

**PENGEMBANGAN SISTEM *HYBRID SMART FARMING* BERBASIS
RESEARCH AND DEVELOPMENT SYSTEM MELALUI INTEGRASI
KALIBRASI SENSOR, IoT DAN OTOMASI LOKAL**

DISERTASI

Oleh

DODI YUDO SETYAWAN



**PROGRAM DOKTOR MIPA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGEMBANGAN SISTEM *HYBRID SMART FARMING* BERBASIS *RESEARCH AND DEVELOPMENT SYSTEM* MELALUI INTEGRASI KALIBRASI SENSOR, IoT DAN OTOMASI LOKAL

Oleh

Dodi Yudo Setyawan

Smart Farming menghadapi berbagai tantangan seperti perubahan iklim yang tidak menentu, keterbatasan sumber daya manusia, dan efisiensi penggunaan air serta nutrisi. Penggunaan *greenhouse* menawarkan solusi terhadap tantangan tersebut, namun masih bergantung pada intervensi manusia yang intensif. Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dan otomasi lokal menjanjikan peningkatan kendali mikro-lingkungan secara otomatis, namun optimalisasi integrasi keduanya masih menghadapi isu akurasi pemantauan, kecepatan respons, dan keberlanjutan operasional. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem *hybrid* pada *smart greenhouse* dengan pendekatan *research and development system* untuk meningkatkan akurasi pemantauan, mempercepat respons terhadap perubahan kondisi, dan menjaga keberlanjutan operasional meski terjadi gangguan konektivitas.

Metode penelitian mengikuti tahap yang meliputi tinjauan literatur sistematis, perancangan arsitektur *hybrid* dengan modul *edge control* Arduino Mega dan modul IoT NodeMCU ESP8266 berbasis HTTP, kalibrasi lima jenis sensor suhu udara, kelembaban udara, kelembaban tanah, pH tanah dan aliran air menggunakan regresi linier dengan pengambilan sampel berpasangan, serta pengujian performa sistem melalui simulasi kondisi *online* dan *offline*, pengukuran waktu respons kontrol *edge* dan uji reliabilitas serta *availability backend* IoT menggunakan Apache JMeter.

Kalibrasi sensor menunjukkan penurunan nilai *RMSE* dari rata rata 0,1345 menjadi 0,1176 untuk sensor suhu DHT11 sehingga akurasi meningkat 12,61%. Sensor kelembaban udara mencatat penurunan *RMSE* dari 0,1375 menjadi 0,1281 yang berarti peningkatan akurasi 6,82%. Sensor pH tanah berhasil menurunkan *RMSE* dari 0,3753 menjadi 0,0180 sehingga akurasi naik 64,26%. Sensor kelembaban tanah mengalami penurunan *RMSE* dari 1,9843 menjadi 1,7783 dengan peningkatan akurasi 10,38% dan sensor aliran air menurun dari 1,4363 menjadi 1,4362 yang setara dengan peningkatan akurasi 0,01%. Pengujian mekanisme *fallback hybrid control* melibatkan *threshold* kelembaban tanah 50%, durasi penyiraman 300 detik, siklus *heartbeat* HTTP setiap 60 detik dan *timeout* deteksi koneksi satu detik. Hasil simulasi pemutusan koneksi selama 1800 detik memperlihatkan *RMSE* kelembaban tanah 1,77, waktu deteksi *timeout* rata rata satu detik dan waktu *recovery* ke mode *online* rata-rata dua detik.

Uji beban *backend* IoT dengan 20 pengguna virtual menghasilkan *reliability* 100% dan *availability* tanpa *downtime* pada beban terbatas. Rata-rata waktu respons *endpoint* berkisar antara 235 sampai 726 milidetik untuk metode *GET* dan *throughput POST* rata rata 20,18 *hits* per detik tanpa *error*. Evaluasi di dua lokasi implementasi menegaskan fleksibilitas desain dalam menghadapi variasi jaringan dan lingkungan.

Penelitian ini menegaskan efektivitas integrasi IoT dan otomasi lokal dalam *smart greenhouse* dengan peningkatan kuantitatif akurasi pemantauan, kecepatan respons dan keandalan operasional. Sistem *hybrid* ini siap diadopsi untuk mendukung pengambilan keputusan jarak jauh sekaligus memastikan kontinuitas otomatisasi saat koneksi terputus.

Kata Kunci : *Smart Farming, greenhouse, hybrid, IoT, otomasi lokal, kalibrasi*

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A HYBRID SMART FARMING SYSTEM USING A RESEARCH AND DEVELOPMENT SYSTEM APPROACH THROUGH INTEGRATION OF SENSOR CALIBRATION, IoT AND LOCAL AUTOMATION

By

Dodi Yudo Setyawan

Smart farming faces challenges such as unpredictable climate change, limited human resources, and the need for efficient water and nutrient management. Greenhouses offer a solution for microclimate control but still rely heavily on manual interventions. This quantitative study aims to develop and evaluate a hybrid system that integrates local automation and Internet of Things (IoT) technology to enhance monitoring accuracy, accelerate response times, and ensure operational continuity under connectivity disruptions.

The research methodology follows a systematic literature review, the design of a hybrid architecture featuring an Arduino Mega-based edge control module and an HTTP-based NodeMCU ESP8266 IoT module, calibration of five sensor types (air temperature, air humidity, soil moisture, soil pH, and water flow) using linear regression with paired sampling, and performance testing through online/offline simulations, edge control response time measurements, and reliability and availability assessments of the IoT backend using Apache JMeter.

Sensor calibration results demonstrate a reduction in root mean square error (RMSE) from 0.1345 to 0.1176 for the DHT11 temperature sensor, corresponding to a 12.61% accuracy improvement. The air humidity sensor's RMSE decreased from 0.1375 to 0.1281 (6.82% improvement), while the soil pH sensor's RMSE dropped from 0.3753 to 0.0180 (64.26% improvement). Soil moisture sensor calibration reduced RMSE from 1.9843 to 1.7783 (10.38% improvement), and the water flow sensor showed a slight RMSE decline from 1.4363 to 1.4362 (0.01% improvement). The hybrid fallback control test, configured with a 50% soil

moisture threshold, 300-second irrigation duration, 60-second HTTP heartbeat cycle, and one-second connection timeout, maintained soil moisture RMSE at 1.77 during 1,800 seconds of simulated disconnection, with average timeout detection of one second and the average recovery time to online mode is two seconds.

Load testing of the IoT backend with 20 virtual users resulted in 100% reliability and zero downtime under limited load conditions. Average endpoint response times ranged from 235 ms to 726 ms for HTTP GET requests, while POST throughput averaged 20.18 hits per second with no errors. Implementation evaluations at two different sites confirmed the design's flexibility in handling network and environmental variations.

These findings validate the effectiveness of integrating IoT and local automation in smart greenhouse applications by quantitatively improving monitoring accuracy, response speed, and operational reliability. The hybrid system is ready for adoption to support remote decision-making while maintaining automated control continuity during connectivity losses.

Keywords :Smart Farming, greenhouse, hybrid, IoT, local automation, calibration

Judul Disertasi : **PENGEMBANGAN SISTEM *HYBRID SMART FARMING* BERBASIS *RESEARCH AND DEVELOPMENT SYSTEM* MELALUI INTEGRASI KALIBRASI SENSOR, IoT DAN OTOMASI LOKAL**

Nama Mahasiswa : Dodi Yudo Setyawan

Nomor Pokok Mahasiswa : 2237061007

Jurusan : Doktor MIPA

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Prof. Warsito, S.Si, DEA, Ph.D.

NIP.197102121995121001

Promotor

Dr. rer. nat. Roniyus Marijunus, S.Si., M.Si.

NIP. 197703182000121003

Ko-Promotor

Dr. Ir. Sumaryo, M.Si.

NIP.196403271990031004

Ko-Promotor

2. Ketua Program Studi Doktor MIPA

Dr. Khoirin Nisa, M.Si.

NIP.197407262000032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Sekretaris : Dr. Khoirin Nisa, M.Si.
NIP. 197407262000032001

Anggota : Prof. Warsito, S.Si, DEA, Ph.D.
NIP. 197102121995121001

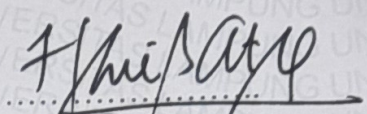
: Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si
NIP. 197703182000121003

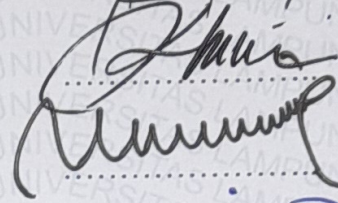
: Dr. Ir. Sumaryo, M.Si.
NIP. 196403271990031004

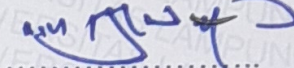
: Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.
NIP. 196510211995122001

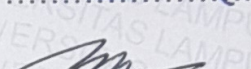
: Dr. Gurum Ahmad Pauzi, M.T.
NIP. 198010102005011002

: Prof. Dr. Iskhaq Iskandar., M.Sc.
NIP. 197210041997021001

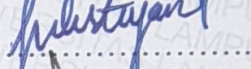

.....


.....

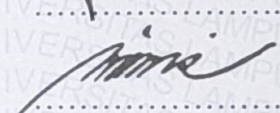

.....


.....

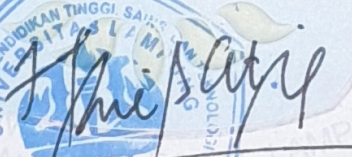

.....


.....

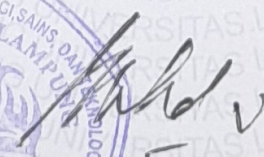

.....


.....

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.


Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

3. Direktur Program Pascasarjana.


Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal lulus ujian disertasi : 4 Agustus 2025

PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya di dalam disertasi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Bandar Lampung, 4 Agustus 2025

Yang Menyatakan



Dodi Yudo Setyawan
NPM. 2237061007

RIWAYAT HIDUP



Dodi Yudo Setyawan lahir pada tanggal 8 Oktober 1981. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara, dari pasangan Bapak Suwoto A.Md.H (almarhum) dan Ibu Sutini A.Md. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 1 Sidomulyo pada tahun 1994. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 2 Punggur hingga selesai. Kemudian, penulis menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Punggur, Lampung Tengah. Setelah itu, penulis memperoleh gelar Sarjana Sains dari Program Studi Fisika, Universitas Lampung pada tahun 2006. Selanjutnya, penulis meraih gelar Magister Teknologi Informasi dari Institut Informatika dan Bisnis Darmajaya pada tahun 2011. Selama menempuh pendidikan S2 dan S3, penulis memperoleh beasiswa dari Yayasan Alfian Husein.

Saat ini, penulis bekerja sebagai Dosen pada Program Studi S1 Sistem Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Institut Informatika dan Bisnis Darmajaya. Minat penelitian penulis berfokus pada bidang sensor, otomasi, dan *Internet of Things* (IoT) yang diimplementasikan khususnya pada bidang pertanian.

Penulis dapat dihubungi melalui email di alamat: dodi@ darmajaya.ac.id

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga dapat diselesaikan Disertasi ini. Dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Doktor MIPA, Universitas Lampung maka Disertasi ini disusun berdasarkan rangkaian penelitian yang sudah dilakukan. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan Disertasi ini, sangatlah sulit untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.IPM. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
3. Dr. Khoirin Nisa, M.Si. selaku Ketua Program Studi S3 MIPA Universitas Lampung.
4. Prof. Warsito, S.Si, DEA, Ph.D. selaku Promotor Disertasi.
5. Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si. dan Dr. Ir. Sumaryo, M.Si. selaku Ko-Promotor Disertasi.
6. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T. dan Dr. Gurum Ahmad Pauzi, M.T. selaku dewan pembahas Internal Disertasi.
7. Prof. Dr. Iskhaq Iskandar., M.Sc selaku pembahas Eksternal Disertasi.
8. Teman-teman Program Studi Doktor MIPA Unila.
9. Rekan-rekan Dosen Institut Informatika dan Bisnis Darmajaya.
10. Seluruh civitas akademika dari Unila yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan, semoga Allah membalas amal kebaikan kita semua.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu dan semoga Disertasi ini membawa manfaat bagi pengembang ilmu pengetahuan. Penulis menyadari adanya keterbatasan pengetahuan maupun kekurangan dalam penyusunan disertasi ini. Oleh karena itu,

kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk perbaikan penelitian berikutnya. Akhirnya, penulis berharap penelitian ini dapat berkontribusi dalam mengembangkan Ilmu Pengetahuan.

