

SISTEM SMART GREENHOUSE BERBASIS IOT MENGGUNAKAN FIREBASE UNTUK MONITORING SUHU DAN KELEMBAPAN

Rahmat Tegar Patriot Hari Lambang, Dimas Saputra, Muh. Mashdarul Hilmi Aufa,

Siti Mar'atus Sholihah, Naili Nafa Khatirokimmah

Teknik Informatika, Universitas Nahdlatul Ulama Sunan Giri

Jl. Jendral Ahmad Yani No. 10, Bojonegoro, Jawa Timur, Indonesia

rahmatkarorio@gmail.com

ABSTRAK

Budidaya *greenhouse* membutuhkan kondisi suhu dan kelembapan yang stabil, sementara pemantauan manual sering menyebabkan keterlambatan tindakan korektif. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengendalian iklim mikro berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk mengotomatisasi pengaturan suhu dan kelembapan *greenhouse*. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, serta aktuator berupa kipas dan pelemkap udara. Arsitektur sistem terdiri dari *monitoring module*, *control module*, dan *communication module*, dengan pemrograman diimplementasikan melalui Arduino IDE untuk memproses data sensor dan mengendalikan aktuator secara otomatis. Pengujian prototipe menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara efektif, di mana kipas aktif ketika suhu melebihi ambang batas dan pelemkap menyala ketika kelembapan turun di bawah nilai minimum yang ditentukan. Pengujian sistem dilakukan selama ± 8 menit dengan interval pembacaan data setiap 3 detik. Kipas aktif secara otomatis ketika suhu mencapai $\geq 32^{\circ}\text{C}$ dan berhenti pada kisaran 29°C , sedangkan humidifier bekerja ketika kelembapan berada di bawah ambang batas minimum yang ditentukan. Data lingkungan berhasil dimonitor dan ditampilkan secara *real-time* melalui platform Firebase, sehingga memungkinkan pemantauan kondisi *greenhouse* secara berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem IoT dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan *greenhouse*, mengurangi ketergantungan pada intervensi manual, serta menjaga stabilitas iklim mikro. Sistem yang dikembangkan juga dilengkapi dengan mekanisme kontrol manual sebagai mode cadangan untuk meningkatkan keandalan operasional. Penelitian ini menawarkan solusi otomatisasi *greenhouse* berbiaya rendah dengan potensi pengembangan lebih lanjut melalui penerapan multi-sensor dan algoritma kontrol adaptif.

Kata kunci : DHT22, ESP32, Firebase, Greenhouse, Internet of Things, Pengendalian Iklim Mikro

1. PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor strategis di Indonesia, memainkan peran vital dalam memenuhi kebutuhan pangan dan mendorong perekonomian nasional [1].

Dengan geografi tropis dan keanekaragaman hayati yang tinggi, Indonesia memiliki potensi signifikan untuk mengembangkan berbagai komoditas pertanian [2].

Namun, tantangan seperti perubahan iklim, ketidakstabilan cuaca, dan keterbatasan lahan produktif menuntut inovasi teknologi untuk meningkatkan efisiensi budidaya. Modernisasi sektor pertanian, termasuk melalui penggunaan teknologi *digital*, merupakan langkah penting dalam menjaga produksi berkelanjutan dan meningkatkan ketahanan pangan nasional [3].

Greenhouse merupakan bentuk inovasi dalam budidaya pertanian yang dapat menyediakan iklim mikro yang lebih stabil bagi tanaman. Di dalam *greenhouse*, beberapa parameter lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara, harus dikelola dengan baik untuk pertumbuhan tanaman yang optimal [4].

Pengendalian suhu yang tepat dapat mengurangi risiko stres panas, menjaga laju fotosintesis yang stabil, dan mencegah kerusakan jaringan tanaman akibat suhu ekstrem [5].

Sementara itu, pengaturan kelembapan sangat memengaruhi proses fisiologis tanaman, termasuk pembukaan stomata, penyerapan air, dan efisiensi pemanfaatan nutrisi [6].

Studi eksperimental pada tanaman oleh Ingmar Tulvad et al. menunjukkan bahwa kelembapan rendah dapat mengurangi pertumbuhan melalui perubahan konduktansi stomata dan mekanisme kehilangan air, yang pada akhirnya mengurangi produktivitas tanaman [7].

Oleh karena itu, pengaturan kelembapan di lingkungan terkontrol seperti *greenhouse* sangat penting [8].

Namun, menjaga kondisi lingkungan *greenhouse* yang stabil bukanlah hal yang mudah. Perubahan cuaca, intensitas cahaya, dan fluktuasi suhu harian dapat menyebabkan parameter lingkungan berubah dengan cepat. Tanpa sistem kontrol yang responsif, tanaman berpotensi terpapar kondisi yang tidak sesuai dalam jangka waktu lama sebelum beradaptasi. Hal ini menyoroti pentingnya sistem kontrol otomatis yang mampu merespons perubahan kondisi secara *real-time* dan menjaga stabilitas lingkungan tanpa memerlukan intervensi pengguna secara terus-menerus [9].

