanfaatkan untuk kebutuhan Monitoring serta penetapan keputusan.	ESP32	Nilai suhu (°C), kelembapan udara (%), kelembapan tanah (%), dan intensitas cahaya (Lux)
3. Pengambilan Keputusan	Pencocokan dilaksanakan antara data pembacaan sensor dengan nilai threshold yang sebelumnya telah ditentukan.	Firmware ESP32	Status kondisi lingkungan dan perintah kontrol
4. Pengendalian Aktuator	Mengaktifkan atau nonaktifkan aktuator berdasarkan hasil keputusan sistem.	Relay, Pompa Air, Kipas	Kondisi lingkungan lebih terkontrol
5. Monitoring IoT	Secara berkala, informasi sensor bersama status aktuator diteruskan menuju dashboard melalui jaringan internet.	Wi-Fi ESP32, Dashboard Monitoring	Informasi kondisi greenhouse secara real-time

B. Metodologi Pengembangan Prototype

Rancangan pengembangan pada karya ilmiah ini mengadopsi pendekatan Prototype. Pemilihan pendekatan tersebut didasarkan pada kemampuannya memfasilitasi penyempurnaan sistem secara bertahap melalui penyusunan rancangan, realisasi, evaluasi, serta revisi berulang hingga terbentuk sistem yang memenuhi kebutuhan pengguna. Rangkaian tahapan mencakup:

Diagram Alur Tahapan Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alur Tahapan Penelitian

1. Analisis Kebutuhan

Fase awal diarahkan untuk mengenali seluruh kebutuhan Smart Greenhouse, meliputi parameter lingkungan yang akan diamati, spesifikasi perangkat keras, spesifikasi perangkat lunak, beserta mekanisme Monitoring dan Automation yang hendak diterapkan.

2. Perancangan Sistem

Pada fase ini disusun arsitektur sistem, diagram aliran proses, skema rangkaian elektronik, penetapan sensor beserta aktuator yang dipakai, sekaligus rancangan dashboard Monitoring.

3. Implementasi Sistem

Realisasi sistem diawali melalui perakitan perangkat keras yang melibatkan ESP32, sensor DHT22, sensor soil moisture, sensor BH1750, relay, pompa air, serta kipas. Bersamaan dengan itu, perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE guna merealisasikan logika Monitoring dan Automation secara terpadu.

4. Pengujian Sistem

Tahap verifikasi bertujuan memastikan seluruh fungsi sistem beroperasi selaras dengan rancangan yang telah ditetapkan. Cakupan verifikasi meliputi ketepatan sensor, kecepatan respons aktuator, keterlambatan komunikasi data, serta performa fungsional sistem secara menyeluruh.

5. Evaluasi dan Penyempurnaan

Tahapan peninjauan diarahkan pada penelaahan keluaran verifikasi guna mengenali kelemahan sistem, sekaligus menyempurnakan perangkat keras maupun perangkat lunak agar performa operasional mencapai kondisi lebih optimal.

C. Analisis Kebutuhan Sistem

Berdasarkan hasil observasi terhadap kebutuhan greenhouse skala kecil, diperoleh beberapa kebutuhan utama yaitu:

- Monitoring suhu udara.
- Monitoring kelembapan udara.
- Monitoring kelembapan tanah.
- Monitoring intensitas cahaya.
- Penyiraman otomatis.
- Pendinginan otomatis.
- Monitoring jarak jauh melalui dashboard.

D. Variabel Penelitian dan Parameter Ambang Batas

Perancangan eksperimen memisahkan faktor pemicu dari faktor keluaran sehingga performa Automation dapat diukur secara presisi. Faktor pemicu mencakup suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, beserta intensitas cahaya. Faktor keluaran meliputi status pompa air ON atau OFF, status kipas pendingin ON atau OFF, keberhasilan transmisi data Monitoring Berhasil atau Gagal, durasi respons sistem dalam detik, serta persentase keberhasilan Automation. Logika kendali direalisasikan melalui fungsi kondisi bersyarat pada ESP32. Penetapan nilai threshold disesuaikan dengan kebutuhan umum lingkungan tumbuh tanaman hortikultura tropis. Rincian threshold pengendalian aktuator tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2. Ambang batas kontrol aktuator

Kondisi	Nilai Parameter	Kondisi Logika	Aksi Aktuator
Suhu Udara Tinggi	>32°C	Suhu > Threshold _Suhu	Kipas Pendingin ON
Suhu Udara Normal	>32°C	Suhu <= Threshold _Suhu	Kipas Pendingin OFF
Tanah Kering	<40%	Kelembapan_Tanah < Threshold _Tanah	Pompa Air ON

