

Smart Agriculture: Pemanfaatan Sensor DHT11 Berbasis *Internet of Things (IoT)* untuk pemantauan suhu dan kelembapan udara

Aeltri Jeacfky Gozal Go^{1*}, Fajerin Biabdillah², Agusma Wajiansyah³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Samarinda; Jl. Dr. Cipto Mangunkusumo Samarinda 75131;

Keywords:

Smart Agriculture, *Internet of Things*, DHT11, Pemantauan Suhu, Kelembapan udara

Correspondent Email:

aeltrigozal@gmail.com

Abstrak. *Internet of Things (IoT)* memberikan peluang besar dalam modernisasi pertanian melalui penerapan *Smart Agriculture*. Salah satu penerapannya adalah pemantauan suhu dan kelembapan udara yang berperan penting bagi pertumbuhan tanaman. Penelitian ini membahas pemanfaatan sensor DHT11 sebagai perangkat utama dalam sistem pemantauan berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP8266 dan platform Blynk untuk menampilkan data secara *real-time*. Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem pemantauan lingkungan yang efisien, ekonomis, dan mudah diimplementasikan pada skala pertanian kecil. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memantau suhu dan kelembapan udara secara *real-time* dengan waktu respons rata-rata 1–2 detik. Sensor DHT11 mendeteksi suhu antara 27,5°C–31,6°C dan kelembapan 60%–77% pada tiga periode pengujian (pagi, siang, malam), dengan akurasi $\pm 0,3^\circ\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2\%$ untuk kelembapan dibandingkan alat pembanding. Pada uji cuaca, suhu turun dari 31,6°C saat panas menjadi sekitar 25,8°C saat hujan, menandakan sensitivitas sensor yang baik terhadap perubahan lingkungan. Sistem *Smart Agriculture berbasis IoT* ini terbukti stabil, akurat, dan efisien dalam mendukung pemantauan kondisi lingkungan pertanian secara *real-time* serta berpotensi diterapkan pada otomatisasi pengelolaan lahan yang lebih cerdas.



Copyright © [JITET](#) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. *The Internet of Things (IoT)* provides great opportunities to modernize agriculture through the implementation of *Smart Agriculture*. One of its applications is monitoring air temperature and humidity, which are essential factors for plant growth. This study discusses the utilization of the DHT11 sensor as the main component in an IoT-based monitoring system using NodeMCU ESP8266 and the Blynk platform to display data in real time. The purpose of this research is to design an environmental monitoring system that is efficient, economical, and easy to implement on a small agricultural scale. Experimental results show that the system can monitor temperature and humidity in real time with an average response time of 1–2 seconds. The DHT11 sensor recorded temperatures between 27.5°C–31.6°C and humidity levels between 60%–77% across three test periods (morning, noon, and night), with an accuracy of $\pm 0.3^\circ\text{C}$ for temperature and $\pm 2\%$ for humidity compared to reference instruments. Under different weather conditions, the sensor detected a temperature drop from 31.6°C during hot weather to about 25.8°C during rain, indicating good sensitivity to environmental changes. Overall, the IoT-based *Smart Agriculture* system proved stable, accurate, and efficient in supporting real-time agricultural monitoring and has potential for use in automated, intelligent farm management.

1. PENDAHULUAN

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pemanfaatan Internet of Things (IoT) dalam sektor pertanian telah memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi pemantauan lingkungan, penghematan biaya operasional, serta peningkatan hasil panen. IoT memungkinkan integrasi berbagai sensor untuk mengumpulkan data suhu, kelembapan, pH tanah, dan kelembapan tanah secara real-time, yang kemudian dikirimkan ke platform berbasis cloud seperti ThingSpeak untuk dianalisis dan divisualisasikan. Studi oleh Paschal Uchenna Chinedu dkk. (2022) menegaskan bahwa sistem pemantauan pertanian berbasis IoT dapat membantu petani meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil dengan memanfaatkan sensor suhu, kelembapan, dan pH untuk pengambilan keputusan berbasis data. Misalnya, penggunaan sensor DHT11 telah terbukti efektif dalam mengukur suhu dan kelembapan dengan biaya rendah dan integrasi sederhana dengan mikrokontroler seperti Arduino. Namun, sebagian besar penelitian masih terbatas pada aspek teknis sensor dan belum mengarah pada pengembangan sistem yang lebih komprehensif dan berkelanjutan. Berdasarkan kajian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian dalam penerapan sensor DHT11 berbasis IoT untuk pemantauan suhu dan kelembapan udara yang lebih terintegrasi, akurat, dan aplikatif pada konteks pertanian lokal. Penelitian ini penting dilakukan untuk menjawab tantangan perubahan iklim, keterbatasan sumber daya petani, serta kebutuhan akan pengelolaan lahan yang efisien. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pengembangan sistem Smart Agriculture berbasis IoT yang memanfaatkan sensor DHT11 secara lebih terstruktur untuk menghasilkan data lingkungan yang real-time, terukur, dan mudah diakses. Tujuan utamanya adalah merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan suhu dan kelembapan udara berbasis IoT yang efektif, efisien, serta mampu mendukung proses pengambilan keputusan dalam budidaya pertanian modern [1].

2. TINJAUAN PUSTAKA

Smart Agriculture atau pertanian cerdas merupakan penerapan teknologi digital dalam bidang pertanian dengan tujuan meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan. Teknologi ini memanfaatkan sensor, sistem komunikasi, serta analisis data untuk mendukung pengambilan keputusan dalam proses budidaya. Melalui penerapan Smart Agriculture, petani dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya, mengurangi risiko akibat perubahan iklim, serta meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil pertanian secara berkelanjutan. Salah satu teknologi pendukung utama dalam Smart Agriculture adalah Internet of Things (IoT). IoT memungkinkan

perangkat elektronik saling terhubung melalui jaringan internet sehingga mampu mengumpulkan, mengirim, dan memproses data secara real-time. Dalam sektor pertanian, IoT berperan penting untuk memantau kondisi lingkungan, mengatur sistem irigasi, hingga memberikan peringatan dini terhadap potensi gangguan pertumbuhan tanaman. Sistem berbasis IoT juga mampu mengintegrasikan berbagai sensor seperti sensor suhu, kelembapan, pH tanah, dan kelembapan tanah untuk membantu petani memantau lahan secara otomatis dan efisien. Dengan adanya data yang akurat dan dapat diakses kapan saja, petani dapat mengambil keputusan yang lebih cepat dan tepat dalam pengelolaan lahan pertanian. Penerapan konsep ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi pemborosan sumber daya, serta mendukung praktik pertanian berkelanjutan di berbagai wilayah [2].

