



Homepage Journal: <https://jurnal.unismuhpalu.ac.id/index.php/JKS>

Sistem Urban Portable Agriculture Berbasis IoT: Validasi Teknis dan Analisis Kinerja Platform Monitoring Hidroponik Berbiaya Rendah

IoT-Based Urban Portable Agriculture System: Technical Validation and Performance Analysis of a Low-Cost Hydroponic Monitoring Platform

Menliman Joyfal Gulo^{1*}, Shofy Azzahra², Daniel Imanuel Manafe³

¹Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

^{2,3}Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

*Author Correspondence: Email: menlimanjoyfalgulo@gmail.com

Artikel Penelitian

Article History:

Received: 09 Sep, 2025

Revised: 15 Sep, 2025

Accepted: 22 Oct, 2025

Kata Kunci:

Internet of Things, Pertanian Perkotaan, Sistem Hidroponik, Validasi Sensor, Teknologi Pertanian

Keywords:

Internet of Things, Urban Agriculture, Hydroponic Systems, Sensor Validation, Agricultural Technology

DOI: [10.56338/jks.v8i11.8560](https://doi.org/10.56338/jks.v8i11.8560)

ABSTRAK

Pertanian perkotaan dihadapkan pada tantangan ganda, yaitu kelangkaan lahan dan tingginya biaya adopsi teknologi yang menghambat aksesibilitas bagi petani skala kecil. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi kinerja teknis dari sebuah sistem Urban Portable Agriculture (UPA) berbasis Internet of Things (IoT) sebagai solusi perangkat pemantau hidroponik berbiaya rendah. Dengan menggunakan metodologi rapid prototyping, sistem hidroponik vertikal dirancang dan dibangun, terintegrasi dengan sensor pH dan kekeruhan, serta dilengkapi kontrol pencahayaan LED otomatis dan dasbor visualisasi data real-time. Validasi kinerja sistem melibatkan analisis metrik teknis dan stabilitas operasional menggunakan algoritma klusterisasi Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN). Hasil penelitian menunjukkan kinerja sistem yang andal, dengan akurasi sensor pH mencapai ± 0.1 dan sensor kekeruhan ± 2 NTU, serta latensi sistem end-to-end di bawah 5 detik. Analisis DBSCAN mengidentifikasi bahwa sistem beroperasi dalam kondisi stabil sebesar 86.5% dari waktu pengujian, yang menunjukkan reliabilitas operasional yang tinggi. Dengan total biaya realisasi sebesar Rp 2.000.000, prototipe ini secara signifikan lebih terjangkau dibandingkan alternatif komersial. Studi ini berhasil memvalidasi sebuah kerangka kerja teknologi yang fungsional dan terjangkau, serta berkontribusi pada konsep "graduated precision agriculture," yang sangat sesuai untuk aplikasi edukasi dan pertanian urban skala kecil di negara berkembang.

ABSTRACT

Urban agriculture faces a double challenge: land scarcity and high technology adoption costs that hinder accessibility for small-scale farmers. This study aims to develop and validate the technical performance of an Internet of Things (IoT)-based Urban Portable Agriculture (UPA) system as a low-cost hydroponic monitoring platform solution. Using rapid prototyping methodology, a vertical hydroponic system was designed and built, integrated with pH and turbidity sensors, and equipped with automatic LED lighting control and a real-time data visualization dashboard. System performance validation involved analysis of technical metrics and operational stability using the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) clustering algorithm. The results showed reliable system performance, with pH sensor accuracy reaching ± 0.1 and turbidity sensor accuracy reaching ± 2 NTU, as well as end-to-end system latency below 5 seconds. DBSCAN analysis identified that the system operated in stable conditions 86.5% of the time during testing, indicating high operational reliability. With a total implementation cost of IDR 2,000,000, this prototype is significantly more affordable than commercial alternatives. This study successfully validated a functional and affordable technological framework and contributed to the concept of "graduated precision agriculture," which is highly suitable for educational applications.

PENDAHULUAN

Ketahanan pangan nasional Indonesia menghadapi tantangan struktural yang kompleks, didorong oleh dua krisis yang saling terkait yaitu penyusutan lahan pertanian produktif dan krisis regenerasi sumber daya manusia di sektor pertanian. Urbanisasi yang pesat mengakselerasi konversi lahan pertanian menjadi kawasan non-pertanian dengan laju yang mengkhawatirkan, dilaporkan mencapai hingga 100.000 hektare per tahun (Gandharum et al., 2025; Riptanti et al., 2024). Fenomena ini secara langsung mengancam kapasitas produksi pangan domestik dan meningkatkan ketergantungan pada impor untuk memenuhi kebutuhan dasar masyarakat. Laporan dari Badan Pangan Nasional tahun 2024 menggarisbawahi pentingnya menjaga stabilitas pasokan dan ketersediaan pangan sebagai fondasi ketahanan nasional, di mana penyusutan lahan menjadi salah satu ancaman utama (Badan Pusat Statistik, 2024). Secara simultan, sektor pertanian mengalami krisis demografis. Data menunjukkan tren penuaan petani yang signifikan, dengan partisipasi generasi muda yang terus menurun (Purwaningsih, 2008). Tercatat hanya sebagian kecil pekerja pertanian yang berada dalam kelompok usia produktif muda, sebuah kondisi yang mengancam keberlanjutan transfer pengetahuan dan inovasi di sektor ini (Sondakh et al., 2021). Kombinasi dari tekanan lahan dan demografi ini menuntut adanya pergeseran paradigma menuju solusi produksi pangan yang inovatif, efisien, dan mampu menarik minat generasi baru, khususnya di kawasan perkotaan yang menjadi pusat konsumsi (Ilyas, 2022; Konyep, 2021).

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, pertanian perkotaan yang didukung oleh teknologi *Controlled Environment Agriculture* (CEA) muncul sebagai solusi strategis. Konsep seperti pertanian vertikal secara efektif mengatasi kelangkaan lahan dengan memaksimalkan produktivitas per satuan luas melalui budidaya bertingkat (Cowan et al., 2022). Fondasi dari sistem ini adalah teknik hidroponik, yaitu metode budidaya tanpa tanah yang memungkinkan kontrol presisi terhadap nutrisi dan penggunaan air yang jauh lebih efisien dibandingkan pertanian konvensional. Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi elemen transformatif dalam implementasi CEA. IoT berfungsi sebagai sistem saraf digital yang memungkinkan pemantauan dan kontrol parameter lingkungan kritis seperti pH, konsentrasi nutrisi, suhu, dan kelembaban secara real-time dan jarak jauh (Rajak et al., 2023). Ekosistem perangkat yang saling terhubung ini memungkinkan otomatisasi proses budidaya, meningkatkan efisiensi sumber daya, dan mengurangi kebutuhan intervensi manual, yang pada akhirnya dapat meningkatkan produktivitas secara signifikan.

