

Pertanian Vertikal Pintar: Peran IoT dalam Mewujudkan Keberlanjutan dan Efisiensi Sumber Daya

Putu Ayu Citra Setiawan¹, Ngurah Indra ER², Gede Sukadarmika³

[Submission: 02-01-2025, Accepted: 09-05-2025]

Abstract— The rapid growth of population and urbanization poses significant challenges to global food security, particularly in urban areas. The conversion of agricultural land into residential and infrastructure zones reduces local food production capacity, while climate change exacerbates uncertainties in crop yields. To address these challenges, IoT-based vertical farming has emerged as an innovative solution to enhance efficiency and sustainability in food production systems. IoT technology enables vertical farming systems to monitor and control environmental variables such as temperature, humidity, lighting, and nutrient levels in real-time through sensors connected to artificial intelligence. The collected data is analyzed to optimize plant growth, minimize resource waste, and maximize crop yields while reducing energy consumption. Additionally, integrating IoT with automated irrigation systems and energy-efficient LED lighting further enhances water and electricity efficiency. From a sustainability perspective, IoT-based vertical farming allows for year-round food production without relying on vast land areas or favorable weather conditions. The adoption of this technology also creates new economic opportunities by establishing self-sustaining urban farming systems that can be integrated with renewable energy sources. This research further explores how IoT contributes to improving resource efficiency, environmental sustainability, and the economic and social impacts of vertical farming. The goal is to develop a smarter, more adaptive, and sustainable food production system that addresses the growing demands of urban populations while preserving natural resources. Based on the research findings, the implementation of IoT in vertical farming has proven to be highly beneficial in enhancing sustainability and resource efficiency in urban food production. Based on the research findings, the implementation of IoT in vertical farming has proven to be highly effective in enhancing sustainability and optimizing resource efficiency in urban food production. Through real-time monitoring and automated control systems, IoT enables precise regulation of key environmental factors such as temperature, humidity, lighting, and nutrient levels, ensuring optimal plant growth with minimal resource wastage.

Intisari— Pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat menimbulkan tantangan besar dalam ketahanan pangan global dan ketahanan pangan, terutama di wilayah perkotaan. Konversi

lahan pertanian menjadi kawasan pemukiman dan infrastruktur mengurangi kapasitas produksi pangan lokal, sementara perubahan iklim memperburuk ketidakpastian hasil panen. Dalam menghadapi tantangan ini, pertanian vertikal berbasis Internet of Things (IoT) muncul sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem produksi pangan. Teknologi IoT memungkinkan sistem pertanian vertikal untuk memantau dan mengontrol variabel lingkungan seperti suhu, kelembapan, pencahayaan, dan nutrisi tanaman secara real-time melalui sensor yang terhubung dengan kecerdasan buatan. Data yang dikumpulkan dianalisis untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman, mengurangi pemborosan sumber daya, serta memaksimalkan hasil panen dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Dari segi keberlanjutan, pertanian vertikal berbasis IoT memungkinkan produksi pangan sepanjang tahun tanpa bergantung pada lahan luas dan kondisi cuaca eksternal. Pemanfaatan teknologi ini juga membuka peluang ekonomi baru dengan menciptakan sistem pertanian mandiri di perkotaan yang dapat diintegrasikan dengan energi terbarukan. Penelitian ini mengkaji lebih lanjut bagaimana IoT berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi sumber daya, keberlanjutan lingkungan, serta dampak ekonomi dan sosial dari pertanian vertikal, dengan tujuan menciptakan sistem produksi pangan yang lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan. Berdasarkan hasil penelitian, penerapan IoT dalam pertanian vertikal terbukti sangat efektif dalam meningkatkan keberlanjutan dan mengoptimalkan efisiensi sumber daya dalam produksi pangan perkotaan. Melalui pemantauan real-time dan sistem kontrol otomatis, IoT memungkinkan pengaturan yang presisi terhadap faktor lingkungan utama seperti suhu, kelembapan, pencahayaan, dan kadar nutrisi, sehingga memastikan pertumbuhan tanaman yang optimal dengan minimnya pemborosan sumber daya.

Kata Kunci— efisiensi sumber daya; IoT; keberlanjutan; ketahanan pangan; Pertanian vertikal.

I. PENDAHULUAN

Pesatnya pertumbuhan populasi dan berlanjutnya urbanisasi telah menimbulkan tantangan besar bagi sistem produksi pangan di tingkat global. Saat ini, lebih dari separuh populasi dunia saat ini menetap di wilayah perkotaan, dan angka ini diperkirakan akan meningkat hingga 70% dalam beberapa dekade mendatang [1]. Urbanisasi yang masif telah mengakibatkan konversi lahan pertanian menjadi kawasan pemukiman, industri, serta infrastruktur lainnya. Akibatnya, produksi pangan lokal semakin menurun dan dependensi terhadap suplai pangan dari luar wilayah perkotaan terus mengalami peningkatan. Hal ini bertolak belakang dengan peningkatan permintaan pangan yang terus tumbuh [2].

Selain keterbatasan lahan di perkotaan, perubahan iklim turut memperburuk tantangan yang dihadapi oleh sektor pertanian tradisional. Fluktuasi cuaca, kekeringan, banjir, dan degradasi

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372

¹Mahasiswa, Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Udayana, Gedung Pacasarjana Universitas Udayana Jl. PB Sudirman Denpasar-Bali, Kode Pos : 80323 (telp: 0361-555225 ; e-mail: ptayucitra@gmail.com)

^{2,3}Dosen, Jurusan Teknik Elektro dan Komputer Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jln. Jalan Kampus Bukit Jimbaran 80361 INDONESIA (telp: 0361-703315; fax: 0361-4321; e-mail: ²indra@unud.ac.id; ³sukadarmika@unud.ac.id)



lahan semakin mengancam produksi pangan di daerah pedesaan yang selama ini menjadi penyedia utama pangan bagi wilayah perkotaan [3]. Tidak dapat dipungkiri bahwa pertanian tradisional telah memberikan kontribusi besar bagi peradaban manusia. Namun, untuk menghadapi tantangan lingkungan yang semakin mendesak, perlu dilakukan transformasi pada sistem pertanian saat ini. Praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, seperti deforestasi dan degradasi tanah, sebaiknya digantikan dengan praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan[4][5].

Pertanian berkelanjutan bertujuan untuk memproduksi pangan dan hasil pertanian lainnya dengan metode yang ramah lingkungan serta menjaga kesejahteraan masyarakat dan hewan [6]. Dengan terus bertambahnya populasi global, permintaan akan produksi pangan meningkat pesat. Diperkirakan pada tahun 2050, konsumsi kalori per individu akan meningkat sekitar 14 persen, yang akan mendorong lonjakan permintaan pangan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, produksi pangan harus meningkat sekitar 60% pada tahun 2050 [7]. Dengan menerapkan metode pertanian yang ramah lingkungan, seperti pertanian vertikal, penggunaan teknologi hemat air, dan pengelolaan tanah yang bijak, kita dapat menjaga keseimbangan ekosistem dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Pertanian vertikal merupakan metode budidaya tanaman yang disusun dalam lapisan bertingkat. Teknik ini sering menggunakan sistem pertanian tanpa tanah, seperti hidroponik, akuaponik, dan aeroponik, serta memanfaatkan lingkungan terkontrol untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman [8]. Ini memungkinkan produksi hasil pertanian segar berkualitas tinggi sepanjang tahun, tanpa bergantung pada cahaya matahari atau kondisi luar. Kontrol lingkungan dapat diotomatisasi sepenuhnya dengan bantuan IoT. Internet of Things (IoT) merupakan inovasi teknologi yang menyatukan berbagai aspek dan teknologi dari beragam metodologi, termasuk Internet Protocol (IP), teknologi komunikasi, komputasi yang menyeluruh, RFID, teknologi sensor, layanan pintar, serta perangkat embedded [2]. Penggunaan sensor, teknik pencitraan, model simulasi tanaman, dan kecerdasan buatan pada pertanian vertikal memungkinkan peningkatan efisiensi dan hasil produksi secara signifikan.