Untuk perangkat yang umum digunakan dalam sistem berbasis IoT adalah sensor DHT11, sensor ini dirancang untuk mengukur suhu dan kelembapan udara dengan konsumsi daya yang rendah, biaya yang relatif murah, serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler seperti Arduino maupun NodeMCU. Walaupun akurasi tidak sebaik sensor kelas industri, DHT11 tetap menjadi pilihan populer dalam penelitian dan implementasi skala kecil karena ketersediaannya yang luas dan kesederhanaannya dalam penerapan.

Dalam konteks pertanian cerdas, sensor DHT11 memiliki relevansi tinggi karena data suhu dan kelembapan merupakan parameter penting bagi pertumbuhan tanaman. Informasi yang diperoleh dari sensor ini, ketika diintegrasikan dengan sistem IoT, dapat ditampilkan secara real-time dan jarak jauh, sehingga petani mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara lebih efektif. Dengan demikian, pemanfaatan sensor DHT11 berbasis IoT menjadi salah satu solusi teknologi yang mendukung pengelolaan pertanian modern, efisien, dan adaptif terhadap dinamika lingkungan.

3. METODE PENELITIAN

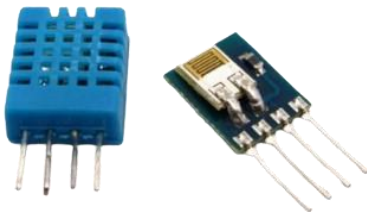
3.1 Alur Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis penelitian eksperimen terapan. Penelitian ini dilakukan untuk menguji kinerja sensor DHT11 dalam sistem Smart Agriculture berbasis Internet of Things (IoT) yang dirancang untuk memantau suhu dan kelembapan udara pada skala kecil. Proses penelitian dilaksanakan di rumah peneliti dengan memanfaatkan media pot atau polibag yang berisi tanaman sebagai simulasi lahan pertanian sederhana. Selama pengujian, sistem dijalankan dalam rentang

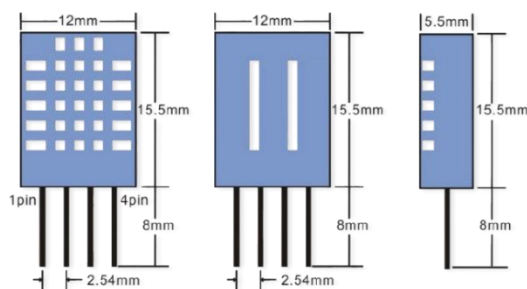
waktu tertentu untuk mengamati kestabilan pembacaan sensor terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti perbedaan suhu siang dan malam atau tingkat kelembapan akibat penyiraman dan hujan.

3.2 Layout dan Konfigurasi Pin DHT11

Sensor DHT11 memiliki empat pin utama yang tersusun dalam satu baris, di mana setiap pin memiliki fungsi spesifik dalam proses pengukuran dan transmisi data. Susunan pin ini dirancang untuk memudahkan integrasi dengan berbagai jenis mikrokontroler, seperti Arduino maupun NodeMCU, serta memastikan kestabilan komunikasi data digital antara sensor dan sistem utama. Selain itu, desain pin yang sederhana dan jarak antar pin yang sesuai dengan standar breadboard mempermudah proses perakitan dan pengujian rangkaian. Setiap pin memiliki peranan penting, mulai dari suplai daya, jalur data, hingga ground, yang bekerja secara sinergis untuk menjamin hasil pengukuran suhu dan kelembapan yang akurat dan efisien.



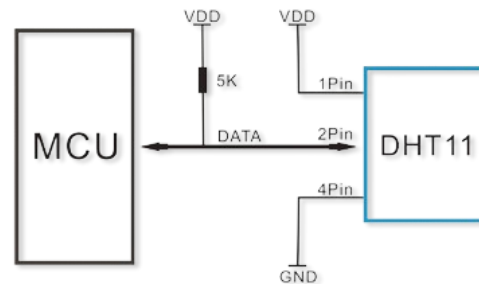
Gambar 1. Sensor DHT11



Gambar 2. Diagram dimensi fisik sensor DHT11

DHT11 merupakan sensor yang mampu menghasilkan sinyal digital yang telah dikalibrasi dengan baik. Sensor ini menggunakan teknologi pengumpulan sinyal digital yang eksklusif serta sistem penginderaan kelembapan yang andal, sehingga menjamin tingkat keakuratan dan stabilitas kinerjanya. Komponen pengindera pada sensor ini terhubung dengan mikrokontroler berukuran 8-bit

yang berfungsi untuk memproses data suhu dan kelembapan secara langsung sebelum dikirim ke sistem utama. Setiap unit DHT11 telah melalui proses kompensasi suhu dan kalibrasi di ruang kalibrasi khusus, dengan koefisien hasil kalibrasi yang tersimpan dalam memori OTP (One Time Programmable) untuk menjaga konsistensi hasil pengukuran. Berkat ukurannya yang ringkas, konsumsi daya yang rendah, serta kemampuan transmisi data hingga jarak 20 meter, DHT11 dapat digunakan pada berbagai kondisi lingkungan yang menantang. Selain itu, sensor ini juga memiliki keunggulan dalam kemudahan instalasi karena dikemas dalam bentuk modul dengan empat pin yang tersusun dalam satu baris, sehingga proses pemasangan dan integrasi dengan berbagai mikrokontroler seperti Arduino maupun NodeMCU menjadi lebih mudah, efisien, dan praktis.



Gambar 3. diagram rangkaian koneksi DHT11 dengan mikrokontroler

Gambar di atas menunjukkan diagram rangkaian koneksi antara sensor DHT11 dan mikrokontroler (MCU). Pada rangkaian ini, pin pertama (VCC) dari sensor DHT11 dihubungkan ke sumber tegangan positif (VDD) sebesar 3.3V hingga 5V sebagai daya utama sensor. Pin kedua berfungsi sebagai jalur data (DATA) yang terhubung ke salah satu pin input/output digital pada mikrokontroler untuk proses komunikasi data, sedangkan pin keempat (GND) dihubungkan ke ground sebagai referensi tegangan sistem. Selain itu, terdapat resistor sebesar 5K ohm yang dipasang antara pin VCC dan pin DATA sebagai pull-up resistor untuk menjaga kestabilan sinyal digital dan mencegah gangguan selama proses transmisi data. Melalui konfigurasi ini, sensor DHT11 dapat mengirimkan data suhu dan kelembapan secara digital ke mikrokontroler dengan stabil dan akurat. Penelitian yang dilakukan oleh Simon Prananta Barus dan Jeriko Ichus Seo (2025) juga menegaskan bahwa integrasi DHT11 dengan NodeMCU ESP8266 memungkinkan pengumpulan data suhu dan kelembapan secara real-time yang kemudian dikirimkan ke server web untuk disimpan dalam basis data dan divisualisasikan melalui

aplikasi berbasis web. Rangkaian ini menjadi dasar dari sistem pemantauan berbasis IoT yang mampu menghasilkan dataset lingkungan secara terstruktur, sehingga mendukung penerapan pertanian cerdas (Smart Agriculture) berbasis data [3].

