

Desain dan Prototipe Integrasi IoT dalam Pertanian Hidroponik Cerdas Berbasis Energi Terbarukan

Agus Salim Wardhana ^{1*}, Muhammad Ferdiansyah ², Siti Kholifah K ³

^{1,3} Program Studi Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Nusantara Lampung, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung, Indonesia.

² Program Studi Teknik Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Nusantara Lampung, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.

Corresponding Email: ferdiverd@gmail.com ^{1*}

Histori Artikel:

Dikirim 26 Oktober 2024; *Diterima dalam bentuk revisi* 11 November 2024; *Diterima* 20 November 2024; *Diterbitkan* 10 Januari 2025. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMik Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan merancang prototipe sistem otomasi menggunakan Internet of Things yang terintegrasi dengan energi terbarukan, khususnya panel surya, guna meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian hidroponik. Permasalahan utama yang dihadapi adalah tingginya biaya energi dan kebutuhan pemantauan intensif pada sistem hidroponik konvensional. Metodologi penelitian menggunakan pendekatan eksperimental, meliputi perancangan perangkat keras dengan Arduino Uno sebagai pusat kontrol, sensor lingkungan (DHT22) untuk pemantauan real-time, serta aktuator otomatis seperti pompa air, kipas, dan lampu LED. Proses integrasi sistem mencakup penghubungan perangkat keras dengan antarmuka IoT, diikuti oleh pengujian fungsional terhadap stabilitas sistem, efisiensi energi, dan kemampuan operasional dalam berbagai kondisi lingkungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe yang dikembangkan berhasil mengoperasikan seluruh sistem secara efisien dengan energi yang sepenuhnya bersumber dari panel surya, mengurangi ketergantungan pada listrik konvensional hingga 100%. Sistem ini memberikan kendali presisi terhadap variabel pertumbuhan tanaman seperti suhu, kelembaban, dan pencahayaan, dengan tingkat stabilitas operasional yang tinggi selama uji coba. Kontribusi spesifik penelitian ini terletak pada integrasi inovatif antara IoT, otomasi, dan energi terbarukan, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga menciptakan solusi pertanian hidroponik yang lebih ramah lingkungan. Temuan ini memiliki implikasi praktis signifikan, terutama dalam penerapan di wilayah terpencil dengan akses listrik terbatas, serta membuka peluang pengembangan lebih lanjut untuk aplikasi pada jenis pertanian lain dan integrasi kecerdasan buatan guna meningkatkan kemampuan prediktif dan kendali otomatis.

Kata Kunci: IoT; Energi Terbarukan; Panel Surya; Sensor; Real Time.

Abstract

This research aims to develop a prototype for an Internet of Things-based automation system powered by renewable energy, specifically solar panels, to enhance the efficiency and productivity of hydroponic farming. The study addresses critical challenges, including high energy costs and the intensive monitoring demands of conventional hydroponic systems. The experimental methodology involves designing hardware featuring Arduino Uno as the central control unit, environmental sensors (DHT22) for real-time monitoring, and automated actuators such as water pumps, fans, and LED lights. The system integration process encompasses linking the hardware to an IoT interface, followed by rigorous functional testing to evaluate system stability, energy efficiency, and operational performance under varying environmental conditions. The results demonstrate that the prototype successfully operates the entire hydroponic system using energy exclusively from solar panels, eliminating reliance on conventional electricity. The system achieves precise control over critical plant growth parameters such as temperature, humidity, and lighting, with high operational stability observed during trials. This research makes a notable contribution by innovatively integrating IoT, automation, and renewable energy, thereby enhancing energy efficiency while delivering a sustainable and environmentally friendly hydroponic farming solution. The findings have significant practical implications, particularly for implementation in remote areas with limited access to electricity. Furthermore, the study paves the way for future developments, including applications in other agricultural systems and the integration of artificial intelligence to enhance predictive analytics and automated control.

Keyword: IoT; Renewable Energy; Solar Panel; Sensor; Real-Time.