Bandar Lampung, 4 Agustus 2025

Dodi Yudo Setyawan

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
PUBLIKASI HASIL PENELITIAN.....	xvi
SEMINAR HASIL PENELITIAN.....	xvii
 I. PENDAHULUAN.....	 1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Manfaat Penelitian.....	6
1.5. Kebaharuan Penelitian (<i>Novelty</i>).....	6
 II. TINJAUAN PUSTAKA.....	 7
2.1. <i>Systematic Literature Review</i> (SLR) pada jurnal terindeks Scopus.....	7
2.1.1 <i>Metode Review</i>	7
2.1.2 <i>Hasil Review</i>	8
2.2. Tinjauan Literatur Nasional pada Jurnal Terakreditasi SINTA.....	11
2.3.1. Tujuan dan Konteks Tinjauan.....	11
2.3.2. <i>Metode Review</i>	12
2.3.3. <i>Hasil Review</i>	14
2.3.4. Pembahasan dan Implikasi.....	16
2.2. Solusi Irigasi di <i>Greenhouse</i>	17
2.3. Pengendalian Iklim Mikro dan Efisiensi Energi di <i>Greenhouse</i>	17
2.4. Integrasi Energi Terbarukan dan <i>Greenhouse</i>	18
2.5. Sistem Pendukung Keputusan, IoT, dan <i>Edge Computing</i> dalam <i>Smart Farming</i>	19
2.6. Sensor dan Sistem Akuisisi Data untuk Pemantauan Tinggi dan Volume Cairan.....	20
2.7. Sistem IoT dan Otomasi.....	21
 III. METODE PENELITIAN.....	 23
3.1. Waktu dan Tempat.....	23
3.2. Alat dan Bahan.....	23

3.2.1. Alat.....	23
3.2.2. Bahan.....	24
3.3. Metode.....	26
3.3.1. Desain Sistem <i>Hybrid</i>	26
3.3.2. Persiapan dan Instalasi.....	27
3.3.2.1. Instalasi Perangkat Keras.....	27
3.3.3. Prosedur Kalibrasi Sensor.....	28
3.3.3.1. Prinsip Umum.....	28
3.3.3.2. Kalibrasi Per Jenis Sensor.....	29
3.3.4. Pengumpulan Data dan Pengujian Empiris.....	30
3.3.5. Prosedur Analisis Data.....	32
3.3.6. Validasi dan Verifikasi.....	33
3.3.7. Dokumentasi Prosedur.....	34
3.3.8. Etika dan Keamanan Data.....	34
3.3.9. Alur Kerja dan Jadwal.....	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1. Sistem Hybrid.....	35
4.1.1. Implementasi keras dan Pengaturan Awal.....	36
4.1.2. Pengumpulan Data dan Kontrol <i>Real-Time</i>	36
4.1.3. Pemantauan dan Analisis <i>Cloud</i>	36
4.1.4. Mekanisme <i>Fallback</i> Saat Koneksi Terputus.....	37
4.2. Model <i>Sustainability Hybrid Automation</i>	38
4.3. Kalibrasi Sensor DHT11 (Suhu Udara).....	45
4.4. Kalibrasi Sensor DHT11 (Kelembaban Udara).....	47
4.5. Kalibrasi Sensor pH Tanah.....	50
4.6. Kalibrasi Sensor <i>Water Flow</i>	53
4.7. Kalibrasi sensor kelembaban tanah.....	57
4.8. Pengambilan data sensor NPK di <i>Greenhouse</i>	60
4.9. Peningkatan Akurasi Sensor.....	61
4.10. <i>Mobile Apps</i>	64
4.11. Hasil Uji Performa <i>Web</i> Metode <i>GET</i>	69
4.12. Hasil Uji Performa <i>Web</i> metode <i>POST</i>	71
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	73
5.1. Kesimpulan.....	73
5.2. Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Data kalibrasi sensor DHT11 (suhu).....	45
Tabel 4.2 Data kalibrasi sensor DHT11 (kelembaban).....	48
Tabel 4.3 Data kalibrasi sensor pH.....	51
Tabel 4.4 Data kalibrasi sensor <i>water flow</i>	54
Tabel 4.5 Data kalibrasi sensor kelembaban tanah.....	58
Tabel 4.6 Perbandingan <i>Blynk</i> , <i>ThingSpeak</i> , dan <i>Android Studio</i>	67

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Proses SLR.....	8
Gambar 2.2 Penggunaan sensor pada sistem <i>smart farming</i> berbasis IoT.....	9
Gambar 2.3 <i>Quartile Ranking</i> artikel.....	9
Gambar 2.4 Tren topik penelitian dari tahun 2017 sampai dengan 2022.....	10
Gambar 2.5 Statistik jurnal.....	11
Gambar 2.6 Statistik <i>ranking</i> jurnal nasional.....	13
Gambar 2.7 Tren artikel dengan topik IoT, otomasi, dan <i>smart farming</i>	14
Gambar 2.8 Sistem IoT (Khodadadi et al., 2017; Kefalakis et al., 2017).....	22
Gambar 2.9 Sistem otomasi (Sharma, 2017a).....	22
Gambar 3.1 Sistem <i>hybrid</i>	26
Gambar 4.1 Sistem <i>hybrid</i> di <i>greenhouse</i> IoT Center Darmajaya.....	35
Gambar 4.2 Sistem <i>hybrid</i> di <i>greenhouse</i> Fisika Unila.....	35
Gambar 4.3 <i>Sustainability hybrid automation</i>	43
Gambar 4.4 Grafik kalibrasi sensor DHT11 (suhu).....	46
Gambar 4.5 Grafik kalibrasi sensor DHT11 (kelembaban).....	49
Gambar 4.6 Grafik kalibrasi sensor pH tanah.....	52
Gambar 4.7 Grafik kalibrasi sensor <i>water flow</i>	56
Gambar 4.8 Grafik kalibrasi sensor kelembaban tanah.....	59
Gambar 4.9 Pengambilan data sensor NPK.....	60
Gambar 4.10 Peningkatan akurasi sensor.....	62
Gambar 4.11 <i>Mobile App Icon</i>	65
Gambar 4.12 <i>Mobile App smart farming</i>	66
Gambar 4.13 Pengujian performa <i>web</i> metode <i>GET</i>	69
Gambar 4.14 Pengujian performa <i>web</i> metode <i>POST</i>	71

DAFTAR LAMPIRAN

1. Artikel Publikasi
2. Sertifikat Seminar Nasional dan Internasional

PUBLIKASI HASIL PENELITIAN

1. D. Y. Setyawan, W. Warsito, R. Marjunus, N. Nurfiana, and R. Syahputri, “A *Systematic Literature Review: Internet of Things on Smart Greenhouse*,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 13, no. 12, 2022, doi: 10.14569/IJACSA.2022.0131280.
2. D. Y. Setyawan, W. Warsito, R. Marjunus, and S. Sumaryo, “A *Novel Controlling System for Smart Farming-based Internet of Things (IoT)*,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 5, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0150563.
3. D. Y. Setyawan, W. Warsito, R. Marjunus, and S. Sumaryo, “Analisis Prosedur Koneksi Ulang Sistem Internet Of Things (IoT) Studi Kasus Pada Pertanian Cerdas,” *TEKNIKA*, vol. 17, no. 2.
4. D. Y. Setyawan, W. Warsito, R. Marjunus, and S. Sumaryo, “Automasi dan *Internet of Things (IoT)* pada Pertanian Cerdas: *review* artikel pada Jurnal Terakreditasi Kemenristek”. Prosiding Semnastek, 30 April 2024.
5. D. Y. Setyawan, W. Warsito, R. Marjunus, and S. Sumaryo, “Otomasi *hybrid* pada Sistem Pertanian Cerdas Berbasis *Internet of Things (IoT)*,” *TEKNIKA*, vol. 18, no. 2.

SEMINAR HASIL PENELITIAN

1. *The First Jambi International Conference on Engineering, Science and Technology (#1 Jicets) 2023*. Tanggal 1 November 2023. Universitas Jambi.
2. *East-Asian Association for Science Education (EASE) and International Conference on Mathematics Education and Science Education (ICMScE)*. Tanggal 8 s/d 10 Juli 2024. *Hybrid Conference in* Universitas Pendidikan Indonesia.
3. Seminar Bersama FMIPA Universitas Lampung 2023 “Sinergitas Sains Alam, Matematika, dan Komputer Dalam Pengelolaan dan Pemanfaatan Sumber Daya Alam yang Berkesinambungan”. Tanggal 24-25 Oktober 2023. Universitas Lampung.
4. Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2024 (SEMNASTEK 2024) Fakultas Teknik dan Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Jakarta. Tanggal 30 April 2024. Universitas Muhammadiyah Jakarta.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pertanian modern saat ini tengah menghadapi tantangan global yang semakin kompleks. Penduduk dunia mengalami peningkatan secara signifikan ditambah maraknya perubahan iklim ekstrim serta degradasi lahan subur akibat urbanisasi dan kerusakan lingkungan menyebabkan tekanan yang begitu besar pada sistem produksi pangan. Badan PBB memprediksi bahwa populasi manusia akan mencapai sekitar 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050 (FAO, 2018). Produksi pangan global diperkirakan harus meningkat sekitar 60–70% dari kondisi saat ini untuk mampu memenuhi kecukupan pangan sebanyak itu (FAO, 2009). Sementara lahan pertanian produktif terus menyusut akibat perubahan fungsi lahan dan menurunnya kualitas lingkungan, sehingga tercipta kesenjangan antara permintaan dan kapasitas produksi. Para ahli pun menilai bahwa metode konvensional tidak akan sanggup mengimbangi lonjakan kebutuhan pangan tersebut tanpa adanya inovasi dan transformasi mendasar (Robinson, 2024).

Solusi inovatif dibutuhkan untuk mengatasi tantangan tersebut sehingga sektor pertanian dapat meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutannya. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat ialah konsep *smart farming* atau konsep pertanian yang menggabungkan teknologi informasi, otomasi, serta *Internet of Things* (IoT) ke dalam aktivitas budidaya. *Smart farming* mengaplikasikan sensor, jaringan komunikasi, dan sistem kendali otomatis untuk mendukung pengambilan keputusan berlandaskan data (Mansoor *et al.*, 2025). Melalui pendekatan cerdas ini, penggunaan sumber daya seperti air, pupuk, dan

tenaga dapat dioptimalkan secara cerdas, dan praktik budidaya disesuaikan secara presisi sesuai kebutuhan tanaman. Implementasi IoT dan otomasi memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara nyata dan waktu yang tepat, sehingga diharapkan dapat meningkatkan hasil produksi dan mengurangi pemborosan sumber daya. Penerapan *smart greenhouse* dilaporkan mampu meningkatkan hasil panen dibandingkan *greenhouse* yang dikendalikan secara manual dan efisiensi penggunaan air juga lebih baik pada sistem otomatis *smart greenhouse* mampu menghemat ~16,5% air dibanding cara konvensional (Kirci *et al.*, 2022). *Smart farming* menawarkan potensi besar untuk memenuhi kebutuhan pangan masa depan secara lebih efisien dan berkelanjutan.

Smart greenhouse adalah salah satu implementasi nyata dari *smart farming* di mana IoT dan otomasi diterapkan dalam lingkungan budidaya tertutup. Berbagai sensor IoT ditempatkan di dalam *smart greenhouse* untuk memantau parameter iklim mikro seperti suhu, kelembaban udara, intensitas cahaya, dan kelembaban tanah secara *real-time* (Volosciuc *et al.*, 2024). Data dari sensor-sensor ini dikirim ke pusat kontrol, dan sistem otomatis akan secara mandiri mengatur perangkat-perangkat aktuator berdasarkan data yang diterima. Misalnya, sistem dapat mengaktifkan penyiraman atau irigasi, kipas ventilasi, lampu pertumbuhan, bahkan pemanas secara otomatis untuk mengoptimalkan kondisi tumbuhan di dalam *greenhouse*. Melalui algoritma kontrol yang diprogramkan, aktuator mampu merespon perubahan lingkungan dengan cepat setelah terdeteksi sensor, menjaga parameter selalu berada pada rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman (Bersani *et al.*, 2022). Sebagai contoh, ketika kelembaban udara di dalam *greenhouse* terdeteksi terlalu tinggi dan berpotensi memicu penyakit jamur, sistem otomatis dapat mengaktifkan kipas atau membuka ventilasi untuk menurunkan kelembaban sebelum kondisi itu memberikan dampak negatif. Mekanisme pemantauan dan tanggapan mandiri ini memungkinkan *smart greenhouse* mengurangi risiko kerugian panen akibat kondisi lingkungan yang berfluktuasi sekaligus menjaga kondisi pertumbuhan selalu konsisten (Shiyale *et al.*, 2020).

Perkembangan teknologi IoT dan otomasi sistem memang membuka peluang yang besar untuk meningkatkan kinerja serta efisiensi *smart greenhouse*. Namun,

tantangan baru muncul dalam hal mengintegrasikan kedua teknologi tersebut secara mendalam. Banyak implementasi *greenhouse* cerdas saat ini belum sepenuhnya mengintegrasikan perangkat IoT dan komponen otomasi, seringkali masih terpisah atau menggunakan berbagai protokol komunikasi yang tidak selaras. Integrasi yang belum komprehensif ini menimbulkan fragmentasi antar komponen sistem dan berbagai hambatan teknis (Ferrández-Pastor *et al.*, 2019). Aliran data dari sensor ke aktuator dapat terhambat bila standar komunikasi berbeda, sehingga respons sistem menjadi lambat atau tidak optimal. Selain itu, keterbatasan infrastruktur jaringan turut mempersulit integrasi IoT dan otomasi. Ketergantungan pada layanan *cloud* untuk memproses data dapat menimbulkan kelambatan respon, karena pengiriman data dan perintah kontrol melalui internet memerlukan waktu dan rentan gangguan. Di sisi lain, koneksi jaringan yang tidak stabil serta akses internet terbatas dapat menghambat pemantauan dan kontrol jarak jauh secara *real-time* (Maraveas & Bartzanas, 2021). Faktor-faktor tersebut menurunkan efektivitas serta keberlanjutan operasional *smart greenhouse*, karena sistem tidak mampu merespons perubahan lingkungan dengan cepat dan akurat.

Beberapa penelitian sebelumnya semakin menguatkan adanya kesenjangan dalam penelitian di bidang ini. Singh *et al.* (2024) menunjukkan bahwa meskipun arsitektur jaringan dan algoritma kontrol untuk *greenhouse* berbasis IoT telah berkembang pesat, integrasi yang efisien antara protokol komunikasi dan mekanisme otomasi adaptif masih menjadi permasalahan penting yang belum sepenuhnya terpecahkan. Abu *et al.* (2022) dalam kajiannya mengenai penerapan IoT untuk pertanian presisi mengungkapkan bahwa integrasi sistem otomasi untuk *smart greenhouse* belum dibahas secara mendalam, sehingga menjadi ruang penelitian yang perlu diteliti lebih lanjut. Bersani *et al.* (2022) melaporkan berbagai keterbatasan pada sistem kontrol dan pemantauan *greenhouse* konvensional, termasuk fragmentasi antar-komponen dan ketidakefisienan energi dalam operasionalnya. Selain itu, Kumar *et al.* (2024) menekankan pentingnya pengoptimalan jaringan komunikasi, sinkronisasi sensor-aktuator, serta pengurangan intervensi manusia dalam sistem otomasi *greenhouse* tanpa mengorbankan keandalannya. Temuan-temuan tersebut menggaris bawahi bahwa permasalahan integrasi IoT dan otomasi di lingkungan *greenhouse* belum

sepenuhnya terpecahkan, sehingga diperlukan pendekatan integrasi yang lebih menyeluruh (Verdouw *et al.*, 2019).

