

IMPLEMENTASI SISTEM AEROPONIK BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) UNTUK MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS SELADA (LACTUCA SATIVA)

Sulthon Ali Musti¹, Yessita Puspaningrum², Dyah Ayu Sri Hartanti³

^{1,2,3}Universitas KH. A. Wahab Hasbullah

Email: sulthonali77@gmail.com¹, yessita@unwaha.ac.id², dyah@unwaha.ac.id³

Abstrak

Tanaman selada (*Lactuca sativa*) merupakan komoditas hortikultura bernilai tinggi yang sangat rentan terhadap fluktuasi suhu lingkungan. Budidaya konvensional maupun sistem aeroponik manual seringkali mengalami kendala berupa cekaman panas (heat stress) pada zona perakaran akibat tidak adanya kontrol iklim mikro yang presisi, sehingga menurunkan kuantitas dan kualitas hasil panen. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun sistem aeroponik berbasis Internet of Things (IoT) dan mengevaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan produktivitas selada. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan eksperimen Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang terdiri dari tiga perlakuan: aeroponik IoT, aeroponik manual, dan metode konvensional (tanah), masing-masing dengan 9 ulangan. Sistem otomatis dibangun menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 yang terintegrasi dengan sensor DHT22 dan ultrasonik untuk mengendalikan suhu ruang akar serta mekanisme drainase. Hasil uji fungsionalitas menunjukkan sensor memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dengan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 3,11%. Lebih lanjut, analisis statistik ANOVA membuktikan bahwa penerapan IoT memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap pertumbuhan tanaman ($p < 0,05$). Perlakuan aeroponik IoT menghasilkan rata-rata bobot basah tertinggi sebesar 114,33 gram per tanaman, meningkat 16,40% dibandingkan aeroponik manual dan 9,35% dari metode konvensional. Sistem terbukti efektif memitigasi cekaman termal, sehingga menjaga pembukaan stomata dan respirasi akar tetap optimal. Kesimpulannya, integrasi IoT pada pertanian aeroponik mampu mengakselerasi elongasi vegetatif dan akumulasi biomassa, sekaligus memberikan solusi berkelanjutan bagi efisiensi pertanian modern.

Kata Kunci: Aeroponik, Internet Of Things, *Lactuca Sativa*, Nodemcu Esp8266, Produktivitas.

Abstract

*Lettuce (*Lactuca sativa*) is a high-value horticultural commodity that is extremely vulnerable to environmental temperature fluctuations. Conventional cultivation, including manual aeroponic systems, frequently experiences heat stress in the root zone due to the absence of precise microclimate control, which ultimately degrades the quantity and quality of the harvest. Therefore, this research aims to design an Internet of Things (IoT) based aeroponic system and evaluate its effectiveness in increasing lettuce productivity. This study employed a quantitative approach with a Completely Randomized Design (CRD) consisting of three treatments: IoT-based aeroponics, manual aeroponics, and conventional soil methods, each with 9 replications.*

The automated system was built utilizing the NodeMCU ESP8266 microcontroller integrated with DHT22 and ultrasonic sensors to control the root chamber temperature and drainage mechanisms. The functional test demonstrated that the sensor possessed excellent accuracy with a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 3.11%. Furthermore, One-Way ANOVA statistical analysis revealed that IoT implementation significantly affected plant growth ($p < 0.05$). The IoT aeroponic treatment yielded the highest average fresh weight of 114.33 grams per plant, representing a 16.40% increase compared to manual aeroponics and 9.35% compared to the conventional method. The system effectively mitigated thermal stress, ensuring optimal stomatal opening and root respiration. In conclusion, the integration of IoT into aeroponic agriculture accelerates vegetative elongation and biomass accumulation, providing a sustainable solution for modern farming efficiency.