Sebagai solusi atas tantangan-tantangan ini, teknologi *Internet of Things (IoT)* menawarkan pendekatan modern untuk pengelolaan *greenhouse* [10].

IoT memungkinkan berbagai perangkat seperti sensor dan aktuator untuk terhubung dalam satu ekosistem cerdas yang dapat membaca kondisi lingkungan, mengirimkan data secara langsung, dan mengambil tindakan korektif secara otomatis. Dengan kemampuan pemantauan dan pengendalian jarak jauh, IoT dapat mengurangi beban kerja pengguna, meningkatkan efisiensi pengelolaan, dan menyediakan data penting yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan budidaya [11].

Arsitektur IoT biasanya terdiri dari tiga lapisan utama: *Perception Layer* yang mengumpulkan data melalui sensor, *Network Layer* yang mengirimkan data melalui konektivitas internet atau protokol komunikasi, dan *Application Layer* yang menampilkan data kepada pengguna dan memungkinkan fungsi kontrol [12].

Dalam konteks pengelolaan greenhouse, IoT dapat diterapkan untuk menciptakan sistem pemantauan dan pengendalian suhu dan kelembapan otomatis. Sensor DHT22 yang mampu membaca suhu dan kelembapan dipasang untuk memantau kondisi lingkungan secara berkala [13].

Data yang dikumpulkan dikirim ke mikrokontroler, yang kemudian dimasukkan ke dalam basis data dan ditampilkan pada *platform* kontrol *greenhouse*. Sistem kemudian mengatur kipas sebagai pengontrol suhu dan pelemas sebagai pengatur kelembapan berdasarkan nilai ambang batas yang telah ditentukan. Dengan demikian, IoT berfungsi sebagai mekanisme adaptif yang mampu menjaga iklim mikro yang stabil dan memastikan tanaman berada dalam kondisi optimal untuk pertumbuhan [14].

Evaluasi sistem pada penelitian ini dilakukan melalui pengujian eksperimental terhadap kestabilan pembacaan sensor, pengiriman data ke Firebase secara *real-time*, serta respon aktuator terhadap perubahan suhu dan kelembapan *greenhouse*. Pengujian dilakukan dengan mengamati perubahan status aktuator berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan pada sistem kontrol.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Greenhouse merupakan bangunan yang digunakan untuk menciptakan kondisi lingkungan yang sesuai bagi pertumbuhan tanaman dengan mengontrol parameter seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan kelembapan tanah. Teknologi *greenhouse* memungkinkan tanaman tumbuh secara optimal karena lingkungan dapat direkayasa sesuai kebutuhan tanaman. Selain itu, penggunaan *greenhouse* dapat meningkatkan produktivitas pertanian karena tanaman terlindungi dari perubahan cuaca ekstrem serta gangguan lingkungan lainnya [15].

Smart *greenhouse* merupakan pengembangan dari *greenhouse* konvensional yang memanfaatkan teknologi sensor dan sistem otomatisasi untuk memantau serta mengendalikan kondisi lingkungan tanaman secara *real-time*. Sistem ini memungkinkan

pengelolaan tanaman menjadi lebih efisien dan presisi [16].

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat melalui jaringan internet sehingga perangkat tersebut dapat saling bertukar data dan melakukan kontrol secara otomatis. Dalam bidang pertanian, IoT memungkinkan proses monitoring kondisi lingkungan dilakukan secara *real-time* dan dapat diakses dari jarak jauh.

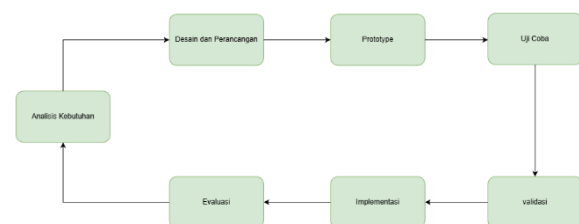
Penelitian oleh Ridwan et al. mengembangkan sistem *smart greenhouse* berbasis IoT untuk memonitor suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah menggunakan sensor DHT11 dan *soil moisture*. Sistem ini dapat mengirimkan data ke *platform* monitoring sehingga pengguna dapat memantau kondisi tanaman secara jarak jauh. Namun penelitian tersebut masih berfokus pada sistem monitoring dasar dan belum mengembangkan integrasi pengendalian lingkungan yang lebih kompleks [17].