1. Pendahuluan

Pertanian merupakan sektor vital dalam memenuhi kebutuhan pangan global yang terus meningkat (Bantacut *et al.*, 2015), terutama di tengah pertumbuhan populasi dunia. Namun, sektor ini menghadapi tantangan besar, termasuk perubahan iklim, keterbatasan sumber daya alam, serta tekanan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan lingkungan (Daria *et al.*, 2023). Metode pertanian konvensional sering kali tidak efisien dalam penggunaan sumber daya seperti air dan energi (Hasibuan, 2023), serta memberikan dampak negatif pada lingkungan. Untuk menjawab tantangan tersebut, inovasi teknologi dalam sektor pertanian menjadi semakin penting. Salah satu pendekatan inovatif yang menjanjikan adalah penerapan *Internet of Things* (IoT) pada sistem hidroponik (Austria *et al.*, 2023). Hidroponik, sebagai metode pertanian tanpa tanah, memungkinkan penggunaan air yang lebih efisien serta kontrol optimal terhadap nutrisi dan kondisi lingkungan tanaman. Dengan integrasi IoT, sistem ini dapat diautomasi dan dipantau secara real-time sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan kualitas hasil pertanian. Namun, meskipun teknologi IoT telah diterapkan pada hidroponik, tantangan keberlanjutan masih menjadi perhatian utama, terutama terkait kebutuhan energi yang stabil dan ramah lingkungan (Melkysedek *et al.*, 2023). Energi terbarukan, seperti panel surya, menawarkan solusi ideal untuk mengatasi tantangan ini. Panel surya menghasilkan energi bersih yang dapat mendukung operasional sistem hidroponik secara mandiri tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional (Mohammad *et al.*, 2021). Hal ini tidak hanya mengurangi biaya operasional tetapi juga mengurangi jejak karbon yang dihasilkan oleh sistem pertanian modern (Almalki, 2021). Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait penerapan IoT dan energi terbarukan di bidang pertanian telah menunjukkan kemajuan yang signifikan. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pengontrol lingkungan hidroponik menggunakan jaringan sensor nirkabel untuk memantau suhu, kelembaban, dan pH secara real-time (Alam & Nasuha, 2020), yang meningkatkan efisiensi pengelolaan lingkungan pertanian. Ada pula penelitian yang merancang sistem berbasis IoT dengan sensor multisensor dan energi panel surya (Sriyanto & Setiawidayat, 2022), memungkinkan pemantauan lengkap terhadap kondisi lingkungan tanaman. Penelitian lainnya mengimplementasikan IoT untuk pengelolaan parameter tanaman dan daya dari panel surya (Rahutomo *et al.*, 2022), menghasilkan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Selain itu, beberapa studi memanfaatkan aplikasi seperti *Blynk* untuk mengontrol otomatis kelembaban, suhu, dan pH udara melalui smartphone, yang meningkatkan efisiensi pemeliharaan tanaman (Visconti, 2020). Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya hanya berfokus pada aspek pemantauan atau integrasi energi terbarukan secara terpisah. Sebagian besar belum mengembangkan prototipe sistem hidroponik cerdas yang sepenuhnya mengintegrasikan IoT dengan energi terbarukan ke dalam satu sistem yang holistik dan otomatis (Melkysedek *et al.*, 2023). Gap ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih menyeluruh untuk menyediakan solusi hidroponik yang benar-benar mandiri, efisien, dan berkelanjutan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengisi gap tersebut dengan merancang prototipe sistem hidroponik berbasis IoT yang didukung panel surya. Sistem ini dirancang tidak hanya mencakup pengairan, sirkulasi udara, pencahayaan, dan keamanan pintu, tetapi juga menyediakan kontrol real-time untuk seluruh komponen. Dengan pendekatan ini, penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya, mengurangi biaya operasional, serta mendukung pengembangan pertanian berkelanjutan yang relevan, terutama untuk wilayah-wilayah yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik konvensional. Pengembangan sistem hidroponik cerdas berbasis energi terbarukan ini tidak hanya berkontribusi pada produktivitas pertanian tetapi juga mendukung agenda global dalam menekan kemiskinan dan menyediakan solusi keberlanjutan untuk pertanian modern. Prototipe ini diharapkan dapat memberikan solusi nyata bagi masyarakat di daerah terpencil, sehingga mendukung kemandirian pangan sekaligus pelestarian lingkungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengembangkan dan menguji prototipe sistem otomasi hidroponik berbasis *Internet of Things* (IoT) yang didukung energi surya (Bantacut *et al.*, 2015). Tujuan utama penelitian ini adalah untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian hidroponik melalui otomatisasi pengelolaan lingkungan dan sumber daya yang lebih ramah lingkungan. Pendekatan ini melibatkan desain sistem, pengembangan prototipe, pengujian, serta analisis menyeluruh untuk memvalidasi kinerja sistem. Prosedur penelitian, parameter yang diukur, teknik pengumpulan data, serta metode analisis dijelaskan sebagai berikut. Pada tahap awal, dilakukan identifikasi masalah untuk memahami tantangan utama dalam sistem hidroponik konvensional, seperti tingginya biaya energi dan kebutuhan pemantauan intensif (Daria *et al.*, 2023). Studi lapangan dilakukan di beberapa lokasi petani hidroponik untuk mengidentifikasi kebutuhan utama teknologi. Teknik yang digunakan meliputi wawancara semi-terstruktur dengan petani dan pengumpulan data primer terkait konsumsi energi, efisiensi irigasi, serta kendala operasional yang dihadapi. Data yang diperoleh dianalisis untuk menetapkan parameter kebutuhan teknologi otomatisasi yang efisien dan berbasis energi terbarukan. Selanjutnya, kajian literatur dilakukan untuk mengumpulkan informasi dari penelitian sebelumnya mengenai penerapan IoT, sensor lingkungan, aktuator, dan energi terbarukan, khususnya panel surya, dalam pertanian. Fokus studi ini mencakup teknologi sensor suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya, serta strategi pengintegrasian IoT dengan panel surya untuk memastikan sistem bekerja secara berkelanjutan. Literatur yang digunakan mencakup jurnal internasional, paten teknologi, dan laporan teknis, yang menjadi dasar dalam merancang sistem prototipe.