Pertanian vertikal diproyeksikan menjadi solusi modern dalam memenuhi kebutuhan pangan bagi populasi global yang terus meningkat. Dengan mendirikan pertanian yang lebih dekat ke konsumen, sistem ini mampu menghasilkan panen yang lebih terjangkau, organik, dan bebas penyakit, sekaligus melestarikan sumber daya alam yang semakin terbatas [8]. Dalam konteks keberlanjutan, pertanian vertikal tidak hanya menawarkan efisiensi dalam penggunaan lahan, tetapi juga mengoptimalkan sumber daya seperti air, energi, dan nutrisi tanaman melalui penerapan teknologi berbasis Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan (AI). Dengan sistem yang terkontrol, kebutuhan akan pupuk dan pestisida dapat diminimalisir, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran IoT pada pertanian vertikal pintar dalam mewujudkan keberlanjutan serta efisiensi sumber daya dengan menganalisa beberapa aspek

yaitu efisiensi penggunaan sumber daya, keberlanjutan lingkungan serta aspek ekonomi dan sosial. Dengan mempertimbangkan aspek-aspek tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai peran IOT dalam mendukung sistem pangan yang lebih berkelanjutan dan efisien, serta sebagai alternatif inovatif dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim dan keterbatasan lahan pertanian konvensional.

II. STUDI PUSTAKA

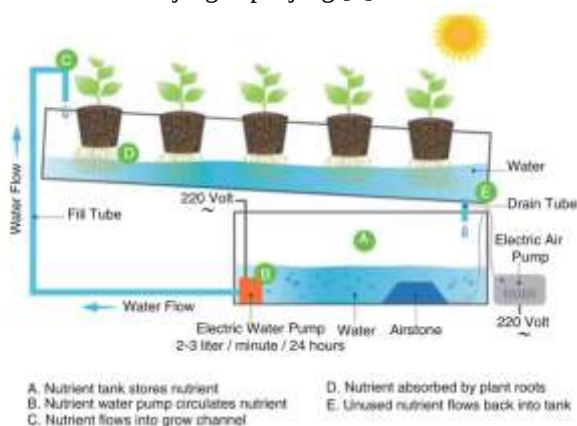
A. Pertanian Vertikal

Pertanian vertikal adalah teknik budidaya yang menanam tanaman dalam lapisan bertingkat dengan memanfaatkan pencahayaan buatan dan lingkungan yang terkontrol untuk menciptakan kondisi tumbuh yang optimal. Metode ini dapat diterapkan di berbagai struktur, seperti rumah kaca, kontainer pengiriman, atau gedung pencakar langit, memungkinkan petani memaksimalkan penggunaan lahan dengan menanam lebih banyak tanaman dalam ruang yang lebih kecil sambil menggunakan lebih sedikit sumber daya, seperti air, pupuk, dan pestisida. Teknik ini termasuk dalam kategori pertanian dengan lingkungan terkontrol (CEA) dan memungkinkan produksi tanaman sepanjang tahun di daerah dengan keterbatasan lahan, seperti kawasan perkotaan. [7]. Metode ini memungkinkan tanaman untuk tumbuh di lapisan bertingkat dalam bangunan tertutup, seperti gudang atau bangunan tinggi, sehingga mengatasi keterbatasan lahan di perkotaan. PV tidak hanya efisien dalam penggunaan ruang, tetapi juga mengurangi kebutuhan akan tanah subur, menghemat air hingga 90%, dan mengurangi penggunaan pestisida secara signifikan karena sistem yang tertutup dan terkontrol [9].

Salah satu keunggulan utama pertanian vertikal adalah kemampuannya menghasilkan produk segar dalam jumlah besar sepanjang tahun tanpa terpengaruh oleh kondisi cuaca dan keterbatasan musim. Dengan mendekatkan produksi pangan ke pusat perkotaan, pertanian vertikal mengurangi jarak transportasi, menekan emisi karbon, dan memastikan ketersediaan pangan lokal yang bernutrisi. Selain itu, sistem ini dapat memanfaatkan ruang yang kurang dimanfaatkan, seperti bangunan terbengkalai, gudang, atau menara vertikal, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan lahan [7]. Di dalam sistem ini, teknologi sensor canggih digunakan untuk secara terus-menerus mengukur dan memantau kondisi lingkungan tersebut. Data yang dikumpulkan ini kemudian diolah menggunakan kecerdasan buatan (AI) dan Internet of Things (IoT), yang memungkinkan sistem untuk secara otomatis menyesuaikan parameter lingkungan sesuai dengan fase pertumbuhan tanaman yang spesifik. Dengan demikian, efisiensi produksi dan kualitas hasil pertanian dapat dimaksimalkan. Konsep pertanian vertikal, yang sering kali dikaitkan dengan teknik budidaya hidroponik, memang menawarkan potensi untuk mengatasi tantangan pertanian tradisional, terutama di kawasan urban yang terbatas lahan. Selain hidroponik, dua teknik lain yang semakin populer adalah sistem aeroponik dan akuaponik, yang keduanya menawarkan pendekatan yang lebih efisien dalam konteks pertanian vertikal.

1. Sistem Hidroponik

Pada sistem hidroponik, tanaman tumbuh dengan akar yang terendam dalam larutan air yang mengandung nutrisi esensial untuk mendukung pertumbuhannya. Sistem ini memungkinkan tanaman untuk memperoleh semua kebutuhan gizi dan mineralnya secara langsung dari larutan air, tanpa bergantung pada tanah. Saat ini, hidroponik diterapkan dalam berbagai skala, mulai dari kebun rumah tangga hingga operasi komersial berskala besar. Sistem ini digunakan untuk menanam berbagai jenis tanaman, seperti sayuran hijau, rempah-rempah, hingga tanaman berbuah seperti tomat dan stroberi. Selain itu, hidroponik juga dimanfaatkan dalam penelitian untuk mempelajari fisiologi dan genetika tanaman, serta dalam eksplorasi luar angkasa guna menyediakan sumber pangan bagi astronot dalam misi jangka panjang [7].



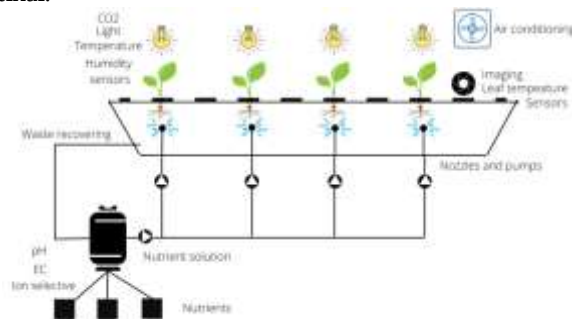
Gambar 1 Mekanisme sistem pertanian hidroponik [20]

Arsitektur dasar sistem hidroponik yang menggunakan teknik *Nutrient Film Technique* (NFT) dirancang dengan kesederhanaan yang efektif, sistem ini dapat mengalirkan larutan nutrisi ke akar tanaman secara berkelanjutan [20]. Teknik *Nutrient Film Technique* (NFT) dalam sistem hidroponik mengalirkan larutan nutrisi tipis melalui saluran tempat tanaman ditanam, tanpa menggunakan tanah. Air dan nutrisi dipompa dari reservoir ke saluran, mengalir tipis di sepanjang akar tanaman yang menyerap unsur hara yang dibutuhkan. Sistem ini menggunakan sedikit air karena larutan nutrisi didaur ulang, dan tanaman mendapatkan nutrisi secara langsung. Arsitektur NFT mencakup reservoir, pompa air, saluran distribusi, serta kontrol terhadap pH dan TDS untuk memastikan nutrisi yang optimal. Keuntungan utamanya adalah efisiensi dalam penggunaan air dan nutrisi, serta kontrol lingkungan yang presisi, meskipun memerlukan pemeliharaan rutin untuk menghindari gangguan pada sirkulasi air dan saluran yang tersumbat.