Keywords: *Aeroponics; Internet Of Things, Lactuca Sativa, Nodemcu Esp8266, Productivity.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara agraris yang dianugerahi kekayaan sumber daya alam melimpah serta iklim tropis yang mendukung, menjadikannya wilayah dengan potensi masif untuk memproduksi komoditas pertanian unggulan (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2023). Dalam struktur perekonomian agrikultur nasional, subsektor hortikultura memegang peranan krusial tidak hanya sebagai penopang ketahanan pangan dan sumber gizi masyarakat, tetapi juga sebagai pilar kelestarian lingkungan hidup dan penggerak ekonomi (Tando, 2019; Umikalsum, 2019). Salah satu produk hortikultura daun yang saat ini mengalami lonjakan permintaan akibat pesatnya pertumbuhan industri kuliner dan kesadaran masyarakat akan pola makan sehat adalah tanaman selada (*Lactuca sativa*). Sayuran ini sangat digemari untuk dikonsumsi dalam

keadaan segar karena teksturnya yang renyah serta kandungan nutrisinya yang kaya akan serat, antioksidan, mineral, kalsium, serta vitamin A dan C (Samadi, 2019; Fadilah, 2022). Kendati memiliki nilai komersial yang menjanjikan, proses budidaya selada di wilayah beriklim tropis seringkali dihadapkan pada tantangan biologis. Secara genetik, selada adalah tanaman subtropis yang sensitif terhadap lonjakan suhu udara. Ketika selada terpapar suhu lingkungan ekstrem yang melampaui ambang batas toleransinya, tanaman akan merespons dengan memicu fase bolting, yakni pembungaan dini yang menyebabkan tekstur daun menjadi alot dan rasanya berubah menjadi sangat pahit, sehingga menurunkan kualitas dan harga jual di pasaran (Khasanah, 2022).

Di samping ancaman fluktuasi iklim, sektor agrikultur saat ini juga terdesak oleh laju alih fungsi lahan produktif akibat

urbanisasi dan masih mendominasi metode pertanian konvensional berbasis tanah yang dinilai boros sumber daya serta rentan terhadap hama (Sari, 2023; Rifqi Fauzi, Nur Ichniarsyah, & Agustin, 2016). Guna merespons problematika tersebut, tren pertanian modern mulai bergeser pada penerapan soilless culture (budidaya tanpa tanah), salah satunya melalui teknik aeroponik. Metode ini memberdayakan udara sebagai media tumbuh utama dengan cara menggantung zona perakaran di dalam ruang gelap, lalu menyemprotkan larutan hara dalam bentuk kabut mikro secara periodik (Fadhil, Argo, & Hendrawan, 2015; Simanungkalit et al., 2023). Meskipun sistem ini diklaim jauh lebih efisien dalam penggunaan air dan mampu menekan penularan patogen bawaan tanah, aplikasi aeroponik secara manual seringkali masih menyisakan celah kelemahan berupa kerentanan akar terhadap cekaman panas (heat stress) laten yang terakumulasi di dalam instalasi greenhouse pada siang hari. Fluktuasi termal yang tidak terkendali ini menjadi urgensi utama perlunya introduksi teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengubah pertanian mekanis menjadi Smart Farming. IoT memungkinkan berbagai sensor fisik, aktuator mekanis, dan platform digital saling

terhubung melalui jaringan nirkabel untuk mengeksekusi otomatisasi presisi secara real-time tanpa intervensi langsung dari manusia (Rusli, 2021; Zulkarnain, Wijaya, & Mustamin, 2022; Mukhopadhyay & Suryadevara, 2014). Beranjak dari analisis kesenjangan (gap analysis) pada penelitian terdahulu yang umumnya hanya memanfaatkan IoT sebatas untuk monitoring jarak jauh, riset ini menawarkan kebaruan dengan mendesain algoritma mitigasi termal aktif langsung pada ruang perakaran (root chamber). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun instalasi aeroponik terotomatisasi berbasis mikrokontroler pintar serta menguji dan mengevaluasi efektivitasnya secara empiris terhadap parameter peningkatan produktivitas akhir tanaman selada dibandingkan dengan praktik konvensional.