Prototipe sistem dirancang berdasarkan hasil identifikasi masalah dan kajian literatur. Sistem yang dirancang mencakup beberapa komponen utama, yaitu sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban, serta sensor intensitas cahaya; aktuator berupa pompa submersible untuk irigasi dan lampu LED untuk pencahayaan buatan; panel surya 100 Wp yang terhubung ke pengontrol daya dan baterai lithium-ion untuk penyimpanan energi; dan mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pengolah data utama yang terhubung dengan aplikasi IoT untuk pemantauan dan kontrol. Desain sistem ini memperhatikan efisiensi energi, skalabilitas, dan antarmuka pengguna yang sederhana (Hasibuan, 2023). Setelah desain selesai, prototipe dirakit menggunakan perangkat keras yang telah disebutkan. Mikrokontroler diintegrasikan dengan perangkat lunak berbasis platform Arduino IDE untuk pemrograman logika otomatisasi (Austria *et al.*, 2023). Komponen seperti relay modul untuk kontrol aktuator dan modul WiFi untuk komunikasi data diuji secara individu sebelum dihubungkan dalam sistem. Aplikasi IoT dikembangkan menggunakan platform Blynk untuk memungkinkan pengguna memantau data sensor dan mengontrol sistem secara real-time melalui smartphone.

Pengujian sistem dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap laboratorium dan tahap lingkungan uji coba. Dalam lingkungan laboratorium, sistem diuji untuk memastikan respons sensor, kinerja aktuator, serta stabilitas aliran data antara mikrokontroler dan aplikasi IoT (Melkysedek *et al.*, 2023). Dalam tahap uji coba di lapangan, prototipe diuji secara penuh di lahan hidroponik. Parameter yang diukur selama pengujian ini meliputi efisiensi energi, kondisi lingkungan, dan efektivitas irigasi. Pengukuran efisiensi energi dilakukan dengan memantau output daya panel surya, serta konsumsi daya oleh pompa dan lampu LED. Kondisi lingkungan yang dipantau meliputi suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya, yang semuanya dipantau secara real-time. Selain itu, efektivitas irigasi diukur dengan menghitung volume air yang digunakan per siklus operasi. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan merekam data yang diperoleh dari sensor yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32 dan disimpan dalam cloud IoT. Pengukuran energi dilakukan dengan menggunakan multimeter digital untuk memverifikasi output panel surya. Pengamatan langsung juga dilakukan untuk mencatat reaksi sistem terhadap perubahan lingkungan, seperti fluktuasi intensitas cahaya. Analisis data dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Secara kuantitatif, dilakukan perhitungan efisiensi energi panel surya, rasio konsumsi energi terhadap produksi tanaman, serta perbandingan efisiensi antara sistem hidroponik otomatis dan konvensional (Almalki, 2021).