Penelitian lain oleh Ristian dkk. merancang sistem monitoring smart *greenhouse* berbasis IoT yang memanfaatkan beberapa sensor seperti suhu, kelembapan tanah, dan pH tanah. Data sensor diproses oleh mikrokontroler untuk mengendalikan perangkat seperti lampu, kipas, dan pompa air secara otomatis. Meskipun sistem ini mampu melakukan kontrol otomatis, penelitian tersebut masih terbatas pada implementasi dan belum membahas efisiensi sistem secara menyeluruh [18].

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, sebagian besar penelitian smart *greenhouse* masih berfokus pada monitoring parameter lingkungan tertentu seperti suhu dan kelembapan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem smart *greenhouse* yang mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan secara *real-time* serta mengintegrasikan sistem kontrol otomatis untuk menjaga kondisi lingkungan tanaman agar tetap optimal.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental dengan pendekatan rancang bangun prototipe, di mana sistem IoT yang dikembangkan diuji secara langsung untuk mengevaluasi kinerja pengendalian suhu dan kelembapan *greenhouse*. Desain prototipe ditampilkan pada Gambar 1.



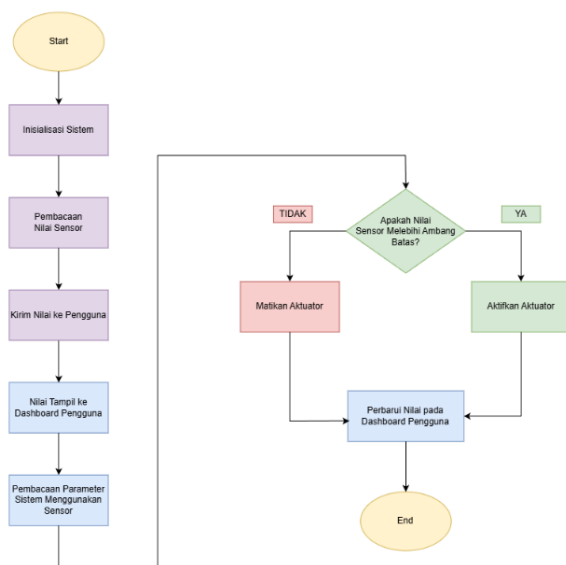
Gambar 1. Tahap pengembangan prototipe

3.1. Tahap Pengembangan

Tahap pengembangan pada penelitian dimulai dengan perancangan dan perakitan sistem berbasis IoT menggunakan sensor DHT22, mikrokontroler ESP32, relay dua *channel*, kipas DC, dan Pelembap udara (*Humidifier*). Semua komponen diintegrasikan ke dalam satu prototipe, dengan sensor ditempatkan di tengah greenhouse untuk mendapatkan data suhu dan kelembapan yang lebih representatif [19].

Setelah perakitan selesai, pemrograman dilakukan menggunakan Arduino IDE untuk mengimplementasikan logika pembacaan sensor, penentuan ambang batas, kontrol aktuator melalui relay, dan komunikasi dengan platform IoT melalui koneksi WiFi bawaan ESP32. Sistem yang telah diprogram kemudian dihubungkan ke dasbor IoT untuk menampilkan data secara *real-time* dan memungkinkan pemantauan jarak jauh.

Tahap selanjutnya adalah pengujian prototipe untuk mengevaluasi akurasi sensor, kecepatan respons aktuator ketika kondisi lingkungan berubah, dan stabilitas komunikasi data. Pengujian dilakukan di bawah kondisi operasional *greenhouse* untuk memastikan sistem mampu secara otomatis menjaga iklim mikro dan bekerja secara konsisten sesuai dengan tujuan penelitian.



Gambar 2. Flowchart prototipe greenhouse

3.2. Desain Prototipe

Penelitian ini merancang sistem kontrol suhu dan kelembapan berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk aplikasi *greenhouse*. Sistem ini terdiri dari *monitoring module*, *control module*, dan *communication module* berbasis *cloud*. Semua komponen dirakit menjadi satu prototipe untuk menguji efektivitas kontrol suhu dan kelembapan secara *real-time* [20].

a. Monitoring Module

Monitoring Module merupakan komponen kunci dari smart greenhouse, karena mengumpulkan data iklim mikro secara *real-time*. Sensor DHT22

digunakan untuk memantau suhu dan kelembapan menggunakan elemen resistif dan kapasitif, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal digital. Pembacaan dilakukan setiap 3 detik untuk mendeteksi perubahan lingkungan dengan cepat. Sensor ditempatkan di tengah greenhouse untuk mendapatkan representasi kondisi yang lebih stabil, seperti yang direkomendasikan oleh sistem pemantauan iklim mikro. Data yang diperoleh kemudian diproses oleh mikrokontroler melalui tahap validasi dan konsistensi sebelum dikirim ke platform IoT. Integrasi ini memungkinkan pemantauan otomatis dan memberikan informasi yang akurat untuk modul kontrol dan dasbor aplikasi IoT.