3.3 Rancangan Sistem

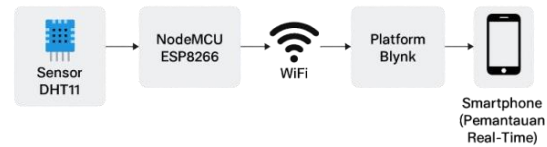
Rancangan sistem terdiri atas beberapa komponen dan spesifikasi utama yang saling terintegrasi untuk membentuk satu kesatuan sistem Smart Agriculture berbasis Internet of Things (IoT). Setiap komponen memiliki fungsi spesifik, mulai dari sensor yang bertugas mengukur suhu dan kelembapan, mikrokontroler sebagai pengolah data, hingga aplikasi yang menampilkan hasil pengukuran secara real-time.

Tabel 1. Komponen dan Spesifikasi yang digunakan

Komponen	Fungsi	Spesifikasi Utama
NodeMCU V3 ESP8266	Mikrokontroler pengolahan data sensor dan penghubung modul WiFi	CPU 32-bit, koneksi WiFi 2.4 GHz
DHT11	Sensor suhu dan kelembapan udara	Rentang suhu 0–50°C, kelembapan 20–90% RH
Aplikasi Blynk	Pemantauan data secara real-time	Aplikasi mobile berbasis IoT
Smartphone	Media perantara antarmuka pengguna	Android/iOS

Penelitian ini menggunakan beberapa komponen utama dalam sistem Smart Agriculture berbasis IoT, yaitu NodeMCU V3 ESP8266 sebagai mikrokontroler yang mengolah data sensor dan mengirimkannya melalui koneksi WiFi 2.4 GHz, sensor DHT11 untuk mengukur suhu (0–50°C) dan kelembapan udara (20–90% RH), serta aplikasi Blynk sebagai platform pemantauan data secara real-time melalui smartphone berbasis Android atau iOS. Kombinasi perangkat tersebut membentuk sistem pemantauan sederhana yang efisien untuk mendukung implementasi pertanian cerdas skala kecil. Berdasarkan hasil penelitian Aris Sudaryanto dkk. (2024), sensor DHT11 terbukti memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi dengan rata-rata kesalahan pengukuran suhu sebesar 3.16% (akurasi 96.84%) dan kelembapan sebesar 7.07% (akurasi 92.93%), sehingga total akurasi rata-rata mencapai 94.89%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor DHT11 sangat layak digunakan dalam sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT seperti Smart Agriculture,

karena mampu memberikan hasil pengukuran yang stabil dan akurat dalam mendeteksi perubahan suhu maupun kelembapan udara [4].



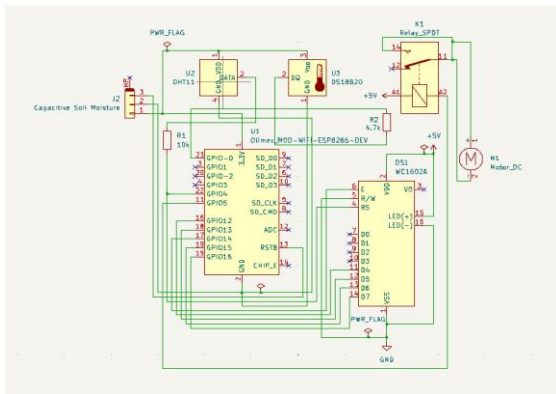
Gambar 4. Blok Diagram Smart Agriculture IoT

Perangkat utama pada diagram blok Smart Agriculture ini adalah NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler dan sensor DHT11 yang berfungsi untuk mendeteksi suhu serta kelembapan udara di sekitar tanaman. Sensor DHT11 mengirimkan data digital ke NodeMCU, yang kemudian memproses dan mengirimkannya secara otomatis melalui koneksi WiFi ke platform Blynk. Melalui Blynk, data dapat dipantau secara real-time menggunakan smartphone, sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi lingkungan tanpa harus berada di lokasi secara langsung. Sistem ini juga memungkinkan penerapan otomatisasi, seperti mengaktifkan pompa air atau kipas berdasarkan ambang batas suhu dan kelembapan yang telah ditentukan, sehingga mendukung efisiensi dan keakuratan dalam pemantauan lingkungan pertanian. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian yang dilakukan oleh Pawar et al. (2023) menjelaskan bahwa integrasi Internet of Things (IoT) dengan Wireless Sensor Networks (WSN) dalam sistem pertanian cerdas dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan melalui pemantauan kondisi lingkungan secara real-time, pengiriman data nirkabel yang stabil, serta kemampuan otomatisasi yang adaptif terhadap perubahan suhu dan kelembapan. Pendekatan ini menjadi dasar pengembangan sistem Smart Agriculture yang hemat energi, responsif, dan mudah diimplementasikan untuk skala kecil hingga besar [5].

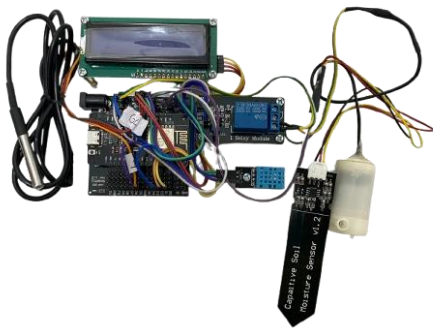
3.4 Tahapan Pengujian

Tahap pengujian pada sistem Smart Agriculture berbasis IoT dengan sensor DHT11 dilakukan untuk menilai kinerja sensor dan kestabilan sistem dalam memantau suhu serta kelembapan udara pada skala kecil di rumah menggunakan media pot atau polibag. Proses pengujian dimulai dengan menyiapkan komponen seperti NodeMCU ESP8266, sensor DHT11, kabel jumper, dan catu daya 5V. Setelah itu dilakukan perakitan rangkaian dengan menghubungkan pin VCC ke 5V, GND ke GND, dan pin data ke D4 pada NodeMCU. Sistem kemudian diprogram menggunakan Arduino IDE dengan interval pembacaan data setiap 60 detik, serta dihubungkan