Meskipun potensi teknologi pertanian modern sangat besar, adopsinya di tingkat dasar, terutama di negara berkembang, terhambat oleh faktor biaya. Sistem hidroponik komersial berbasis IoT seringkali membutuhkan investasi awal yang sangat tinggi, berkisar antara Rp 10.000.000 hingga Rp 25.000.000, sehingga tidak terjangkau bagi rumah tangga perkotaan, institusi pendidikan, atau petani skala kecil. Kesenjangan ini menciptakan kebutuhan mendesak akan penelitian dan pengembangan yang berfokus pada solusi berbiaya rendah yang tervalidasi secara ilmiah (Kaur, 2021). Literatur terkini menunjukkan adanya tren pengembangan sistem berbiaya rendah, namun seringkali kurang disertai dengan validasi kinerja teknis yang rigor dan analisis data operasional yang mendalam. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan merancang, membangun, dan memvalidasi secara teknis sebuah prototipe Urban Portable Agriculture (UPA) berbasis IoT. Tujuan spesifik dari penelitian ini adalah: (1) Mengukur dan memvalidasi kinerja sistem dalam hal akurasi sensor dan latensi respons; (2) Menganalisis stabilitas operasional sistem menggunakan pendekatan *unsupervised machine learning*; dan (3) Mengevaluasi desain berdasarkan efektivitas biaya dan analisis risiko. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa prototipe UPA mampu melakukan pemantauan lingkungan secara andal (akurasi pH ± 0.2 , latensi < 10 detik) dengan total biaya realisasi di bawah Rp 3.000.000. Kontribusi utama penelitian ini bukan pada penemuan teknologi baru, melainkan pada validasi sebuah implementasi yang terjangkau dan dapat diakses. Dengan menyajikan analisis kinerja yang transparan dari sebuah sistem yang dibangun di bawah keterbatasan sumber daya, penelitian ini menawarkan

kerangka kerja praktis untuk "pertanian presisi bertahap" (*graduated precision agriculture*), yang relevan bagi konteks edukasi dan adopsi teknologi di tingkat pemula.

TINJAUAN LITERATUR

Pertanian Perkotaan dan Sistem Hidroponik

Pertanian perkotaan telah berkembang menjadi solusi strategis untuk mengatasi tantangan ketahanan pangan di wilayah perkotaan yang mengalami keterbatasan lahan. ghoerbaier et al (2015) mengidentifikasi bahwa pertanian perkotaan tidak hanya berfungsi sebagai solusi produksi pangan, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem urban melalui pengurangan jejak karbon transportasi dan peningkatan kualitas udara. Konsep *vertical farming* atau pertanian vertikal muncul sebagai inovasi yang mengoptimalkan penggunaan ruang terbatas dengan menerapkan teknik budidaya bertingkat secara vertikal (Kaur 2021). Sistem hidroponik memberikan fondasi teknologi untuk implementasi pertanian vertikal yang efisien. Hidroponik adalah teknik bercocok tanam tanpa media tanah yang menggunakan larutan nutrisi sebagai sumber hara bagi tanaman (Srinidhi, Shreenidhi, and Vishnu 2020). Keunggulan sistem hidroponik meliputi efisiensi penggunaan air hingga 70%, kontrol nutrisi yang presisi, eliminasi hama tanah, dan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional. Ghorbel et al (2022) mengkategorikan metode hidroponik ke dalam beberapa teknik utama: *Nutrient Film Technique* (NFT), *Deep Flow Technique* (DFT), aeroponik, dan akuaponik, masing-masing dengan karakteristik dan keunggulan spesifik. Implementasi hidroponik dalam konteks perkotaan menghadapi tantangan teknis dan ekonomi yang signifikan. Suryaningsih et al (2023) mengidentifikasi kendala utama berupa investasi awal yang besar, kebutuhan energi tinggi untuk pencahayaan artifisial, dan kompleksitas sistem otomatisasi untuk kontrol lingkungan. Namun, perkembangan teknologi sensor dan sistem kontrol berbasis mikroprosesor telah membuka peluang untuk mengatasi tantangan ini melalui solusi yang lebih hemat dan mudah digunakan.

Internet of Things (IoT) dalam Teknologi Pertanian

Internet of Things (IoT) telah mengalami evolusi signifikan dari konsep akademis menjadi aplikasi praktis dalam berbagai sektor, termasuk pertanian. Rajak et al. (2023) mendefinisikan IoT sebagai ekosistem perangkat yang terhubung melalui internet untuk memungkinkan pertukaran data *real-time*, monitoring jarak jauh, dan pengambilan keputusan otomatis berdasarkan analisis data. Dalam konteks pertanian, IoT memungkinkan implementasi pertanian presisi melalui monitoring parameter lingkungan yang komprehensif dan kontrol otomatis sistem budidaya. Pengembangan *smart hydroponics system* yang mengintegrasikan IoT dengan *machine learning algorithm* dilakukan untuk optimalisasi kondisi pertumbuhan tanaman (Srinidhi, Shreenidhi, and Vishnu 2020). Sistem ini menunjukkan kemampuan untuk monitoring pH, *electrical conductivity*, suhu, dan kelembaban secara *real-time* dengan akurasi tinggi. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi IoT dapat meningkatkan efisiensi sistem hidroponik hingga 35% dibandingkan sistem konvensional non-terotomasi. Bakar et al. (2025) melakukan studi komprehensif tentang monitoring kualitas air secara *real-time* berbasis IoT dengan fokus pada kalibrasi sensor dan peningkatan akurasi. Temuan mereka menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT dapat mencapai akurasi ± 0.1 pH dan ± 2 NTU untuk kekeruhan dengan kalibrasi sensor yang tepat. Studi ini juga mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan sistem IoT, termasuk kualitas konektivitas internet, manajemen daya, dan *environmental interference*.