Kesenjangan tersebut coba dijabatani melalui penelitian ini lewat pengembangan model integrasi IoT dan otomasi yang bersifat holistik. Model yang diusulkan menekankan kerjasama antara protokol komunikasi IoT yang efisien dengan algoritma otomasi adaptif, sehingga komponen dalam sistem *smart greenhouse* mampu beroperasi secara terkoordinasi. Sinkronisasi yang erat diharapkan sistem tidak hanya dapat memantau kondisi dengan akurat, namun juga menjaga kelangsungan operasional *greenhouse* secara mandiri. Artinya, sistem bisa beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan lingkungan seperti kelembaban tanah dan kondisi jaringan internet melalui mekanisme kontrol cerdas tanpa bergantung bantuan manusia. Di luar itu, model integrasi ini dirancang untuk meminimalisir *latency* komunikasi dan menjaga stabilitas koneksi jaringan, sehingga keputusan kontrol dapat diambil secara nyata dengan kehandalan.

Disertasi ini hadir untuk menjawab celah di atas dengan merancang dan mengembangkan model integrasi IoT dan otomasi berbasis sinkronisasi protokol komunikasi dan mekanisme otomasi adaptif tersebut. Model ini diarahkan untuk meraih beberapa sasaran bersamaan meningkatkan akurasi pengendalian iklim mikro di dalam *greenhouse*, mengurangi ketergantungan pada intervensi manusia dalam operasional, meminimalkan ketertinggalan dalam proses kendali, serta menjaga stabilitas dan kelangsungan kinerja sistem secara keseluruhan. Guna mengevaluasi pencapaian tersebut, model yang diusulkan akan diaplikasikan di lingkungan *greenhouse* nyata dan diuji serta divalidasi secara empiris, sehingga efektivitasnya dapat dibuktikan pada skenario operasional sesungguhnya.

Melalui pengembangan model integrasi baru ini, diharapkan dapat menghasilkan kontribusi ilmiah dan praktis untuk penerapan *smart greenhouse* yang lebih tangguh. Secara teoritis, penelitian ini akan memperkaya khazanah ilmu di bidang *smart farming* dengan menawarkan kerangka integrasi IoT dan otomasi yang menekankan keberlanjutan sistem kontrol. Di sisi praktis, model integrasi yang dihasilkan diharapkan mampu meningkatkan efisiensi produksi pertanian melalui kontrol iklim mikro yang lebih akurat dan handal, sehingga mendukung

pencapaian ketahanan pangan global. Selain itu, panduan teknis yang terangkum dari penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pelaku sektor pertanian dalam mengadopsi teknologi IoT dan otomasi secara terintegrasi. Hal ini akan mempermudah implementasi *smart greenhouse* yang tangguh terhadap perubahan iklim dan variabilitas lingkungan. Pada akhirnya, inovasi ini diharapkan dapat mendukung transformasi sektor pertanian menuju masa depan yang kompetitif dan berkelanjutan, terutama dalam menghadapi tantangan sumber daya dan iklim yang semakin kompleks.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengatasi fragmentasi antara komponen IoT dan sistem otomasi di *smart greenhouse* yang menyebabkan operasional kurang efektif, respons lambat, dan ketidakstabilan jaringan?
2. Bagaimana merancang model integrasi IoT dan sistem otomasi adaptif untuk meningkatkan akurasi pengaturan iklim mikro, mengurangi ketergantungan pada intervensi manusia, dan menjamin keberlanjutan sistem?
3. Bagaimana mengoptimalkan pengendalian *smart greenhouse* melalui algoritma otomasi *hybrid* yang mampu beradaptasi terhadap dinamika lingkungan?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Merancang model integrasi holistik antara IoT dan sistem otomasi untuk meningkatkan akurasi pemantauan dan kontrol kondisi iklim mikro di *smart greenhouse*.
2. Mengembangkan algoritma *hybrid* yang memadukan protokol komunikasi IoT efisien dan mekanisme otomasi adaptif untuk meningkatkan stabilitas sistem dan menurunkan *latency*.

3. Menguji efektivitas model dalam meningkatkan ketahanan jaringan dan memastikan keberlangsungan operasional *smart greenhouse* melalui validasi empiris.

1.4. Manfaat Penelitian

Secara teoritis, penelitian ini memperkaya literatur pertanian presisi dengan kerangka kerja integrasi IoT dan otomasi yang menekankan keberlanjutan sistem. Hasil penelitian menyediakan dasar analisis untuk pengembangan algoritma otomasi adaptif yang dapat diterapkan dalam berbagai sistem *smart farming*. Secara praktis, model yang dihasilkan diharapkan meningkatkan efisiensi produksi melalui kontrol iklim mikro yang lebih akurat, sehingga mendukung ketahanan pangan global. Pedoman teknis yang dihasilkan memberi referensi bagi pelaku pertanian dalam mengadopsi IoT dan otomasi secara terintegrasi, mempermudah implementasi *smart greenhouse* tangguh terhadap perubahan iklim dan variabilitas lingkungan.

1.5. Kebaharuan Penelitian (*Novelty*)

Penelitian ini menawarkan kebaruan sebagai berikut:

1. Model Integrasi Holistik. Pengembangan model integrasi IoT dan sistem otomasi secara menyeluruh dengan menitikberatkan sinergi antara protokol komunikasi efisien dan mekanisme kontrol.
2. Algoritma *Hybrid*. Pengenalan algoritma yang mengoptimalkan respons terhadap perubahan lingkungan secara *real-time*, mengurangi intervensi manusia, serta meminimalkan *latency* dan risiko kegagalan jaringan.
3. Fokus Keberlanjutan Sistem. Penekanan pada adaptasi dinamis kondisi iklim mikro untuk menjaga keberlangsungan operasional *smart greenhouse* merupakan aspek yang belum banyak dibahas secara mendalam.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Systematic Literature Review* (SLR) pada jurnal terindeks Scopus

2.1.1 Metode *Review*

Kajian ini difokuskan untuk memahami tren dan *gap* penelitian *smart farming* berbasis IoT pada jurnal terindeks Scopus. Langkah-langkah yang dilakukan adalah:

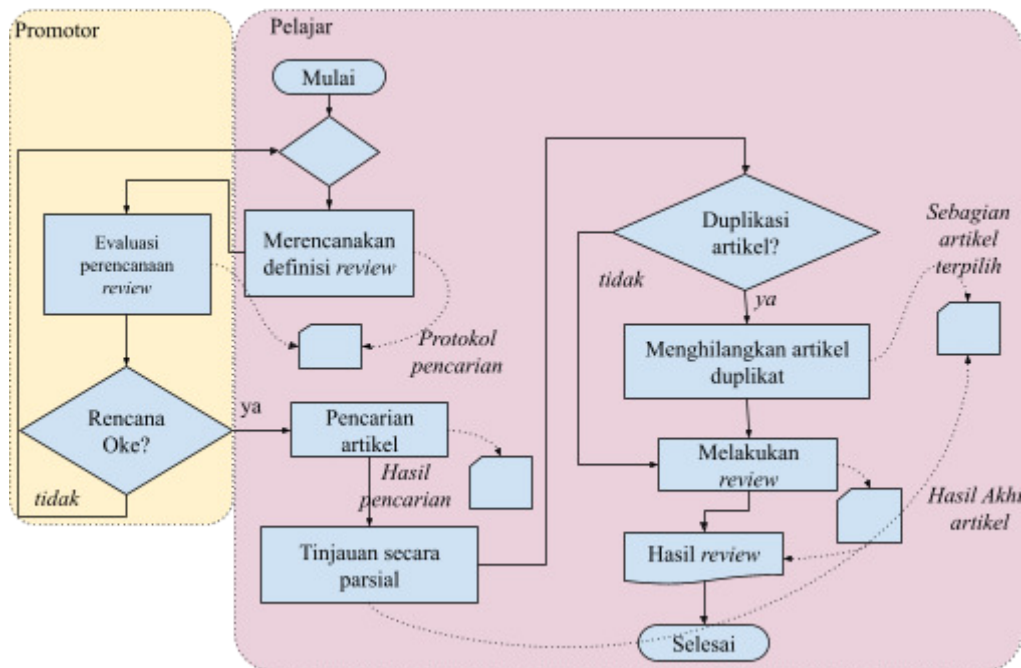
1. Penentuan sumber dan kata kunci
 - a. *Database* utama pada ScienceDirect, IEEE, dan MDPI.
 - b. Kata kunci: “IoT” AND “Farming” AND “Agriculture” AND “Greenhouse” di judul, abstrak, atau isi artikel.
 - c. Rentang publikasi dari 2017 hingga Agustus 2022 untuk mencakup perkembangan terkini .
2. Manajemen sitasi dan seleksi awal
 - a. Metadata artikel diimpor ke Zotero untuk memudahkan pengelolaan referensi dan deteksi duplikasi. Zotero adalah perangkat lunak manajemen referensi *free* dan *open-source*.
 - b. Duplikasi dihapus dan judul serta abstrak diseleksi untuk memastikan relevansi dengan topik *smart farming* berbasis IoT.

3. Analisis berdasarkan *Research Questions* (RQ)

Setiap artikel yang lolos seleksi dianalisis lebih mendalam dengan menjawab:

- a. Sensor apa saja yang digunakan?
- b. Metode apa yang diterapkan dalam sistem?
- c. Jurnal apa yang menerbitkan penelitian terkait?
- d. *Gap* penelitian apa yang muncul?

Proses ini diilustrasikan pada Gambar 2.1 untuk memudahkan pemahaman alur SLR.



Gambar 2.1 Proses SLR.

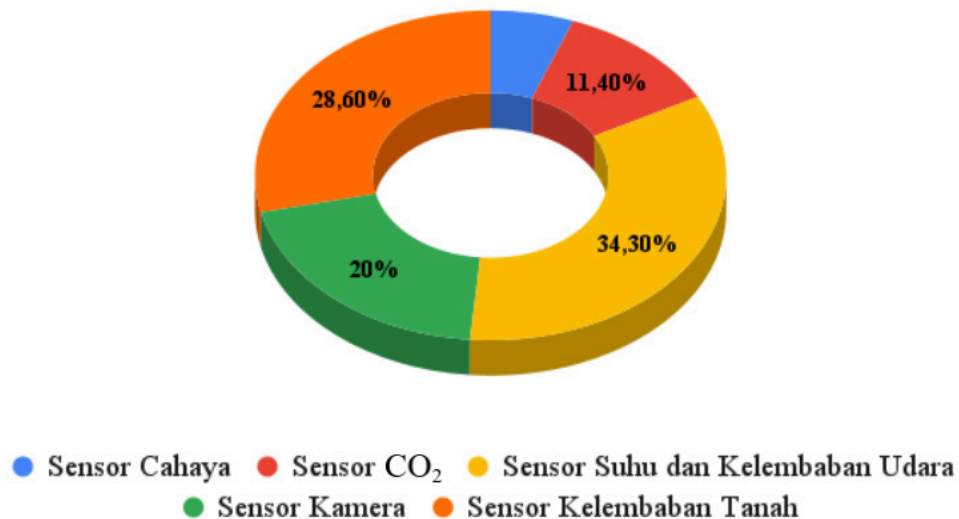
2.1.2 Hasil Review

1. Jumlah artikel per *database*

Hasil pencarian awal menunjukkan 233 artikel dari ScienceDirect, 68 dari IEEE, dan 32 dari MDPI. Setelah *import* metadata, penghapusan duplikasi, dan seleksi judul dan abstrak, artikel dianalisis lebih lanjut.

2. Penggunaan sensor

Analisis RQ1 mengungkap bahwa sensor suhu dan kelembaban udara paling dominan, hadir di 28,6% artikel (12 artikel) yang hanya menggunakan kedua sensor tersebut. Artikel lain cenderung mengkombinasikan sensor tambahan misalnya sensor cahaya, kelembaban tanah, atau sensor aliran *fluida* untuk meningkatkan ketepatan monitoring (Gambar 2.2).

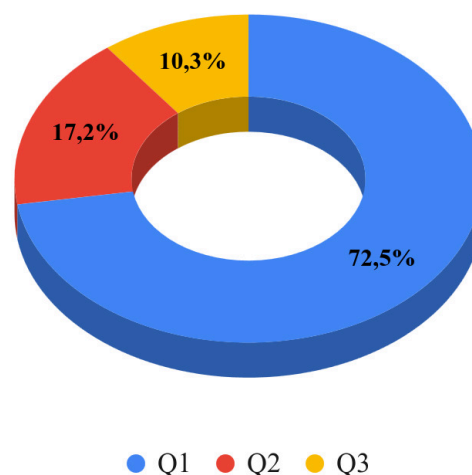


Gambar 2.2 Penggunaan sensor pada sistem *smart farming* berbasis IoT.

Temuan ini menegaskan bahwa parameter suhu dan kelembaban udara menjadi fokus utama dalam *smart greenhouse* karena perannya krusial menjaga kondisi mikro-lingkungan.

3. Kualitas jurnal (*Quartile Ranking*)

Evaluasi kualitas jurnal dilakukan melalui ISSN pada *Scimago Journal and Country Rank*. Sebagian besar artikel berada di kuartil Q1 (72,5%) dan Q2 (17,2%), sementara Q3 mencapai 10,3% (Gambar 2.3) .