Secara kualitatif, observasi langsung terhadap kinerja prototipe dilakukan, serta wawancara dengan ahli pertanian untuk mendapatkan umpan balik terhadap potensi implementasi sistem. Dengan demikian, analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh dan memberikan gambaran tentang efektivitas penerapan teknologi ini dalam skala yang lebih besar. Hasil dari analisis ini digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem yang dikembangkan, menyoroti keunggulan dan kekurangannya, serta memberikan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut. Dengan pendekatan menyeluruh ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan solusi inovatif untuk pertanian hidroponik yang berkelanjutan, efisien, dan mudah diakses.



Gambar 1. Model Proses Penelitian

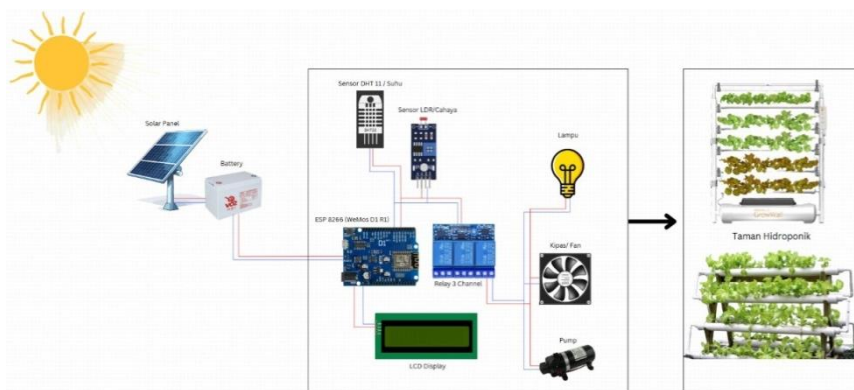
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Penelitian ini menghasilkan prototipe sistem otomasi IoT yang terintegrasi dengan energi terbarukan menggunakan panel surya. Sistem ini dirancang untuk mendukung pertanian hidroponik dengan fitur otomatisasi yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh melalui aplikasi IoT. Prototipe ini mencakup komponen utama seperti ESP8266, sensor suhu dan kelembaban (DHT22), pompa air, kipas, lampu LED, serta kunci pintu otomatis. Semua komponen berhasil diintegrasikan untuk bekerja secara harmonis, dengan sumber energi utama yang disuplai oleh panel surya, memungkinkan sistem beroperasi tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional.

3.1.1 Desain dan Implementasi

Prototipe ini dirancang menggunakan Arduino Uno sebagai pusat kendali. Sensor suhu dan kelembaban memberikan data real-time mengenai kondisi lingkungan. Aktuator, seperti pompa air, kipas, dan lampu LED, berfungsi untuk mengoptimalkan kondisi pertumbuhan tanaman (Bantacut *et al.*, 2015). Panel surya berkapasitas 100 Wp digunakan sebagai sumber energi utama, dengan sistem penyimpanan baterai lithium-ion untuk menjaga kestabilan daya.



Gambar 2. Desain Model Integrasi Otomasi dan Energi Kebaruan



Gambar 3. Prototype Otomasi IoT dan Energi Kebaruan

Desain ini menunjukkan kemajuan signifikan dalam penerapan IoT untuk pertanian hidroponik, terutama dalam konteks pemanfaatan energi terbarukan. Penggunaan panel surya membuat sistem ini lebih ramah lingkungan dan mandiri, sehingga dapat diterapkan di daerah yang memiliki keterbatasan akses listrik.

3.1.2 Pengujian Fungsional

Pengujian menunjukkan bahwa semua sensor berhasil mengirimkan data dengan akurasi tinggi, dan aktuator merespons perintah tanpa jeda signifikan. Panel surya mampu menghasilkan energi yang cukup untuk mendukung operasi sistem secara penuh selama 24 jam setiap hari. Berikut adalah tabel data hasil pengujian prototipe selama dua periode terkait pendapatan energi dari panel surya untuk sistem otomasi.

Tabel 1. Hasil Ujicoba dan Pendapatan Energi Kebaruan

Parameter	Periode I	Periode II
Rata-rata Intensitas Matahari (jam/hari)	5,0	5,2
Energi dihasilkan Panel Surya (kWh/hari)	1,5	1,6
Daya baterai yang Terisi Penuh (Jam/hari)	24	24
Kapasitas Cadangan Energi (%)	26	31
Konsumsi Energi Sistem (kWh/hari)	1,1	1,1
Efisiensi Penggunaan Energi (%)	74	69

Data menunjukkan bahwa panel surya menghasilkan energi yang cukup untuk mengoperasikan sistem hidroponik selama 24 jam setiap hari. Efisiensi penggunaan energi tetap tinggi, meskipun terjadi sedikit penurunan dari 74% ke 69% pada periode kedua. Penurunan ini disebabkan oleh fluktuasi intensitas matahari. Sistem ini sangat cocok untuk daerah dengan intensitas cahaya matahari yang stabil.