Teknologi Sensor untuk Aplikasi Hidroponik

Teknologi sensor merupakan komponen kritis dalam sistem hidroponik terotomasi yang menentukan akurasi monitoring dan efektivitas kontrol lingkungan. h et al. (2024) mengembangkan sistem kompensasi drift otomatis untuk sensor *electrical conductivity* dan pH dalam sistem hidroponik, yang mengatasi masalah degradasi akurasi sensor seiring waktu. Sistem kompensasi ini mampu mempertahankan akurasi sensor dalam jangka panjang dengan rekalisasi otomatis berdasarkan standar

acuan. Parameter pH merupakan faktor krusial dalam sistem hidroponik karena secara langsung mempengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Rentang pH optimal untuk sebagian besar tanaman hidroponik adalah 5.8-6.3, dimana penyimpangan dari rentang ini dapat menyebabkan defisiensi atau toksisitas nutrisi. Sensor pH yang akurat dan stabil menjadi prasyarat untuk sistem hidroponik yang dapat diandalkan dan produktif. Monitoring kekeruhan air memberikan indikasi kualitas air dan kebersihan sistem hidroponik. Peningkatan kekeruhan dapat mengindikasikan kontaminasi mikrobiologis, akumulasi partikel organik, atau pertumbuhan alga yang dapat mengganggu sistem sirkulasi dan kesehatan akar tanaman. Adanya kemampuan pemantauan kekeruhan dengan akurasi ± 2 NTU cukup memadai untuk deteksi dini masalah kualitas air dalam sistem hidroponik (Bakar et al. 2025).

Cost-Effectiveness dan Aksesibilitas Teknologi

Faktor ekonomi menjadi determinan utama dalam adopsi teknologi pertanian, khususnya untuk aplikasi skala kecil dan rumah tangga. Thomaier et al. (2015) mengidentifikasi bahwa tingginya biaya investasi awal menjadi barrier utama dalam implementasi sistem pertanian perkotaan. Sistem hidroponik komersial umumnya memerlukan investasi Rp 10.000.000 hingga Rp 25.000.000 untuk setup dasar, yang tidak aksesibel bagi sebagian besar rumah tangga perkotaan di Indonesia. Pengembangan sistem berbasis komponen siap pakai dan *open-source platform* seperti Arduino dan ESP32 telah membuka peluang untuk pengurangan biaya yang signifikan. Penelitian ini membangun sistem IoT hidroponik dengan biaya yang masih terjangkau tanpa mengorbankan fungsionalitas dasar. Pendekatan modular dengan peningkatan kemampuan juga memungkinkan implementasi bertahap sesuai budget dan kebutuhan pengguna.

METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan sebagai riset terapan dengan pendekatan eksperimental yang berfokus pada pengembangan prototipe cepat dan validasi fungsional. Proyek prototipe ini difasilitasi oleh PT Kilang Pertamina Internasional Refinery Unit III Plaju dalam Program Mina Padi Lomba Social and Technology 2024 (Sotech). Berbeda dari rencana awal yang berlokasi di Palembang, Sumatera Selatan, selama lebih dari tiga bulan, realisasi penelitian dilaksanakan di Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kegiatan berlangsung dalam periode yang dipadatkan, yaitu selama 40 hari efektif, dari 14 April 2024 hingga 25 Mei 2024. Perubahan lokasi dan pemadatan durasi ini merupakan adaptasi langsung terhadap kerangka waktu dan sumber daya yang ditetapkan oleh penyelenggara kompetisi Sotech 2024, yang menantang peserta untuk menghasilkan prototipe fungsional dalam batasan yang ketat.



Gambar 1. Timeline Pengembangan Prototipe Urban Portable Agriculture

Arsitektur Sistem UPA (Urban Portable Agriculture)

Sistem UPA dirancang dengan filosofi modular dan berbiaya rendah, menggunakan arsitektur berlapis yang memisahkan fungsi fisik, sensorik, pemrosesan, dan aplikasi. Arsitektur ini memastikan skalabilitas dan kemudahan dalam pemeliharaan.

1. Lapisan Fisik (*Physical Layer*)

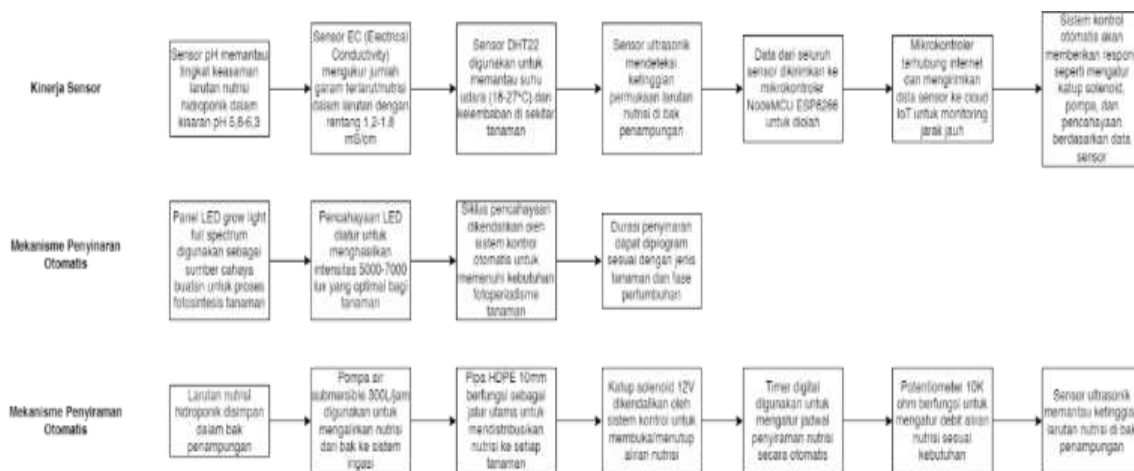
Merupakan struktur mekanis sistem, terdiri dari menara tanam vertikal yang dibuat dari pipa PVC, reservoir nutrisi di bagian dasar, pompa air *submersible* untuk sirkulasi, dan tiga unit lampu LED tabung sebagai sumber pencahayaan buatan. Desain fisik ini, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2 dalam manuskrip asli, dirancang untuk memaksimalkan kapasitas tanam (12 titik) dalam jejak spasial yang minimal (30cm x 90cm).

2. Lapisan Sensorik (*Sensing Layer*)

Bertugas mengumpulkan data mentah dari lingkungan hidroponik. Lapisan ini terdiri dari sensor pH (DFRobot) untuk mengukur tingkat keasaman larutan nutrisi dan sensor kekeruhan (*turbidity*) untuk memantau kejernihan air sebagai indikator proksi kualitas air.