ke aplikasi Blynk untuk menampilkan hasil pengukuran secara real-time melalui jaringan WiFi rumah. Penelitian serupa oleh Ellys Kumala Pramartaningthas dkk. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan NodeMCU ESP8266 dan sensor DHT11 pada sistem monitoring suhu dan kelembapan greenhouse berbasis IoT mampu bekerja dengan baik sesuai algoritma pemrograman, dengan rata-rata kesalahan pengukuran hanya 1,2% untuk suhu dan 1,17% untuk kelembapan. Hasil ini membuktikan bahwa sistem berbasis IoT menggunakan NodeMCU dan DHT11 cukup stabil, akurat, dan efisien untuk diaplikasikan dalam pemantauan lingkungan pertanian secara real-time [6].



Gambar 5. Schematic Diagram



Gambar 6. Prototipe Sistem Pertanian Cerdas

Gambar di atas menampilkan prototipe dan schematic perangkat keras sistem pertanian cerdas berbasis NodeMCU ESP8266. Komponen utamanya adalah sensor DHT11, yang berfungsi mengukur suhu serta kelembapan udara di sekitar tanaman. Data dari sensor ini dikirim ke mikrokontroler untuk diproses dan ditampilkan pada LCD 16x2, serta digunakan sebagai dasar pengendalian sistem otomatis, seperti pengaktifan pompa air melalui modul relay saat kelembapan rendah. Dengan demikian, DHT11 berperan penting dalam menjaga

kondisi lingkungan tetap optimal bagi pertumbuhan tanaman. Selain itu, sistem ini juga menunjukkan integrasi antara berbagai komponen IoT, di mana NodeMCU ESP8266 bertugas sebagai pusat kendali sekaligus pengirim data ke platform monitoring berbasis internet. Hal ini memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi suhu dan kelembapan secara real-time, sehingga proses perawatan tanaman menjadi lebih efisien dan tepat waktu. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Idris Tukan dan Azizahwati (2024), sistem monitoring berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor DHT11, sensor kelembapan tanah, dan sensor gerak PIR menggunakan NodeMCU ESP8266 terbukti mampu bekerja dengan tingkat akurasi tinggi dan kesalahan minimal pada setiap sensor. Data lingkungan yang dihasilkan divisualisasikan melalui platform Thingier.IO, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh secara efisien untuk mendukung penerapan pertanian modern yang lebih produktif dan berkelanjutan [7].



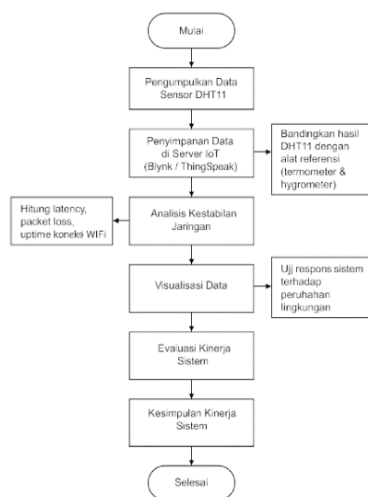
Gambar 7. Uji coba prototipe

Pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor di sekitar pot atau polibag berisi tanaman untuk memantau kondisi udara lingkungan selama 14 hari. Data suhu dan kelembapan dikirim otomatis ke dashboard Blynk setiap menit untuk diamati perubahan nilainya pada pagi, siang, dan malam hari. Selain itu, dilakukan pemantauan kestabilan koneksi jaringan agar data tetap terkirim tanpa gangguan. Selama proses berjalan, diperhatikan juga ketahanan sistem terhadap penggunaan jangka panjang, termasuk kemampuan sensor dan NodeMCU bekerja terus-menerus tanpa error. Hasil pengujian ini digunakan untuk menilai keandalan sistem secara keseluruhan dan memberikan dasar bagi pengembangan sistem pertanian cerdas yang lebih stabil dan efisien. Penelitian yang dilakukan oleh Riski Mardhatillah, Eka Daryanto, dan Desyanti (2024) juga menunjukkan hasil serupa, di mana sistem pemantauan suhu dan kelembapan

berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP8266 dan sensor DHT11 mampu mengirimkan data secara real-time ke aplikasi Blynk dengan tingkat kestabilan tinggi dan delay pengiriman data yang sangat kecil. Sistem tersebut terbukti efisien dalam memantau kondisi lingkungan tanaman dan memberikan dasar kuat untuk pengembangan sistem pertanian cerdas berkelanjutan di masa depan [8].

3.5 Analisis dan Evaluasi Data

Proses analisis dilakukan melalui tahapan yang meliputi pengumpulan data suhu dan kelembapan menggunakan sensor DHT11 yang terhubung ke mikrokontroler NodeMCU ESP8266, kemudian data dikirim secara berkala ke server IoT seperti Blynk atau ThingSpeak melalui jaringan WiFi untuk disimpan dan dipantau secara real-time. Hasil pengukuran dibandingkan dengan alat referensi berupa termometer dan hygrometer untuk menilai akurasi, serta dilakukan pengujian respons sistem terhadap perubahan lingkungan. Selain itu, dilakukan analisis kestabilan jaringan dengan mengukur latency, packet loss, dan uptime koneksi WiFi. Data yang diperoleh kemudian divisualisasikan dan dievaluasi untuk menilai keakuratan sensor, kestabilan jaringan, serta efektivitas pengiriman data, sehingga diperoleh kesimpulan mengenai kinerja keseluruhan sistem Smart Agriculture berbasis DHT11 dan NodeMCU ESP8266.