Penelitian ini menggunakan satu sensor DHT22 karena prototipe greenhouse yang dikembangkan masih berskala kecil sehingga satu titik pembacaan dianggap cukup merepresentasikan kondisi lingkungan di dalam greenhouse. Selain itu, penggunaan satu sensor juga bertujuan untuk menjaga efisiensi biaya dan menyederhanakan implementasi sistem pada tahap awal pengembangan prototipe.

b. Control Module

Control Module dalam sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32, yang memproses data dari sensor dan menentukan tindakan otomatis untuk menjaga iklim mikro *greenhouse*. ESP32 dilengkapi dengan konektivitas WiFi, memori yang cukup, dan jumlah GPIO yang memadai untuk menghubungkan sensor dan aktuator. Data suhu dan kelembapan dari DHT22 dikirim ke ESP32 untuk dianalisis sebelum dikirim kembali ke platform IoT.

Berdasarkan data ini, ESP32 mengontrol relay dua *channel* yang terhubung ke kipas dan pelembap udara. Ketika suhu melebihi batas yang ditentukan, kipas diaktifkan ketika kelembapan turun di bawah ambang batas minimum, maka pelembap udara akan dinyalakan. Dengan mekanisme ini, ESP32 bertindak sebagai pusat kendali, memastikan sistem beroperasi secara otomatis, responsif, dan dapat dipantau melalui dasbor aplikasi IoT.

c. Communication Module

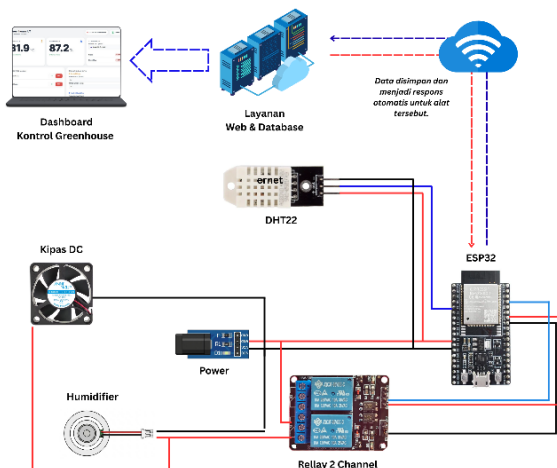
Communication Module menghubungkan sistem greenhouse ke platform IoT melalui konektivitas nirkabel. Dalam penelitian ini, ESP32 menggunakan modul WiFi terintegrasi untuk mengirimkan data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22 ke layanan web dan basis data secara *real-time*. Melalui koneksi ini, setiap pembaruan data lingkungan disimpan dan ditampilkan dalam aplikasi kontrol *greenhouse*, memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi iklim mikro dari jarak jauh.

Selain itu, *communication module* memungkinkan ESP32 untuk menerima perintah dari aplikasi IoT untuk mengontrol aktuator seperti kipas dan pelembap udara. Mekanisme ini memastikan

komunikasi dua arah, mengirim data sensor dan menerima instruksi kontrol, sehingga sistem dapat beroperasi secara otomatis dan responsif. Dengan integrasi WiFi dan platform IoT, komunikasi dalam sistem greenhouse menjadi lebih efisien, stabil, dan mudah diakses oleh pengguna. Mekanisme alur ini ditunjukkan pada Gambar 3, yang memperlihatkan proses pengiriman data dari sensor ke *cloud* sebelum akhirnya ditampilkan di aplikasi pengguna.

3.3. Firebase Web dan Database Service

Aplikasi IoT yang dikembangkan pada penelitian ini terintegrasi dengan Firebase sebagai platform penyimpanan data dan manajemen komunikasi secara *real time*. Setiap data hasil pembacaan sensor dikirim oleh ESP32 ke Firebase, sehingga perubahan nilai suhu dan kelembapan dapat dipantau secara langsung melalui dashboard atau aplikasi pengguna. Integrasi ini memungkinkan proses monitoring dan pengendalian perangkat (aktuator) berjalan lebih responsif, terstruktur, serta mendukung sinkronisasi data antarperangkat tanpa memerlukan server lokal tambahan. Dengan demikian, Firebase berperan sebagai penghubung utama antara perangkat IoT, sistem kontrol, dan antarmuka pengguna.



Gambar 3. Desain sistem control *greenhouse*

3.4. Relay

Relay 2 *channel* menghubungkan ESP32 ke aktuator, memungkinkan mikrokontroler untuk mengontrol perangkat tegangan tinggi seperti kipas dan pelembap udara. Setiap saluran pada relay bertindak sebagai sakelar elektronik yang aktif berdasarkan sinyal digital dari ESP32, memungkinkan aktuator untuk dihidupkan atau dimatikan secara otomatis sesuai dengan kebutuhan kontrol suhu dan kelembapan *greenhouse*.