3. Lapisan Pemrosesan & Kontrol (*Processing & Control Layer*)

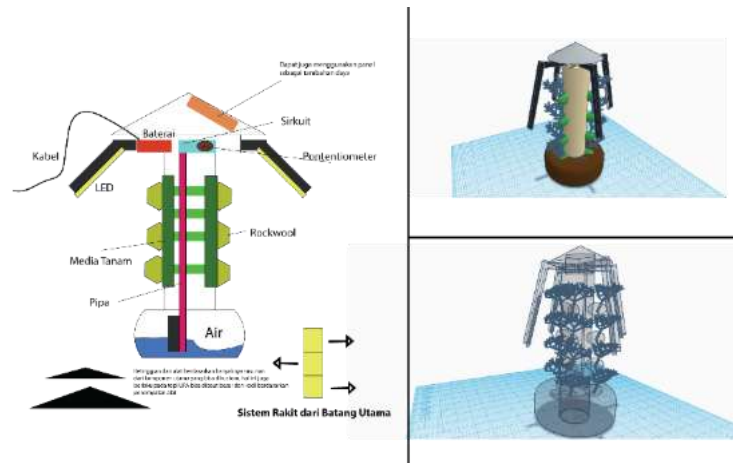
Berfungsi sebagai otak sistem. Mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai unit pemrosesan utama karena telah terintegrasi dengan modul WiFi, memiliki daya komputasi yang memadai, dan sangat efektif dari segi biaya. Lapisan ini bertanggung jawab untuk membaca data dari sensor, memprosesnya, dan mengendalikan aktuator—dalam hal ini, menyalakan dan mematikan lampu LED melalui modul *relay* sesuai jadwal yang telah diprogram.



Gambar 2. Lapisan Proses dan Kontrol

4. Lapisan Aplikasi & Visualisasi (*Application & Visualization Layer*)

Merupakan antarmuka antara sistem dan pengguna. Data yang telah diproses oleh mikrokontroler dikirim melalui jaringan WiFi ke basis data berbasis *cloud*. Data ini kemudian divisualisasikan pada sebuah dasbor berbasis web yang dapat diakses secara *real-time*, memungkinkan pemantauan jarak jauh.



Gambar 3. Ilustrasi Prototipe Urban Portable Agriculture

Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Implementasi sistem dilakukan dengan pemilihan komponen yang tersedia secara luas untuk menekan biaya dan memastikan kemudahan replikasi.

1. Perangkat Keras

Spesifikasi komponen kunci yang digunakan dalam prototipe UPA dirangkum dalam Tabel 1. Pemilihan setiap komponen didasarkan pada keseimbangan antara biaya, ketersediaan, dan kinerja yang memadai untuk tujuan penelitian.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Perangkat Keras Prototipe UPA

Komponen	Spesifikasi / Model	Fungsi dalam Sistem
Mikrokontroler	NodeMCU ESP8266 (ESP32)	Unit pemrosesan pusat, kontrol aktuator, dan komunikasi WiFi.
Sensor pH	DFRobot Gravity Analog pH Sensor/Meter Kit V2	Mengukur tingkat keasaman (pH) larutan nutrisi dengan rentang 0-14.
Sensor Kekeruhan	Analog Turbidity Sensor	Mengukur tingkat kekeruhan air (NTU) sebagai indikator kualitas air.
Aktuator Lampu	3x Lampu LED Tabung	Sumber pencahayaan artifisial untuk fotosintesis.
Aktuator Pompa	Pompa Submersible Aquarium 300L/jam	Mensirkulasikan larutan nutrisi dari reservoir ke menara tanam.
Struktur Utama	Pipa PVC 216mm, Pipa HDPE 10mm	Rangka vertikal untuk 12 titik tanam dan sistem distribusi air.
Manajemen Daya	Adaptor 12V, Buck Converter, Modul Relay	Menyediakan dan mengatur daya listrik untuk seluruh komponen.

2. Perangkat Lunak

Firmware untuk mikrokontroler ESP32 dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Kode program mencakup tiga modul utama: (1) modul akuisisi data untuk membaca nilai dari sensor pH dan kekeruhan, (2) modul kontrol untuk mengelola logika pengoperasian lampu LED, dan (3) modul komunikasi untuk mengirimkan data ke *cloud* melalui protokol HTTP. Platform *cloud* yang digunakan berfungsi sebagai penyimpanan data

deret waktu (*time-series*), sementara dasbor visualisasi dikembangkan menggunakan teknologi web standar (HTML, CSS, JavaScript) untuk memastikan aksesibilitas dari berbagai perangkat.

3. Protokol Kalibrasi

Untuk menjamin akurasi data, prosedur kalibrasi yang ketat diterapkan sebelum sistem dioperasikan. Sensor pH dikalibrasi menggunakan larutan *buffer* standar dengan nilai pH 4.0, 7.0, dan 10.0. Sensor kekeruhan dikalibrasi sesuai dengan instruksi pabrikan menggunakan standar kalibrasi. Pentingnya kalibrasi yang akurat tidak dapat dilebih-lebihkan, karena degradasi dan *drift* sensor merupakan tantangan teknis utama dalam aplikasi pertanian cerdas jangka panjang, yang dapat menyebabkan data tidak andal dan keputusan yang salah jika tidak ditangani dengan benar.

Protokol Validasi Kinerja dan Analisis Data

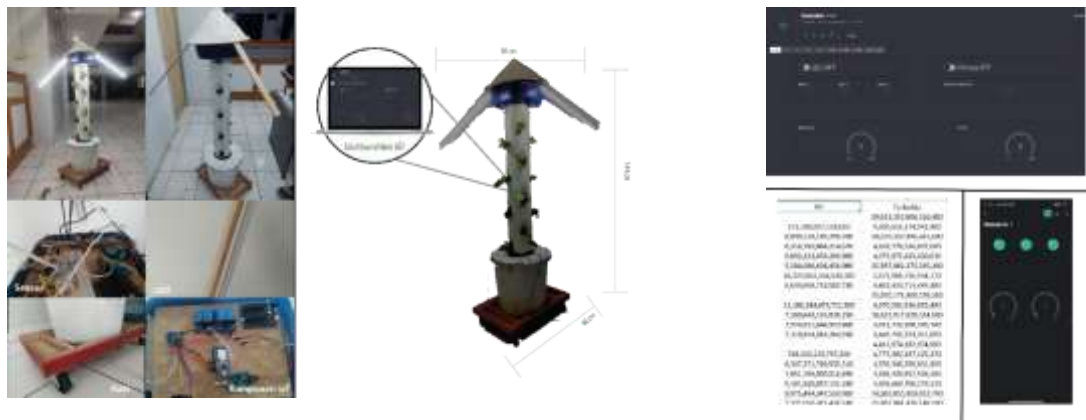
Validasi sistem dilakukan melalui serangkaian pengujian kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja teknis dan stabilitas operasional. Akurasi dilakukan dengan pembacaan sensor pH dan kekeruhan divalidasi berdasarkan spesifikasi teknis pabrikan setelah melalui proses kalibrasi. Sedangkan, latensi *end-to-end* diukur secara manual menggunakan *stopwatch*. Pengukuran ini mencakup total waktu dari saat sensor mengambil data hingga data tersebut berhasil diperbarui dan ditampilkan di dasbor *cloud*. Latensi ini kemudian dipecah menjadi komponen-komponennya: akuisisi sensor, pemrosesan lokal, transmisi WiFi, dan pembaruan basis data *cloud* untuk mengidentifikasi *bottleneck*.