2. Sistem Aeroponik

Aeroponik merupakan kemajuan signifikan dalam teknologi hidroponik. Sistem ini tidak memerlukan tanah atau media tanam serta menggunakan air dan sinar matahari dalam jumlah minimal. Secara umum, aeroponik dapat didefinisikan sebagai ekosistem tertutup yang mengandalkan udara dan

larutan nutrisi untuk mempercepat pertumbuhan tanaman. Perbedaan utama antara hidroponik dan aeroponik terletak pada penggunaan media tanam—hidroponik masih memanfaatkan media tertentu, sedangkan aeroponik sepenuhnya menggantungkan pertumbuhan tanaman pada semprotan larutan nutrisi di udara [11]. Sistem aeroponik dapat mengurangi penggunaan air hingga 90% dibandingkan dengan sistem hidroponik yang paling efisien, menjadikannya metode penanaman yang paling hemat air di antara teknik pertanian vertikal.



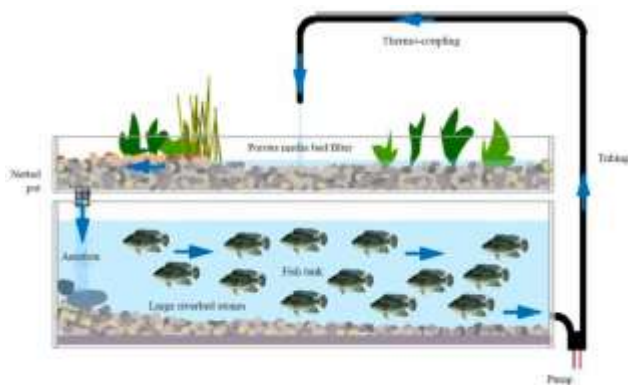
Gambar 2 Mekanisme sistem pertanian aeroponik [18]

Sistem aeroponik terdiri dari beberapa elemen utama yang saling berfungsi untuk mendukung pertumbuhan tanaman dengan efisien. Akar tanaman diletakkan dekat dengan nozel yang menyemprotkan larutan nutrisi dalam bentuk kabut, dan pipa digunakan untuk mengalirkan atau memulihkan larutan tersebut. Seluruh sistem ditempatkan dalam ruang berinsulasi termal untuk menjaga suhu yang optimal. Aktuator utama dalam sistem aeroponik meliputi: (1) pompa dan nozel yang menyuplai larutan nutrisi ke akar tanaman, (2) lampu LED yang memberikan pencahayaan buatan yang diperlukan untuk fotosintesis, (3) sistem pendingin udara dan kipas untuk mengatur suhu, kelembaban, dan sirkulasi udara yang mendukung pertumbuhan tanaman, dan (4) sistem perpipaan yang berfungsi untuk memulihkan dan mendaur ulang larutan nutrisi, menjaga efisiensi penggunaan air dan nutrisi.

3. Sistem Akuaponik

Sistem akuaponik menggabungkan hidroponik dan akuakultur untuk menciptakan ekosistem simbiotik di mana ikan dan tanaman tumbuh secara bersamaan [20]. Dalam sistem ini, limbah ikan, yang kaya nutrisi, disirkulasikan ke tanaman, memberikan mereka unsur hara yang dibutuhkan, sementara tanaman membantu menyaring air untuk ikan, menciptakan siklus berkelanjutan yang saling menguntungkan [40]. Untuk mengoptimalkan kinerja sistem ini, Internet of Things (IoT) digunakan untuk memantau dan mengontrol lingkungan, seperti pH, suhu, dan kualitas air, guna menjaga kesehatan tanaman dan ikan [16]. Selain memastikan lingkungan ideal untuk pertumbuhan tanaman dan ikan, sistem ini juga harus mengelola keseimbangan antara keduanya, serta memantau kondisi peralatan secara otomatis, guna menjaga sistem berjalan efisien dan berkelanjutan.





Gambar 3 Mekanisme sistem pertanian akuaponik [8]

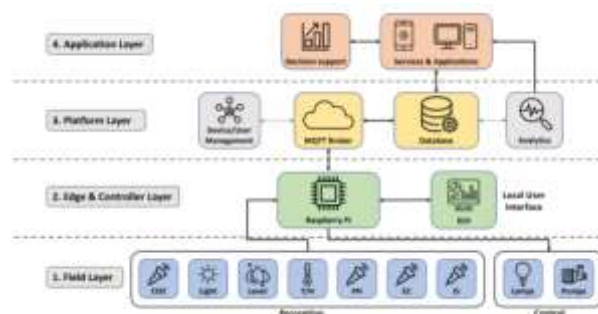
Sistem akuaponik berpotensi menjadi model produksi pangan berkelanjutan dengan menerapkan prinsip 3R (reduce, reuse, recycle). Sistem ini menawarkan berbagai manfaat, termasuk membersihkan air untuk ikan, menyediakan pupuk cair organik untuk tanaman, dan menciptakan efisiensi dengan mengubah limbah ikan menjadi nutrisi untuk tanaman. Akuaponik juga menghemat air melalui sirkulasi ulang, mengurangi ketergantungan pada bahan kimia dan pupuk buatan, serta meningkatkan keanekaragaman hayati dengan menanam berbagai tanaman. Selain itu, sistem ini menyediakan makanan sehat yang ditanam lokal, menciptakan lapangan kerja, dan menawarkan peluang bisnis dengan memproduksi sayuran segar dan ikan dalam satu unit kerja yang efisien.

B. Internet Of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang memungkinkan pertukaran data secara real-time melalui jaringan internet tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung [39]. IoT dapat dianggap sebagai model yang menggabungkan berbagai aspek dan teknologi yang berasal dari beberapa metodologi. Protokol Internet (IP), teknologi komunikasi, komputasi yang menyeluruh, Identifikasi Frekuensi Radio (RFID), teknologi sensor, layanan pintar, dan perangkat embedded semua dikonvergensi untuk membentuk kerangka kerja di mana dunia nyata dan digital saling bertemu dan berinteraksi secara terus-menerus [2]. Dalam pertanian vertikal, penerapan teknologi IoT memiliki peluang besar untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam produksi pangan. Dengan sensor yang terpasang di dalam sistem pertanian, petani dapat memantau secara langsung berbagai kondisi lingkungan, seperti suhu, kelembaban, dan konsentrasi CO₂ secara real-time. Data yang diperoleh dianalisis untuk meningkatkan proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan tanaman, sehingga mendukung terciptanya pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan.