3.5. Aktuator

Aktuator berfungsi sebagai perangkat eksekusi yang melakukan tindakan fisik berdasarkan perintah dari mikrokontroler. Dalam sistem smart *greenhouse* ini, aktuator digunakan untuk secara otomatis

menyesuaikan kondisi iklim mikro berdasarkan pembacaan sensor dan logika kontrol yang telah ditentukan.

a. Kipas DC 12V

Kipas DC digunakan sebagai aktuator pengontrol suhu. Ketika sensor DHT22 mendeteksi suhu melebihi batas maksimum, ESP32 mengaktifkan relai, menhidupkan kipas. Aliran udara dari kipas membantu menurunkan suhu dan meningkatkan sirkulasi udara di dalam *greenhouse*. Kipas akan mati secara otomatis setelah suhu kembali ke kisaran optimal.

b. Humidifier

Pelembap udara berfungsi sebagai aktuator pengontrol kelembapan. Ketika pembacaan kelembapan turun di bawah ambang batas minimum, ESP32 mengaktifkan pelembap udara melalui relai, menghasilkan uap air halus yang meningkatkan kelembapan di *greenhouse*. Pelembap udara akan berhenti bekerja secara otomatis ketika kelembapan kembali stabil.

3.6. Arduino IDE

Arduino IDE berfungsi sebagai platform pemrograman untuk menulis, mengkompilasi, dan mengunggah kode ke mikrokontroler ESP32. IDE ini mendukung bahasa pemrograman C/C++ dan menyediakan pustaka yang diperlukan untuk mengoperasikan sensor DHT22, modul relai, dan konektivitas WiFi. Arduino IDE memungkinkan implementasi terstruktur dari logika pemantauan, kontrol aktuator, dan komunikasi dengan platform IoT, sehingga seluruh sistem *greenhouse* dapat beroperasi secara otomatis dan responsif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Prototype



Gambar 4. Prototipe smart *greenhouse*

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian prototipe, sistem IoT berbasis ESP32 yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan dan pengendalian suhu serta kelembapan *greenhouse* secara *real-time*. Sensor DHT22 berhasil membaca parameter lingkungan secara stabil dan konsisten, dengan data yang dikirimkan ke platform Firebase

tanpa jeda yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat sensor, mikrokontroler, dan layanan cloud berjalan dengan baik serta mendukung kebutuhan monitoring jarak jauh.

Pengujian respon aktuator menunjukkan bahwa kipas DC aktif secara otomatis ketika suhu lingkungan melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sedangkan pelembap udara menyala ketika nilai kelembapan turun di bawah batas minimum. Mekanisme kontrol berbasis ambang batas ini mampu menjaga kondisi iklim mikro *greenhouse* berada pada rentang yang diinginkan tanpa memerlukan intervensi manual secara terus-menerus.

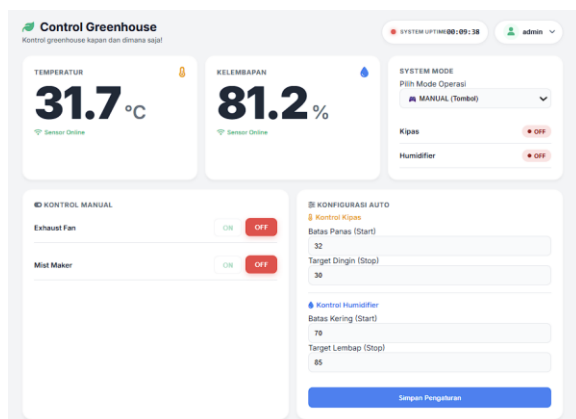
Respon aktuator yang cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat responsivitas yang memadai untuk aplikasi *greenhouse* skala kecil.

Implementasi perancangan perangkat keras dimana menggunakan aktuator berupa kipas yang diletakan pada bagian dinding sebelah kiri dan kanan *greenhouse* untuk masuk-keluar nya udara dan *humidifier* yang diletakan pada bagian tengah *greenhouse* seperti yang terlihat pada Gambar 4.

4.2. Analisis Sistem

Pengujian sistem dilakukan selama ± 8 menit dengan interval pembacaan sensor setiap 3 detik untuk mengamati kestabilan monitoring, pengiriman data, dan respon aktuator terhadap perubahan kondisi lingkungan *greenhouse*.

Analisis sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan sistem IoT dalam kondisi operasional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara stabil dalam membaca data sensor, mengirimkan data ke platform Firebase, serta mengeksekusi kontrol aktuator secara otomatis. Integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan dashboard pengguna memungkinkan proses monitoring dan pengendalian iklim mikro dilakukan secara real-time dan berkelanjutan.