Untuk menganalisis stabilitas operasional, digunakan algoritma klusterisasi DBSCAN. Metode ini dipilih karena kemampuannya sebagai algoritma tanpa pengawasan yang tidak memerlukan jumlah kluster yang telah ditentukan sebelumnya. DBSCAN secara efektif dapat mengidentifikasi kelompok data dengan kepadatan tinggi (yang merepresentasikan kondisi operasional normal) dan memisahkannya dari titik-titik data dengan kepadatan rendah, yang dilabeli sebagai *noise* atau anomali. Dalam konteks ini, DBSCAN digunakan secara otomatis membedakan antara perilaku sistem yang stabil dan fluktuasi abnormal dari data deret waktu pH dan kekeruhan. Parameter algoritma, yaitu radius lingkungan (*eps*) dan jumlah minimum titik (*MinPts*), ditentukan secara empiris untuk mencapai pemisahan kluster yang optimal pada set data yang dikumpulkan.

HASIL

Validasi Kinerja Sensor dan Teknis Sistem

Validasi sensor pH menunjukkan akurasi ± 0.1 unit pH yang memenuhi kriteria teknis untuk aplikasi hidroponik. Ketelitian ini krusial karena hubungan logaritmik antara pH dan aktivitas ion dalam larutan nutrisi, dimana perubahan 0.1 unit pH merepresentasikan 26% perubahan konsentrasi ion hidrogen. Dalam konteks fisiologi tanaman, pH kisaran 5.8-6.3 mengoptimalkan solubilitas dan *bioavailability nutrient* makro (N, P, K) dan *mikronutrient* (Fe, Mn, Zn), sementara pH di luar *range* ini menyebabkan pengendapan atau *complex formation* yang mengurangi efisiensi penyerapan hingga 40% (Cho et al., 2024). Sensor turbiditas dengan akurasi ± 2 NTU memungkinkan deteksi dini pembentukan biofilm dan kontaminasi mikroba. Turbiditas >15 NTU mengindikasikan kepadatan bakteri $>10^5$ CFU/mL berdasarkan korelasi empiris yang terbentuk dalam studi kualitas air (Bakar et al., 2025). Peningkatan progresif baselinturbiditas dari *baseline* 5-8 NTU menjadi >20 NTU selama periode operasional menunjukkan perkembangan alami biofilm yang memerlukan intervensi pemeliharaan.



Gambar 4. (a) Hasil Akhir Prototipe *Urban Portable Agriculture*, (b) Tampilan Dashboard IoT

Sistem pengukuran menunjukkan *coefficient of variation* (CV) 4.9% untuk pH dan 31.2% untuk turbiditas, mengindikasikan pH sebagai parameter yang lebih stabil dibandingkan turbiditas. Variabilitas kekeruhan yang lebih tinggi mencerminkan sensitivitas terhadap gangguan lingkungan dan dinamika suspensi partikel dalam sistem sirkulasi.

Pengujian kuantitatif terhadap prototipe UPA menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi dan bahkan melampaui target kinerja yang ditetapkan. Hasil validasi sensor dan latensi sistem disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan Metrik Kinerja Sistem UPA

Metrik Kinerja	Hasil Pengukuran	Konteks dan Signifikansi
Akurasi Sensor pH	± 0.1 unit pH	Akurasi ini sangat memadai untuk aplikasi hidroponik, di mana rentang pH optimal (umumnya 5.8–6.3) harus dijaga secara ketat untuk memastikan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. ¹
Akurasi Sensor Kekeruhan	± 2 NTU	Memungkinkan deteksi dini terhadap masalah kualitas air seperti pertumbuhan alga atau kontaminasi mikroba, yang dapat mengganggu kesehatan akar tanaman. ¹
Latensi Sistem <i>End-to-End</i>	3.2 ± 1.1 detik	Waktu respons yang cepat ini memastikan bahwa data yang ditampilkan di dasbor hampir bersifat <i>real-time</i> , memungkinkan intervensi pengguna yang tepat waktu jika terjadi anomali.
<i>Bottleneck</i> Latensi	Transmisi WiFi (1.2 ± 0.4 detik)	Analisis dekomposisi latensi mengidentifikasi bahwa transmisi data nirkabel merupakan kontributor terbesar (sekitar 37.5%) terhadap total latensi, yang dipengaruhi oleh kualitas sinyal jaringan.

Analisis Efisiensi Energi dan Lingkungan Tumbuh

Salah satu fungsi inti dari sistem CEA adalah kontrol presisi terhadap lingkungan tumbuh, termasuk pencahayaan. Gambar 5 menampilkan analisis siklus 24 jam dari sistem pencahayaan LED, yang membandingkan konsumsi daya listrik (Watt) dengan *output* cahaya dalam bentuk *Photosynthetic Photon Flux Density* (PPFD).



Gambar 5. Siklus 24 Jam (Hubungan antara Konsumsi Daya dan Output PPFD pada Sistem LED)

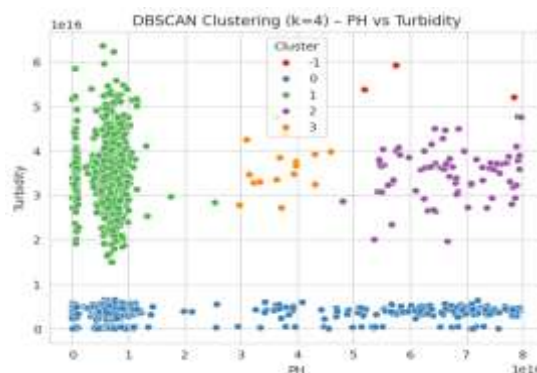
Analisis grafik menunjukkan dua kondisi operasional yang jelas:

1. Mode Siaga (*Standby*): Selama periode "malam" (jam 0-5 dan 21-24), sistem mengkonsumsi daya minimal (sekitar 15 W) dengan output PPFD nol, yang mengindikasikan lampu dalam keadaan mati.
2. Mode Aktif (*Active*): Selama periode "siang" (jam 6-20), sistem beroperasi pada tingkat daya yang stabil sekitar 35 W. Konsumsi daya ini menghasilkan output PPFD yang konsisten sebesar 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.