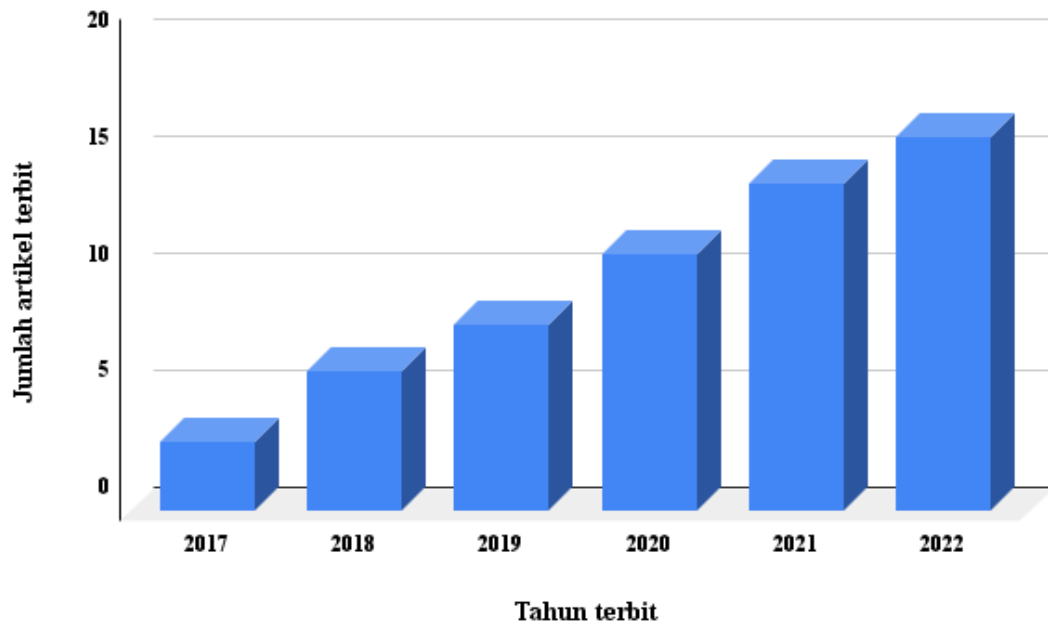


Gambar 2.3 *Quartile Ranking* artikel.

Distribusi ini menunjukkan bahwa topik *smart farming* berbasis IoT mendapat perhatian kuat di jurnal internasional bereputasi tinggi.

4. Tren publikasi tahunan

Tren publikasi dari 2017 hingga Agustus 2022 diperlihatkan pada Gambar 2.4. Jumlah artikel meningkat secara bertahap setiap tahun, mencerminkan perhatian yang terus tumbuh pada topik ini.

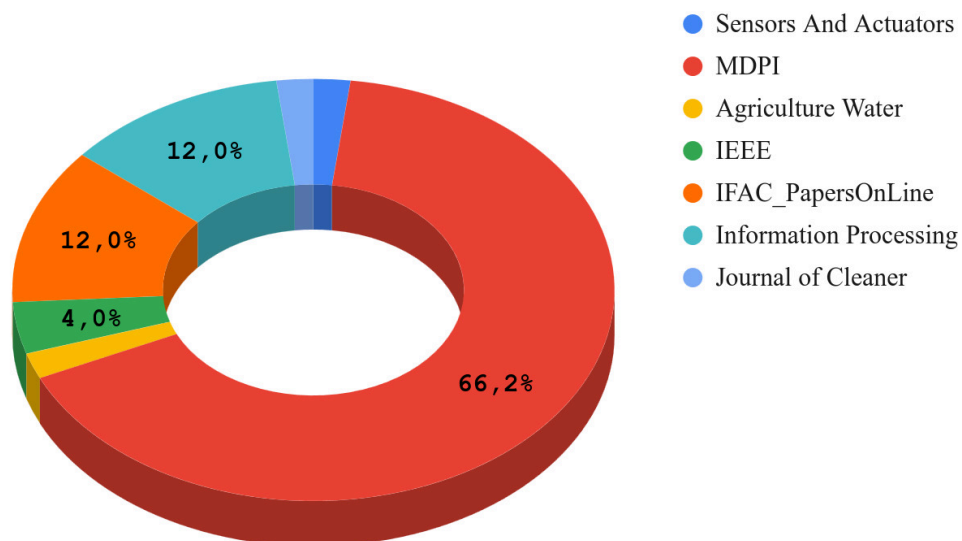


Gambar 2.4 Tren topik penelitian dari tahun 2017 sampai dengan 2022.

Lonjakan khusus terjadi ketika kebutuhan akan solusi digital di pertanian semakin mendesak. Pola kenaikan ini membantu memposisikan penelitian disertasi dalam konteks perkembangan global dan menunjukkan relevansi untuk *novelty* selanjutnya .

5. Distribusi jurnal penerbit

Analisis jurnal penerbit (Gambar 2.5) mengungkap bahwa MDPI mempublikasikan 56,9% artikel terkait, sementara jurnal *Sensors and Actuators* hanya 1,7% .



Gambar 2.5 Statistik jurnal.

Temuan ini mengindikasikan variasi preferensi peneliti dalam memilih *outlet* publikasi serta peluang memperluas publikasi ke jurnal lain untuk meningkatkan diversifikasi dan visibilitas penelitian.

6. *Mapping Gap* Penelitian

Berdasarkan RQ4, gap utama yang muncul terkait integrasi sensor, metode kontrol, dan keberlanjutan operasional. Meskipun banyak penelitian menekankan sensor suhu dan kelembaban, integrasi mendalam dengan algoritma kontrol dan validasi empiris jangka panjang masih terbatas. *Insight* ini menjadi pijakan bagi rancangan metode *hybrid* dalam disertasi selanjutnya. Sistem *hybrid* dapat menysasar aspek yang belum banyak diteliti, misalnya kontrol berdasarkan data historis atau mekanisme *fallback* saat *offline* (Setyawan, et.al. 2022).

2.2. Tinjauan Literatur Nasional pada Jurnal Terakreditasi SINTA

2.3.1. Tujuan dan Konteks Tinjauan

Tinjauan ini bertujuan memahami sejauh mana topik IoT, otomasi, dan *smart farming* di Indonesia telah dibahas dalam jurnal nasional terakreditasi SINTA dengan memperhatikan akreditasi, diharapkan dapat diketahui kualitas dan tren

publikasi lokal yang relevan, sekaligus mengidentifikasi peluang penelitian yang mendalam.

2.3.2. Metode *Review*

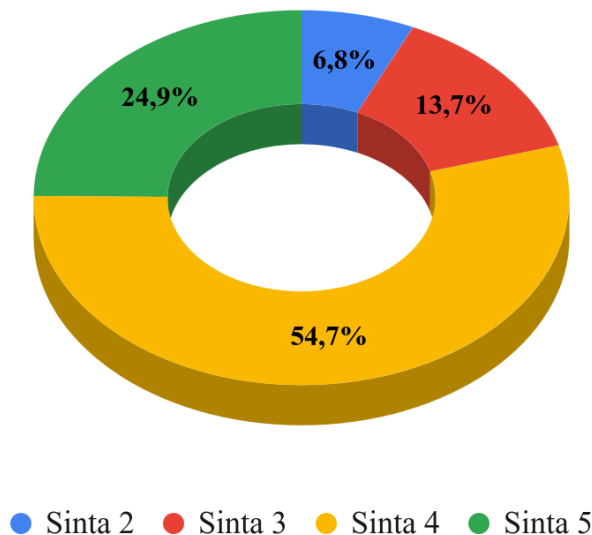
1. Perencanaan kata kunci dan sumber
 - Kata kunci dalam bahasa Indonesia dan Inggris disusun sesuai topik: “IoT”, “otomasi”, “*smart farming*”.
 - Pencarian dilakukan melalui Google Scholar dengan memanfaatkan aplikasi *Publish or Perish* (PoP) untuk menemukan metadata artikel tanpa perlu mengunduh teks lengkap. PoP membantu menyaring karya ilmiah dari berbagai bidang dan memeriksa kualitas sumber melalui tautan ke *database online*.
 - Hasil pencarian diekspor ke Zotero, dikelompokkan dalam folder khusus untuk mengelola metadata referensi. Artikel yang tidak relevan dihapus berdasarkan judul dan abstrak.
2. Kriteria seleksi berdasarkan akreditasi SINTA
 - Setiap artikel diperiksa tingkat akreditasi jurnal melalui portal SINTA. Artikel dari jurnal yang tidak terakreditasi dikeluarkan dari daftar akhir.
 - Rentang waktu pencarian dibatasi pada publikasi tahun 2020–2023 untuk menangkap tren terkini.
3. Proses *review* mendalam
 - Setelah daftar awal diperoleh (162 artikel), langkah berikutnya menelaah judul, abstrak, dan bagian hasil penelitian untuk memastikan relevansi topik.
 - Artikel yang memenuhi kriteria dan berasal dari jurnal terakreditasi disaring lebih lanjut berdasarkan pertanyaan *Research Questions* (RQ)
 - RQ1: Apakah artikel diterbitkan di jurnal terakreditasi SINTA?
 - RQ2: Tahun publikasi artikel tersebut.
 - RQ3: Jenis sensor yang digunakan.

■ RQ4: Peralatan IoT apa saja yang diimplementasikan.

- Hasil akhir mencakup 29 artikel yang terakreditasi SINTA, dengan peringkat SINTA 2–5.

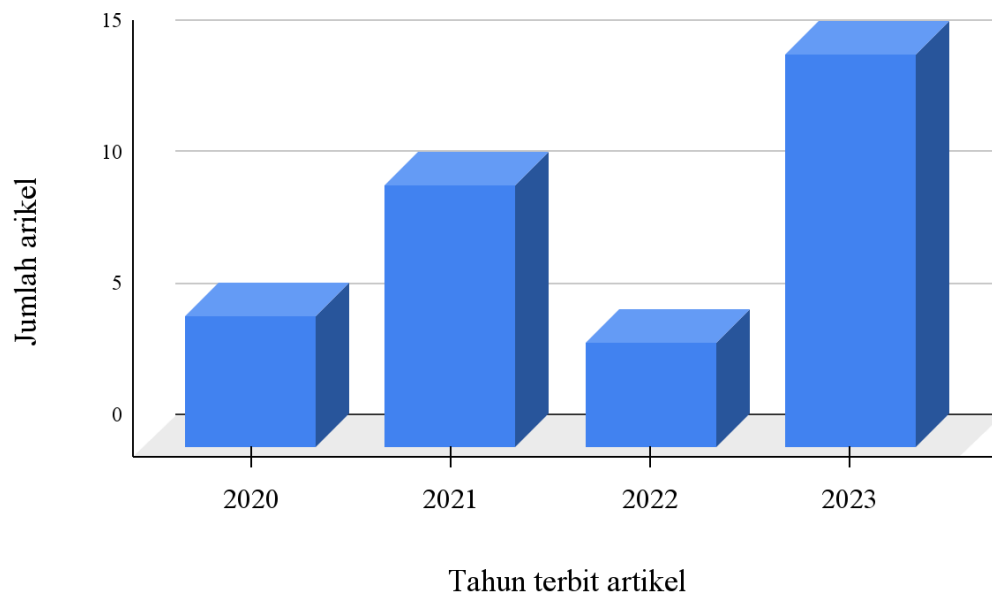
4. Visualisasi dan analisis data

- Statistik distribusi akreditasi dipresentasikan pada Gambar 2.6 untuk melihat sebaran persentase Jurnal SINTA 2, 3, 4, 5.



Gambar 2.6 Statistik *ranking* jurnal nasional.

- Tren publikasi per tahun dipetakan pada Gambar 2.7, menggambarkan dinamika minat penelitian selama 2020–2023.



Gambar 2.7 Tren artikel dengan topik IoT, otomasi, dan *smart farming*.

- Analisis lebih lanjut membahas implikasi distribusi akreditasi dan tren waktu terhadap peluang peningkatan kualitas publikasi di tingkat nasional.

2.3.3. Hasil Review

1. Jumlah dan distribusi akreditasi

- Dari 162 artikel awal, 29 artikel memenuhi kriteria akreditasi SINTA (peringkat 2 hingga 5).
- Sebagian besar (sekitar 55,2%) diterbitkan di jurnal SINTA 4, sedangkan jurnal SINTA 1 tidak ditemukan dalam hasil karena pencarian hanya melalui Google Scholar dan *Scopus-indexed* sering berada di *platform* lain. Hal ini menunjukkan riset *smart farming* lokal banyak beredar di jurnal menengah, dengan potensi peningkatan ke jurnal berperingkat lebih tinggi.
- Distribusi akreditasi mencerminkan peluang dan tantangan peneliti Indonesia dalam mempublikasikan karya pada jurnal bereputasi lebih tinggi dengan peningkatan mutu penulisan dan metodologi dapat mendorong loncatan ke SINTA 2 atau 1.

2. Tren publikasi dari tahun 2020 sampai dengan 2023

- Tahun 2020 sekitar 5 artikel relevan, menunjukkan tahap awal perhatian terstruktur terhadap topik IoT dan otomasi di *smart farming*.
- Tahun 2021 melonjak hingga sekitar 10 artikel, kemungkinan dipicu kesadaran pentingnya teknologi selama pandemi COVID-19 untuk menjaga ketahanan pangan.
- Tahun 2022 terjadi penurunan kembali mendekati angka 2020, mengindikasikan pergeseran prioritas penelitian atau keterbatasan sumber daya.
- Tahun 2023 terjadi lonjakan lagi mencapai sekitar 15 artikel, menunjukkan minat yang semakin kuat dan inisiatif baru di bidang ini.
- Tren ini menegaskan bahwa topik *smart farming* berbasis IoT dan otomasi semakin krusial. Fluktuasi pada 2022 mendorong pertanyaan mengenai infrastruktur riset, atau kebutuhan kolaborasi lintas institusi untuk menjaga kesinambungan penelitian.