Tanah Basah / Cukup	$\geq 40\%$	Kelembapan Tanah $\geq$ Threshold Tanah	Pompa Air OFF
---------------------	-------------	---	---------------

E. Teknik Pengujian dan Analisis Data

Evaluasi terhadap prototype Smart Greenhouse yang telah direalisasikan dilaksanakan guna menilai performa keseluruhan sistem. Ruang lingkup evaluasi mencakup empat komponen utama, yakni ketepatan sensor, durasi respons aktuator, keterlambatan komunikasi data, beserta performa fungsional sistem.

Verifikasi ketepatan sensor DHT22 dilaksanakan melalui perbandingan keluaran pembacaan sensor terhadap thermo-hygrometer digital sebagai perangkat acuan. Nilai galat ditentukan menggunakan selisih antara pembacaan sensor dengan pembacaan perangkat referensi.

Pengujian sensor soil moisture dilakukan dengan mengamati kemampuan sensor dalam membedakan kondisi tanah basah, lembap, dan kering berdasarkan nilai keluaran sensor.

Durasi aktivasi pompa air maupun kipas diukur sejak nilai sensor melampaui threshold yang telah ditetapkan guna memperoleh waktu respons setiap aktuator.

Rentang waktu sejak informasi dikirimkan oleh ESP32 hingga diterima kemudian ditampilkan pada dashboard Monitoring diukur untuk memperoleh nilai keterlambatan komunikasi data.

Verifikasi fungsional memanfaatkan pendekatan black-box testing guna memastikan setiap fungsi sistem memenuhi kebutuhan operasional. Persentase keberhasilan sistem ditentukan memakai persamaan berikut.

Persentase Keberhasilan = (Total Skenario Sukses dibagi Total Skenario Verifikasi) dikalikan 100%.

Seluruh data keluaran verifikasi selanjutnya diolah melalui pendekatan pemaparan kuantitatif dengan menghitung rerata galat sensor, rerata durasi respons aktuator, rerata keterlambatan komunikasi data, beserta persentase keberhasilan sistem guna mengevaluasi performa prototype Smart Greenhouse yang telah direalisasikan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototype Smart Greenhouse berhasil direalisasikan dengan memanfaatkan ESP32 sebagai pusat kendali utama. Sensor DHT22 berfungsi memperoleh informasi suhu beserta kelembapan udara, sensor soil moisture dimanfaatkan mendeteksi kelembapan tanah, sementara sensor BH1750 bertugas mengukur intensitas cahaya. Seluruh informasi sensor diteruskan menuju dashboard Monitoring melalui

jaringan Wi-Fi lalu ditampilkan secara real-time. Sistem turut dilengkapi pompa air serta kipas yang beroperasi otomatis mengikuti kondisi lingkungan yang teridentifikasi.

4.1 Pengujian Akurasi Sensor DHT22

Proses verifikasi dilaksanakan melalui perbandingan pembacaan sensor DHT22 terhadap thermo-hygrometer digital yang difungsikan sebagai instrumen acuan.

Tabel 3. Pengujian Suhu

Pengujian	DHT22 (°C)	Referensi (°C)	Error
1	28.5	28.0	0.5
2	29.1	29.0	0.1
3	30.2	30.0	0.2
4	31.4	31.0	0.4
5	32.1	32.0	0.1

Rata-rata Error:

$$(0.5 + 0.1 + 0.2 + 0.4 + 0.1) / 5 = 0.26^{\circ}\text{C}$$

Tabel 4 Pengujian Kelembapan Udara

Pengujian	DHT22 (%)	Referensi (%)	Error
1	70	69	1
2	72	71	1
3	74	73	1
4	75	74	1
5	76	75	1

Rata-rata Error:

1%

Analisis

Merujuk pada keluaran verifikasi, rerata galat temperatur yang dicapai sensor DHT22 berada pada angka 0,26°C, sedangkan galat kelembapan udara mencapai 1%, sehingga pemanfaatannya masih memadai bagi kebutuhan Monitoring lingkungan greenhouse.