KAJIAN TEORITIS

Secara morfologis dan fisiologis, tanaman selada (*Lactuca sativa*) yang tergolong ke dalam famili Asteraceae memiliki karakteristik perakaran yang memadukan sistem serabut dan tunggang dangkal (Cahyono, 2005; Rukmana, 1994). Sifat akar yang responsif terhadap tingkat aerasi oksigen dan serapan nutrisi

makro menjadikannya komoditas yang sangat ideal untuk dikembangkan melalui skema aeroponik (Saparinto & Susiana, 2014). Berbeda dengan hidroponik statis seperti Nutrient Film Technique (NFT) yang merendam sebagian akar dalam aliran air murni, teknik aeroponik mengekspos akar seratus persen ke udara terbuka di dalam chamber pelindung (Susilawati, 2019; Pracaya, 2011). Tingkat oksigen terlarut (Dissolved Oxygen) yang melimpah dari udara bebas ini mampu memicu laju respirasi seluler pada jaringan akar, yang berimbas pada percepatan metabolisme pembelahan sel vegetatif tanaman melebihi teknik budidaya lainnya (Stoner, 1983; Anggraini, Prayogo, Suhartini, & Permadi, 2023).

Keberhasilan rekayasa iklim mikro pada budidaya tertutup sangat bergantung pada arsitektur sistem kendali (Wulandari & Sholihin, 2019). Dalam perancangan IoT, modul System on Chip (SoC) NodeMCU ESP8266 kerap dipilih sebagai unit pemroses utama. Berbeda dari papan sirkuit mikrokontroler tradisional seperti keluarga Arduino yang mengandalkan pemrosesan 8-bit, modul ESP8266 telah mengadopsi prosesor 32-bit Tensilica L106 yang beroperasi pada clock speed 80 MHz, lengkap dengan kapabilitas integrasi

jaringan Wi-Fi secara built-in (Iqbal, Hartawan, & Nugraha, 2024; Wati & Sholihah, 2021; Yazid, Ingetenta, & Yusro, 2021). Perpaduan ini memungkinkan cip untuk mengekstrak data dari berbagai sensor fisik, mengevaluasi algoritma logika bersyarat, serta merespons dengan memicu relai aktuator hanya dalam hitungan milidetik. Kehadiran teknologi ini menjadi krusial untuk mencegah kelayuan transien pada tanaman hortikultura akibat fluktuasi cuaca ekstrem.

Tinjauan terhadap sejumlah literatur terdahulu mengafirmasi bahwa intervensi teknologi mutlak diperlukan untuk mendongkrak tonase pertanian daun. Studi lapangan komprehensif yang dilakukan oleh Sari (2023) di Serenity Farm Bandung memvalidasi bahwa sistem konvensional berbasis lahan tanah sangat rentan terhadap fluktuasi cuaca serta memiliki risiko tinggi terhadap serangan kutu daun, ulat grayak, dan penyakit busuk pangkal yang memicu gagal panen (Sari, 2023). Sebaliknya, eksperimen Prawoto dan Kartika (2016) yang membandingkan performa *soilless culture* menemukan bahwa budidaya aeroponik mendemonstrasikan elongasi tajuk serta pembentukan luasan daun yang jauh lebih

masif dibandingkan hidroponik tradisional karena ketiadaan hambatan friksi mekanis pada zona perakaran (Prawoto & Kartika, 2016). Kendati demikian, berbagai riset tersebut belum mengintegrasikan mekanisme umpan balik otomatisasi iklim ke dalam ruang perakaran. Hipotesis implisit dari penelitian ini meyakini bahwa penggabungan kapabilitas cooling system berbasis IoT secara langsung ke dalam instalasi aeroponik mampu mengeliminasi ancaman heat stress pada akar, sehingga memastikan seluruh energi asimilat tanaman tersalurkan sepenuhnya untuk pembentukan biomassa vegetatif tanpa hambatan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif (quasi-experiment) berbentuk Rancangan Acak Lengkap (RAL) untuk mengukur secara presisi pola hubungan kausalitas antara perlakuan manipulasi lingkungan budidaya terhadap luaran akhir biomassa tanaman (Sugiyono, 2013; Arikunto, 2014; Creswell & Creswell, 2018). Populasi dari studi ini adalah seluruh populasi tanaman selada (*Lactuca sativa*) varietas unggul Nauli F1 yang dibudidayakan di fasilitas greenhouse Pondok Pesantren Al-Madienah, Jombang. Sampel penelitian ditarik menggunakan teknik purposive sampling terhadap 27 bibit