Tabel 2. Tabel uji stabilitas sistem otomasi prototype

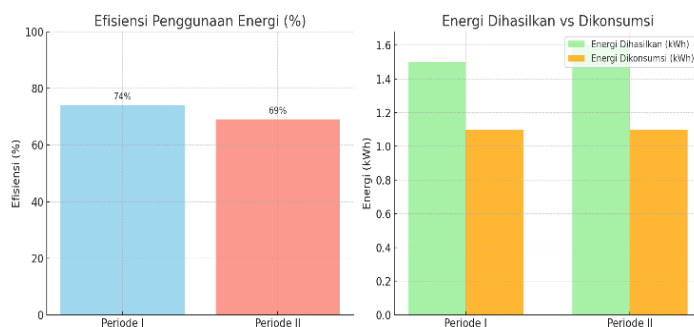
Parameter	Periode I (Minggu 1-2)	Periode II (Minggu 3-4)
Kestabilan Sistem	Stabil, tanpa gangguan operasional	Stabil, tanpa gangguan operasional
Konsumsi Energi	1,1 kWh, sepenuhnya dari panel surya	1,1 kWh, sepenuhnya dari panel surya
Efisiensi Energi	74% (energi tersimpan dalam baterai)	69% (energi yang tersimpan di baterai mencukupi kebutuh)
Kemudahan Pemantauan	Pemantauan lancar melalui aplikasi IoT	Pemantauan lancar melalui aplikasi IoT
Tingkat Kebisingan	Rendah (<30 dB)	Rendah (<30 dB)

Sistem menunjukkan kestabilan yang tinggi selama dua periode pengujian. Tidak ditemukan gangguan operasional, dan seluruh sistem mampu bekerja dengan tingkat kebisingan rendah, yaitu di bawah 30 dB. Hal ini menandakan bahwa prototipe ini cocok untuk penggunaan jangka panjang tanpa risiko gangguan besar.

Signifikansi Hasil Penelitian:

- 1) Keandalan Energi Terbarukan: Panel surya terbukti mampu menyediakan energi yang cukup untuk sistem hidroponik, bahkan dengan kapasitas cadangan yang memadai.
- 2) Efisiensi Operasional: Sistem berbasis IoT mampu mengoptimalkan penggunaan energi, mengurangi konsumsi daya, dan memastikan kontrol lingkungan yang presisi.
- 3) Potensi Implementasi di Daerah Terpencil: Prototipe ini sangat cocok diterapkan di daerah yang memiliki keterbatasan akses listrik, karena bersifat mandiri dan hemat energi.
- 4) Kemudahan Pemantauan: Sistem berbasis IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh secara real-time, memudahkan petani untuk mengelola lahan tanpa harus hadir secara fisik.

Penelitian ini menawarkan solusi inovatif yang berkontribusi pada keberlanjutan pertanian hidroponik dengan mengintegrasikan teknologi canggih dan ramah lingkungan, guna memenuhi kebutuhan masyarakat modern.



Gambar 4. Diagram Penggunaan Energi, Energi Dihasilkan Vs Energi Dikonsumsi

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa prototipe sistem otomasi IoT berbasis energi terbarukan yang dikembangkan berhasil memenuhi tujuan efisiensi dan keberlanjutan. Grafik di atas memberikan gambaran visual mengenai kinerja energi sistem:

1) Efisiensi Penggunaan Energi

Grafik pertama menunjukkan bahwa efisiensi energi tetap berada pada tingkat yang tinggi, yaitu 74% pada periode pertama dan sedikit menurun menjadi 69% pada periode kedua. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu memanfaatkan energi yang dihasilkan oleh panel surya secara optimal, meskipun terdapat sedikit penurunan efisiensi yang disebabkan oleh perubahan intensitas cahaya matahari.

2) Energi Dihasilkan vs Dikonsumsi

Grafik kedua menggambarkan perbandingan antara energi yang dihasilkan oleh panel surya dengan konsumsi energi sistem selama dua periode pengujian. Hasilnya menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan (1,5 kWh hingga 1,6 kWh per hari) selalu lebih tinggi dibandingkan dengan energi yang dikonsumsi (1,1 kWh per hari). Hal ini memastikan keberlanjutan operasional sistem hidroponik, bahkan dalam kondisi intensitas cahaya matahari yang fluktuatif.