IOT memiliki arsitektur yang terdiri dari Field Layer (Lapisan Lapangan), Edge & Controller Layer (Lapisan Pengontrol dan Edge Computing), Platform Layer (Lapisan Platform) dan Application Layer (Lapisan Aplikasi) [18]. Field Layer (Lapisan Lapangan) bertanggung jawab atas pengumpulan data dan eksekusi kontrol. Perangkat sensor yang digunakan untuk mengukur berbagai parameter lingkungan, seperti CO₂, intensitas cahaya, level air, suhu (T), pH,

konduktivitas listrik (EC), dan ion spesifik (IS). Perangkat aktuator untuk mengontrol lingkungan pertanian, termasuk lampu dan pompa. Edge & Controller Layer (Lapisan Pengontrol dan Edge Computing) berfungsi sebagai jembatan antara perangkat fisik di Field Layer dan sistem pengelolaan data di Platform Layer. Pada lapisan ini, contohnya Raspberry Pi bertindak sebagai unit pengontrol utama yang bertanggung jawab atas pemrosesan data sensor, pengambilan keputusan lokal, dan pengendalian aktuator. Platform Layer (Lapisan Platform) Bertanggung jawab atas manajemen data dan komunikasi. Contohnya protocol MQTT Broker digunakan untuk komunikasi antar perangkat IoT. Kemudian Database menyimpan data yang dikumpulkan untuk analisis lebih lanjut. Proses analytics digunakan untuk menganalisis tren dan pola dalam data lingkungan. Device/User Management memungkinkan pengelolaan perangkat dan pengguna yang berinteraksi dengan sistem. Application Layer (Lapisan Aplikasi) bertugas memberikan layanan berbasis aplikasi untuk pengguna akhir. Decision Support membantu dalam memberikan rekomendasi berbasis data untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan efisiensi sumber daya dan Services & Applications memungkinkan pengguna untuk mengakses layanan pemantauan dan kontrol secara real-time.



Gambar 4 Contoh Arsitektur IoT [18]

C. Keberlanjutan dan Efisiensi Sumber Daya

Pertanian berkelanjutan sering kali dikaji dalam konteks masalah lingkungan yang muncul akibat pemanfaatan sumberdaya alam yang berlebihan. Penelitian di bidang ini sering menghadirkan dilema antara kelayakan ekonomi dan kebutuhan untuk menjaga kelestarian sumber daya alam. Pelestarian sumber daya lahan pertanian, kualitas lingkungan, dan keberlanjutan sistem produksi menjadi aspek krusial bagi keberlangsungan sektor pertanian [12]. Seperti konsep keberlanjutan secara umum, keberlanjutan dalam pertanian mencakup tiga pilar utama: lingkungan, ekonomi, dan social. Ketiga pilar ini harus dipertimbangkan secara bersamaan agar sistem pertanian yang diterapkan tidak hanya menguntungkan dari segi ekonomi, tetapi juga mendukung pelestarian lingkungan sertamemberikan manfaat sosial.

III. METODOLOGI

Metodologi dalam penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan tujuan untuk mengeksplorasi dan memahami kontribusi pertanian vertikal pintar melalui

penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam mencapai keberlanjutan dan efisiensi sumber daya. Tahapan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

A. Identifikasi Masalah

Langkah pertama dalam metodologi ini adalah mengidentifikasi isu utama yang akan dibahas, yaitu kontribusi Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi sumber daya di pertanian vertikal. Penelitian ini berfokus pada aspek teknologi yang berhubungan dengan pengelolaan sumber daya, keberlanjutan lingkungan, serta dampak sosial-ekonomi dari penerapan IoT pada pertanian vertikal

B. Pengumpulan dan Seleksi Literatur

Literatur yang relevan dikumpulkan dari berbagai database akademik seperti Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, dan Science Direct. Pencarian dilakukan menggunakan kata kunci seperti “Vertical Farming”, “Agriculture Sustainability”, “Sustainability and Efficiency of Resources in Agriculture”, serta “Controlled Environment Agriculture (CEA)”. Penelitian ini membatasi kajian pada artikel yang diterbitkan dalam rentang waktu 10 tahun terakhir (2014-2024) untuk memastikan kesesuaian dengan perkembangan teknologi terkini di bidang IoT dan pertanian vertikal. Artikel yang diterbitkan sebelum tahun 2014 hanya akan dipertimbangkan jika dianggap sebagai literatur klasik yang memiliki pengaruh signifikan terhadap pengembangan teknologi IoT atau pertanian vertikal. Sementara itu, artikel yang membahas pertanian tradisional tanpa penerapan teknologi, serta yang tidak mencakup aspek keberlanjutan dan efisiensi sumber daya, akan dieksklusi dari kajian ini. Langkah-langkah ini diambil untuk memastikan bahwa analisis yang dilakukan akan berfokus pada inovasi dan solusi yang mendukung keberlanjutan dalam praktik pertanian modern.

C. Pengelompokan Literatur

Setelah literatur dikumpulkan, data tersebut dikelompokkan ke dalam beberapa kategori topik utama yang relevan dengan tema penelitian, yaitu (1) Efisiensi Sumber Daya; (2) Keberlanjutan Lingkungan; dan (3) Dampak Sosial dan Ekonomi. Pada topik kategori 1 merupakan Literatur yang berfokus pada bagaimana IoT membantu mengoptimalkan penggunaan air, energi, dan pupuk di dalam pertanian vertikal. Topik kategori 2 merupakan literatur yang menilai dampak lingkungan dari penerapan IoT di pertanian vertikal. Topik kategori 3 merupakan artikel yang mengeksplorasi implikasi sosial dan ekonomi dari pertanian vertikal berbasis IoT, seperti peningkatan ketahanan pangan di perkotaan dan penciptaan lapangan kerja.

D. Analisis dan Sintesis Data

Pada tahap ini dilakukan eksplorasi pada setiap kategori untuk menemukan tema-tema utama yang muncul dari data. Proses ini melibatkan pemahaman konteks dan makna di balik setiap tema, serta bagaimana tema tersebut berkontribusi pada

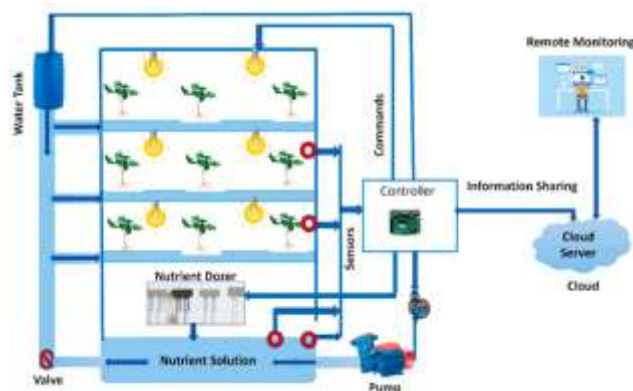
Putu Ayu Citra Setiawan : Pertanian Vertikal Pintar : Peran ...

pemahaman tentang peran IoT dalam pertanian vertikal. Peneliti juga dapat membandingkan temuan dari berbagai sumber untuk mengidentifikasi kesamaan dan perbedaan. Kemudian peneliti mengintegrasikan hasil analisis untuk membentuk narasi yang kohesif mengenai kontribusi pertanian vertikal pintar terhadap keberlanjutan dan efisiensi sumber daya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Peran IoT pada Pertanian Vertikal

Penerapan Internet of Things (IoT) dalam sistem pertanian vertikal telah terbukti memiliki potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan dalam produksi pangan. IoT memungkinkan pengumpulan data secara langsung melalui sensor yang memantau parameter penting seperti suhu, kelembaban, kadar nutrisi, dan tingkat pencahayaan. Data tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya seperti air, energi, dan pupuk, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi dibandingkan dengan metode pertanian konvensional. [38]. Selain itu, pengendalian berbasis IoT memungkinkan pemantauan dan pengelolaan lingkungan tumbuh secara jarak jauh melalui perangkat pintar, yang meningkatkan produktivitas sambil mengurangi risiko kegagalan panen [24]. Dengan demikian, integrasi IoT dalam pertanian vertikal dapat menjadi solusi inovatif untuk memenuhi kebutuhan pangan di masa depan dalam konteks urbanisasi dan perubahan iklim yang terus meningkat.