selada yang memiliki keseragaman genetik dan visual pada usia 7 Hari Setelah Semai (HSS). Keseluruhan sampel kemudian direndomisasi secara berimbang ke dalam tiga kelompok perlakuan eksperimental, di mana masing-masing kelompok memuat 9 unit ulangan. Variabel bebas dalam riset ini direpresentasikan oleh kategori metode tanam: Kelompok P1 yang diintervensi menggunakan metode Aeroponik Internet of Things (IoT), Kelompok P2 menggunakan Aeroponik Manual tanpa otomatisasi, serta Kelompok P3 yang dibudidayakan menggunakan media tanah sebagai representasi metode Konvensional (Wulandari, Muhartini, & Sri, 2012). Untuk mengantisipasi bias hasil, variabel kontrol diberlakukan secara ketat mencakup keseragaman volume nutrisi cair AB Mix, intensitas pencahayaan matahari, serta masa pemeliharaan hingga memasuki fase panen pada umur 30 Hari Setelah Tanam (HST).

Secara teknis, prototipe aeroponik cerdas ini direkayasa menggunakan prinsip ruang kompartemen ganda (dual-chamber). Tandon penampung larutan hara dipisahkan dengan ruang isolasi tempat akar menggantung. Modul NodeMCU ESP8266 diprogram bertindak sebagai sistem saraf pusat yang

menghimpun input pembacaan dari sensor DHT22 untuk kalkulasi suhu mikro dan kelembaban nisbi, serta sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur elevasi genangan air di dasar chamber. Metode pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung yang didokumentasikan secara terstruktur meliputi pengukuran laju pertumbuhan elongasi tinggi batang menggunakan mistar penggaris (cm), tabulasi jumlah helaian daun sehat yang terbentuk, dan diakhiri dengan penimbangan massa akumulasi produk menggunakan neraca analitik digital (gram) pascapanen (Daruhadi & Sopiati, 2024; Rijali, 2018; Fuad, 2003). Keseluruhan data metrik kuantitatif yang terkumpul kemudian direkapitulasi dan diuji signifikansinya secara parametrik menggunakan fitur One-Way Analysis of Variance (ANOVA) berbantuan piranti lunak pengolah data statistik. Apabila kalkulasi derajat kebebasan mengindikasikan signifikansi nilai $p < 0,05$, maka proses validasi diteruskan dengan analisis komparasi post-hoc Least Significant Difference (LSD) atau Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf signifikansi 5% guna memetakan divergensi performa secara spesifik antar masing-masing kelompok perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Siklus pelaksanaan eksperimen berlangsung selama periode satu bulan penuh, yang dipusatkan di dalam lingkungan terkendali greenhouse. Diskursus terhadap hasil penelitian ini dibagi menjadi evaluasi teknis terhadap kapabilitas peranti lunak dan keras, serta analisis fisiologis terhadap parameter vegetatif tanaman akibat perlakuan yang telah diujikan.

1. Kalibrasi dan Fungsionalitas Sistem Kendali Mikrokontroler

Keandalan data dan akurasi sensorik merupakan tulang punggung bagi sistem aktuasi Smart Farming. Sebelum instrumen diberdayakan untuk mengawal siklus hidup tanaman sampel, uji kalibrasi dilaksanakan dengan membandingkan pembacaan cip sensor DHT22 terhadap instrumen standar industri (Thermohygrometer digital) dengan interval pencatatan selama 60 menit. Observasi menunjukkan selisih rerata (deviasi) pembacaan suhu hanya terpaut 0,86°C, sementara deviasi kelembaban tercatat sebesar 2,14%. Kalkulasi Mean Absolute Percentage Error (MAPE) mencatatkan persentase kesalahan absolut senilai 3,11% untuk variabel temperatur dan 2,93% untuk kelembaban udara. Merujuk pada

literatur standardisasi pengukuran kalibrasi metrologi, nilai MAPE yang berada di bawah rentang 10% masuk ke dalam klasifikasi "Excellent" atau sangat presisi (Lewis, 1982; Widodo, 2025). Akurasi yang mumpuni ini menjamin sistem aeroponik tidak akan salah dalam mengambil keputusan otomatisasi iklim (Yazid et al., 2021)