Kemampuan sensor DHT22 dalam menyediakan ketelitian yang memadai untuk kebutuhan Monitoring lingkungan greenhouse tercermin melalui rerata galat temperatur 0,26°C beserta galat kelembapan udara 1%. Nilai tersebut masih berada pada kisaran toleransi yang dapat diterima bagi implementasi Internet of Things. Temuan tersebut selaras dengan riset terdahulu yang menyatakan bahwa DHT22 mempunyai ketepatan memadai dalam pengukuran temperatur serta kelembapan pada lingkungan pertanian maupun greenhouse. Rendahnya tingkat galat menjadikan sensor DHT22 layak dimanfaatkan sebagai sumber informasi utama dalam mekanisme penetapan keputusan otomatis pada Smart Greenhouse.

4.2 Pengujian Sensor Soil Moisture

Pelaksanaan verifikasi mencakup tiga kondisi kelembapan tanah yang saling berbeda.

Tabel 5. Pengujian Soil Moisture

Kondisi Tanah	Nilai Sensor (%)
Basah	82
Lembap	63
Kering	28

Analisis

Sensor mampu mengidentifikasi perbedaan kondisi tanah secara tepat sehingga layak dijadikan landasan penetapan keputusan penyiraman otomatis.

Kemampuan sensor membedakan tanah berkondisi basah, lembap, maupun kering membuktikan kelayakannya sebagai acuan Automation penyiraman. Temuan tersebut selaras dengan riset terdahulu yang menjelaskan bahwa sensor kelembapan tanah memegang peranan penting dalam mempertahankan ketersediaan air bagi tanaman sekaligus mengoptimalkan efisiensi pemanfaatan air pada Smart Agriculture. Ketersediaan informasi kelembapan tanah secara real-time memungkinkan sistem menekan potensi kekurangan maupun kelebihan penyiraman.

4.3 Pengujian Waktu Respon Aktuator

Penentuan durasi aktivasi aktuator dilaksanakan melalui pengukuran waktu sejak parameter sensor melampaui nilai threshold hingga perangkat mulai beroperasi.

Tabel 6. Pengujian Pompa Air

Pengujian	Waktu Respon (detik)
1	1.8
2	1.9
3	1.7
4	1.8
5	1.9

Rata-rata:
1.82 detik

Tabel 7. Pengujian Kipas

Pengujian	Waktu Respon (detik)
1	1.2
2	1.3
3	1.1
4	1.2
5	1.2

Rata-rata:
1.2 detik

Analisis

Kipas memiliki waktu respon lebih cepat dibandingkan pompa air karena tidak memerlukan proses mekanis tambahan seperti pengaliran air.

Durasi respons pompa air yang mencapai rerata 1,82 detik serta kipas yang mencapai rerata 1,2 detik mencerminkan kemampuan sistem dalam merespons perubahan kondisi lingkungan secara cepat. Perbedaan waktu aktivasi kedua aktuator dipicu karakteristik mekanis masing-masing perangkat. Singkatnya durasi respons tersebut mengindikasikan keterpaduan sensor, ESP32, relay, beserta aktuator telah berlangsung secara optimal. Kondisi demikian memiliki peranan penting dalam mempertahankan kestabilan lingkungan greenhouse sehingga perubahan parameter dapat segera ditangani melalui mekanisme Automation.

4.4 Pengujian Delay Monitoring IoT

Pengujian dilakukan dengan mengukur waktu pengiriman data dari ESP32 menuju dashboard monitoring.

Tabel 8. Pengujian Delay

Pengujian	Delay (detik)
1	0.8
2	0.9
3	0.7
4	0.8
5	0.9

Rata-rata Delay:
0.82 detik

Analisis

Rerata keterlambatan komunikasi yang mencapai 0,82 detik mengindikasikan kemampuan sistem menjalankan Monitoring real-time karena informasi telah diterima dashboard dalam durasi kurang dari satu detik.

Nilai rerata keterlambatan komunikasi 0,82 detik memperlihatkan kemampuan sistem meneruskan informasi sensor menuju dashboard Monitoring dalam rentang waktu yang sangat singkat. Temuan tersebut menguatkan bahwa pemanfaatan ESP32 dengan konektivitas Wi-Fi mendukung implementasi Monitoring real-time pada greenhouse. Rendahnya latensi memungkinkan pengguna memperoleh kondisi lingkungan secara cepat sehingga aktivitas pengawasan berlangsung lebih efektif dibandingkan pendekatan pemantauan manual.