3. Jenis Sensor dan Peralatan IoT

- 29 artikel mayoritas memanfaatkan sensor suhu, kelembaban udara, dan kelembaban tanah sebagai komponen utama. Beberapa studi menambahkan sensor cahaya, pH tanah, atau sensor aliran air sesuai fokus aplikasi.
- Modul IoT yang umum digunakan adalah mikrokontroler berbasis Arduino atau ESP (ESP8266/ESP32) serta protokol komunikasi seperti HTTP atau MQTT. Penggunaan *platform* lokal maupun internasional tercatat dalam beberapa artikel.
- Variasi peralatan mencerminkan kebutuhan adaptasi kontekstual pada ketersediaan perangkat lokal, kemudahan integrasi, dan biaya. Hal ini menegaskan pentingnya desain sistem yang modular dan terjangkau bagi pengguna di lapangan.

2.3.4. Pembahasan dan Implikasi

1. Kualitas dan peluang publikasi

- Sebaran terbesar di SINTA 4 mengindikasikan banyak penelitian *smart farming* masih di level jurnal menengah. Untuk meningkatkan reputasi, peneliti perlu memperkuat metodologi, validasi empiris yang lebih luas, dan kolaborasi interdisiplin.
- Kurangnya artikel di SINTA 1 atau 2 mungkin disebabkan proses seleksi yang ketat serta tuntutan kontribusi teori dan praktik yang signifikan. Peneliti dapat memfokuskan studi pada aspek inovasi nyata, seperti *hybrid* dan optimasi energi, untuk memenuhi kriteria jurnal unggulan.

2. Tren dinamis dan tantangan

- Lonjakan 2021 dan 2023 memperlihatkan momentum riset yang dipengaruhi faktor eksternal seperti pandemi, inisiatif pemerintah, kebijakan pertanian digital. Peneliti perlu menjajaki sinergi dengan program nasional atau internasional guna menjaga konsistensi publikasi.
- Penurunan 2022 memberi pelajaran penting bahwa perlunya perencanaan jangka panjang, sumber pendanaan, dan infrastruktur laboratorium untuk mendukung studi lanjutan agar tren positif tidak hilang.

3. Implementasi sistem di lapangan

- Mayoritas studi berfokus pada prototipe atau uji laboratorium skala kecil. Tantangan praktis meliputi kondisi jaringan di area terpencil, toleransi lingkungan ekstrim, dan ketersediaan energi. Pengembangan sistem *hybrid* atau *edge computing* yang diuji coba secara luas dapat menjadi arah riset selanjutnya.
- Adaptasi teknologi harus mempertimbangkan aspek biaya dan kemudahan perawatan untuk petani. Rancangan sistem terbuka (*open-source*) dan dokumentasi yang mudah dipahami dapat mempercepat adopsi di lapangan (Setyawan dkk., 2024).

2.2. Solusi Irigasi di *Greenhouse*

Irigasi merupakan tulang punggung produktivitas tanaman dalam *greenhouse*, terutama di daerah dengan keterbatasan air. Etheram *et al.*, (2021) menerapkan *Copula Bayesian Model Average* (CBMA) yang memadukan *multilayer perceptron* berbasis data guna memprediksi produksi air tawar dari air laut, sekaligus memperhitungkan konsumsi energi secara optimal. Hasilnya memperlihatkan akurasi prediksi meningkat signifikan, memberikan landasan bagi sistem irigasi yang mempertimbangkan sumber air alternatif.

Mamouri *et al.*, (2020) mengembangkan *greenhouse* terintegrasi dengan sistem desalinasi *Humidification-Dehumidification* (HDH) dan pemisah spektrum cahaya. Pendekatan ini mampu memenuhi hingga 85% kebutuhan air tomat sambil mengurangi beban pendinginan lebih dari 25% di iklim panas seperti Phoenix, Arizona. Temuan ini menekankan potensi integrasi teknologi fisik dan kontrol otomatis untuk pengelolaan air.

Parada *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa daur ulang endapan dalam siklus irigasi *greenhouse* meningkatkan efisiensi penggunaan air sekitar 7% dan menekan dampak eutrofikasi tanpa menurunkan produktivitas tanaman. Temuan ini mengisyaratkan pentingnya mekanisme monitoring kualitas air dan pengendalian otomatis untuk menjaga kesinambungan penggunaan kembali air.

Meskipun berbagai solusi ini menjanjikan, sebagian besar studi masih terfokus pada model spesifik tanpa memanfaatkan data *real-time* dari sensor IoT atau algoritma kontrol. Oleh karena itu, kerangka kerja irigasi yang memanfaatkan sensor *real-time* dan otomasi cerdas akan dieksplorasi untuk menyesuaikan volume dan frekuensi irigasi secara dinamis, mendukung penggunaan air yang hemat dan berkelanjutan.

2.3. Pengendalian Iklim Mikro dan Efisiensi Energi di *Greenhouse*

Pengendalian iklim mikro di *greenhouse* meliputi pengaturan suhu, kelembaban, sirkulasi udara, dan pencahayaan untuk menciptakan kondisi optimal bagi

tanaman. Tsafaras *et al.*, (2021) menemukan bahwa penempatan *exhaust fan* dan alas pendingin yang tepat dapat mengurangi penggunaan air hingga lebih dari 40%. Zapalac (2022) memperkenalkan sistem pendinginan tanpa ventilasi yang memanfaatkan gravitasi dan penukar panas plastik, terbukti sekitar 6,9 kali lebih efisien dibanding metode konvensional. Peningkatan konsentrasi CO₂ juga berdampak positif, Zhang *et al.*, (2022) melaporkan efisiensi fotosintesis meningkat sekaligus konsumsi energi berkurang hingga 15% melalui optimasi aliran udara dan redistribusi CO₂. Integrasi panel surya sebagai atap eksternal di *greenhouse* dapat menurunkan suhu udara 1–2°C dan intensitas cahaya 25–40% tanpa merusak kondisi kelembaban, meski ada sedikit penurunan vitamin C pada tanaman tertentu. Costantino *et al.*, (2021) menggunakan simulasi dinamik untuk mengevaluasi ventilasi mekanis dengan kipas variabel, yang berhasil memangkas konsumsi listrik hingga 25%. Katzin *et al.*, (2021) menambahkan bahwa penggunaan lampu LED di *greenhouse* dapat menghemat energi 10–25%, meski perlu penyesuaian pemanasan yang naik 9–49%.

Berbagai penelitian ini menunjukkan kemajuan signifikan dalam efisiensi energi dan pengendalian iklim mikro. Namun, sebagian besar studi masih terpisah-pisah dan kurang memadukan data *real-time* dari sensor IoT serta algoritma kontrol yang dapat menyesuaikan respons sistem terhadap fluktuasi lingkungan. Kerangka integrasi IoT dan otomasi cerdas akan dirancang untuk mengoptimalkan iklim mikro secara berkelanjutan, sekaligus menilai performanya secara empiris.

2.4. Integrasi Energi Terbarukan dan *Greenhouse*

Integrasi energi terbarukan ke dalam operasional *greenhouse* menjadi strategi penting untuk mengurangi emisi dan biaya energi. Blom *et al.*, (2022) menunjukkan bahwa produksi selada di *vertical farming* di Belanda dapat mengurangi emisi karbon 15% dibanding hortikultura konvensional dan 23% dibanding pertanian lapang. Temuan ini menegaskan keunggulan sistem tertutup, meski membutuhkan pasokan energi yang stabil. Maureira *et al.*, (2022) melaporkan *smart greenhouse* di Washington menghasilkan panen tomat 6,4 kali lipat per luas area dibanding sistem terbuka, namun jejak energi dan emisi gas

rumah kaca meningkat masing-masing 231 kali dan 18 kali lipat. Hal ini menekankan perlunya desain yang menyeimbangkan produktivitas tinggi dengan efisiensi energi. Muñoz-Liesa *et al.*, (2022) mengintegrasikan atap *greenhouse* dengan ventilasi aktif untuk memanfaatkan panas buang *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) hingga 198 kWh/m² per tahun dan pemanasan pasif 205,2 kWh/m² per tahun. Pendekatan ini berhasil menurunkan kebutuhan energi operasional sekitar 8% tanpa mengorbankan produktivitas tanaman. Desain semacam ini mengilustrasikan potensi sinergi antara sistem HVAC, energi terbarukan, dan kontrol otomatis. Meski potensi besar, adaptasi strategi ini ke konteks lokal termasuk ketersediaan energi terbarukan, iklim tropis, dan skala usaha petani di Indonesia memerlukan kajian lebih lanjut. Tinjauan ini akan fokus pada model integrasi energi terbarukan dengan IoT dan otomasi cerdas untuk mengelola iklim mikro dan air secara *real-time*, dengan tujuan menyeimbangkan produktivitas, efisiensi energi, dan keberlanjutan sistem.

2.5. Sistem Pendukung Keputusan, IoT, dan *Edge Computing* dalam *Smart Farming*

Sistem pendukung keputusan di *smart farming* semakin memanfaatkan sensor IoT dan komputasi *edge* untuk membantu petani mengambil keputusan cepat. Flores Cayuela *et al.*, (2022) mengintegrasikan data *real-time* sensor dan prediksi cuaca untuk mengoptimalkan irigasi presisi, sehingga penggunaan air dapat ditekan secara berkelanjutan. Pada ranah sensor dan monitoring Shakya *et al.*, (2021) dan Yin *et al.*, (2021) menunjukkan peran sensor kelembaban tanah berbasis Arduino UNO. Akurasi estimasi kelembaban meningkat berkat algoritma kalibrasi, memungkinkan kontrol irigasi yang lebih responsif. Wang *et al.*, (2020) melaporkan mekanisme komunikasi IoT yang dioptimalkan mampu mengurangi kehilangan data antara sensor dan *server* hingga di bawah 2%. Komunikasi jarak jauh semakin efisien menggunakan *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN). Jabbar *et al.*, (2022) membuktikan cakupan luas dan pengumpulan data *real-time* untuk kualitas udara, sedangkan Koteish *et al.*, (2022) melaporkan mekanisme *smart farming AGRiculture mOnitoring* (AGRO) yang mengurangi transmisi data berlebih. Namun, ketepatan prediksi cuaca tetap mempengaruhi

performa kontrol otomatis, seperti ditunjukkan Kuijpers *et al.*, (2022) yang menyoroti kerugian ekonomi jika model stokastik cuaca kurang akurat. Pada sisi komputasi dekat (*edge/fog computing*), Dastjerdi (2016) memperkenalkan paradigma *fog* untuk menurunkan *latency*, sementara Yang *et al.*, (2022) menjalankan algoritma deteksi anomali DELHi Forest di *edge* untuk analisis data sensor *real-time*. Pendekatan ini menjanjikan respons cepat tanpa ketergantungan penuh pada *cloud*, tetapi evaluasi integrasi dengan sistem otomasi adaptif masih dibutuhkan. Aplikasi spesifik berkembang, Chigwada *et al.*, (2022) merancang manajemen *smart chicken farming*, dan Pasika and Gandla (2020) mengawasi kualitas air secara *real-time*. Temuan ini menunjukkan potensi luas IoT di berbagai sub-sektor pertanian. Meskipun banyak inisiatif, masih diperlukan kerangka kerja menyeluruh yang menggabungkan sensor, komunikasi, komputasi *edge*, dan algoritma kontrol dalam satu sistem *hybrid*. Arsitektur yang dirancang akan memadukan aspek-aspek tersebut untuk mendukung keputusan otomatis di *smart greenhouse*, dengan fokus pada *latency* minim, keandalan jaringan, dan efisiensi energi.

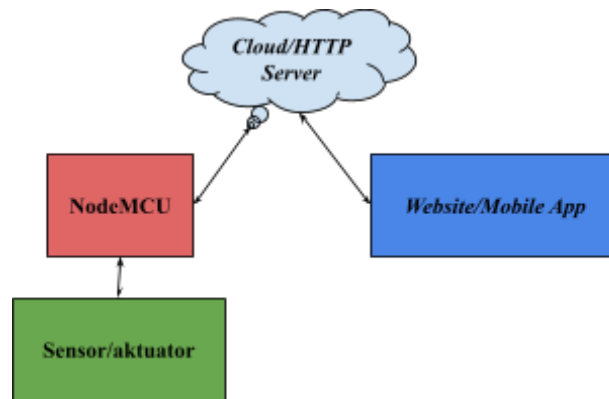
2.6. Sensor dan Sistem Akuisisi Data untuk Pemantauan Tinggi dan Volume Cairan

Tangki air kerap dimanfaatkan untuk menyimpan air irigasi maupun pupuk cair di lahan pertanian. Pengawasan tinggi cairan di dalam tangki dapat dilakukan secara mekanik atau melalui sensor, seperti sensor ultrasonik yang mendeteksi ketinggian zat cair lewat pengukuran lama waktu tempuh gelombang (Pauzi *et al.*, 2012). Alternatif mekanisme pengukuran lain memanfaatkan sensor MW22B Multiturn Potensiometer, yang memberikan resolusi vertikal instrumen sebesar 0,03 m dengan kesalahan pengukuran kira-kira 1,11% (Warsito *et al.*, 2012). Pengendalian kecepatan alir dan volume cairan juga dapat diatur dengan menerapkan *Pulse Width Modulation* (PWM) dan waktu tunda pada motor pompa, sehingga diperoleh akurasi pengisi rata-rata 0,5 ml (Junaidi *et al.*, 2019). Untuk pemantauan jarak jauh, telah dikembangkan sistem pengumpulan data tinggi air berbasis SMS gateway pada frekuensi *Global System for Mobile Communications* (GSM) 900–907,5 MHz menggunakan transduser ultrasonik HC-SR04 (rentang

deteksi hingga 5 m) menampilkannya di LCD, menyimpannya di microSD, dan mengirimkan data lewat *Short Message Service* (SMS) dengan rata-rata lama transmisi tereduksi menjadi sekitar 4,15 detik (Warsito *et al.*, 2017). Selain itu, kalibrasi respons transduser ultrasonik dengan metode linierisasi digital menggunakan mikrokontroler ATmega16 menunjukkan kesalahan rata-rata hanya 0,299%, sehingga meningkatkan akurasi pengukuran tinggi air (Warsito *et al.*, 2014). Kemajuan IoT memungkinkan penggantian SMS *gateway* dengan koneksi HTTP/MQTT, mendukung monitoring *real-time* dan integrasi otomasi cerdas. Dengan demikian, integrasi sensor tinggi cairan dengan platform IoT dan sistem otomasi adaptif akan dapat diimplementasikan. Kalibrasi otomatis berkelanjutan diprogram untuk menjaga akurasi seiring waktu, mendukung pengelolaan air dan nutrisi secara cerdas di *greenhouse*.