Algoritma pemrograman logika bersyarat dirancang untuk mempertahankan kestabilan ambang batas termal (set-point) root chamber agar tidak menembus angka 28°C. Saat gelombang panas siang hari melanda dan sensor menstimulasi deteksi pelampauan batas suhu atau penyusutan kelembaban makro, NodeMCU ESP8266 seketika memicu integrasi relai ganda, menyalakan pompa kabut (sprayer) dan kipas sirkulasi (exhaust fan) secara simultan. Dorongan kinetik dari kipas mendistribusikan kabut dingin nutrisi secara merata ke seluruh celah akar tanaman, yang mana secara mekanis terbukti jauh lebih cepat memangkas temperatur hingga 3°C dan mendongkrak kelembaban sebesar 18% dibandingkan jika hanya menggunakan misting tunggal. Pada saat bersamaan, mekanisme feedback loop dari sensor ultrasonik HC-SR04 mengantisipasi ancaman pembusukan akar akibat genangan

(waterlogging) dengan mengaktifkan aktuator sedot paksa ke tandon utama, sehingga menciptakan sistem tertutup nir-limbah yang efisien secara hidrologis. Pemantauan via platform aplikasi Web Server lokal juga mengafirmasi bahwa perintah saklar manual (remote override) dari antarmuka visual mampu direspons oleh aktuator perangkat di kebun dengan jeda latensi ultra-rendah berkisar 0,4 hingga 1,9 detik saja, mengonfirmasi sinkronisasi dua arah yang sempurna pada arsitektur IoT ini.

2. Analisis Dinamika Pertumbuhan Vegetatif

Pertambahan dimensi linier vertikal (elongasi) dan eskalasi pembentukan helaian daun baru merupakan visualisasi primer dari lancarnya aktivitas pembelahan meristem apikal tanaman. Rangkuman perbandingan laju metrik pertumbuhan fisik dari fase persemaian hingga memasuki periode panen direkapitulasi secara komprehensif pada Tabel 1.

**Tabel 1. Deskripsi Statistik Rata-Rata
Pertumbuhan dan Hasil Panen Selada**

Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun (helai)	Bobot Basah (gram)
P1: Aeroponik IoT	25,10 a	19,00 a	114,33 a
P2: Aeroponik Manual	22,49 c	16,55 b	98,22 c
P3: Konvensional	23,90 b	12,88 c	104,55 b

Keterangan: Angka dengan superskrip yang sama pada kolom yang sama menunjukkan hasil yang tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji BNT.

Merujuk pada paparan data faktual Tabel 1, intervensi aeroponik cerdas (P1) mengantarkan kelompok sampel tersebut meraih rekor puncak pertumbuhan tajuk vertikal dengan capaian rerata 25,10 cm, membayangi performa aeroponik manual (22,49 cm) maupun metode konvensional (23,90 cm). Pada periode observasi ekstensif (14-28 HST), grafik laju pemanjangan sel perlakuan P1 memperlihatkan diferensiasi kurva eksponensial yang mencolok. Ekskalasi pesat ini adalah produk sampingan dari stabilisasi termal pada organ bawah tanah. Dalam tinjauan fisiologis komoditas (crop physiology), optimalisasi temperatur media mikroklimat mendikte maksimalisasi turgor internal jaringan parenkim; manakala sel mengalami turgiditas maksimal, regulasi fitohormon sensitif cuaca seperti auksin pembelah dan giberelin pemanjang sel akan terekspresi secara brutal tanpa interupsi, mempercepat ekstensi ruas-ruas meristematik batang muda (Gardner, Pearce,

& Mitchell, 1991). Kontras dengan hal tersebut, kelompok sampel aeroponik konvensional (P2) yang dibiarkan terekspos fluktuasi suhu greenhouse kerap mengalami cekaman evaporasi sesaat, memaksa tanaman merealokasi energinya dari fungsi pemanjangan vegetatif menjadi pertahanan kelangsungan hidup (Sari, 2023).