Gambar 5 Arsitektur IoT dan AI dalam pertanian vertikal [41]

Gambar 5 merupakan contoh arsitektur sistem pertanian vertikal berbasis IoT yang terintegrasi untuk mengelola lingkungan pertumbuhan tanaman secara otomatis. Sistem ini terdiri dari beberapa elemen utama, termasuk tangki air, larutan nutrisi, sensor, pompa, pengontrol, dan server cloud yang memungkinkan pemantauan jarak jauh. Air dari tangki dialirkan melalui sistem dengan bantuan pompa dan dicampur dengan larutan nutrisi menggunakan *nutrient dozer*. Sensor yang ditempatkan di berbagai titik dalam sistem mengukur parameter penting seperti pH, kelembaban, suhu, dan konsentrasi nutrisi dalam larutan. Data dari sensor ini dikirimkan ke pengontrol untuk dianalisis. Kemudian

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



berdasarkan hasil analisis, pengontrol mengirimkan perintah untuk menyesuaikan aliran air, penambahan nutrisi, atau pengaturan lain guna mempertahankan kondisi optimal bagi pertumbuhan tanaman. Informasi dari pengontrol juga dikirim ke server *cloud* untuk pemantauan dan pengelolaan jarak jauh. Petani dapat memantau data secara *real-time* melalui perangkat pintar dan memberikan perintah tambahan jika diperlukan. Integrasi dengan *cloud* memungkinkan pengelolaan yang lebih efisien, berbasis data, serta memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat guna meningkatkan produktivitas dan efisiensi sumber daya. Berikut beberapa contoh penerapan IoT dan Pertanian Vertikal :

TABEL I
TABEL APLIKASI IOT PADA PERTANIAN VERTIKAL

Aplikasi	Fungsi	Ref.
Computer Imaging	Menggunakan kamera dan sensor optik untuk menangkap gambar tanaman untuk mendeteksi penyakit pada tanaman.	[37],[41], [43]
Precision Farming	Mengoptimalkan penggunaan sumber daya seperti air, pupuk, dan pestisida dengan teknologi IoT untuk meningkatkan efisiensi dan hasil pertanian.	[41],[33], [36]
Controlled Environment System	Menggunakan teknologi IoT untuk mengontrol suhu, kelembapan, pencahayaan, dan sistem irigasi di rumah kaca guna meningkatkan efisiensi produksi.	[33],[34], [35],[36], [41],[42]
Yield prediction	Prediksi hasil panen menggunakan integrasi IoT dan Machine Learning	[27]
Automated Harvest	Menggunakan sistem otomatis berbasis IoT dan robotika untuk memanen tanaman secara efisien tanpa intervensi manusia.	[36]

B. Efisiensi Sumber Daya

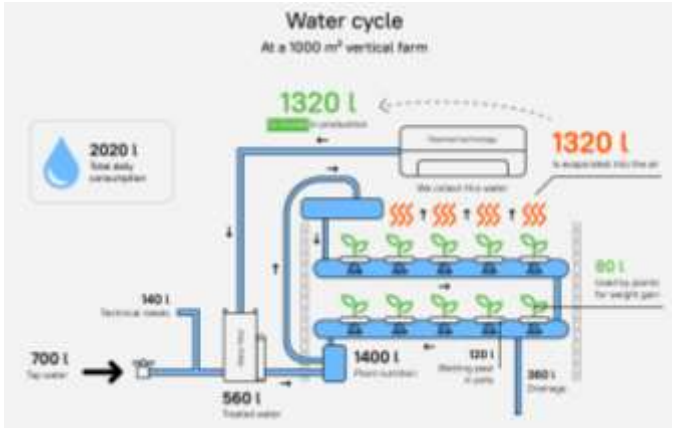
Efisiensi Penggunaan Sumber Daya atau *Resource Use Efficiency* (RUE) menjadi konsep kunci dalam mengevaluasi keberlanjutan pertanian vertikal. RUE dapat diukur sebagai rasio antara produksi tanaman yang dihasilkan dan total input yang digunakan, termasuk air, energi, pupuk, dan nutrisi lainnya. Semakin tinggi RUE, semakin efisien sistem tersebut dalam memanfaatkan sumber daya untuk mencapai produksi maksimal. Hal ini sangat relevan dalam konteks keberlanjutan, di mana tujuan utama pertanian vertikal adalah mengoptimalkan hasil produksi dengan meminimalkan dampak negatif pada lingkungan. Dengan RUE yang tinggi, pertanian vertikal mampu menghasilkan tanaman secara efektif dan efisien, sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem melalui

pengurangan limbah, pemanfaatan sumber daya yang hemat, dan minimnya penggunaan pestisida serta pupuk kimia.

Pendekatan berbasis RUE ini mendorong penggunaan teknologi canggih, seperti sensor IoT dan kecerdasan buatan (AI), untuk mengoptimalkan setiap aspek pengelolaan lingkungan secara otomatis. Teknologi ini memungkinkan penyesuaian kondisi pertumbuhan secara tepat sesuai kebutuhan spesifik tanaman pada setiap fase pertumbuhannya. Dengan demikian, pertanian vertikal tidak hanya berkontribusi pada peningkatan hasil produksi tetapi juga pada tercapainya praktik pertanian yang lebih berkelanjutan.

1. Efisiensi Penggunaan Air (Water Use Efficiency - WUE)

Sistem produksi pangan tradisional telah menyediakan solusi pangan bagi manusia sejak awal sejarah. Seiring waktu, teknik inovatif tambahan diterapkan dalam pertanian tradisional untuk meningkatkan tingkat produktivitas dan mengurangi biaya serta keseluruhan jejak lingkungan tanaman. Dalam hal sumber daya, pertanian konvensional tampaknya memiliki peningkatan permintaan penggunaan air karena pertanian tradisional menggunakan hampir 70% air tawar yang tersedia secara global [8,16,17]. Kekurangan air adalah kendala utama dalam produksi tanaman di berbagai wilayah di seluruh dunia dan menjadi salah satu tantangan utama dalam pertanian modern. Perkiraan menunjukkan bahwa masalah ini akan semakin parah akibat perubahan iklim, yang menyebabkan peningkatan suhu global, pergeseran pola curah hujan, dan meningkatnya frekuensi peristiwa cuaca ekstrem seperti kekeringan dan gelombang panas.



Gambar 6 Siklus penggunaan air pada pertanian vertikal

Metode aeroponik dan hidroponik dianggap sebagai yang paling efisien dalam penggunaan air pada sistem pertanian vertikal [20]. Kedua metode ini menggunakan sistem irigasi tertutup yang memungkinkan penggunaan kembali air secara optimal, mengurangi pemborosan, dan meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 95% atau lebih. Dengan aeroponik, nutrisi disemprotkan langsung ke akar tanaman dalam bentuk kabut, memungkinkan penyerapan nutrisi dan air yang lebih cepat tanpa perendaman di media tanah. Sementara itu, sistem hidroponik menggunakan larutan nutrisi berair untuk menumbuhkan tanaman tanpa tanah, yang juga meminimalkan kebutuhan air dibandingkan dengan pertanian tradisional.