Tingkat PPFD sebesar 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ini berada dalam rentang yang efektif untuk pertumbuhan sayuran daun seperti selada atau bayam dalam sistem hidroponik dalam ruangan (Hanafi et al. 2025). Analisis ini menunjukkan bahwa sistem kontrol pencahayaan otomatis tidak hanya berfungsi sesuai jadwal, tetapi juga mampu menyediakan lingkungan cahaya yang memadai secara agronomi sambil mengelola konsumsi energi secara efisien.

Analisis Stabilitas Operasional Menggunakan DBSCAN

Untuk mengevaluasi stabilitas sistem dari data operasional yang dikumpulkan, algoritma DBSCAN diterapkan pada data gabungan pH dan kekeruhan. Hasil klusterisasi divisualisasikan pada Gambar 6.

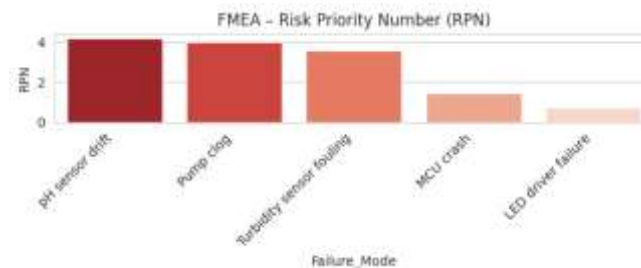


Gambar 6. Hasil Klusterisasi DBSCAN pada Data Operasional pH dan Kekeruhan

Interpretasi hasil klasterisasi dibagi dalam 2 klaster. Klaster operasional normal yaitu algoritma yang berhasil mengidentifikasi beberapa klaster padat (dilabeli 0, 1, 2, dan 3), yang secara kolektif mewakili kondisi operasional sistem yang stabil atau kuasi-stabil. Klaster terbesar (hijau, label 0) dapat diartikan sebagai kondisi normal utama sistem. Klaster-klaster lainnya kemungkinan merepresentasikan fase operasional yang berbeda namun tetap konsisten, seperti setelah penambahan air atau nutrisi. Sedangkan, klaster deteksi anomali (Klaster -1): Titik-titik data yang berwarna merah (dilabeli -1) adalah titik-titik yang oleh DBSCAN diklasifikasikan sebagai *noise* atau *outlier*. Dalam konteks analisis data sensor, titik-titik ini merepresentasikan anomali operasional (Efendi, Wahyono, and Widiyari 2024). Ini adalah momen-momen ketika pembacaan sensor pH dan kekeruhan secara signifikan menyimpang dari pola normal yang telah diidentifikasi. Potensi penyebab anomali ini dapat mencakup gangguan sesaat pada sensor, perubahan mendadak pada kualitas air, atau faktor eksternal lainnya. Secara kuantitatif, hasil ini sejalan dengan klaim dalam abstrak: mayoritas titik data (sekitar 86.5%) termasuk dalam klaster-klaster stabil, yang mengonfirmasi bahwa sistem beroperasi secara konsisten. Sejumlah kecil titik data (sekitar 13.5%) diidentifikasi sebagai anomali. Kemampuan untuk secara otomatis membedakan antara perilaku normal dan anomali tanpa memerlukan ambang batas yang ditentukan secara manual merupakan validasi dari kapabilitas pemantauan cerdas sistem ini, sebuah langkah fundamental menuju sistem pemeliharaan prediktif.

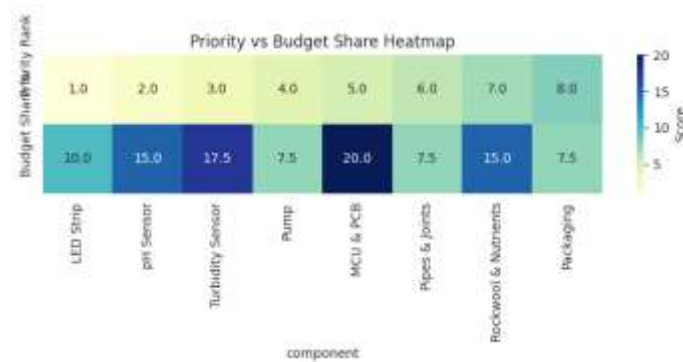
Analisis Risiko dan Prioritas Desain

Desain prototipe UPA tidak hanya didasarkan pada tujuan fungsional, tetapi juga dipandu oleh analisis risiko dan alokasi sumber daya yang pragmatis. Gambar 7 dan Gambar 8 memberikan wawasan tentang proses pengambilan keputusan rekayasa di balik pengembangan sistem.



Gambar 7. Analisis FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) untuk Mengidentifikasi Risiko Sistem

Analisis FMEA (Gambar 8) digunakan untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan potensi mode kegagalan sistem. Hasilnya menunjukkan bahwa "*pH sensor drift*" (pergeseran akurasi sensor pH seiring waktu) dan "*Pump clog*" (penyumbatan pompa) merupakan dua risiko dengan *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi. Ini mengindikasikan bahwa keandalan sensor dan sistem sirkulasi air adalah aspek paling kritis yang perlu diperhatikan dalam desain dan pemeliharaan.



Gambar 8. Heatmap Prioritas Desain versus Alokasi Anggaran Komponen

Heatmap pada Gambar 8 memvisualisasikan bagaimana prioritas desain dan alokasi anggaran didistribusikan ke berbagai komponen. Analisis gabungan dari kedua gambar ini mengungkapkan bahwa risiko tertinggi yang diidentifikasi dalam FMEA (keandalan sensor pH) secara langsung dimitigasi melalui alokasi prioritas dan anggaran yang tinggi pada komponen "pH Sensor" dan "MCU & PCB" sebagai unit pemrosesannya. Sehingga, komponen-komponen ini menerima skor tinggi baik dalam peringkat prioritas maupun porsi anggaran, menunjukkan bahwa sumber daya yang terbatas difokuskan untuk mengatasi titik-titik paling rentan dalam sistem. Analisis ini menunjukkan bahwa proses desain dilakukan secara sistematis, di mana keputusan rekayasa didasarkan pada data risiko untuk menghasilkan prototipe yang kuat dan andal dalam fungsi-fungsi intinya, meskipun dibangun dengan anggaran yang terbatas.