Kedua grafik ini memperkuat klaim bahwa sistem yang dirancang tidak hanya efisien tetapi juga handal dalam mendukung kebutuhan energi untuk pertanian hidroponik cerdas. Dengan efisiensi penggunaan dan kapasitas energi cadangan yang mencukupi (Almalki, 2021), sistem ini memiliki potensi untuk diimplementasikan di daerah dengan keterbatasan akses listrik konvensional.

3.2 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan panel surya sebagai sumber energi utama dalam sistem otomasi hidroponik sangat efisien, terutama di wilayah dengan intensitas cahaya matahari tinggi. Panel surya mampu mengisi baterai hingga kapasitas penuh setiap hari, memberikan energi yang cukup untuk mendukung pengoperasian sistem selama 24 jam. Hasil ini sejalan dengan studi oleh Nursyaban (2024), yang menunjukkan bahwa pemanfaatan energi terbarukan, seperti panel surya, mampu mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional sekaligus menurunkan biaya operasional. Implikasi penerapan sistem ini sangat signifikan, terutama untuk daerah terpencil yang memiliki akses listrik terbatas. Sistem ini memberikan solusi energi mandiri yang berkelanjutan, mendukung praktik pertanian hidroponik modern bahkan di wilayah dengan infrastruktur listrik yang minim. Keberlanjutan sistem ini tidak hanya mendorong efisiensi energi, tetapi juga mendukung inisiatif global untuk mengurangi emisi karbon dalam sektor pertanian. Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dengan energi terbarukan memungkinkan pengelolaan sistem hidroponik secara presisi. Sensor suhu, kelembaban, dan pH bekerja secara real-time, memastikan penyiraman, pencahayaan, dan sirkulasi udara dilakukan hanya sesuai dengan kebutuhan tanaman. Hal ini menciptakan lingkungan tumbuh yang optimal, yang mendukung pertumbuhan tanaman secara signifikan. Temuan ini didukung oleh penelitian Ridwan (2021), yang menemukan bahwa otomatisasi berbasis sensor mampu meningkatkan hasil panen hingga 30% melalui manajemen yang lebih efisien dan responsif terhadap kebutuhan tanaman. Aplikasi IoT yang memungkinkan pemantauan jarak jauh juga meningkatkan efisiensi pengelolaan sistem. Dalam konteks wilayah terpencil, teknologi ini menawarkan kemampuan pengawasan tanpa memerlukan kehadiran fisik secara terus-menerus, yang sangat menghemat waktu dan tenaga.

Pengujian prototipe selama dua periode membuktikan kestabilan sistem, dengan konsumsi energi sepenuhnya bergantung pada panel surya. Tingkat efisiensi baterai sedikit menurun dari 74% menjadi 69%, namun hal ini masih dalam batas yang dapat diterima untuk mendukung operasional penuh selama 24 jam. Stabilitas sistem ini mencerminkan kemampuan desain untuk menyesuaikan dengan kondisi lingkungan yang dinamis, sesuai dengan penelitian Pasaribu (2021), yang menyatakan bahwa sistem otomasi berbasis energi terbarukan cenderung lebih stabil ketika dioperasikan dengan algoritma pengendalian yang adaptif. Tantangan utama yang dihadapi adalah penurunan efisiensi panel surya pada hari-hari mendung atau dengan intensitas cahaya matahari rendah. Masalah ini