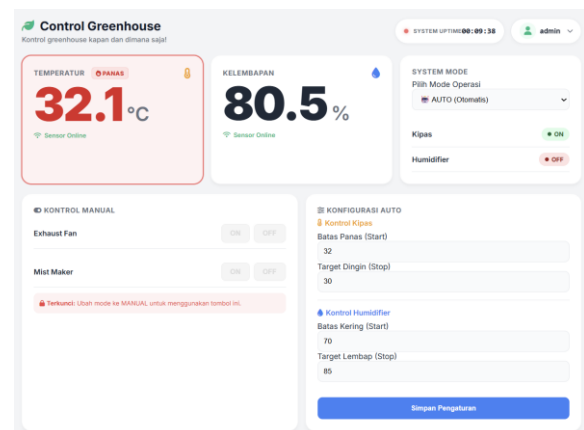


Gambar 5. Kontrol *greenhouse* via dashboard pengguna

Dari sisi komunikasi data, Firebase berperan efektif sebagai media penyimpanan dan sinkronisasi

data secara *real-time*. Setiap perubahan nilai suhu dan kelembapan dapat langsung ditampilkan pada dashboard aplikasi, sehingga pengguna dapat memantau kondisi *greenhouse* secara kontinu. Stabilitas pengiriman data selama pengujian menunjukkan bahwa koneksi WiFi pada ESP32 cukup andal untuk mendukung sistem monitoring berbasis IoT.

Pengujian respon aktuator menunjukkan bahwa kipas DC aktif secara otomatis ketika suhu lingkungan melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sedangkan pelembap udara menyala ketika nilai kelembapan turun di bawah batas minimum. Mekanisme kontrol berbasis ambang batas ini mampu menjaga kondisi iklim mikro *greenhouse* berada pada rentang yang diinginkan tanpa memerlukan intervensi manual secara terus-menerus. Respon aktuator yang cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat responsivitas yang memadai untuk aplikasi *greenhouse* skala kecil.



Gambar 6. Tampilan pada dashboard pengguna ketika di kondisi suhu panas

Tabel 1. Data *real-time* untuk respon aktuator

Waktu	Suhu	Kelembapan	Status
11:13:46	32	79.7	Aktif
11:13:49	32	80.9	Aktif
11:13:52	32.1	80.5	Aktif
11:13:55	32.1	80.8	Aktif
11:13:58	32.2	79.6	Aktif
11:14:02	32.2	79.6	Aktif
...	...	...	...
...	...	...	...
11:20:25	29	74.6	Mati
11:20:29	29.1	74.4	Mati
11:20:32	29.1	74.4	Mati
11:21:36	29.1	74.3	Mati
11:21:39	29.1	74.3	Mati
11:21:43	29.1	74.8	Mati

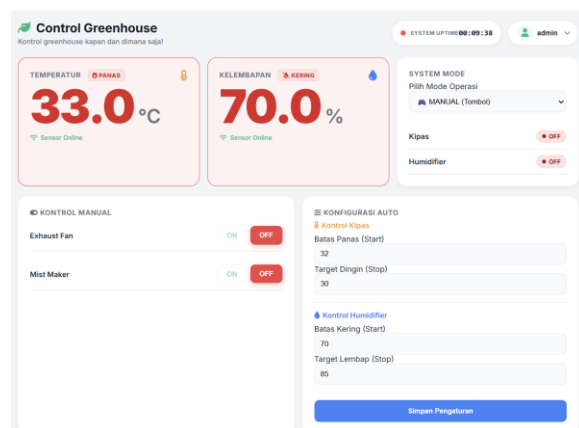
Berdasarkan data pada Tabel 1, suhu awal pengujian berada pada rentang 32–32.2°C dengan kelembapan sekitar 79–80%, sehingga aktuator kipas berada pada kondisi aktif. Setelah beberapa menit pengujian, suhu mengalami penurunan hingga

mendekati 29°C dan status aktuator berubah menjadi tidak aktif. Perubahan status aktuator ini menunjukkan bahwa logika kontrol berbasis ambang batas bekerja sesuai dengan perancangan sistem, di mana aktuator mampu merespons perubahan kondisi suhu dan kelembapan secara otomatis. Penurunan suhu yang terjadi secara bertahap juga menunjukkan bahwa sistem bekerja secara stabil tanpa menyebabkan fluktuasi lingkungan yang ekstrem di dalam *greenhouse* selama proses pengujian berlangsung.

Untuk meningkatkan keandalan dan keamanan operasional sistem, penelitian ini juga menyediakan mekanisme pengendalian manual sebagai mode cadangan (*fail-safe mechanism*). Mekanisme ini memungkinkan pengguna untuk menghidupkan atau mematikan aktuator secara manual melalui dashboard aplikasi IoT apabila terjadi gangguan pada sistem otomatis, seperti kegagalan koneksi jaringan, kesalahan pembacaan sensor, atau ketidakstabilan sistem kontrol.