4.5 Pengujian Fungsional Sistem

Tabel 9. Pengujian Fungsional

No	Skenario	Hasil
1	Monitoring suhu	Berhasil
2	Monitoring kelembapan udara	Berhasil
3	Monitoring kelembapan tanah	Berhasil
4	Monitoring intensitas cahaya	Berhasil
5	Pompa otomatis	Berhasil
6	Kipas otomatis	Berhasil
7	Dashboard real-time	Berhasil

Persentase keberhasilan:

$$\frac{\text{Jumlah berhasil}}{\text{Jumlah skenario}} \times 100\%$$

$$\frac{7}{7} \times 100\% = 100\%$$

4.6 Pengujian Fungsional Sistem

Merujuk pada keseluruhan rangkaian verifikasi, prototype Smart Greenhouse berbasis Internet of Things yang direalisasikan mampu mengoperasikan fungsi Monitoring beserta pengendalian lingkungan secara otomatis selaras dengan rancangan sistem. Sensor DHT22 memperlihatkan ketelitian memadai melalui rerata galat temperatur 0,26°C disertai galat kelembapan udara 1%, sementara sensor soil moisture sanggup mengidentifikasi perbedaan kelembapan tanah secara tepat sehingga layak dijadikan acuan penetapan penyiraman otomatis.

Ditinjau dari mekanisme pengendalian, pompa air beserta kipas dapat dioperasikan otomatis oleh sistem dengan durasi respons yang tergolong singkat. Di samping itu, komunikasi informasi antara ESP32 dan dashboard Monitoring memperlihatkan performa memadai melalui rerata keterlambatan 0,82 detik. Perolehan tersebut menegaskan kemampuan sistem dalam mendukung Monitoring lingkungan greenhouse secara real-time.

Apabila disejajarkan dengan greenhouse konvensional yang masih bertumpu pada observasi manual, platform yang direalisasikan sanggup mengoptimalkan efisiensi pemantauan kondisi lingkungan sekaligus mempercepat penetapan keputusan. Keterpaduan sensor, aktuator, serta Internet of Things dalam satu kesatuan memungkinkan Monitoring beserta pengendalian berlangsung otomatis tanpa keterlibatan pengguna secara berkesinambungan. Atas dasar itu, sistem ini memiliki peluang diterapkan pada greenhouse berskala kecil maupun dimanfaatkan sebagai fondasi pengembangan Smart Greenhouse pada riset berikutnya.

5. KESIMPULAN

Merujuk pada keseluruhan rangkaian riset yang telah diselesaikan, dapat ditegaskan bahwa prototype Smart Greenhouse berbasis Internet of Things dengan memanfaatkan ESP32 berhasil direalisasikan untuk menjalankan Monitoring sekaligus pengendalian lingkungan greenhouse secara otomatis dan real-time. Sistem sanggup mengamati suhu udara, kelembapan udara, kelembapan tanah, beserta intensitas cahaya, disertai pengoperasian pompa air dan kipas secara otomatis mengikuti nilai threshold yang telah ditetapkan.

Perolehan verifikasi mengindikasikan bahwa sistem memiliki ketelitian beserta performa operasional yang memadai, tercermin melalui rerata galat temperatur 0,26°C, galat kelembapan udara 1%, rerata respons pompa air 1,82 detik, respons kipas 1,2 detik, serta rerata keterlambatan komunikasi data 0,82 detik. Di samping itu, seluruh skenario verifikasi

fungsional terselesaikan dengan persentase keberhasilan mencapai 100%.

Kontribusi utama riset ini diwujudkan melalui terealisasinya prototype Smart Greenhouse berbasis Internet of Things yang memadukan fungsi Monitoring beserta Automation ke dalam satu kesatuan sistem sederhana dengan kebutuhan biaya relatif rendah. Platform yang direalisasikan tersebut berpotensi meningkatkan efisiensi pengelolaan greenhouse sekaligus menekan ketergantungan terhadap aktivitas pemantauan maupun pengendalian yang masih dikerjakan secara manual.