berpotensi mengganggu kestabilan daya, terutama jika kapasitas baterai tidak mencukupi. Solusi yang diusulkan meliputi peningkatan kapasitas baterai dengan menambahkan baterai yang lebih besar untuk menyimpan energi cadangan, pengoptimalan sudut panel surya dengan menggunakan mekanisme pelacakan matahari untuk meningkatkan efisiensi penyerapan energi pada hari dengan intensitas cahaya rendah, serta integrasi sumber energi cadangan seperti generator kecil berbasis bioenergi atau angin sebagai alternatif untuk daerah dengan cuaca ekstrem. Di wilayah terpencil, penerapan sistem ini memberikan dampak besar, karena sistem yang dapat beroperasi secara mandiri tanpa jaringan listrik mempermudah akses teknologi pertanian modern (Visconti, 2020). Selain itu, kestabilan sistem memungkinkan pengelolaan pertanian hidroponik tanpa memerlukan keahlian teknis tinggi, membuka peluang bagi komunitas lokal untuk meningkatkan produktivitas pangan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam inovasi teknologi pertanian dengan mengintegrasikan sistem otomasi berbasis IoT dan energi terbarukan melalui panel surya. Prototipe yang dikembangkan tidak hanya berhasil menciptakan lingkungan tumbuh yang optimal untuk tanaman hidroponik tetapi juga membuktikan efisiensi operasional yang tinggi. Sistem ini mampu mendukung pengelolaan real-time terhadap variabel-variabel kritis seperti suhu, kelembaban, dan pencahayaan dengan akurasi tinggi melalui sensor IoT yang terhubung ke aplikasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi penuh selama 24 jam tanpa bergantung pada listrik konvensional, dengan efisiensi penggunaan energi mencapai 69-74%. Temuan ini menegaskan bahwa energi terbarukan, khususnya panel surya, dapat menjadi solusi andal untuk mendukung pertanian berkelanjutan di wilayah terpencil dengan keterbatasan akses listrik. Selain itu, stabilitas sistem dalam menghadapi tantangan teknis, seperti fluktuasi intensitas matahari, menjadi bukti keberlanjutan dan keandalannya dalam jangka panjang. Kontribusi orisinal penelitian ini terletak pada integrasi inovatif antara IoT, otomatisasi, dan energi terbarukan yang secara langsung mendukung produktivitas sekaligus mengurangi jejak karbon pertanian. Hal ini menjadi langkah penting dalam mendorong praktik pertanian modern yang hemat energi dan ramah lingkungan. Penelitian ini membuka peluang bagi penerapan teknologi serupa di berbagai sektor pertanian lainnya, seperti akuaponik atau budidaya sayur organik, sehingga dampak keberlanjutannya dapat diperluas.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar sistem ini dilengkapi dengan baterai berkapasitas lebih besar atau sumber energi alternatif seperti turbin angin untuk mengatasi tantangan cuaca ekstrem yang dapat memengaruhi efisiensi panel surya. Teknologi kecerdasan buatan (AI) juga dapat diintegrasikan untuk prediksi kebutuhan nutrisi, pengaturan iklim mikro, dan optimasi otomatisasi, sehingga meningkatkan akurasi dan hasil panen. Uji lapangan di berbagai kondisi geografis dan iklim juga diperlukan untuk mengukur kinerja sistem secara lebih komprehensif dan mengidentifikasi potensi peningkatan. Secara praktis, prototipe ini memberikan solusi nyata bagi petani di wilayah terpencil untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas tanpa bergantung pada infrastruktur listrik konvensional. Pelatihan bagi petani terkait pengoperasian, pemeliharaan, dan pemanfaatan data real-time dari sistem ini sangat penting untuk memastikan keberlanjutan teknologi. Selain itu, pengembangan kapasitas sistem untuk memenuhi kebutuhan skala besar, seperti area pertanian komersial, dapat menjadi fokus pengembangan strategis. Dengan memadukan inovasi teknologi dan penerapan praktis di lapangan, penelitian ini berpotensi merevolusi sektor pertanian menuju era baru yang lebih efisien, mandiri energi, dan berkelanjutan.