Pendekatan fail-safe dan mekanisme kontrol manual juga telah dilaporkan dalam penelitian lain oleh Qiu et al., di mana solusi arsitektur komunikasi *fail-safe* digunakan untuk mempertahankan fungsi sistem saat jalur utama IoT gagal dan dual-mode control (otomatis dan manual) diusulkan untuk sistem otomasi *smart home* guna menjamin layanan tetap berjalan saat terjadi gangguan IoT [21].

Keberadaan mode kontrol manual ini menjadikan sistem lebih andal dan siap digunakan pada kondisi lapangan, di mana gangguan teknis seperti koneksi jaringan atau error sensor dapat terjadi sewaktu-waktu.



Gambar 7. Kontrol manual untuk pengguna

Dalam kondisi normal, sistem bekerja secara otomatis berdasarkan pembacaan sensor dan logika kontrol berbasis ambang batas. Namun, ketika sistem mendeteksi kondisi tidak normal atau pengguna mengidentifikasi adanya *error*, kontrol manual dapat diaktifkan untuk memastikan kipas dan pelembap udara tetap dapat dioperasikan sesuai kebutuhan. Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas pengendalian iklim mikro *greenhouse* serta meminimalkan risiko kerusakan tanaman akibat kegagalan sistem otomatis.

Dengan adanya fitur kontrol manual, sistem menjadi lebih fleksibel dan andal, karena tidak sepenuhnya bergantung pada proses otomatis. Mekanisme ini juga memberikan lapisan keamanan tambahan dalam implementasi sistem IoT, terutama pada lingkungan pertanian yang memerlukan respon cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pengendalian suhu dan kelembapan *greenhouse* berbasis *Internet of Things* menggunakan ESP32 dan sensor DHT22. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring dan pengendalian iklim mikro secara *real-time* dengan respon aktuator yang cepat dan integrasi data yang stabil melalui platform *Firestore*, serta mengaktifkan aktuator secara otomatis berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat merespons perubahan kondisi lingkungan dengan baik sehingga mampu menjaga stabilitas lingkungan *greenhouse*. Dengan demikian, sistem *smart greenhouse* berbasis IoT ini dapat menjadi solusi dalam meningkatkan efisiensi monitoring dan pengendalian lingkungan tanaman.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pembacaan data setiap 3 detik secara *real-time* dan mengaktifkan kipas otomatis ketika suhu mencapai $\geq 32^\circ\text{C}$ hingga suhu turun pada kisaran 29°C. Data monitoring juga berhasil dikirim dan ditampilkan melalui *Firestore* tanpa keterlambatan signifikan selama pengujian berlangsung.

Meskipun demikian, sistem masih memiliki keterbatasan berupa penggunaan satu sensor dan algoritma kontrol berbasis ambang batas yang belum adaptif. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengimplementasikan multi-sensor, algoritma kontrol cerdas, serta pengujian pada skala *greenhouse* yang lebih besar guna meningkatkan akurasi dan keandalan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. G. Safitri, M. Agustin, I. Syahroni, dan E. Kurniati, "Peran Sektor Pertanian dalam Mewujudkan Ketahanan Pangan untuk Pemberdayaan Ekonomi di Pulau Sumatera," *J. Ekon. dan Pembang. Indones.*, vol. 3, no. 1, hal. 195–204, 2025, doi: <https://doi.org/10.61132/jepi.v3i1.1158>.
- [2] T. Borelli et al., "Invisible Treasures : Assessing Indonesia ' s Unique Agrobiodiversity for Food and Nutrition Security," *Sustain.*, hal. 1–26, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16229824>.
- [3] T. Ihsan dan V. Derosya, "Adaptasi Pertanian dalam Menghadapi Perubahan Iklim : Peluang Dan Tantangan," *J. Serambi Eng.*, vol. IX, no. 4, hal. 10946–10953, 2024, doi: <https://orcid.org/0000-0003-4018-8987>.
- [4] K. Yadav, I. Arora, A. Kumar, M. K. Rana, dan V. Kumar, "Integrated Greenhouse Microclimate