DISKUSI

Interpretasi Kinerja Sistem dalam Konteks *Appropriate Technology*

Hasil validasi menunjukkan bahwa prototipe UPA berhasil mencapai kinerja teknis yang andal untuk fungsi pemantauan dasar. Dalam konteks yang lebih luas, sistem ini dapat diposisikan sebagai contoh "*appropriate technology*" (teknologi tepat guna) untuk pertanian skala kecil (Dhillon and Moncur 2023). Konsep ini menekankan pada solusi yang sesuai dengan konteks ekonomi, sosial, dan teknis penggunaannya. Daripada mengejar fungsionalitas maksimal dengan biaya tinggi, sistem UPA fokus pada penyediaan nilai inti yaitu data pH dan kualitas air yang akurat dan *real-time* dengan biaya yang sangat terjangkau. Keterbatasan utama sistem ini adalah absensi sensor *Electrical Conductivity* (EC), yang krusial untuk mengukur konsentrasi nutrisi secara langsung. Ketiadaan sensor ini secara fundamental membatasi kapabilitas sistem, menjadikannya sebuah "platform pemantauan lingkungan" daripada "sistem kontrol nutrisi" yang sepenuhnya otonom. Namun, keterbatasan ini merupakan hasil dari sebuah *trade-off* desain yang disengaja untuk mencapai target biaya. Bagi pengguna pemula atau untuk tujuan edukasi, pemantauan pH dan kekeruhan sudah memberikan wawasan yang sangat berharga untuk manajemen hidroponik manual yang lebih baik, berfungsi sebagai langkah awal yang signifikan menuju pertanian berbasis data.

Inovasi dalam Keterbatasan (*Constrained Innovation*)

Perjalanan pengembangan prototipe UPA dari proposal awal hingga realisasi akhir memberikan studi kasus yang menarik tentang inovasi yang lahir dari keterbatasan. Perbandingan antara rencana awal dan produk akhir, seperti yang dirangkum dalam tabel perbandingan pada manuskrip asli, menyoroti dampak signifikan dari kendala sumber daya. Pengurangan anggaran sebesar 72% dan pemadatan jadwal proyek menjadi hanya 40 hari memaksa tim untuk melakukan penyederhanaan radikal pada arsitektur sistem (Tabel 3). Fenomena ini dapat dianalisis melalui kerangka Teori Inovasi Terbatas (*Constrained Innovation Theory*), yang menyatakan bahwa batasan yang ketat dapat berfungsi

sebagai katalis untuk kreativitas dan mendorong pengembangan solusi yang lebih fokus, efisien, dan sesuai dengan konteks (Kilian 2006). Dalam kasus UPA, kendala yang ada memaksa tim untuk beralih dari pendekatan komprehensif menjadi penciptaan sebuah *Minimum Viable Product* (MVP). Hasilnya bukanlah sebuah kegagalan, melainkan sebuah solusi yang lebih ramping dan terfokus yang berhasil memvalidasi fungsionalitas inti dengan biaya minimal. Kegagalan implementasi fitur seperti irigasi otomatis akibat ketidakcocokan voltase juga memberikan pelajaran rekayasa yang berharga tentang tantangan integrasi komponen *off-the-shelf*. Dengan demikian, proses pengembangan ini sendiri menjadi sebuah data, yang menunjukkan bagaimana keterbatasan dapat membentuk inovasi yang pragmatis dan relevan, khususnya untuk konteks negara berkembang.

Tabel 3. Perbandingan Spesifikasi Rencana dan Realisasi Prototipe UPA

Parameter	Rencana Awal (Proposal)	Realisasi Akhir (Prototipe)
Anggaran	Rp7.275.000	Rp2.000.000
Durasi Proyek	>3 bulan	40 hari
Lokasi Penelitian	Palembang, Sumatera Selatan	Depok, Sleman, DI Yogyakarta
Sensor Kunci	pH, EC, Suhu/Kelembaban (DHT22), Level Air (Ultrasonik)	pH, Kekeruhan (Turbidity)
Fitur Otomasi Irigasi	Otomatis (Pompa, Katup Solenoid, Timer)	Manual (Pompa on/off kontinu), Kontrol Lampu Otomatis

Implikasi untuk Edukasi dan Adopsi Skala Kecil

Validasi sistem UPA yang berbiaya rendah memiliki implikasi praktis yang signifikan, terutama di dua bidang: pendidikan dan adopsi oleh petani skala kecil. Dalam bidang pendidikan, sistem ini merupakan platform pembelajaran STEM (Sains, Teknologi, Rekayasa, dan Matematika) yang ideal. Siswa dapat terlibat secara langsung dengan konsep-konsep abstrak seperti sensorik, mikrokontroler, pemrograman, komunikasi data, dan bahkan analisis data (melalui interpretasi hasil DBSCAN). Ini memberikan pengalaman belajar langsung (*hands-on*) yang mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu dalam konteks aplikasi dunia nyata yang relevan dengan ketahanan pangan dan keberlanjutan. Bagi petani urban atau penghobi, sistem UPA dapat berfungsi sebagai "*bridge technology*"—sebuah jembatan teknologi yang menurunkan ambang batas untuk masuk ke dunia pertanian presisi. Dengan investasi awal yang rendah, pengguna dapat mulai merasakan manfaat dari pemantauan berbasis data, meningkatkan pemahaman mereka tentang dinamika sistem hidroponik, dan berpotensi meningkatkan hasil panen mereka. Ini sejalan dengan upaya global untuk mendemokratisasi akses terhadap teknologi digital bagi petani kecil, memberdayakan mereka dengan alat untuk membuat keputusan yang lebih baik.

Keterbatasan dan Arah Penelitian Selanjutnya

Pengakuan yang transparan terhadap keterbatasan penelitian sangat penting untuk integritas ilmiah dan untuk memandu pengembangan di masa depan. Keterbatasan utama dari studi ini adalah adanya absensi data agronomis sehingga validasi yang dilakukan bersifat teknis dan tidak mencakup pengukuran dampak sistem terhadap pertumbuhan atau hasil panen tanaman. Terdapat sensor yang tidak lengkap menjadi faktor signifikan yang membatasi kemampuan sistem untuk manajemen nutrisi yang presisi. Terakhir, prototipe sangat bergantung pada listik dan jaringan sehingga sumber daya listrik eksternal membatasi aspek "portabilitas" dari sistem ini.