Ruang lingkup riset ini masih dibatasi oleh pelaksanaan verifikasi pada tingkat prototype serta penerapan mekanisme kendali berbasis threshold-based control. Oleh sebab itu, pengembangan berikutnya dapat mengadopsi pendekatan pengendalian yang lebih adaptif, misalnya fuzzy logic ataupun machine learning, disertai pelaksanaan verifikasi pada greenhouse berskala nyata menggunakan jumlah sensor lebih banyak serta durasi observasi yang lebih panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Simangunsong, R. Simbolon, dan M. Ginting, "Rancang Bangun Sistem Smart Greenhouse Berbasis IoT dengan Kendali Logika Fuzzy Menggunakan 4 Parameter Sensor," *Jurnal Sains dan Sistem Riset*, vol. 1, no. 2, 2026. [Online]. Available: <https://ejurnal.kampusakademik.co.id/index.php/jssr/article/view/9667>
- [2] D. A. Perman, C. W. Kurniawan, dan M. H. Sidiq, "Smart Greenhouse Otomatis Berbasis IoT untuk Tanaman Selada," *Prosiding SENATIB*, 2025. [Online]. Available: <https://ojs.udb.ac.id/Senatib/article/view/5428>
- [3] RABIT, "Rancang Bangun Smart Greenhouse Otomatis Berbasis Internet of Things dengan Kontrol Rule-Based untuk Optimalisasi Pertumbuhan Tanaman Tomat," *Jurnal RABIT*, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.univrab.ac.id/index.php/rabit/article/view/6435>
- [4] Politeknik Negeri Jakarta, "Rancang Bangun Smart Mini Greenhouse Dengan Sumber Energi Surya Berbasis IoT," *Repository PNJ*, 2025. [Online]. Available: <https://repository.pnj.ac.id/id/eprint/29511/>
- [5] XLSmart, "Penggunaan IoT dalam Pertanian Skala Industri Modern," 2025. [Online]. Available:

- <https://www.xlsmart.co.id/bisnis/id/insights/article/penggunaan-iot-dalam-pertanian/>
- [6] Suparli, "Mengenal ESP32: Mikrokontroler WiFi & Bluetooth Serbaguna," 2025. [Online]. Available: <https://suparli.com/apa-itu-esp32/>
- [7] Jurnal SAINTEK, "Spesifikasi Sensor DHT22 untuk Pengukuran Suhu dan Kelembaban," 2024. [Online]. Available: <https://journal.upgripnk.ac.id/index.php/saintek/article/download/8941/3363/26632>
- [8] Alat Riset Pertanian, "Kenapa Tidak Semua Sensor Kelembaban Tanah Layak untuk Kelas Penelitian," 2025. [Online]. Available: <https://www.alatrisetpertanian.com/knowledge/kenapa-tidak-semua-sensor-kelembaban-tanah-layak-untuk-kelas-penelitian/>
- [9] Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, "Implementasi Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Berbasis IoT: Perbandingan Capacitive vs Resistif," 2025. [Online]. Available: <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/49169/>
- [10] Eureka Unima, "Rancang Bangun Luxmeter Menggunakan Sensor BH1750," 2024. [Online]. Available: <https://eurekaunima.com/index.php/fista/article/download/447/233>
- [11] Arduino Indonesia, "Sensor Cahaya Lingkungan BH1750 dengan ESP32," 2025. [Online]. Available: <https://www.arduinoindonesia.id/2025/12/micropython-sensor-cahaya-lingkungan-bh1750-dengan-esp32esp8266.html>
- [12] Misel, "Apa itu Relay? Berikut Pengertian, Jenis dan Fungsi Relay," 2025. [Online]. Available: <https://misel.co.id/apa-itu-relay-berikut-pengertian-jenis-dan-fungsi-relay-yuk-simak>
- [13] Bisa IoT, "Mengenal Relay: Fungsi, Jenis, dan Cara Kerja dalam Sistem Otomasi," 2025. [Online]. Available: <https://bisaioti.com/relay-adalah/>
- [14] A. A. Riski, "Perancangan Smart Greenhouse Berbasis IoT dan Aktuator Pompa Air, Kipas Angin," Universitas Nusantara Islam, 2024. [Online]. Available: https://repository.uninus.ac.id/705/1/Anita%20Ayudya%20Riski_41037002211021.pdf
- [15] A. Z. Babar and O. B. Akan, "Sustainable and Precision Agriculture with the Internet of Everything (IoE)," arXiv preprint arXiv:2404.06341, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2404.06341>
- [16] M. S. Farooq, S. Riaz, and A. Alvi, "Web of Things and Trends in Agriculture: A Systematic Literature Review," arXiv preprint arXiv:2306.09079, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2306.09079>
- [17] Politeknik Negeri Jakarta, "Rancang Bangun Smart Mini Greenhouse Dengan Sumber Energi Surya Berbasis IoT," Repository Politeknik Negeri Jakarta, 2025. [Online]. Available: <https://repository.pnj.ac.id/id/eprint/29511/>
- [18] E. Alreshidi, "Smart Sustainable Agriculture (SSA) Solution Underpinned by Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI)," arXiv preprint arXiv:1906.03106, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1906.03106>