Gambar 8. Flowchart

Selanjutnya dilakukan analisis akurasi dengan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur standar untuk mengetahui tingkat kesalahan (error). Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa sensor DHT11 memiliki tingkat ketelitian yang baik dalam mendeteksi suhu dan kelembapan lingkungan, sebagaimana dilakukan pada penelitian sebelumnya dengan perbandingan terhadap alat ukur seperti

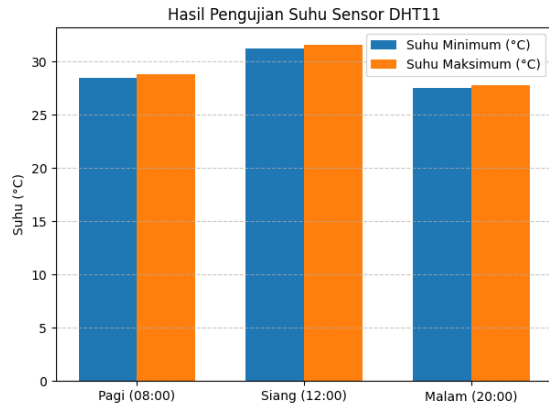
termogun dan higrometer untuk menghitung persentase error suhu dan kelembapan [1]. Tahap berikutnya yaitu analisis kestabilan jaringan, mencakup pengukuran latency, packet loss, dan uptime untuk menilai keandalan koneksi WiFi dalam sistem berbasis IoT. Data hasil pengujian kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik suhu dan kelembapan terhadap waktu guna melihat pola perubahan lingkungan secara real-time. Dari hasil tersebut dilakukan evaluasi kinerja sistem untuk menilai kemampuan sensor dan jaringan dalam mendukung sistem pertanian cerdas skala kecil. Evaluasi ini sejalan dengan prinsip penelitian sebelumnya yang menggunakan NodeMCU dan DHT11 untuk pemantauan otomatis suhu serta kelembapan, di mana sistem IoT terbukti mampu menjaga kestabilan lingkungan melalui pengendalian otomatis kipas dan pemanas guna mencapai kondisi optimal [9].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

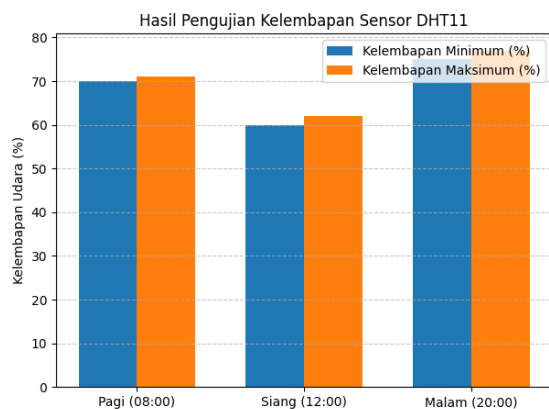
4.1 Hasil Pengujian Sistem

Penelitian ini menghasilkan sistem Smart Agriculture berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu memantau kondisi suhu dan kelembapan udara secara real-time menggunakan sensor DHT11 yang diintegrasikan dengan mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Sistem ini dirancang agar data yang diperoleh dari sensor dapat dikirim secara otomatis ke platform Blynk melalui koneksi Wi-Fi, sehingga pengguna dapat memantau kondisi lingkungan tanaman dari jarak jauh hanya melalui smartphone dengan cara yang mudah dan efisien. Dengan adanya sistem ini, pengguna tidak perlu lagi melakukan pemantauan manual terhadap suhu dan kelembapan setiap saat, sehingga waktu dan tenaga dapat digunakan secara lebih optimal. Selain itu, sistem ini juga memberikan tampilan antarmuka yang sederhana dan informatif, memudahkan pengguna dalam membaca hasil pengukuran suhu dan kelembapan secara langsung. Prinsip kerja sistem ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Azran Budi Arief dkk. (2024), yang mengembangkan sistem kendali otomatis dan monitoring suhu serta kelembapan pada rumah burung walet berbasis Blynk menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor BME280. Dalam penelitian tersebut, data hasil pembacaan sensor dikirim ke aplikasi Blynk dan divisualisasikan dalam bentuk grafik suhu serta kelembapan terhadap waktu, memungkinkan pengendalian perangkat secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan aktual. Hasil uji menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga suhu pada kisaran 26–29 °C dan kelembapan 80–90 % RH, dengan nilai rata-rata 28,16 °C dan 84,24 % RH selama empat minggu pengamatan. Temuan tersebut membuktikan bahwa

teknologi IoT berbasis Blynk efektif dalam menjaga kestabilan lingkungan secara otomatis dan berpotensi besar untuk diadaptasi pada sistem pertanian cerdas di masa mendatang [10].



Gambar 9. Hasil pengujian suhu DHT11

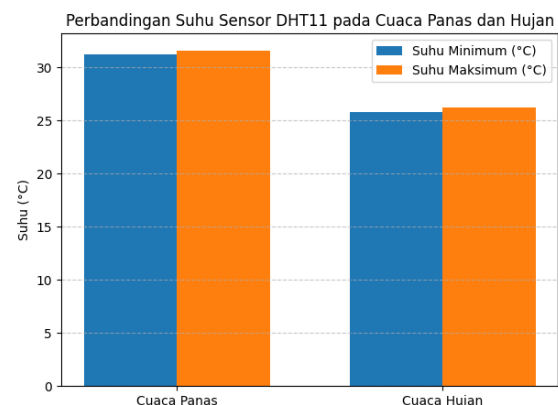


Gambar 10. Hasil pengujian kelembapan DHT11

Pengujian dilakukan dalam tiga periode waktu, yaitu pagi hari (08:00), siang hari (12:00), dan malam hari (20:00), pada pot bunga dengan kondisi lingkungan alami. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sensor DHT11 mampu mendeteksi perubahan suhu dan kelembapan sesuai variasi waktu. Pada pagi hari, suhu terukur berada pada kisaran 28,3°C–28,8°C dengan kelembapan 70%–71%; pada siang hari, suhu meningkat menjadi 31,2°C–31,6°C dengan kelembapan menurun hingga 60%–62%; sedangkan pada malam hari, suhu kembali menurun ke 27,5°C–27,8°C dengan kelembapan meningkat hingga 75%–77%. Waktu respon pengiriman data ke server Blynk rata-rata 1–2 detik, menunjukkan performa sistem yang cepat dan stabil pada setiap periode pengujian. Berdasarkan perbandingan antara hasil sensor DHT11 dan alat pembanding (termometer digital dan hygrometer), pola perubahan suhu dan kelembapan menunjukkan kesesuaian yang baik. Selisih rata-rata hasil pengukuran berada pada kisaran 0,2–0,3°C untuk suhu dan 1%–2% untuk

kelembapan, yang masih dalam batas toleransi akurasi sensor DHT11. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT11 memiliki respons yang konsisten terhadap perubahan kondisi lingkungan pada pagi, siang, dan malam hari, serta mampu beroperasi dengan baik sebagai bagian dari sistem pemantauan berbasis IoT pada lingkungan pertanian cerdas.