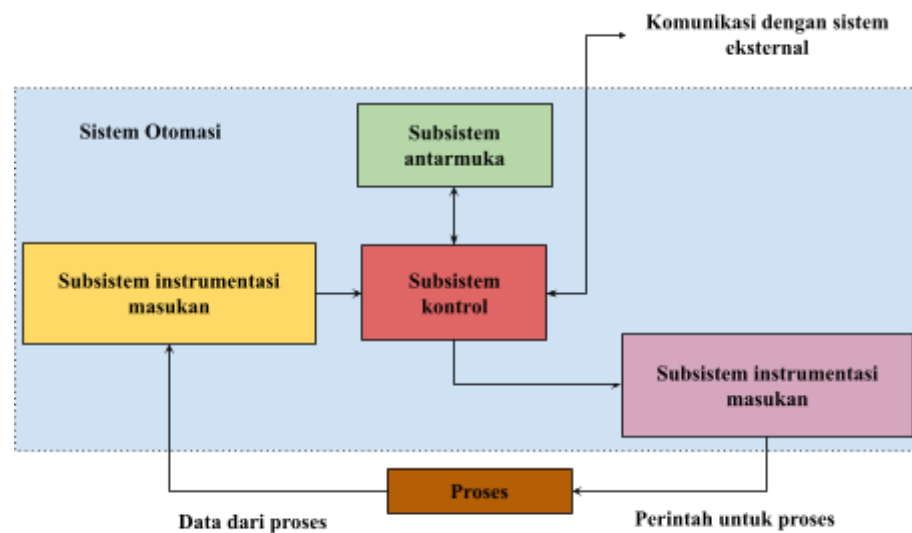
2.7. Sistem IoT dan Otomasi

IoT merupakan paradigma teknologi informasi dan komunikasi yang menghubungkan berbagai perangkat ke internet untuk pemantauan dan pengendalian jarak jauh (Liberg *et al.*, 2018). Otomasi adalah rangkaian proses yang berjalan berkelanjutan tanpa intervensi manual hingga diperlukan keputusan operator (Sharma *et al.*, 2017b). Pemahaman arsitektur dasar IoT dan otomasi menjadi landasan penting sebelum merancang mekanisme *hybrid* yang menjadi kebaruan dalam penelitian ini. Arsitektur umum sistem IoT memperlihatkan sensor dan aktuator berkomunikasi dengan *cloud* melalui protokol tertentu sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.8. Sementara itu, sistem otomasi menjalankan logika kontrol lokal secara terus-menerus, seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Sistem IoT (Khodadadi *et al.*, 2017; Kefalakis *et al.*, 2017).

Interaksi pengguna berlangsung melalui *mobile app* atau antarmuka *web* yang terhubung ke *cloud*, sedangkan perangkat lapangan misalnya modem GSM atau modul NodeMCU berfungsi sebagai pusat kendali sensor dan aktuator



Gambar 2.9 Sistem otomasi (Sharma, 2017a).

Komunikasi data pada *node* dapat menggunakan *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) atau *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). Dalam konteks penelitian ini, protokol HTTP dipilih untuk memudahkan interoperabilitas dengan *platform cloud* dan layanan analitik (Chakravarthy *et al.*, 2022) (Méndez-Guzmán *et al.*, 2022). Pemilihan ini mendorong pembagian sistem menjadi dua modul utama yakni modul otomasi lokal dan modul IoT.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada periode 2022–2024 di Laboratorium *Internet of Things (IoT) Center* Institut Informatika dan Bisnis Darmajaya dan di Laboratorium Fisika (*greenhouse*) FMIPA Universitas Lampung. Tahap awal mencakup instalasi perangkat keras dan konfigurasi sistem di kedua lokasi. Setelah instalasi selesai, pengujian sistem dan pengambilan data sensor serta aktuator dilakukan untuk menilai kinerja sistem dalam kondisi nyata. Data yang dikumpulkan digunakan sebagai dasar analisis performa dan validasi empiris model *hybrid automation*. Hasil pengujian dirangkum dan diproses untuk penulisan laporan penelitian, termasuk persiapan publikasi artikel di jurnal terpilih.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat

A. *Software* pendukung :

- a. Linux Mint 20.3 Cinnamon 64-bit sebagai sistem operasi utama untuk menjalankan aplikasi dan pemrograman.
- b. Google Docs dan Google Spreadsheet untuk penulisan laporan, visualisasi data SLR, dan pembuatan grafik kalibrasi.
- c. Zotero untuk manajemen referensi disertasi dan publikasi.
- d. Arduino IDE untuk pemrograman mikrokontroler Arduino.

- e. Android Studio untuk pengembangan aplikasi mobile (*mobile app*).
- f. *Text editor* untuk penulisan skrip PHP atau konfigurasi.
- g. MySQL sebagai basis data untuk penyimpanan data IoT.
- h. FileZilla untuk manajemen dan pengunggahan ke *server hosting* (FTPS).
- i. Mozilla Firefox sebagai antarmuka monitoring hasil pengujian sensor dan aktuator dalam bentuk grafik.
- j. Apache JMeter untuk mengukur performa *website* pada metode *GET/POST*.
- k. Postman untuk pengujian pengiriman dan penerimaan data antara NodeMCU dan *server*.

B. Perangkat keras umum:

- a. Laptop berprosesor Intel Core i7, RAM 12 GB, SSD 128 GB, untuk pemrograman, analisis data, dan kontrol eksperimen.
- b. Multimeter untuk pengukuran tegangan dan arus pada rangkaian sensor dan aktuator.
- c. Solder untuk penyambungan kabel pada PCB.

C. Fasilitas laboratorium:

- a. *Greenhouse* di Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Lampung sebagai lokasi uji sistem *hybrid automation*.
- b. Laboratorium IoT *Center* IIB Darmajaya untuk instalasi dan pengujian awal komponen perangkat keras IoT.
- c. Setiap alat dipilih sesuai fungsinya dalam tahap instalasi, pemrograman, pengujian performa, dan pengumpulan data untuk validasi empiris model *hybrid automation*.

3.2.2. Bahan

A. Sensor Udara.

- a. DHT11: Mengukur suhu udara (0–50 °C, akurasi ± 2 °C, respon 6–30 detik) dan kelembaban relatif (20–90% RH, akurasi $\pm 5\%$ RH, respon 6–15 detik). *Output* digital memudahkan integrasi dengan

mikrokontroler untuk monitoring iklim mikro di *greenhouse* (Electronics, 2019) .

B. Sensor Tanah.

- a. SEN0193: Sensor kelembaban tanah kapasitif, memanfaatkan perbedaan permitivitas antara air dan tanah (kadar air diindra sebagai perubahan kapasitansi) untuk kontrol irigasi (Ida, 2015).
- b. Sensor pH Tanah: Mengukur pH media tanam (rentang pH 3,5–8), dengan catu daya 3–4,7 V dan *output* analog 4–4,5 V. Respon cepat (0,1–0,3 detik) deteksi perubahan keasaman untuk penyesuaian nutrisi (Depoinovasi, 2019).
- c. Sensor NPK: Mendeteksi kadar *Nitrogen, Phosphorus, dan Kalium* (0–1999 mg/kg) via komunikasi RS485 (*baud rate* 2400–9600 bps). *Probe* terbuat dari *stainless steel* tahan korosi. Data mentah dibaca dalam format heksadesimal, kemudian dikonversi ke desimal untuk analisis nutrisi (Clinic, 2019).

C. Sensor Cairan

- a. YF-S201: Mengukur aliran air/*fluida* (1–50 l/menit) dengan *output* pulsa frekuensi terkait kecepatan aliran. Integrasi dengan mikrokontroler mendukung monitoring volume irigasi (SEAFLO Industrial Co.Ltd, 2017).
- b. TDS Sensor: Mengukur total *dissolved solids* (0–1000 PPM) untuk memantau konsentrasi larutan pupuk cair. *Output* tegangan 0–2,3 V sebanding dengan nilai PPM (DFRobot, 2019).

D. Mikrokontroler/*Platform* IoT

- a. Arduino Mega 2560: Berbasis ATmega 2560 (16 MHz), menyediakan pin I/O (16 *analog*, 22 *digital*) untuk antarmuka sensor dan aktuator (Team, 2024).
- b. NodeMCU (ESP8266): Mikrokontroler dengan *WiFi* terintegrasi, CPU 80–160 MHz, RAM ~36 kB untuk pemrograman *edge control*. Mendukung protokol HTTP/MQTT untuk komunikasi IoT (Espressif, 2017).

E. Komponen Pendukung

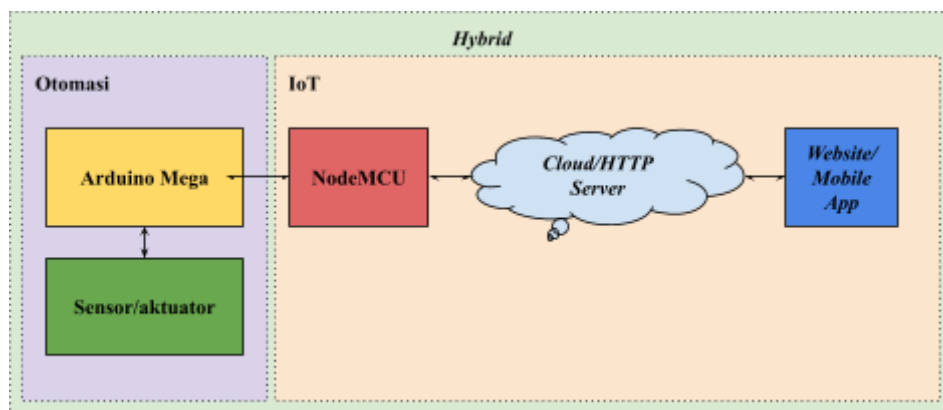
- a. *RC Snubber*: Rangkaian resistor dan kapasitor untuk meredam transien tegangan pada saklar daya (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET)/*Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT)), melindungi komponen dan mengurangi *Electromagnetic Interference* (EMI) (Yang *et al.*, 2022).

Setiap bahan tersebut dipilih untuk mendukung rangkaian kalibrasi, monitoring *real-time*, dan implementasi *hybrid*. Spesifikasi sensor diuji kalibrasinya untuk memastikan akurasi data, sedangkan *platform* mikrokontroler digunakan untuk menjalankan logika otomasi lokal dan pengiriman data ke *cloud*.

3.3. Metode

3.3.1. Desain Sistem *Hybrid*

Penelitian ini mengadopsi desain sistem *hybrid* yang menggabungkan kontrol lokal (otomasi) dengan pemantauan dan analisis berbasis *cloud* (IoT). Arsitektur sistem ditetapkan berdasarkan skema yang digambarkan pada Gambar 3.1, modul mikrokontroler (Arduino Mega) bertanggung jawab atas logika kontrol *real-time*, sedangkan modul komunikasi nirkabel (ESP8266) memastikan pertukaran data dengan *server cloud* untuk pemantauan jarak jauh dan analisis historis. Skema *hybrid* ini dipilih agar sistem mampu merespons kondisi kritis secara mandiri saat koneksi terputus, sekaligus memanfaatkan kemampuan analitik *cloud* untuk parameter adaptif jangka panjang.



Gambar 3.1 Sistem *hybrid*.

Langkah-langkah desain:

1. Spesifikasi fungsional:
 - a. Kontrol otomatis peralatan (pompa, kipas, katup) berdasarkan *input* sensor (kelembaban tanah, suhu dan kelembaban udara, pH, aliran air, NPK).
 - b. Pengiriman data sensor secara periodik ke *cloud* untuk pemantauan dan analisis *trend*.
 - c. Mekanisme *fallback* saat koneksi internet tidak tersedia, kontrol lokal tetap berjalan berdasarkan parameter *default* atau terakhir.
 - d. Antarmuka *mobile/web* untuk pemantauan dan kontrol manual.
2. Diagram blok sistem:
 - a. Rangkaian mikro dan sensor ditata sesuai instalasi di laboratorium dan *greenhouse*.
 - b. Jalur komunikasi NodeMCU/ESP8266 mengirim data via HTTP ke *server*, *server* menyimpan dan memproses data dan keputusan dikembalikan ke *edge*.
 - c. Logika *hybrid* struktur *state machine* di mikrokontroler menangani kondisi *online/offline*.
3. Penentuan komponen:
 - a. Mikrokontroler: Arduino Mega untuk kontrol lokal.
 - b. Modul *WiFi*: ESP8266 untuk komunikasi HTTP.
 - c. Sensor dan aktuator: DHT11, sensor kelembaban tanah, sensor pH, sensor NPK, *flow* sensor YF-S201, *relay/contact* untuk pompa dan kipas.
 - d. *Server*: layanan *cloud* yang mendukung API HTTP penyimpanan *database* dan analitik.
 - e. Aplikasi *mobile/web*: antarmuka pengguna untuk monitoring dan kontrol manual.