Lebih jauh, perbandingan pembentukan helaian daun memvalidasi superioritas metode soilless culture ruang udara, di mana P1 memproduksi 19 helaian daun dan P2 dengan 16 helaian, menumbangkan metode tanah (P3) yang tertahan pada 12 helaian. Ketimpangan ini mengonfirmasi postulat botani terkait korelasi antara porositas ruang udara dengan laju absorpsi gas (Stoner, 1983). Konfigurasi akar yang tersuspensi bebas di udara pada chamber aeroponik diselimuti oleh pasokan oksigen mikrobuih tanpa batas. Oksigenasi terlarut yang melimpah ruah ini memacu aktivitas metabolisme mitokondria pada zona serabut akar, mendongkrak kapasitas pompa ion untuk memanen nutrisi molekuler, terkhusus unsur Nitrogen (N) kationik dari larutan kabut AB Mix. Akselerasi asimilasi hara Nitrogen secara esensial bertindak sebagai penyokong utama perbanyak jaringan

kloroplas, sintesis asam amino protein sitoplasma, dan pada gilirannya mendorong pembelahan masif jaringan episeluler untuk merakit mekar-lebaran lembar daun yang meruah (Sutedjo, 2010)

3. Analisis Akumulasi Biomassa dan Produktivitas Akhir

Penimbangan tonase bobot basah akhir memegang hierarki tertinggi sebagai indikator pamungkas keberhasilan budidaya, karena parameter ini merupakan manifestasi akumulatif dari efisiensi translokasi fotosintat (energi karbohidrat) secara holistik selama satu siklus hidup tanaman. Hasil eksekusi uji F pada ANOVA (Analysis of Variance) mendeklarasikan secara absolut ($p\text{-value} < 0,05$) bahwa modifikasi sistem tanam membawa implikasi transformatif terhadap bobot panen. Tabel 1 merepresentasikan bahwa Kelompok P1 yang diawasi oleh kecerdasan IoT membukukan akumulasi biomassa paling inferior yakni 114,33 gram per individu. Capaian impresif ini menegaskan defleksi surplus persentase sebesar 16,40% menyalip metode aeroponik nir-otomasi (P2) dan surplus 9,35% di atas pola pertanian tanah (P3).

Diskrepansi tonase panen ini sejatinya menyingkap rahasia ketahanan fisiologis tanaman dalam merespons cekaman iklim

lokal. Pada perlakuan P2, sengatan radiasi mentari klimaks di siang bolong mendadak meroketkan suhu chamber akar. Keterlambatan respons manual pekebun dalam memompa nutrisi penyegar memaksa tanaman selada—yang notabene varietas subtropis anti-panas—masuk ke fase dehidrasi transien. Demi menghindari desikasi fatal akibat kelebihan keringat (evapotranspirasi), tanaman menginisiasi pertahanan mekanis dengan cara mengunci rapat gerbang stomata pada pori-pori daunnya. Penutupan portal stomata ini berujung tragis pada terhentinya absorpsi gas Karbondioksida (CO_2) ke dalam kloroplas, yang secara harafiah melumpuhkan mesin fotosintesis; produksi cadangan makanan (glukosa) terhenti, sehingga pertumbuhan biomassa melambat secara kronis. Berlawanan dengan tragedi di atas, penjagaan algoritma IoT pada P1 secara apik memutilasi probabilitas terjadinya heat stress. Detik ketika sensor mendeteksi ancaman lonjakan panas, orkestra kabut misting mendinginkan suhu ruang akar tanpa sempat menyentuh ambang kritis layu. Oleh karenanya, pori stomata selada P1 senantiasa terbuka lebar sepanjang durasi fotoperiode siang, menghisap CO_2 dalam kapasitas maksimal, mencetak

asimilat energi tiada henti, dan memompakan seratus persen molekul karbohidrat tersebut untuk mengekspansi jaringan sel penyusun bobot tubuhnya menjadi membesar dan memberat sempurna

KESIMPULAN DAN SARAN

Perancangan dan implementasi infrastruktur aeroponik berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan modul cip cerdas NodeMCU ESP8266 terbukti berhasil mengotomatisasikan regulasi stabilitas iklim ruang perakaran secara mutakhir dan andal. Hasil kalibrasi memvalidasi bahwa jejaring sensor yang disematkan mampu mencetak rekor akurasi istimewa dengan toleransi galat (MAPE) hanya di kisaran angka absolut 3,11%, menjamin tidak terjadinya malfungsi algoritma aktuasi pendinginan termal. Evaluasi statistik secara gamblang menyimpulkan bahwa intervensi teknologi digital IoT ini berkoleransi positif dan memberikan pengaruh yang teramat signifikan terhadap lompatan produktivitas akhir selada (*Lactuca sativa*). Sistem terotomatisasi ini merevolusi kapasitas akumulasi biomassa hingga menorehkan rata-rata tonase bobot basah puncak senilai 114,33 gram per individu, mengeliminasi cekaman panas abiotik yang sebelumnya merugikan elongasi vegetatif pada metode