TABEL II

TABEL PERBANDINGAN PENGGUNAAN AIR PERTANIAN KONVENSIONAL DAN PERTANIAN VERTIKAL

Metode	Penggunaan Air	Ref.
Konvensional	250 (L/kg/tahun)	[17]
	3–20 g/L	[18]
Pertanian vertikal	1-20 (L/kg/tahun)	[17]
	45–80 (g/L)	[18]

Hasil studi literatur (Tabel I) menunjukkan bahwa pertanian vertikal lebih efisien dalam penggunaan air per kilogram hasil, membutuhkan hanya 1 hingga 20 liter per kg per tahun, dibandingkan dengan 250 liter dalam metode konvensional. Namun, dalam satuan gram per liter, pertanian vertikal tampak lebih tinggi memerlukan sekitar 45–80 g/L dibandingkan dengan 3–20 g/L pada metode konvensional. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh intensitas penggunaan air dalam ruang tertutup yang lebih kecil. Meskipun demikian, secara keseluruhan, pertanian vertikal menawarkan solusi hemat air untuk produksi pangan, yang penting di tengah krisis air global dan kebutuhan keberlanjutan.

Penelitian [38] memperkenalkan sistem pertanian cerdas tertutup dengan teknologi misting untuk efisiensi penggunaan air dan nutrisi, cocok untuk tanaman bernilai tinggi di lingkungan urban dengan keterbatasan ruang. Pendekatan lain adalah melalui proses evapotranspirasi [15]. Salah satu tantangan utama dalam pengaturan suhu dan kelembapan pertanian vertikal adalah kehilangan air melalui proses evapotranspirasi atau penguapan yang berasal dari tanaman. Untuk mengatasi hal ini, pertanian vertikal menggunakan pompa panas yang terintegrasi dengan panel pendingin untuk mengondensasi dan mengumpulkan kembali air yang hilang [8]. Air ini kemudian didaur ulang dan dialirkan kembali melalui sistem irigasi tertutup, memungkinkan siklus penggunaan air yang lebih efisien. Sistem ini memanfaatkan perangkat dehumidifikasi yang dipasang di setiap lantai pertanian vertikal, di mana air uap dikondensasi kembali menjadi air cair untuk disirkulasikan kembali ke tanaman. Teknologi ini berpotensi mengumpulkan hingga 220.000 m³ air per tahun, menciptakan sistem yang hampir mandiri dalam pengelolaan air [17]. Pendekatan ini tidak hanya mendukung efisiensi air dalam skala besar, tetapi juga mengurangi kebutuhan akan sumber air eksternal, menjadikan pertanian vertikal dalam ruangan sebagai salah satu metode yang lebih ramah lingkungan dalam produksi pangan berkelanjutan.

2. Efisiensi Penggunaan Pupuk (Fertilizer Use Efficiency - FUE)

Untuk mempertahankan hasil panen, pertanian konvensional biasanya menggunakan pupuk dan pestisida dalam jumlah besar yang dapat meresap ke dalam air tanah atau terbawa aliran air hujan ke sungai dan danau, mencemari ekosistem perairan. Selain itu, efisiensi pemanfaatan fosfor dalam pertanian konvensional sangat rendah, hanya sekitar 15% hingga 30%. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan kemampuan akar tanaman dalam menyerap fosfor, yang hanya dapat terambil dalam radius sekitar 1 mm dari permukaan akar [20].

Fosfor adalah salah satu elemen penting yang mendukung perkembangan tanaman. Fosfor mendukung berbagai proses vital tanaman, seperti pembentukan akar yang kuat, fotosintesis, serta sintesis molekul penting seperti DNA, RNA, dan protein. Molekul-molekul ini esensial untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang optimal, serta membantu tanaman untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berubah.

Sebaliknya, pertanian vertikal mengadopsi sistem tanam tanpa tanah dengan memanfaatkan larutan nutrisi yang dipompa langsung ke akar tanaman melalui irigasi otomatis berbasis IoT. Dalam sistem ini, tanaman ditanam di tempat tanam yang terisolasi dari tanah, dan larutan nutrisi yang diperkaya diberikan langsung melalui saluran irigasi untuk memastikan tanaman mendapatkan asupan hara yang optimal [8,25]. Setelah tanaman menyerap nutrisi yang diperlukan, sisa larutan nutrisi kembali ke tangki pusat dalam siklus tertutup, sehingga bisa didaur ulang dan digunakan kembali tanpa membuang air atau nutrisi ke lingkungan luar. Proses ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemanfaatan air dan nutrisi, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dengan mengurangi limbah yang dihasilkan dari sisa larutan. Penelitian [41] menggunakan sensor K⁺, NO₃⁻, dan Ca²⁺ ISEs, sensor pH, dan EC, serta digunakan untuk menanam selada guna mengamati proses resirkulasi larutan nutrisi. Berbagai persentase larutan bekas (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% dari volume target) didaur ulang untuk menentukan volume resirkulasi yang sesuai guna mempertahankan tingkat nutrisi target dengan suplai larutan stok seminimal mungkin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem budidaya tipe daur ulang lebih efisien dalam penghematan nutrisi, menekan biaya, dan mengurangi pencemaran lingkungan dengan manajemen nutrisi berbasis sensor [41][42].

3. Efisiensi Penggunaan Energi Cahaya (Light Use Efficiency - LUE)

Salah satu komponen penting untuk keberhasilan pertanian vertikal adalah pencahayaan yang efisien. Pada saat ini, teknologi LED yang digunakan dalam sistem pencahayaan pertanian vertikal hanya memberikan efisiensi sekitar 28%. Angka ini masih jauh dari yang dibutuhkan untuk menjadikan pertanian dalam ruangan lebih ekonomis dan efisien, di mana tingkat efisiensi pencahayaan idealnya harus mencapai sekitar 50-60% untuk mendukung produksi pangan yang berkelanjutan dan ekonomis [20]. Tanaman menggunakan cahaya dalam rentang panjang gelombang 400 nm (ungu) hingga 700 nm (merah tua), yang dikenal sebagai Radiasi Aktif Fotosintetik (PAR), untuk mendukung fotosintesis. Rentang ini hampir sama dengan cahaya tampak yang dapat dilihat manusia (380 nm–780 nm) [21]. Cahaya biru (450 nm) dan merah (650–700 nm) sangat efektif dalam proses fotosintesis, dengan cahaya biru mendukung reaksi awal dan cahaya merah mendukung produksi karbohidrat. Pemahaman spektrum PAR ini penting dalam merancang sistem pencahayaan untuk pertanian vertikal, meningkatkan hasil tanaman dan efisiensi energi.

Pencahayaan antar tanaman merupakan salah satu pendekatan penting untuk mengoptimalkan efisiensi fotosintesis dalam sistem pertanian vertikal. Teknologi LED



dapat dipasang tidak hanya di atas panel kultur, tetapi juga di sepanjang sisi-sisi panel atau struktur tanam lainnya, untuk memberikan pencahayaan baik ke samping maupun ke atas. Pendekatan ini memungkinkan distribusi cahaya yang lebih merata ke seluruh bagian tanaman, termasuk daun-daun bawah yang sering kali kekurangan cahaya dalam sistem pencahayaan konvensional yang hanya mengarah ke bawah [28]. Salah satu contoh industri terkemuka dari penerapan teknologi ini adalah AeroFarms, yang mampu menghasilkan sekitar 700 buah dan sayuran hanya dalam waktu 10 hingga 14 hari—sebuah pencapaian yang 390 kali lebih produktif dibandingkan dengan metode pertanian tradisional [29].