Berdasarkan keterbatasan ini, arah penelitian selanjutnya dapat disusun dalam tiga fase teknis yaitu; 1) Penyempurnaan teknis menjadi prioritas utama untuk mengintegrasikan sensor ec dan merancang sistem manajemen daya yang lebih baik untuk memungkinkan irigasi otomatis yang andal; 2) Validasi agronomis dengan melakukan studi pertumbuhan tanaman terkontrol jangka panjang untuk membandingkan produktivitas tanaman pada sistem upa dengan sistem kontrol non-IoT; 3) Peningkatan otonomi dan skalabilitas yang mengeksplorasi integrasi dengan sumber energi terbarukan (misalnya, panel surya) untuk mencapai otonomi penuh dan mengembangkan model analitik prediktif berdasarkan data historis yang terkumpul untuk memberikan peringatan dini dan rekomendasi otomatis.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan memvalidasi secara teknis sistem Urban Portable Agriculture (UPA) berbasis IoT sebagai platform monitoring hidroponik berbiaya rendah yang fungsional. Seluruh target kinerja teknis yang ditetapkan dalam penelitian ini berhasil dicapai. Sistem menunjukkan akurasi sensor yang andal ($\text{pH} \pm 0.1$, kekeruhan ± 2 NTU) dan waktu respons sistem yang cepat (rata-rata 3.2 detik), yang secara signifikan berada di bawah ambang batas <10 detik yang ditargetkan. Dengan total biaya realisasi sebesar Rp 2.000.000, sistem ini menawarkan penghematan biaya hingga 80-92% dibandingkan dengan alternatif komersial, sehingga secara dramatis meningkatkan aksesibilitas teknologi.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah validasi sebuah kerangka kerja untuk "*Graduated Precision Agriculture*", yang menunjukkan bahwa adopsi teknologi pertanian modern dapat dilakukan secara bertahap dan terjangkau. Studi ini membuktikan bahwa dengan integrasi komponen *off-the-shelf* yang cermat dan analisis kinerja yang rigor, sebuah sistem IoT-hidroponik yang fungsional dan andal dapat diciptakan. Arsitektur modular yang dikembangkan tidak hanya memenuhi kebutuhan saat ini tetapi juga menyediakan jalur yang jelas untuk peningkatan kapabilitas di masa depan, menjadikannya solusi yang berkelanjutan dan dapat diskalakan, terutama untuk konteks institusi pendidikan dan petani urban dengan keterbatasan modal di negara berkembang.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. 2024. Produksi Tanaman Pangan Nasional (Ton). <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MjM0NSMy/produksi-tanaman-pangan-nasional--ton-.html>.
- Bakar, Azinoor Azida Abu et al. 2025. "IoT-Based Real-Time Water Quality Monitoring and Sensor Calibration for Enhanced Accuracy and Reliability." *Int. J. Interact. Mob. Technol.* 19: 155–70. <https://consensus.app/papers/iotbased-realtime-water-quality-monitoring-and-sensor-bakar-yusoff/fe2ef43906a254a1804bfe10b206aa11/>.
- Cho, Woo-Jae et al. 2024. "Automated Drift Compensation System for Electrical Conductivity and PH Probes in Hydroponic Systems." *Journal of the ASABE*. <https://consensus.app/papers/automated-drift-compensation-system-for-electrical-kim-cho/75521c8ff03c5592a288fe6363c56bee/>.
- Cowan, N et al. 2022. "CEA Systems: The Means to Achieve Future Food Security and Environmental Sustainability?" 6. <https://consensus.app/papers/cea-systems-the-means-to-achieve-future-food-security-and-skiba-cowan/f4da6b868c2f5b32b5de1edc6eecc44e/>.
- Dhillon, Rajveer, and Qianna Moncur. 2023. "Small-Scale Farming: A Review of Challenges and Potential Opportunities Offered by Technological Advancements." *Sustainability* 15(21). <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/21/15478>.
- Efendi, Rissal, Teguh Wahyono, and Indrastanti Ratna Widiarsari. 2024. "DBSCAN SMOTE LSTM: Effective Strategies for Distributed Denial of Service Detection in Imbalanced Network Environments." *Big Data and Cognitive Computing* 8(9). <https://www.mdpi.com/2504-2289/8/9/118>.

- Gandharum, Laju et al. 2025. "Agricultural Land Change and Its Farmers' Perception in the North Coast Region of West Java Province, Indonesia." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1462(1): 12027. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1462/1/012027>.
- Ghorbel, Roukaya, Jamel Chakchak, Nedim Koşum, and Numan Cetin. 2022. "Hydroponic Technology for Green Fodder Production: Concept, Advantages, and Limits."
- Hanafi, Ahmed M et al. 2025. "Revolutionizing Agriculture with IoT, Mobile Apps, and Computer Vision in Automated Hydroponic Greenhouses." International Journal of Engineering and Applied Sciences-October 6 University 2(1): 1–16.
- Ilyas, Ilyas. 2022. "Optimalisasi Peran Petani Milenial Dan Digitalisasi Pertanian Dalam Pengembangan Pertanian Di Indonesia." FORUM EKONOMI 24: 259–66.
- Kaur, Et. 2021. "All about Vertical Farming: A Review." Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT) 12: 1–14.
- Kilian, Axel. 2006. "Design Innovation through Constraint Modeling." International Journal of Architectural Computing vol. 4 - no. 1, 87-105 4: 87–105.
- Konyep, Sostenes. 2021. "Mempersiapkan Petani Muda Dalam Mencapai Kedaulatan Pangan." Jurnal Triton 12(1): 78–88.
- Purwaningsih, Yunastiti. 2008. "KETAHANAN PANGAN: SITUASI, PERMASALAHAN, KEBIJAKAN, DAN PEMBERDAYAAN MASYARAKAT." Jurnal Ekonomi Pembangunan 9: 1.
- Rajak, Prem, Abhratanu Ganguly, Satadal Adhikary, and Suchandra Bhattacharya. 2023. "Internet of Things and Smart Sensors in Agriculture: Scopes and Challenges." Journal of Agriculture and Food Research 14: 100776. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323002831>.
- Riptanti, Erlyna Wida, Zeino Heka Raharjo, Khairiyakh, and Refaul. 2024. "Dampak Alih Fungsi Lahan Pertanian Terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Petani (Studi Kasus Pembangunan Jalan Tol Surakarta – Yogyakarta Di Kabupaten Boyolali." Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis 8(2).
- Sondakh, Joula, Janne Rembang, and N F N Syahyuti. 2021. "KARAKTERISTIK, POTENSI GENERASI MILENIAL DAN PERSPEKTIF PENGEMBANGAN PERTANIAN PRESISI DI INDONESIA." Forum penelitian Agro Ekonomi 38: 155.
- Srinidhi, H K, H S Shreenidhi, and G S Vishnu. 2020. "Smart Hydroponics System Integrating with IoT and Machine Learning Algorithm." In 2020 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT), , 261–64.
- Suryaningsih, Y et al. 2023. "Edukasi Peran Generasi Muda Terhadap Pembangunan Pertanian Dalam Mewujudkan Ketahanan Pangan." Prosiding Seminar Nasional Unars 2(1): 86–93.
- Thomaier, Susanne et al. 2015. "Farming in and on Urban Buildings: Present Practice and Specific Novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming)." Renewable Agriculture and Food Systems 30(1): 43–54.s