3.3.2. Persiapan dan Instalasi

3.3.2.1. Instalasi Perangkat Keras

1. Rangkaian Sensor dan Aktuator:

- a. Sensor dipasang sesuai kategori: sensor udara (DHT11), sensor tanah (kelembaban, pH, NPK), sensor aliran. Aktuator (*pump*, kipas, katup) dihubungkan melalui *relay/contactor*.
 - b. Rangkaian RC snubber dipasang pada sirkuit daya aktuator untuk meredam transien tegangan.
 - c. Mikrokontroler dan modul WiFi ditempatkan di lokasi terlindung dari kelembaban berlebih, dengan suplai daya stabil.
2. Konfigurasi Jaringan dan *Server*:
- a. Modul ESP8266 dikonfigurasi agar dapat terhubung ke jaringan WiFi laboratorium/*greenhouse*.
 - b. *Endpoint* HTTP pada *server* disiapkan untuk menerima data sensor dengan format *JavaScript Object Notation* (JSON) atau *form-data* dan mengirim parameter adaptif.
 - c. Basis data dikembangkan untuk menyimpan rekaman sensor beserta *timestamp* (format ISO 8601).
 - d. API diimplementasikan dengan mekanisme autentikasi sederhana memastikan keamanan minimal akses data.
3. Instalasi Aplikasi *Mobile/Web*:
- a. Aplikasi mobile diuji pada *emulator/device*, memastikan tampilan *dashboard* data *real-time* dan kontrol manual berfungsi.
 - b. Fitur pencatatan *timestamp* ditambahkan agar pengguna dapat melihat waktu pembaruan terakhir.
 - c. Validasi ikon dan aplikasi dilakukan untuk menjamin kepercayaan pengguna .

3.3.3. Prosedur Kalibrasi Sensor

3.3.3.1. Prinsip Umum

Kalibrasi bertujuan meminimalkan *deviasi* antara pembacaan sensor dan nilai acuan (kalibrator) dengan menerapkan koreksi linear. Prosedur umum terdiri dari:

- 1. Penentuan lingkungan uji (ruang terbuka dengan kondisi terkontrol atau sampel media sesuai sensor).

2. Pengambilan data berpasangan melalui nilai sensor dan nilai kalibrator.
3. Pengolahan data dengan menghitung *RMSE* sebelum dan sesudah kalibrasi menggunakan Persamaan (3.1) (Dong *et al.*, 2025) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2}{n}}. \quad (3.1)$$

4. Penentuan persamaan koreksi (regresi linier) dan persentase peningkatan akurasi menggunakan Persamaan (3.2).

$$\% \text{ peningkatan akurasi} = \frac{RMSE_{\text{sebelum}} - RMSE_{\text{sesudah}}}{RMSE_{\text{sebelum}}} \times 100\%, \quad (3.2)$$

5. Integrasi persamaan koreksi ke dalam kode mikrokontroler agar setiap pembacaan sensor dikoreksi secara otomatis.

3.3.3.2. Kalibrasi Per Jenis Sensor

1. DHT11 (suhu udara):
 - a. Penempatan sensor berpasangan dengan kalibrator digital (HTC-1) di ruang uji dengan variasi suhu dihasilkan oleh uap air panas.
 - b. Pengambilan 10 sampel untuk rentang suhu yang relevan .
 - c. Perhitungan *RMSE* dan regresi linier.
 - d. Validasi meningkatkan akurasi.
 - e. Implementasi kode setiap pembacaan dikoreksi dengan hasil persamaan yang diperoleh.
2. DHT11 (kelembaban udara):
 - a. Penempatan berpasangan dengan kalibrator *hygrometer* digital di ruang dengan kelembaban bervariasi (10 sampel).
 - b. Analisis *RMSE* dan regresi.
 - c. Integrasi koreksi dalam program mikro.
3. Sensor pH tanah:
 - a. Uji pada 8 sampel tanah bermacam pH .

- b. Pengukuran stabil dengan kalibrator SPH 004 pengambilan data saat nilainya konvergen.
 - c. Hitung *RMSE* sebelum/sesudah regresi.
 - d. Implementasi koreksi ke dalam pembacaan analog mikro.
- 4. Sensor *water flow* (YF-S201):
 - a. Pemasangan paralel dengan kalibrator YF-B5 pada pipa 0,5 inci variasi debit dari rendah ke tinggi 10 sampel.
 - b. Perhitungan *RMSE* dan regresi.
 - c. Integrasi persamaan pada mikrokontroler.
- 5. Sensor kelembaban tanah:
 - a. Kalibrasi menggunakan metode (*American Society for Testing and Materials*) ASTM D2216 dengan membandingkan *output* sensor dengan nilai kelembaban massa kering dan massa air (ASTM D2216, 2019).
 - b. Pengambilan 8 sampel dengan variasi kelembaban.
 - c. Analisis *RMSE* dan regresi.
 - d. Integrasi koreksi di mikro.
- 6. Sensor NPK:
 - a. Pengambilan data fluktuasi N, P, K di *greenhouse* .
 - b. Data dikumpulkan secara berkala.
 - c. Implementasi pembacaan serial/RS485 ke format mg/kg yang sesuai parameter.

3.3.4. Pengumpulan Data dan Pengujian Empiris

Setelah instalasi dan kalibrasi, pengumpulan data sensor berlangsung dalam skenario nyata *greenhouse*.

- 1. Pengujian lingkungan nyata:
 - a. Data sensor (suhu, kelembaban, pH, aliran, NPK) diambil secara periodik tiap lima menit selama *fase* pertumbuhan tanaman.
 - b. Data disimpan di *server* dengan *timestamp* untuk analisis historis.
- 2. Pengujian otomasi *hybrid*:
 - a. Simulasi skenario *online/offline*:

- Kondisi koneksi aktif dan sistem mengirim data ke *cloud* kemudian *cloud* mengirim parameter adaptif ke *edge*.
 - Kondisi koneksi terputus dan sistem hanya mengandalkan logika lokal berdasarkan *threshold* ($r(t) = 50\%$).
 - b. Pengukuran respons waktu yang dibutuhkan sistem untuk merespons perubahan sensor kelembaban turun di bawah *setpoint*.
 - c. Evaluasi kestabilan kelembaban tanah dibandingkan antara mode IoT dan mode lokal.
 - d. Validasi karakteristik kontrol berdasarkan fungsi alih yang akan diusulkan, perhitungan dan interpretasi *output* model transfer *function* untuk kedua mode, serta transisi antara mode.
3. Pengujian performa *web* (*backend* IoT):
- Beban uji menggunakan BlazeMeter dengan skenario *GET* dan *POST*.
 - Parameter uji pada 20 *virtual users*, *endpoint* sensor.php, pilih.php, insert_sensor1.php, update1.php, update_sensor1.php.
 - Pengukuran *throughput*, waktu respons rata-rata, *percentile*, dan kesalahan (*error rate*).
 - Identifikasi *endpoint* yang memerlukan optimasi.
4. Evaluasi *mobile app*:
- Uji fungsionalitas antarmuka monitoring *real-time dashboard*, kontrol *On/Off* (irigasi, pompa, kipas).
 - Validasi kemudahan penggunaan dengan observasi subjek pengguna yang berinteraksi dengan aplikasi.
 - Pencatatan waktu *update* data dan akurasi tampilan melalui sinkronisasi dengan data sensor aktual.
 - Pengujian *offline* dengan memverifikasi apakah aplikasi menunjukkan status ketika koneksi terputus dan memungkinkan pengguna melihat data historis.
5. Pengukuran keandalan dan ketersediaan:
- Definisi *reliability* dari sistem dipantau selama periode tertentu, mencatat frekuensi kegagalan atau intervensi manual.

- Definisi *availability* menggunakan persentase waktu sistem dalam kondisi operasional (baik mode lokal maupun mode IoT).
- *Log* otomatis dengan mencatat status perangkat (NodeMCU/Arduino) dan koneksi untuk analisis statistik *uptime/downtime*.

3.3.5. Prosedur Analisis Data

1. Pra-pemrosesan:
 - Membersihkan data dengan memeriksa nilai *outlier* atau *missing* data, imputasi atau penandaan sebelum analisis.
 - Sinkronisasi *timestamp* dengan memastikan konsistensi urutan data dari berbagai sensor.
2. Analisis kalibrasi:
 - Perhitungan *RMSE* sebelum dan sesudah kalibrasi dengan persentase peningkatan.
 - Regresi linier untuk menentukan persamaan koreksi evaluasi R^2 untuk menilai kualitas kalibrasi.
 - Interpretasi secara deskriptif, mengaitkan karakteristik sensor dengan hasil kalibrasi.
3. Analisis otomatisasi *hybrid*:
 - Pemodelan transfer *function* berdasarkan data uji .
 - Simulasi respons sistem untuk berbagai skenario (*online* atau *offline* perbandingan performa kontrol (*time response*, *overshoot*, *settling time*)).
 - Visualisasi hasil (*plot respons* waktu terhadap *step change* pada kelembaban).
 - Evaluasi *fallback* dengan menganalisis sistem mempertahankan kondisi ketika koneksi terputus.
4. Analisis performa sistem:
 - Statistik ringkasan hasil uji *web throughput* rata-rata, waktu respons *percentile* dan *error rate*.

- Interpretasi dampak hasil performa terhadap keandalan pengiriman data sensor.
- Analisis pengguna *mobile app* waktu *update*, keterlambatan tampilan, serta *feedback* pengguna.

3.3.6. Validasi dan Verifikasi

1. Verifikasi fungsi dasar:
 - Uji awal tiap modul (sensor, aktuator, komunikasi) secara terpisah sebelum integrasi penuh.
 - Pemeriksaan integritas data sensor dan respons aktuator sesuai perintah logika.
2. Validasi integrasi:
 - Pengujian *end-to-end* data sensor mengalir ke *server*, parameter adaptif kembali ke *edge*, dan tindakan aktual dijalankan.
 - Skenario *failover* memutus koneksi *WiFi* untuk mengecek otomatisasi lokal tetap berjalan sesuai *threshold*.
3. Uji replikasi:
 - Pengulangan pengambilan data dan kontrol selama beberapa siklus untuk memastikan konsistensi hasil.
 - Variasi kondisi lingkungan dengan variasi suhu atau kelembaban alamiah di *greenhouse* untuk mengevaluasi adaptabilitas.
4. Triangulasi:
 - Membandingkan pembacaan sensor dengan pengukuran manual atau perangkat kalibrator eksternal di beberapa titik waktu untuk memvalidasi akurasi setelah kalibrasi.
5. *Peer review* dan umpan balik pengguna:
 - Diskusi hasil dengan promotor atau rekan sejawat untuk memastikan interpretasi valid.

3.3.7. Dokumentasi Prosedur

- Setiap tahap eksperimen dicatat secara rinci seperti tanggal, kondisi lingkungan, *versi firmware* mikrokontroler, konfigurasi *server*, serta catatan anomali.
- *Log* sistem otomatis diarsipkan untuk keperluan analisis lebih lanjut atau penelusuran kesalahan.
- Hasil kalibrasi, data respons kontrol, dan hasil uji performa *web* disimpan dalam format tabel dan *grafik* yang jelas.

3.3.8. Etika dan Keamanan Data

- Data eksperimen diperlakukan sesuai standar etika penelitian dengan tidak memuat informasi pribadi.
- Akses ke *server* dilindungi kredensial agar tidak terjadi manipulasi data.
- Pada pengujian performa, digunakan beban uji internal tanpa mengganggu layanan eksternal pihak ketiga.

3.3.9. Alur Kerja dan Jadwal

- Tahap persiapan satu sampai dua minggu instalasi dan konfigurasi.
- Kalibrasi sensor selama satu minggu untuk tiap jenis sensor.
- Pengembangan dan Uji Integrasi Sistem *Hybrid* tiga sampai empat minggu untuk pengujian *online/offline*, debugging logika *hybrid*.
- Pengujian empiris di *greenhouse* selama dua sampai tiga minggu pemantauan kondisi nyata tanaman.
- Pengujian *performa web* dan *aplikasi* selama satu sampai dua minggu pengujian beban dan uji pengguna.
- Analisis data dan validasi selama tiga sampai empat minggu analisis statistik, simulasi transfer *function*, dan diskusi hasil.
- Dokumentasi dan publikasi yang dilakukan paralel dengan analisis, menulis laporan, menyiapkan artikel jurnal.

Jadwal ini disesuaikan dengan ketersediaan laboratorium di *greenhouse*. Peneliti memastikan periode pengambilan data mencakup variasi kondisi lingkungan yang representatif.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Berhasil merancang model holistik antara IoT dan sistem otomasi dengan algoritma *hybrid* dan memastikan keberlangsungan operasional *smart greenhouse* melalui validasi empiris ditandai dengan hasil uji mekanisme *fallback hybrid control* yang dilakukan menggunakan parameter kontrol yang terukur antara lain *threshold* kelembaban tanah 50 % ($r(t)=50\%$) dan durasi penyiraman berbasis *cloud* (IoT) dan lokal masing-masing 300 detik, siklus *heartbeat* HTTP setiap 60 detik dengan *timeout* deteksi koneksi satu detik, serta simulasi pemutusan koneksi selama 30 menit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa meski koneksi terputus hingga 1.800 detik, kelembaban tanah tetap terjaga di sekitar *setpoint* 50 % dengan *RMSE* sebesar 1,77 dan tanpa intervensi manual. Waktu deteksi *timeout* rata-rata tercatat satu detik, dan waktu *recovery* atau kembali ke mode *online* rata-rata dua detik, sehingga *downtime* sistem efektif nihil. Persentase *uptime* konektivitas di atas 95 % selama uji. Peningkatan akurasi pemantauan ditandai dengan penurunan nilai *RMSE* dan peningkatan akurasi setiap sensor. Sensor suhu DHT11, *RMSE* turun dari 0,1345 menjadi 0,1176, menghasilkan peningkatan akurasi sebesar 12,61%. Sensor kelembaban DHT11 mengalami pengurangan *RMSE* dari 0,13748 menjadi 0,12810 dengan peningkatan akurasi 6,82%. Sensor pH tanah mencatat penurunan *RMSE* dari 0,37531 menjadi 0,01799 dengan peningkatan akurasi hingga 64,26%. Kalibrasi sensor alir air menunjukkan *RMSE* turun dari 1,436339 menjadi 1,436245 setara dengan peningkatan akurasi 0,01%. Terakhir, sensor kelembaban tanah mengalami penurunan

RMSE dari 1,98431 menjadi 1,77833 sehingga akurasi meningkat sebesar 10,38%.