Gambar 7 Petanian vertikal perusahaan AeroFarm

Teknologi ini menggabungkan berbagai inovasi, seperti sistem aeroponik (budidaya kabut) yang memungkinkan akar tanaman untuk tumbuh dalam kabut nutrisi (*fogponics*) yang kaya oksigen, dan pencahayaan LED yang dioptimalkan untuk fotosintesis. Dengan demikian, tanaman mendapatkan semua nutrisi yang dibutuhkan dalam lingkungan yang terkendali, tanpa ketergantungan pada elemen eksternal seperti tanah atau sinar matahari langsung. Penelitian [43] melakukan dengan membudidayakan selada merah menggunakan sistem pertanian vertikal dengan mengintegrasikan kamera dengan filter yang dapat diganti dan sensor RGB CMOS, yang digunakan untuk menghitung SI-NDVI (Single-Image Normalized Difference Vegetation Index) dan UV-NDVI (UV-Induced Red Chlorophyll Fluorescence NDVI) secara bersamaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tren UV-NDVI dan SI-NDVI serupa dalam memantau pertumbuhan tanaman, tetapi UV-NDVI lebih sensitif dalam mendeteksi kesehatan tanaman. Saat stres kekeringan diinduksi, UV-NDVI dapat mendeteksi defisiensi air lebih awal dibandingkan pengamatan visual, sehingga berpotensi meningkatkan efektivitas sistem pemantauan tanaman di pertanian vertikal.

4. Efisiensi Penggunaan Energi (Energy Use Efficiency - EUE)

Meskipun ada berbagai faktor yang dapat digunakan untuk menentukan profitabilitas tanaman dalam pertanian vertikal, salah satu tantangan utama untuk menanam setiap jenis tanaman adalah kebutuhan energi. Sayuran berdaun, seperti selada, membutuhkan cahaya yang relatif sedikit untuk tumbuh karena sebagian besar komposisinya sekitar 95% terdiri dari air, yang menjadikannya tanaman dengan massa yang rendah dan

efisiensi tinggi dalam konsumsi energi [20]. Selain itu, hampir seluruh bagian dari sayuran berdaun dapat dimakan, yang meningkatkan rasio hasil tanaman terhadap sumber daya yang digunakan. Sebaliknya, tanaman seperti padi, yang menyediakan 90% kalori untuk populasi manusia global, memiliki komposisi yang berbeda. Hanya sekitar 15% dari massa padi yang dapat dimakan, sedangkan sisanya terdiri dari bagian yang tidak dikonsumsi, seperti batang dan kulit [20]. Menanam padi dalam sistem pertanian vertikal menggunakan pencahayaan buatan dapat sangat menuntut energi. Proses ini membutuhkan sekitar 30 kali lebih banyak energi dibandingkan dengan menumbuhkan sayuran berdaun, yang membuat produksi beras melalui pertanian vertikal menjadi sangat mahal dan mengonsumsi banyak energi.

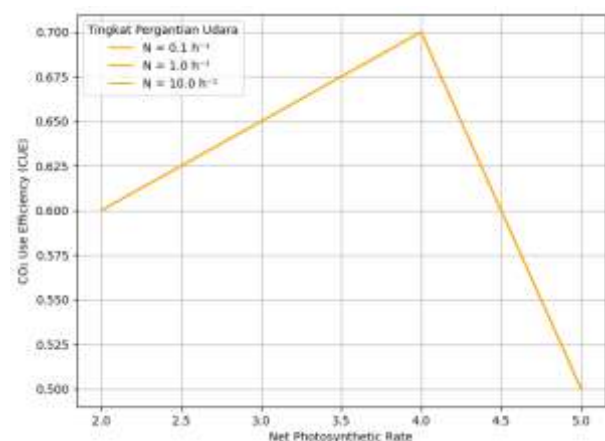
TABEL III
TABEL PERBANDINGAN PENGGUNAAN ENERGI PERTANIAN KONVENSIONAL DAN PERTANIAN VERTIKAL

Metode	Penggunaan Energi	Ref.
Konvensional	1.100 kJ/kg/year	[16]
Pertanian vertikal	90.000 kJ/kg/year	[16]

Penggunaan energi pada metode konvensional adalah 1.100 kJ/kg/tahun, sementara pertanian vertikal memerlukan 90.000 kJ/kg/tahun. Perbedaan ini menunjukkan kebutuhan energi yang jauh lebih tinggi pada pertanian vertikal. Hal ini disebabkan oleh kontrol lingkungan yang lebih ketat dalam sistem terkontrol, yang memungkinkan optimasi penggunaan energi untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Namun, pertanian vertikal dalam ruangan memiliki potensi efisiensi yang lebih tinggi ketika digerakkan oleh sumber energi terbarukan seperti panel surya, turbin angin, atau energi geotermal [31,32].

5. Efisiensi Penggunaan CO₂ (CO₂ Use Efficiency - CUE)

Carbon Use Efficiency (CUE) adalah ukuran efisiensi penggunaan karbon oleh tanaman dalam sistem tertentu. CUE menggambarkan seberapa efisien tanaman menggunakan karbon dioksida yang tersedia dalam proses fotosintesis untuk menghasilkan biomassa. Semakin tinggi nilai CUE, semakin efisien tanaman dalam memanfaatkan CO₂ untuk tumbuh.



Gambar 8 merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara efisiensi penggunaan karbon dioksida (CO₂ Use Efficiency atau CUE) dan laju fotosintesis bersih per area tanam (*Net Photosynthetic Rate*) pada berbagai tingkat pergantian udara (N). *Net Photosynthetic Rate* (Laju Fotosintesis Bersih) adalah laju konversi energi dari cahaya matahari menjadi energi kimia melalui fotosintesis, dikurangi dengan laju respirasi tanaman. Semakin tinggi laju fotosintesis, semakin besar jumlah energi yang tersedia bagi tanaman untuk pertumbuhan. Pergantian udara mengacu pada seberapa cepat udara di sekitar tanaman diganti dengan udara segar yang mengandung CO₂ untuk proses fotosintesis. Nilai N yang lebih tinggi menunjukkan pertukaran gas yang lebih cepat, sedangkan N rendah menunjukkan ventilasi yang lebih terbatas. Gambar 7 menunjukkan bahwa CUE meningkat seiring bertambahnya laju fotosintesis bersih, tetapi peningkatannya lebih signifikan pada tingkat pergantian udara yang rendah (N = 0,1 h⁻¹) [33]. Pada tingkat pergantian udara yang tinggi (N = 10 h⁻¹), efisiensi penggunaan CO₂ tetap rendah meskipun laju fotosintesis meningkat.

Secara umum, efisiensi penggunaan karbon dioksida (*Carbon Use Efficiency* atau CUE) pada pertanian vertikal dalam ruangan lebih tinggi dibandingkan dengan rumah kaca. Pada pertanian vertikal dalam ruangan, CUE berada di kisaran 0,87–0,89, dengan tingkat kedap udara antara 0,01–0,02 h⁻¹ dan konsentrasi CO₂ sekitar 1.000 ppm [8]. Jika dibandingkan dengan rumah kaca dengan sistem ventilasi tertutup memiliki nilai CUE lebih kecil yaitu hanya mencapai sekitar 0,5, meskipun menggunakan tingkat kedap udara 0,01 h⁻¹ dan konsentrasi CO₂ yang diperkaya hingga 700 ppm [31].