- Management : A Review,” *J. Sci. Res. Reports*, vol. 30, no. 7, hal. 103–114, 2024, doi: <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72127>.
- [5] A. G. Yusuf, F. A. Al-yahya, dan A. A. Saleh, “Optimizing greenhouse microclimate for plant pathology : challenges and cooling solutions for pathogen control in arid regions,” *Plants Sci.*, no. February, hal. 1–15, 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1492760.
- [6] L. Ncisana *et al.*, “Water use efficiency (WUE) and nutrient concentration of selected fodder radish (*Raphanus sativus* L .) genotypes for sustainable diets,” *Sci. Reports (Nature Portfolio)*, vol. 14, hal. 1–20, 2024.
- [7] I. Tulva dan K. Koolmeister, “Low relative air humidity and increased stomatal density independently hamper growth in young *Arabidopsis*,” *Plant J.*, hal. 2718–2736, 2024, doi: 10.1111/tpj.16944.
- [8] B. Amin, M. J. Atif, W. Kandegama, J. Nasar, P. Alam, dan Z. Fang, “Low temperature and high humidity affect dynamics of chlorophyll biosynthesis and secondary metabolites in Cucumber,” *BMC Plant Biol.*, vol. 24, 2024, doi: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05615-2>.
- [9] M. Zikri, M. Fikry, dan R. Suwanda, “Rancang bangun smart greenhouse otomatis berbasis internet of things dengan kontrol rule-based untuk optimalisasi pertumbuhan tanaman tomat,” *RABIT J. Teknol. dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 10, no. 2, hal. 693–700, 2025, doi: <https://doi.org/10.36341/rabit.v10i2.6435>.
- [10] A. Maulana, O. P. Barus, Haryati, A. Kristanto, D. Chainatra, dan W. J. Alexander, “Peningkatan Produksi Dan Pemasaran Melalui Smart Greenhouse Dan Content Marketing Strategy Untuk Urban Farmer Hidroponik,” *J. Pengabd. Kpd. Masy. Nusan.*, vol. 4, no. 4, hal. 3388–3397, 2023, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal.sisfokomtek.org/index.php/jpkm/article/view/1735>
- [11] F. Dirayati, R. A. Sari, dan R. F. Purnomo, “Perancangan dan Implementasi Sistem Smart Agriculture Berbasis Internet of Things untuk Meningkatkan Produktivitas Pertanian,” *J. MEDIA Inform. [JUMIN]*, vol. 6, no. 2, hal. 863–872, 2025, doi: <https://doi.org/10.55338/jumin.v6i2.4982>.
- [12] N. S. S. Dhoni Setyanto, “Prototipe Monitor dan Kontrol Otomatis Iklim Mikro Greenhouse dengan Platform IoT Blynk,” *Techno Com*, vol. 21, no. 1, hal. 89–103, 2022, doi: <https://doi.org/10.33633/tc.v21i1.5462>.
- [13] B. L. Candradewani, S. Indriyanto, dan I. Permatasari, “SISTEM MONITORING KELEMBAPAN MEDIA TANAM AGLAONEMA SP BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT),” *SINTA J. Sist. Inf. dan Teknol. Komputasi*, vol. 2, hal. 103–115, 2025, doi: <https://doi.org/10.61124/sinta.v2i3.60>.
- [14] N. Bafdal, I. Ardiansah, dan S. Asmara, “Application of Internet of Things (IoT) on Microclimate Monitoring System in The ALG Unpad Greenhouse Based on Raspberry Pi,” *J. Tek. Pertan. Lampung*, vol. 11, no. 3, hal. 518–530, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-l.v11i3.518-530>.
- [15] S. R. Bhandari, U. K. Khang, A. K. Yadav, dan D. Pradhan, “An Economic and Smart Greenhouse System using Microcontroller for Sustainable Agriculture : A Case Study,” vol. 3, no. June, hal. 36–46, 2023.
- [16] Z. Lu, “A Review of Intelligent Greenhouse Systems Based on Internet of Things Control Technology,” vol. 0, hal. 44–50, 2025, doi: 10.54254/2755-2721/2025.22577.
- [17] F. Aditya, R. Mas, S. W. Suciayati, dan G. A. Pauzi, “Smart Greenhouse on Monitoring of Soil Temperature and Humidity Control of Orchid Plants Using Internet of Things (IoT),” vol. 3, no. 3, 2022.
- [18] U. Ristian, I. Ruslianto, dan K. Sari, “Sistem Monitoring Smart Greenhouse pada Lahan Terbatas Berbasis Internet of Things (IoT),” vol. 8, no. 1, hal. 87–94, 2022.
- [19] R. Hermawan, D. R. Adhy, S. Maesaroh, dan M. B. Anggara, “Formulasi Penempatan Sensor Suhu Pada Green House,” *Power Elektron. J. Orang Elektro*, vol. 13, no. 3, hal. 342–350, 2024, doi: <https://doi.org/10.30591/polektro.v13i3.7711>.
- [20] A. Kalbasinia, M. Jafari, R. Kouhikamali, dan M. Sadeghi, “Smart Agricultural Technology Application of computational fluid dynamics (CFD) for optimal temperature sensor placement in a greenhouse equipped with a pad-fan cooling (PFC) system,” *Smart Agric. Technol.*, vol. 12, no. June, hal. 101109, 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.101109.
- [21] S. Qiu, R. Allan, R. Nilavalan, J. Ivey, S. Butterfield, dan M. Li, “Performance analysis of a fail-safe wireless communication architecture for IoT based fire alarm control panels,” 2021.