Pada penelitian ini, dilakukan pula percobaan untuk menguji kinerja sensor DHT11 pada dua kondisi cuaca yang berbeda, yaitu saat cuaca panas dan saat hujan. Pada kondisi panas, sensor menunjukkan peningkatan suhu udara yang signifikan disertai penurunan kelembapan secara stabil, sedangkan pada kondisi hujan, sensor mendeteksi penurunan suhu yang diikuti peningkatan kelembapan udara secara konsisten. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa DHT11 mampu merespons perubahan lingkungan dengan baik serta memberikan data yang akurat terhadap variasi suhu dan kelembapan akibat perubahan cuaca. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ilma Noor Dinanti, Agus Triyono, dan Irwansyah (2025) yang merancang sistem monitoring suhu, kelembapan, dan kualitas udara pada ruang tidur berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP32 dan sensor DHT11, MQ-135, MQ-9, serta PM2.5. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan data suhu dan kelembapan secara real-time melalui aplikasi mobile serta mengontrol kipas dan humidifier secara otomatis berdasarkan data sensor. Hasil pengujian mereka memperlihatkan perubahan suhu dan kelembapan yang stabil pada berbagai waktu pengamatan (pagi, siang, malam), membuktikan bahwa integrasi sensor DHT11 dengan sistem IoT dapat berfungsi dengan akurat dan responsif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis [11].



Gambar 11. Hasil perbandingan cuaca panas dan dingin DHT11

Grafik di atas menunjukkan hasil pengujian sensor DHT11 terhadap perubahan suhu pada dua kondisi cuaca yang berbeda, yaitu cuaca panas dan cuaca hujan. Pada cuaca panas, suhu udara yang terdeteksi oleh sensor berada pada rentang 31,2°C hingga 31,6°C, menandakan bahwa sensor mampu merespons kondisi lingkungan yang kering dan bersuhu tinggi dengan baik. Sementara itu, pada cuaca hujan, suhu yang terukur menurun menjadi sekitar 25,8°C hingga 26,2°C akibat meningkatnya kelembapan udara dan berkurangnya intensitas sinar matahari. Perbedaan suhu antara kedua kondisi tersebut mencapai sekitar 5–6°C, yang menunjukkan bahwa sensor DHT11 memiliki sensitivitas yang baik dalam mendeteksi perubahan suhu lingkungan dan dapat diandalkan untuk digunakan dalam sistem Smart Agriculture berbasis Internet of Things (IoT).

4.2 Analisis Data dan Kinerja Sistem

Untuk mengetahui performa sensor DHT11 dalam mendeteksi perubahan suhu dan kelembapan udara pada berbagai kondisi lingkungan, dilakukan pengujian pada tiga periode waktu yang berbeda, yaitu pagi, siang, dan malam hari. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan sensor dalam merespons fluktuasi suhu serta kelembapan yang terjadi secara alami dalam satu siklus harian. Hasil pengukuran yang diperoleh selama pengujian disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Tabel Pengujian Sensor DHT11.

Waktu Pengujian	Suhu Udara (°C)	Kelembapan Udara (%)
Pagi (08:00)	28.5 – 28.8	70 – 71
Siang (12:00)	31.2 – 31.6	60 – 62
Malam (20:00)	27.5 – 27.8	74 – 76

Hasil penelitian menunjukkan pengukuran suhu dan kelembapan udara menggunakan sensor DHT11 pada tiga periode waktu yang berbeda, yaitu pagi, siang, dan malam hari. Berdasarkan hasil tersebut, terlihat adanya perubahan nilai suhu dan kelembapan yang signifikan sesuai dengan kondisi lingkungan pada masing-masing waktu pengujian. Pada pagi hari (08:00), suhu udara terukur berada pada kisaran 28,5°C–28,8°C, sedangkan kelembapan udara berada pada rentang 70%–71%. Kondisi ini menunjukkan bahwa udara masih relatif sejuk dan lembap karena intensitas sinar matahari belum terlalu tinggi. Memasuki siang hari (12:00), suhu udara meningkat menjadi 31,2°C–31,6°C, sementara kelembapan menurun ke kisaran 60%–62%. Kenaikan suhu ini disebabkan oleh meningkatnya radiasi matahari, sedangkan penurunan kelembapan terjadi akibat penguapan air yang lebih cepat pada suhu tinggi. Pada malam hari (20:00), suhu udara menurun kembali menjadi 27,5°C–27,8°C, dan kelembapan meningkat hingga

75%–77%. Kondisi ini mencerminkan pendinginan udara akibat berkurangnya paparan sinar matahari serta peningkatan kadar uap air di udara. Hasil ini sejalan dengan penelitian Syaelan Raka Pramuja Ananda dkk. (2025) yang merancang sistem monitoring dan kontrol otomatis pada greenhouse hidroponik berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor DHT11, di mana sistem berhasil menjaga kestabilan suhu dan kelembapan secara real-time serta mengatur kipas dan pompa air secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor. Penelitian tersebut membuktikan bahwa sensor DHT11 mampu memberikan data suhu dan kelembapan dengan akurasi tinggi dan respons cepat terhadap perubahan lingkungan di berbagai waktu pengujian [12].

Pengujian selanjutnya dilakukan di polibag yang berisi tanaman yang siap dijadikan objek uji coba selama 1x24 jam untuk mengetahui kinerja sensor DHT11 secara lebih akurat ketika terkena pengaruh air, seperti pada kondisi lingkungan yang lembap atau saat terjadi hujan, serta pada kondisi cuaca panas yang menyebabkan tanah mengalami kekeringan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat sejauh mana sensor mampu mempertahankan akurasi pengukuran suhu dan kelembapan meskipun berada dalam kondisi udara yang mengandung uap air tinggi maupun saat kelembapan rendah akibat panas. Dengan demikian, hasil pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang stabilitas dan ketahanan sensor DHT11 terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hasil pengujian sensor DHT11 pada kondisi cuaca panas dan saat terkena air (hujan) ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

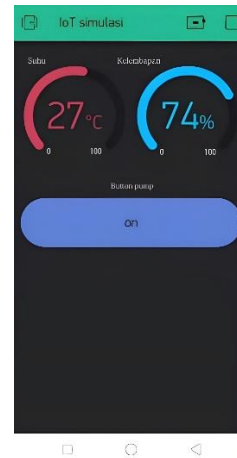
Tabel 3. Pengujian sensor DHT11 pada kondisi cuaca.