aeroponik konvensional manual, serta menjamin suplai oksigenasi pernapasan seluler akar berada pada titik klimaks. Kendati purwarupa Smart Farming ini beroperasi secara cemerlang, riset ini masih dibatasi oleh ruang lingkup aktuasi yang hanya memitigasi fluktuasi termal dan hidrologi semata. Oleh sebab itu, sangat direkomendasikan bagi eksplorasi akademis di masa mendatang untuk memutakhirkan arsitektur IoT ini dengan mengintegrasikan sensor Electrical Conductivity (EC) serta probe pengukur derajat keasaman (pH) di dalam tandon utama demi mengeksekusi injeksi kepekatan nutrisi cair secara algoritmik mandiri. Lebih jauh, kajian berorientasi bisnis sangat dinantikan untuk membedah studi kelayakan ekonomi (Break-Even Point atau Cost-Benefit Analysis) guna memformulasikan strategi eskalasi dari skala purwarupa ke level agribisnis industri masif yang menguntungkan secara profitabilitas dan berkesinambungan bagi masyarakat petani masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Anggraini, D., Prayogo, S. S., Suhartini, & Permadi, Y. (2023). Sistem Automasi Dan Monitoring Pada Metode Pertanian Aeroponik. *Jurnal Ilmiah*

- Teknologi Dan Rekayasa, 28(1), 1-14.
<https://doi.org/10.35760/tr.2023.v28i1.6266>.
- Arikunto, S. (2014). *Prosedur penelitian: Suatu pendekatan praktik* (14th ed.). Rineka Cipta.
- Cahyono, B. (2005). *Budidaya tanaman sayuran*. Penebar Swadaya.
- Creswell, J. W. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Daruhadi, G., & Sopiati, P. (2024). Pengumpulan Data Penelitian. *Jurnal Cendekia Ilmiah*, 3(1), 148-155.
- Fadhil, M., Argo, B. D., & Hendrawan, Y. (2015). Rancang Bangun Prototype Alat Penyiram Otomatis dengan Sistem Timer RTC DS1307 Berbasis Mikrokontroler Atmega16 pada Tanaman Aeroponik. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis Dan Biosistem*, 3(1), 37-43.
- Fadilah, E. (2022). Karakterisasi Senyawa Anthraquinone dari Daun Selada Hijau (*Lactuca sativa* L.) dan Uji Aktivitas Antibakteri. *Jurnal Kimia Terapan*, 1(2), 142-150.
- Fuad. (2003). *Budidaya Tanaman Sawi*. Jakarta: Penebar Swadaya
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (1991). *Fisiologi tanaman budidaya* (H. Susilo, Trans.). UI-Press.
- Iqbal, M., Hartawan, L., & Nugraha, N. (2024). Perancangan dan Pembuatan Alat Sistem Monitoring Temperatur dan Kelembapan Greenhouse dengan Protokol ESP-NOW. *Jurnal Otomasi Industri*, 4(1), 79-89.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2023). *Statistik Pertanian Agricultural Statistics*. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Khasanah, U. (2022). *Tanggapan Pertumbuhan, Hasil, Dan Mutu dua Kultivar Selada (Lactuca sativa L.) Hidroponik Terhadap Perbedaan tinggi Rumah Kaca di dataran Rendah*. Universitas Gadjah Mada.
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. Butterworth Scientific.
- Mukhopadhyay, S. C., & Suryadevara, N. K. (2014). *Internet of Things: Challenges and Opportunities*.