2. Berhasil menguji efektivitas model dalam meningkatkan ketahanan jaringan dan memastikan keberlangsungan operasional *smart greenhouse* melalui validasi empiris. Peningkatan ketahanan jaringan ditandai dengan hasil pengujian performa *web* pada <https://greenhouse.darmajaya.ac.id/> dengan 20 Pengguna Virtual (PV) menunjukkan sistem mampu melayani beban tinggi tanpa kesalahan (0 % *error*) dan *throughput* stabil. Pada metode *GET*, total *request* mendekati 50 *req/detik* dengan rata-rata waktu *respons* 398 ms untuk *endpoint* *pilih.php* dan *pilih_aktuator.php*, masing-masing memproses 19.574 dan 19.576 *request* dengan rata-rata *respons* hanya 235 ms pada 90 % durasi uji, sedangkan *pilih_sensor.php* memproses 19.594 *request* dengan rata-rata *respons* 726 ms dan 90 th *percentile* mencapai 740 ms. Pada metode *POST*, pengujian selama 19 menit 59 detik memperlihatkan *throughput* rata-rata 20,18 *hits/detik* tanpa *error*, meski terdapat lonjakan puncak *respons* mendekati 6.000 ms. Rincian *endpoint POST* *insert_sensor1.php* memproses 8.061 *hits* dengan rata-rata *respons* 583 ms (90 th *percentile* 1.198 ms) *update1.php* memproses 8.073 *hits* dengan rata-rata *respons* 1.777 ms (90 th *percentile* 4.727 ms) dan *update_sensor1.php* memproses 8.060 *hits* dengan rata-rata *response* 542 ms (90 th *percentile* 1.006 ms).

5.2. Saran

1. Mengimplementasikan sistem *Ultrasonic Repellent* Otomatis untuk mengusir tikus tanpa mengganggu tanaman.
2. Mengintegrasikan *WiFiClientSecureBearSSL library* pada *mobile app* untuk menghindari serangan DDoS.
3. Pengujian sistem pada suhu ekstrim.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, N., Durani, N. A. B., Shari, M. F. B., Siong, K. S., Hau, V. K. W., Siong, W. N., & Ahmad, I. K. A. 2021. Towards smart agriculture monitoring using fuzzy systems. *IEEE Access*, 9, 4097–4111.
- Abu, N. S., Bukhari, W. M., Ong, C. H., Kassim, A. M., Izzuddin, T. A., Sukhaimie, M. N., Norasikin, M. A., & Rasid, A. F. A. 2022. Internet of things applications in precision agriculture: A review. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 3(3), 338–347.
- Arduino Team. (2024). *Arduino® Mega 2560 Rev3* [Microcontroller board]. Arduino [Data sheet].
- ASTM International. (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass (ASTM D2216)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bersani, C., Ruggiero, C., Sacile, R., Soussi, A., & Zero, E. 2022. Internet of Things approaches for monitoring and control of smart greenhouses in Industry 4.0. *Energies*, 15(10), 3834.
- Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R. M., & van den Dobbelsteen, A. A. J. F. 2022. The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, 377, Article 134443.
- Chigwada, J., Mazunga, F., Nyamhere, C., Mazheke, V., & Taruvinga, N. 2022. Remote poultry management system for small to medium scale producers using IoT. *Scientific African*, 18, e01398.
- Costantino, A., Comba, L., Sicardi, G., Bariani, M., & Fabrizio, E. 2021. Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*, 288, 116583.
- Dastjerdi, A. V., Gupta, H., Calheiros, R. N., Ghosh, S. K., & Buyya, R. 2016. Fog computing: Principles, architectures, and applications. In *Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications* (pp. 61–75).
- Depoinovasi. (2019). *Datasheet sensor pH tanah* [Data sheet].
- Depoinovasi. DFRobot. (2019). *Gravity: Analog TDS sensor/meter for Arduino* (SKU: SEN0244) [Data sheet].
- Dong, J., Goodman, N., Carre, A., & Rajagopalan, P. 2025. Calibration and validation-based assessment of low-cost air quality sensors. *Science of the Total Environment*, 977, 179364.
- Ehteram, M., Ahmed, A. N., Kumar, P., Sherif, M., & El-Shafie, A. 2021. Predicting freshwater production and energy consumption in a seawater greenhouse based on ensemble frameworks using optimized multi-layer perceptron. *Energy Reports*, 7, 6308–6326.
- Espressif Systems. 2017. *ESP8266 technical reference* [Technical reference]. Espressif.
- Ferrández-Pastor, F. J., Alcañiz-Lucas, S., García-Chamizo, J. M., & Platero-Horcajadas, M. 2019. *Smart environments design on industrial*

- automated greenhouses*. Proceedings, 31(1), 36.
- Flores Cayuela, C. M., González Perea, R., Camacho Poyato, E., & Montesinos, P. 2022. An ICT-based decision support system for precision irrigation management in outdoor orange and greenhouse tomato crops. *Agricultural Water Management*. 269, Article 107686.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2009. *Global agriculture towards 2050: Briefing paper for FAO high-level expert forum "How to feed the world 2050"* (12–13 October 2009).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2018. *The future of food and agriculture Alternative pathways to 2050*, 2, 1-191.
- Huang, K., Shu, L., Li, K., Yang, F., Han, G., Wang, X., & Pearson, S. 2020. Photovoltaic agricultural Internet of Things towards realizing the next generation of smart farming. *IEEE Access*, 8, 76300–76312.
- Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Ong, A. E., Shu'lb, M. I., Wu, W., & de Oliveira, M. A. 2022. LoRaWAN-based IoT system implementation for long-range outdoor air quality monitoring. *Internet of Things*. 19, Article 100540.
- Jerrin Simla, A., Chakravarthy, R., & Megalan Leo, L. 2022. An experimental study of IoT-based topologies on MQTT protocol for agriculture intrusion detection. *Measurement: Sensors*. 24, Article 100470.
- Junaidi, A. S. Y., Iffah, P. Y. D., Pauzi, G. A., Surtono, A., Suciyati, S. W., Warsito, K. T., & Khairurrijal. 2019. Flow rate and volume control of fluid based on Arduino for synthesis of silver nanowires. In *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1338. Article 012018).
- JXCT. 2020. *JXBS-3001-NPK-RS soil NPK sensor user manual* (Version 2.0) [User manual]. <http://www.jxct-iot.com>.
- Katzin, D., Marcelis, L. F. M., & van Mourik, S. 2021. Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*. 281, Article 116019.
- Kefalakis, N., Petris, S., Georgoulis, C., & Soldatos, J. 2016. Open source semantic web infrastructure for managing IoT resources in the cloud. In *Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications* (pp. 29–48).
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedamb, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayaked, U. 2024. A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100487.
- Kuijpers, W. J. P., Antunes, D. J., van Mourik, S., van Henten, E. J., & van de Molengraft, M. J. G. 2022. Weather forecast error modelling and performance analysis of automatic greenhouse climate control. *Biosystems Engineering*, 214, 207–229.
- Kirci, P., Ozturk, E., & Celik, Y. (2022). *A Novel Approach for Monitoring of Smart Greenhouse and Flowerpot Parameters and Detection of Plant Growth with Sensors*. *Agriculture*, 12(10), 1705.
- Maraveas, C., & Bartzanas, T. 2021. *Application of Internet of Things (IoT) for optimized greenhouse environments*. *AgriEngineering*, 3(4), 954–970.
- Morgan Kaufmann. Khodadadi, F., Dastjerdi, A. V., & Buyya, R. 2016. Internet of things: An overview. In *Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications* (pp. 1–28).
- Morgan Kaufmann. Koteish, K., Harb, H., Dbouk, M., Zaki, C., & Abou Jaoude, C. 2022. AGRO: A smart sensing and decision-making mechanism for

- real-time agriculture monitoring. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34(9), 7059–7069.
- Liberg, O., Sundberg, M., Wang, Y.-P. E., Bergman, J., & Sachs, J. 2018. The cellular Internet of Things. In *Cellular Internet of Things* (pp. 1–13).
- Liu, Y., & Jin, J. (2021). Hybrid-driven control of networked switched systems with random cyber attacks. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(10), 2402–2409.
- Maureira, F., Rajagopalan, K., & Stöckle, C.O. 2022. Evaluating tomato production in open-field and high-tech greenhouse systems. *Journal of Cleaner Production*, 337, Article 130459.
- Mamouri, S.J., Tan, X., Klausner, J.F., Yang, R., & Bénard, A. 2020. Performance of an integrated greenhouse equipped with light-splitting material and an HDH desalination unit. *Energy Conversion and Management: X*, 7, Article 100045.
- Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J.-H. 2025. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1587869.
- Méndez-Guzmán, H. A., Padilla-Medina, J. A., Martínez-Nolasco, C., Martínez-Nolasco, J. J., Barranco-Gutiérrez, A. I., Contreras-Medina, L. M., & Leon-Rodriguez, M. 2022. IoT-based monitoring system applied to aeroponics greenhouse. *Sensors*, 22(15), 5646.
- Muñoz-Liesa, J., Royapoor, M., Cuerva, E., Gassó-Domingo, S., Gabarrell, X., & Josa, A. 2022. Building-integrated greenhouses raise energy co-benefits through active ventilation systems. *Building and Environment*, 208, Article 108585.
- Parada, F., Gabarrell, X., Ruff-Salís, M., Arcas-Pilz, V., Muñoz, P., & Villalba, G. 2021. Optimizing irrigation in urban agriculture for tomato crops in rooftop greenhouses. *Science of the Total Environment*, 794, Article 148689.
- Pasika, S., & Gandla, S. T. 2020. Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT. *Heliyon*, 6(7), Article e04096.
- Robinson, G. M. 2024. Global sustainable agriculture and land management systems. *Geography and Sustainability*, 5, 637-646.
- SEAFLO Industrial Co., Ltd. 2017. *YF-S201 water flow sensor datasheet* [Data sheet]. SEAFLO Industrial Co., Ltd.
- Setyawan, D. Y., Warsito, M., Marjunus, R., & Nurfiana, & Syahputri, R. 2022. A systematic literature review: Internet of Things on smart greenhouse. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(12), 672–679.
- Setyawan, D. Y., Warsito, W., Marjunus, R., & Sumaryo, S. 2024. A novel controlling system for smart farming-based Internet of Things (IoT). *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(5), 630–641.
- Setyawan, D. Y., Warsito, M., Marjunus, R., & Sumaryo, S. 2024. Automasi dan Internet of Things (IoT) pada pertanian cerdas: Review artikel pada jurnal terakreditasi Kemenristek. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 2024, 1–9.

- Shakya, A. K., Ramola, A., Kandwal, A., & Vidyarthi, A. 2021. Soil moisture sensor for agricultural applications inspired from state of art study of surfaces scattering models & semi-empirical soil moisture models. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(8), 559–572.
- Sharma, K. L. S. 2017a. Automation system structure. In *Overview of Industrial Process Automation* (pp. 15–23). Elsevier. Sharma, K. L. S. (2017b). Why automation? In *Overview of Industrial Process Automation* (pp. 1–14).
- Shiyale, P. D., Thombre, H., Tyagi, G., & Chauhan, A. 2020. *IOT-based smart greenhouse automation*. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 8(5), 121–124.
- Singh, N., Tafaoul, M., & Magdi, A. 2024. IoT-based greenhouse technologies for enhanced crop production: A comprehensive study of monitoring, control and communication techniques. *Systems Science & Control Engineering*, 12(1), 2306825.
- Thorat, T., Patle, B. K., & Kashyap, S. K. 2023. Intelligent insecticide and fertilizer recommendation system based on TPF-CNN for smart farming. *Smart Agricultural Technology*, 3, Article 100114.
- Tsafaras, I., Campen, J. B., Stanghellini, C., de Zwart, H. F., Voogt, W., Scheffers, K., Al Harbi, A., & Al Assaf, K. 2021. Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions. *Agricultural Water Management*, 250, 106807.
- Verdouw, C., Sundmaeker, H., Tekinerdogan, B., Conzon, D., & Montanaro, T. 2019. *Architecture framework of IoT-based food and farm systems: A multiple case study*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104939.
- Volosciuc, C., Bogdan, R., Blajovan, B., Stângaciu, C., & Marcu, M. 2024. *GreenLab: An IoT-based small-scale smart greenhouse*. *Future Internet*, 16, 195.
- Wang, J., Chen, M., Zhou, J., & Li, P. 2020. Data communication mechanism for greenhouse environment monitoring and control: An agent-based IoT system. *Information Processing in Agriculture*, 7(3), 444–455.
- Warsito, P., Suciayati, S. W., & Turyani. 2012. Design and characterization of water level detector using MW22B multi-turn potentiometer. *AIP Conference Proceedings*, 1454, 174–177.
- Warsito, Suciayati, S. W., Pauzi, G. A., Putra, B. L., Aprila, S., & Kurniati, L. 2014. Calibration and digital linearization of ultrasonic transducer response. *Sensors & Transducers*, 183(12), 48–52.
- Yin, H., Cao, Y., Marelli, B., Zeng, X., Mason, A. J., & Cao, C. 2021. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. *Advanced Materials*, 33(20), Article 2007764.
- Zapalac, G. 2022. Simulation of a convectively-cooled unventilated greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106563.
- Zhang, Y., Yasutake, D., Hidaka, K., Okayasu, T., Kitano, M., & Hirota, T. 2022. Crop-localized CO₂ enrichment improves the microclimate, photosynthetic distribution and energy utilisation efficiency in a greenhouse. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133465.