Kondisi Cuaca	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)
Cuaca Panas	31.2	31.6
Cuaca Hujan	25.8	26.2

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa suhu udara yang terdeteksi oleh sensor DHT11 mengalami perbedaan signifikan antara kondisi cuaca panas dan hujan. Pada saat cuaca panas, suhu yang terukur berada pada kisaran 31°C–31,5°C, sedangkan saat hujan menurun menjadi sekitar 25,5°C–26°C. Penurunan suhu ini menunjukkan bahwa sensor DHT11 mampu merespons perubahan suhu lingkungan secara akurat. Selain itu, hasil ini juga memperlihatkan bahwa sensor tetap berfungsi dengan baik meskipun terkena kelembapan tinggi akibat air hujan, sehingga dapat disimpulkan bahwa DHT11 memiliki ketahanan dan stabilitas

pengukuran yang baik dalam berbagai kondisi cuaca. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Agustan Latif dkk. (2025) yang mengembangkan framework Internet of Things (IoT) berbasis real-time untuk pemantauan beban, suhu, dan performa energi pada proses pengeringan gabah. Dalam penelitian tersebut, sensor DHT11 diintegrasikan bersama load cell HX711 menggunakan sistem closed-loop untuk memantau suhu dan kelembapan pada lima titik strategis ruang pengeringan secara terus-menerus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan suhu pada kisaran 73–77°C dan menghasilkan akurasi deteksi kelembapan dengan rata-rata kesalahan hanya $\pm 1,92\%$, membuktikan bahwa DHT11 memiliki kemampuan yang andal untuk bekerja pada kondisi lingkungan dengan fluktuasi suhu dan kelembapan tinggi [13]. Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sensor DHT11 mampu mendeteksi perubahan suhu dan kelembapan dengan baik sesuai dinamika waktu harian. Nilai yang diperoleh menggambarkan kondisi lingkungan alami yang wajar, dengan suhu tertinggi pada siang hari dan kelembapan tertinggi pada malam hari. Hal ini membuktikan bahwa sensor DHT11 bekerja responsif dan akurat dalam sistem Smart Agriculture berbasis IoT menggunakan aplikasi Blynk untuk pemantauan data. Hasil ini sejalan dengan penelitian Zuhijayanto dan Abdul Fadlil (2022) yang menunjukkan bahwa sensor DHT11 memiliki akurasi 96,91% untuk suhu dan 87,61% untuk kelembapan pada sistem monitoring tanaman tomat berbasis IoT [14]. Aplikasi ini berfungsi sebagai antarmuka pengguna (user interface) yang menampilkan data hasil pengukuran suhu dan kelembapan dari sensor DHT11 secara real-time, yang dikirim melalui modul mikrokontroler NodeMCU ESP8266 menggunakan koneksi Wi-Fi. Aplikasi ini tidak hanya menampilkan data secara visual, tetapi juga memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi lingkungan secara terus-menerus dari jarak jauh menggunakan smartphone, sehingga meningkatkan efisiensi dan kenyamanan dalam pengawasan sistem Smart Agriculture berbasis IoT. Konsep ini sejalan dengan penelitian Muhammad Abbas Khan dkk. (2022) yang mengembangkan sistem otomasi rumah pintar berbasis Android menggunakan teknologi Internet of Things (IoT). Dalam penelitian tersebut, aplikasi mobile dirancang agar pengguna dapat memantau dan mengendalikan berbagai perangkat rumah tangga melalui jaringan Wi-Fi dengan antarmuka yang intuitif, responsif, dan mudah digunakan. Sistem tersebut memanfaatkan mikrokontroler ESP8266 dan Raspberry Pi untuk menghubungkan sensor serta aktuator dengan aplikasi, memungkinkan pemantauan dan pengendalian perangkat secara real-time melalui

smartphone. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa penggunaan aplikasi berbasis Android dalam sistem IoT memberikan performa komunikasi yang stabil, waktu respon yang cepat, dan kemudahan akses bagi pengguna, yang juga menjadi prinsip utama dalam pengembangan sistem pemantauan suhu dan kelembapan pada penelitian ini [15]



Gambar 12. Tampilan aplikasi IoT simulasi Blynk

Pada tampilan tersebut menunjukkan antarmuka dari aplikasi simulasi Internet of Things (IoT) yang digunakan untuk memantau suhu dan kelembapan lingkungan secara real-time serta mengendalikan pompa air secara otomatis. Tampilan aplikasi menampilkan dua indikator utama, yaitu suhu dan kelembapan, di mana indikator suhu menunjukkan nilai 27°C yang menandakan kondisi udara normal, sementara indikator kelembapan menunjukkan nilai 74% yang menggambarkan udara cukup lembap dan ideal untuk pertumbuhan tanaman. Selain itu, terdapat tombol “Button pump” dengan status “on” yang berfungsi untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa air secara manual sesuai kebutuhan. Sistem seperti ini umumnya diterapkan dalam proyek Smart Agriculture, di mana data sensor dikirim ke aplikasi melalui koneksi Wi-Fi secara real-time, memungkinkan pengendalian irigasi otomatis saat kelembapan tanah berada di bawah ambang batas tertentu guna menjaga kondisi ideal bagi tanaman. Prinsip kerja tersebut sejalan dengan penelitian Rudra Kumar Mishra dkk. (2023) yang merancang sistem IoT-Based Smart Greenhouse and Smart Farming menggunakan Arduino Uno, NodeMCU, dan Blynk platform. Sistem tersebut berhasil mengintegrasikan berbagai sensor seperti DHT11, dan flame sensor untuk pemantauan suhu, kelembapan, intensitas cahaya, serta keamanan, yang seluruhnya dapat dipantau dan dikendalikan melalui aplikasi Blynk secara real-time, membuktikan efektivitas penerapan IoT dalam otomasi pertanian modern [16].

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem Smart Agriculture berbasis Internet of Things (IoT) berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan menggunakan sensor DHT11, NodeMCU ESP8266, dan platform Blynk sebagai media pemantauan suhu serta kelembapan udara secara real-time. Sistem ini mampu mengirimkan data hasil pengukuran sensor ke aplikasi Blynk melalui koneksi Wi-Fi, sehingga pengguna dapat memantau kondisi lingkungan tanaman dari jarak jauh secara mudah dan efisien melalui perangkat smartphone. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT11 memiliki kemampuan yang baik dalam mendeteksi perubahan suhu dan kelembapan udara sesuai dengan dinamika waktu harian. Nilai suhu tertinggi terdeteksi pada siang hari, sedangkan kelembapan tertinggi terjadi pada malam hari, yang menandakan sensor bekerja secara responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Tingkat akurasi pengukuran yang diperoleh cukup tinggi, dengan selisih rata-rata sekitar $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2\%$ untuk kelembapan, serta waktu respons yang cepat berkisar antara 1–2 detik, sehingga sistem mampu menampilkan data secara stabil dan real-time.