5. Daftar Pustaka

- Adhy, D. R., Hermawan, R., Fauzi, A. M., Maesaroh, S., Mauhib, A., Rosada, N. I., ... & Noor, Y. W. (2024). Sistem Monitoring Keamanan Pada Green House. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 13(3), 351-357. DOI: <https://doi.org/10.30591/polektro.v13i3.7721>.
- Alam, R. L., & Nasuha, A. (2020). Sistem pengendali pH air dan pemantauan lingkungan tanaman hidroponik menggunakan fuzzy logic berbasis IoT. *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocational Education)*, 5(1), 11–20. DOI: <https://doi.org/10.21831/elinvo.v5i1.34587>.
- Almalki, F. A. (2021). A low-cost platform for environmental smart farming monitoring system based on IoT and UAVs. *Sustainability*, 13(11), 5908. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13115908>.
- Austria, A. C., Fabros, J. S., Sumilang, K. R., Bernardino, J., & Doctor, A. (2023). Development of IoT smart greenhouse system for hydroponic gardens. *International Journal of Computer Science Research*, 7(Ircctete), 2111–2136. DOI: <https://doi.org/10.25147/ijcsr.2017.001.1.149>.
- Bantacut, T., Firdaus, Y. R., & Akbar, M. T. (2015). Pengembangan Jagung untuk Ketahanan Pangan, Industri dan Ekonomi Corn Development for Food Security, Industry and Economy. *Jurnal Pangan*, 24(2), 135-148. DOI: <https://doi.org/10.33964/jp.v24i2.29>.
- Bouali, E. T. (2022). Renewable energy integration into cloud IoT-based smart agriculture. *IEEE Access*, 10, 1175–1191. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138160>.
- Canedo, A., Goyal, P., Huang, D., Pandey, A., & Quiros, G. (2021). ArduCode: Predictive framework for automation engineering. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18(3), 1417–1428. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.3008055>.
- Daria, T., Valeriy, S., Aleksander, L., Aleksandr, B., Roland, G., Kirill, K., ... & Yury, M. (2023). Climate Change and Future Food Security: Predicting the Extent of Cropland Gain or Degradation. *arXiv preprint arXiv:2310.03261*. DOI: <https://arxiv.org/abs/2310.03261>.
- Hasibuan, M. R. R. (2023). INOVASI TEKNOLOGI IRIGASI DALAM MENINGKATKAN EFISIENSI PENGGUNAAN AIR DALAM PERTANIAN.
- Lestari, H. A., Kurniawan, A., & Yuwono, T. A. (2023). Otomatisasi ultrasonik fogger budidaya selada keriting hijau secara fogponik di pertanian indoor berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Ilmiah Inovasi*, 23(2), 111–117. DOI: <https://doi.org/10.25047/jii.v23i2.3616>.
- Mekonnen, Y. (2020). Review - Machine learning techniques in wireless sensor network based precision agriculture. *Journal of Electrochemical Society*, 167(3). DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0222003JES>.
- Melkysedek, T., Hesti, E., & Salamah, I. (2023). Design and build hydroponic installations and applications using IoT-based multisensors with solar panel electrical energy. *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*, 13(2), 123. DOI: <https://doi.org/10.22146/ijeis.87906>.
- Mohammad, L., Suyanto, M. K. A., Husna, A., & Pakpahan, S. (2021). Pengembangan sistem hidroponik otomatis-modern berbasis panel surya dan baterai. *Jurnal Nasional Teknologi Elektro dan Teknologi Informasi*, 10(1), 77–84. DOI: <https://doi.org/10.22146/jnteti.v10i1.727>.

- Nursyaban, I., Stefanie, A., & Lammad, I. (2024). Analisis Kebutuhan Daya Pada Perancangan Sistem Instrumentasi Smart Garden ISMOTA. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(3), 351-355. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10638106>.
- Pasaribu, F. I., & Reza, M. (2021). Design and Build an Arduino-Based Charging Station Using 50 WP Solar Cells. *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, 3(2), 46-55.
- Rahutomo, F., Sutrisno, S., Pramono, S., Sulisty, M. E., Ibrahim, M. H., & Haryono, J. (2022). Implementasi dan sosialisasi smart farming hidroponik berbasis Internet of Things di Dusun Ngentak, Bulakrejo, Sukoharjo. *Jurnal Abdi Masyarakat Indonesia*, 2(6), 1961-1970. DOI: <https://doi.org/10.54082/jamsi.567>.
- Rastegari, H. (2023). Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends. *Smart Agriculture Technologies*, 4, 100187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100187>.
- Ridwan, M., & Sari, K. M. (2021). Penerapan IoT dalam sistem otomatisasi kontrol suhu, kelembaban, dan tingkat keasaman hidroponik. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 10(4), 481. DOI: <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i4.481-487>.
- Ruslan, R. (2021). Status pemanfaatan energi baru terbarukan dan opsi nuklir dalam bauran energi nasional. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(1), 39. DOI: <https://doi.org/10.17146/jpen.2021.23.1.6161>.
- Setiawan, M. A., & Sulistyasni, S. (2024). Sistem pertanian hidroponik padi cerdas berbasis Internet of Things pada lahan perkotaan guna menambah ketahanan pangan masyarakat. *MALCOM Indonesian Journal of Machine Learning and Computational Science*, 4(1), 118-129. DOI: <https://doi.org/10.57152/malcom.v4i1.973>.
- Suyitno, B. M. (2022). Rekayasa Sistem Energi Nasional.
- Visconti, P. (2020). Development of sensors-based agri-food traceability system remotely managed by a software platform for optimized farm management. *Sensors*, 20(13), 1-43. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20133632>.