- Switzerland: Springer International Publishing.
- Pracaya. (2011). Bertanam sayur organik. Penebar Swadaya.
- Prawoto, B. R., & Kartika, J. G. (2016). Pengelolaan Aspek Produksi dan Pasca Panen Sayuran Daun Secara Aeroponik dan Hidroponik: Studi Kasus Lembang, Bandung. *Buletin Agrohorti*, 4(1), 1-8.
- Rifqi Fauzi, A., Nur Ichniarsyah, A., & Agustin, H. (2016). Pertanian Perkotaan: Urgensi, Peranan, Dan Praktik Terbaik. *Jurnal Agroteknologi*, 10(1), 49-62.
- Rijali, A. (2018). Analisis Data Kualitatif. *Jurnal Ilmu Dakwah*, 17(33), 81-95.
- Rukmana, R. (1994). Bertanam selada. Kanisius.
- Rusli, S. J. (2021). Implementasi Konsep Smart Farming Berbasis IoT dan Manfaatnya. *Jurnal Ilmu Teknik Dan Komputer*, 5(1), 233-237.
- Samadi, B. (2019). Rahasia budidaya selada teknik budidaya pertanian organik dan anorganik. Pustaka Mina.
- Saparinto, C., & Susiana, R. (2014). Panduan lengkap budidaya ikan dan sayuran dengan sistem akuaponik. Lily Publisher.
- Sari, L. P. (2023). Produksi Selada Keriting (*Lactuca sativa* L.) Secara Konvensional Di Serenity Farm Bandung. *Jurnal Pertanian*, 1(1), 1-10.
- Simanungkalit, dkk. (2023). Inovasi Teknologi Budidaya Pertanian Tanpa Tanah. Medan: Agripublish.
- Stoner, R. J. (1983). Aeroponics versus bed and hydroponic propagation. *Florists' Review*, 173(1), 43-45.
- Sugiyono. (2013). Metode penelitian kuantitatif kualitatif dan R&D. Alfabeta.
- Susilawati. (2019). Dasar-Dasar Bertanam Secara Hidroponik. Palembang: Universitas Sriwijaya Press.
- Sutedjo, M. M. (2010). Pupuk dan Cara Pemupukan. PT. Rineka Cipta.
- Tando, E. (2019). Review: Pemanfaatan Teknologi Greenhouse Dan Hidroponik Sebagai Solusi Menghadapi Perubahan Iklim Dalam Budidaya Tanaman Hortikultura. *Buana Sains*, 19(1), 91-102. <https://doi.org/10.33366/bs.v19i1.1530>.
- Umikalsum, R. A. (2019). Analisis Usahatani Tanaman Selada Hidroponik Pada Kebun Eve'S

- Veggies Hydroponics Kota Palembang. *Societa*, 8(1), 52-57.
- Wati, D. R., & Sholihah, W. (2021). Pengontrol pH dan Nutrisi Tanaman Selada pada Hidroponik Sistem NFT Berbasis Arduino. *MULTINETICS*, 7(1), 12-20. <https://doi.org/10.32722/multinetics.v7i1.3504>.
- Widodo, A. (2025). Things (IoT) untuk Peningkatan Efisiensi dan Produktivitas Pertanian Modern. Jakarta: Penerbit Teknologi Agri.
- Wulandari, C., Muhartini, S., & Sri, T. (2012). Pengaruh Air Cucian Beras Merah Dan Beras Putih Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Selada (*Lactuca sativa* L.). *Vegetalika*, 1(1), 1-11. <https://doi.org/10.22146/veg.1516>.
- Wulandari, N., & Sholihin, H. (2019). Analisis Pengaruh Program Pendekatan Inovatif Budidaya Sayuran dengan Memanfaatkan Teknologi Smart Farming Berbasis IoT terhadap Efisiensi Produksi Tanaman pada Kelompok Wanita Tani Desa Jatimulyo. *Journal of Agribusiness Science and Rural Development (JASRD)*, 27(2), 58-66.
- Yazid, I., Ingetenta, S. O., & Yusro, M. (2021). Prototipe Pengamatan Budidaya Aeroponik berbasis IoT (Internet of Things). *Autocracy: Jurnal Otomasi, Kendali, Dan Aplikasi Industri*, 7(1), 12-18. <https://doi.org/10.21009/autocracy.071.3>.
- Zulkarnain, A. F., Wijaya, E. S., & Mustamin, N. F. (2022). Penerapan Teknologi Smart Farming Berbasis Internet of Things Bagi Masyarakat Petani Jeruk Siam. *Batara Wisnu: Indonesian Journal of Community Services*, 2(1), 50-59. <https://doi.org/10.53363/bw.v2i1.47>.