Kelebihan sistem ini terletak pada kemampuannya untuk beroperasi dengan biaya implementasi yang rendah dan konsumsi daya yang efisien, menjadikannya cocok digunakan pada sistem pertanian skala kecil. Selain itu, integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak dilakukan dengan mudah, serta antarmuka aplikasi Blynk memberikan tampilan yang sederhana namun informatif bagi pengguna. Pemantauan jarak jauh berbasis IoT ini juga memberikan kemudahan bagi petani atau pengguna dalam mengontrol kondisi lingkungan tanaman tanpa perlu melakukan pengukuran manual setiap saat. Namun demikian, sistem ini juga memiliki beberapa keterbatasan, antara lain keterbatasan akurasi sensor DHT11 pada kondisi ekstrem dengan suhu tinggi atau kelembapan sangat rendah, serta ketergantungan pada kestabilan jaringan Wi-Fi yang dapat memengaruhi kecepatan dan kontinuitas pengiriman data ke server Blynk.

Untuk pengembangan selanjutnya, sistem ini memiliki potensi besar untuk ditingkatkan guna mendukung fungsi irigasi otomatis berdasarkan kondisi aktual media tanam. Selain itu, integrasi penyimpanan data berbasis cloud dapat diterapkan untuk memantau tren perubahan suhu dan kelembapan secara historis, sehingga pengguna dapat melakukan analisis jangka panjang terhadap pola pertumbuhan tanaman. Penggunaan kecerdasan juga sangat direkomendasikan untuk diterapkan di masa depan, misalnya untuk melakukan prediksi

kebutuhan air, rekomendasi penyiraman optimal, serta pengaturan sistem ventilasi atau pendingin secara otomatis berdasarkan data sensor yang terkumpul. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya membuktikan bahwa sistem berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi pemantauan lingkungan tanaman, tetapi juga membuka peluang besar bagi penerapan teknologi cerdas dalam pengelolaan pertanian modern yang berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. I. & N. B. C. Paschal Uchenna Chinedu, "An Internet of Things (IoT) Based Smart Agriculture Monitoring System for Enhanced Productivity in a Controlled Farm Environment," *Journal of Science Technology and Education*, pp. 10(3), 122–136, 2022.
- [2] R. N. F. d. M. R. A. A. S. Hadi, "Implementasi Internet of Things (IoT) pada Smart Agriculture untuk Pemantauan Kondisi Lingkungan Pertanian," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, pp. 11(2), 89–97, 2023.
- [3] S. P. B. & J. I. Seo, "Temperature and Humidity Monitoring in Hydroponic Cultivation Based on Internet of Things: Dataset Development for Smart Agriculture," *Jurnal SISFOKOM (Sistem Informasi dan Komputer)*, no. DOI: 10.32736/sisfokom.v14i1.2311., pp. 14(1), 63–68, 2025.
- [4] Y. A. W. W. & A. K. Aris Sudaryanto, "Accuracy of DHT11 Temperature and Humidity Sensor in Egg Incubator," *Informatics, Electrical and Electronics Engineering (Infotron)*, no. SSN 2798-0197., pp. 4(1), 1–6, 2024.
- [5] P. K. A. & K. K. Pawar, "Internet of Things and Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey," *Sustainability*, no. DOI: 10.3390/su15054229, pp. 15(5), 1–22, 2023.
- [6] S. M. & R. S. M. Ellys Kumala Pramartaningthyas, "Rancang Bangun Sistem Kontrol dan Monitoring Suhu dan Kelembaban Tanah pada Greenhouse berbasis Internet of Thing menggunakan Aplikasi Telegram," *QOMARUNA Journal of Multidisciplinary Studies*, pp. 1(1), 67–77, 2023.
- [7] M. I. T. & Azizahwati, "Monitoring Tools Using DHT11 Sensor, Soil Moisture Sensor and Motion Sensor," *Journal of Frontier Research in Science and Engineering (JoFRISE)*, pp. 2(4), 38–48, 2024.

- [8] E. D. & D. Riski Mardhatillah, "Monitoring Kelembapan dan Suhu pada Tanaman Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Media Informatika Budidarma (MIB)*, no. DOI: 10.30865/mib.v8i6.621, pp. 8(6), 2904–2912, 2024.
- [9] A. F. S. & A. T. Nugraha, "Implementation of the DHT11 Sensor for Monitoring and Control in Poultry Farming," *Journal of Electrical, Marine and Its Application Technology*, p. 1–12, 2024.
- [10] W. & M. U. H. Azran Budi Arief, "Rancang Bangun Sistem Kendali Otomatis dan Monitoring Suhu dan Kelembapan pada Rumah Burung Walet Berbasis Blynk," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, pp. Vol. 12 No. 2, pp. 1279–1285, 2024.
- [11] A. T. & I. Ilma Noor Dinanti, "Monitoring Suhu, Kelembaban, dan Kualitas Udara pada Ruang Tidur Berbasis IoT," *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, no. E-ISSN 2988-1986, pp. Vol. 10, No. 4, 2025.
- [12] A. A. Y. R. Z. & N. M. R. Syaelan Raka Pramaja Ananda, "Sistem Monitoring dan Kontrol Otomatis pada Greenhouse Hidroponik," *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis (SENATIB) 2025, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Duta Bangsa Surakarta*, no. ISSN 2962-1968, p. 1159–1167, 2025.
- [13] S. & M. A. Y. Agustan Latif, "Real-Time Framework for Sustainable IoT-Based Grain Drying Integrated Load, Temperature, and Energy Performance Monitoring," *Instrumentation Measure Métrologie (I2M)*, no. DOI: 10.18280/i2m.240301, pp. Vol. 24, No. 3, pp. 195–206, 2025.
- [14] Z. & A. Fadlil, "Desain Sistem Monitoring dan Penyiraman Tanaman Tomat Berbasis Internet of Things (IoT)," *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, pp. Vol. 4, No. 2, pp. 94–104, 2022.
- [15] M. A. I. N. A. A. A.-S. M. H. D. Y. R. S. E. E. & S. M. Khan, "Smart Android-Based Home Automation System Using Internet of Things (IoT)," *Sustainability*, no. 14(17), 10717 DOI: 10.3390/su141710717, 2022.
- [16] R. K. S. M. A. K. N. P. R. & K. S. Mishra, "IoT-Based Smart Greenhouse and Smart Farming," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, no. Issue V, DOI: 10.22214/ijraset.2023.53044, pp. Vol. 11, pp. 5838–5844, 2023.