Penelitian [34] Menunjukkan bahwa sistem pertanian vertikal dapat berkontribusi signifikan dalam memperbaiki kualitas udara dalam ruangan sekaligus mengurangi kebutuhan energi untuk ventilasi di gedung perkantoran. Dengan kemampuan sayuran pertanian vertikal untuk menyerap CO₂ secara signifikan lebih cepat daripada tanaman lanskap pencinta teduh, sistem ini dapat menurunkan konsentrasi CO₂ dalam ruangan hingga 34,3%, yang berkontribusi pada pengurangan kebutuhan ventilasi mekanis. Hal ini berpotensi mengurangi konsumsi energi ventilasi bangunan sebesar 12,7% hingga 58,4%, tergantung pada jumlah penghuni dan kondisi pertumbuhan tanaman. Dengan bertambahnya jumlah penghuni di ruang kantor dan pertumbuhan tanaman yang maksimal, pertanian vertikal dapat menjadi solusi yang efisien untuk mengurangi jejak karbon bangunan, meningkatkan kenyamanan penghuni, serta menciptakan lingkungan kerja yang lebih sehat dan lebih produktif. Di sisi lain, penerapan pertanian vertikal juga dapat mendukung pembangunan bangunan berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada sistem ventilasi yang memerlukan energi tinggi, memberikan kontribusi positif terhadap upaya efisiensi energi di sektor konstruksi. Dengan demikian, pertanian vertikal tidak hanya berfungsi sebagai solusi pertanian urban tetapi juga sebagai elemen penting dalam desain bangunan ramah lingkungan yang mengintegrasikan prinsip keberlanjutan.

Putu Ayu Citra Setiawan : Pertanian Vertikal Pintar : Peran ...

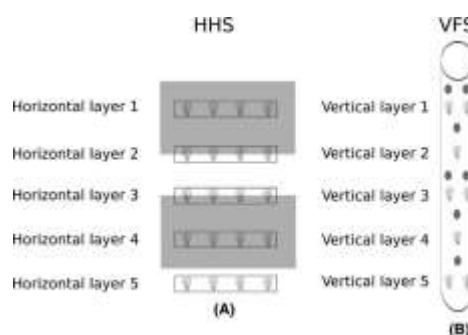
TABEL IV
TABEL PERBANDINGAN PENGGUNAAN KARBON PADA PERTANIAN RUMAH KACA DAN PERTANIAN VERTIKAL

Metode	CUE (CO ₂)	Ref.
Rumah Kaca dengan Ventilasi tertutup	0.4 – 0.6	[31]
Pertanian vertikal	0.87 – 0.89	[31]

6. Efisiensi Penggunaan Lahan (*Land Use Efficiency - LUE*)

Penggunaan lahan dalam konteks pertanian mencakup berbagai aspek, termasuk jumlah tanaman yang ditanam, praktik pengolahan tanah, dan manajemen irigasi, yang semuanya berkontribusi pada Indikator Agro-Lingkungan (AEI) [36]. Jumlah tanaman yang ditanam mencerminkan kapasitas sistem untuk mengintegrasikan tanaman, yang berkontribusi pada keanekaragaman hayati struktural dan keberlanjutan, terutama jika melibatkan tanaman bernilai tinggi. Praktik pengolahan tanah berfokus pada persentase luas pertanian yang digarap menggunakan metode konvensional atau konservasi. Pada area perkotaan, pertumbuhan tanaman seringkali terhambat oleh bayangan bangunan, tanah yang tidak subur, atau bahkan lahan yang tidak aktif. Selain itu, harga tanah di wilayah ini relatif tinggi, menjadikannya kendala utama bagi keberlanjutan sistem pertanian konvensional [8]. Oleh karena itu, pertanian vertikal sering kali ditempatkan di gudang besar, pabrik industri, atau bangunan yang tidak terpakai dengan biaya lahan yang lebih rendah.

Menurut penelitian [33] efisiensi penggunaan lahan dalam pertanian vertikal sangat tinggi. Untuk menghasilkan 1 kg selada romaine segar per hari, hanya diperlukan lahan seluas 0,3 m², yang berarti pengurangan kebutuhan lahan sebesar 97% dibandingkan rumah kaca dan hampir 100% dibandingkan pertanian konvensional. Bahkan dengan struktur bertingkat 10 lapis, pertanian vertikal dapat menghasilkan hingga 3.110 gram bobot segar per m² per hari, dibandingkan dengan 112 gram untuk rumah kaca dan 10 gram untuk pertanian tradisional. Teknologi modern dan desain penumpukan tanaman juga memberikan peningkatan hasil yang signifikan yaitu 1,5 kali lebih baik dibandingkan pertanian konvensional dengan teknologi saja, atau hingga 709 kali lebih baik dengan teknologi dan sistem penumpukan, sebagaimana disebutkan [22].



Gambar 9 Skema kepadatan tanam dalam Horizontal Hydroponic System (HHS) dan Vertical Farming System (VFS) [37]



Jika dibandingkan dengan sistem hidroponik horizontal, rasio hasil panen pada pertanian vertikal (kg) terhadap luas lantai tumbuh (m²) mencapai 13,8 kali lebih tinggi [37]. Efisiensi ini disebabkan oleh kepadatan tanam yang sangat tinggi pada pertanian vertikal, yaitu hingga 20 kali lebih banyak tanaman per luas lantai tumbuh dibandingkan sistem pertanian horizontal. Namun, perbandingan menunjukkan bahwa bobot rata-rata hasil segar per tanaman pada sistem horizontal secara signifikan lebih tinggi, sehingga mampu menghasilkan total panen 1,7 kg lebih banyak dibandingkan pertanian vertikal dengan jumlah tanaman yang sama.

C. Keberlanjutan Lingkungan

Keberlanjutan lingkungan dalam pertanian vertikal mengacu pada praktik dan teknologi yang digunakan dalam sistem pertanian vertikal untuk mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan, sekaligus mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam dengan cara yang efisien dan berkelanjutan. Pertanian vertikal menawarkan berbagai manfaat lingkungan yang mendukung keberlanjutan ekosistem, mengurangi kerusakan lingkungan, dan menjaga keseimbangan alam.

TABEL V
TABEL KONTRIBUSI PERTANIAN VERTIKAL TERHADAP KEBERLANJUTAN LINGKUNGAN

No.	Manfaat	Ref
1.	Meningkatkan efisiensi air	[11], [17], [25] [27]
2.	Pengurangan eutrofikasi	[25]
3.	Menghemat penggunaan lahan serta mengurangi kerusakan lingkungan dan pembersihan lahan pertanian setelah kerusakan	[11],[25], [27],
4.	Mengurangi emisi gas rumah kaca dan	[2], [25], [27]
5.	Meningkatkan Keanekaragaman Hayati dalam Pertanian	[11]

D. Keberlanjutan Aspek Sosial

Secara umum, keberlanjutan sosial berkaitan dengan kemampuan untuk menciptakan masyarakat yang adil, inklusif, dan sejahtera, dengan memperhatikan kesejahteraan manusia, kesehatan, dan hak-hak sosial. Dalam konteks pertanian vertikal, keberlanjutan sosial berfokus pada bagaimana sistem pertanian vertikal dapat mendukung kualitas hidup, menyediakan lapangan pekerjaan, dan memperbaiki kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan.

TABEL VI
TABEL KONTRIBUSI PERTANIAN VERTIKAL TERHADAP KEBERLANJUTAN SOSIAL

No.	Manfaat	Ref
1.	Menciptakan lapangan kerja lokal	[11], [13], [27], [28]

2.	Meningkatkan kualitas pangan dan kesehatan konsumen	[2], [11], [13], [27]
3.	Meningkatkan <i>Social engagement</i>	[11], [13], [2], [28]
4.	Menyediakan fasilitas pembelajaran dan pendidikan	[2], [27]
5.	Dapat meningkatkan ketersediaan sepanjang tahun dan merespons kebutuhan publik dengan lebih baik.	[11]

E. Keberlanjutan Aspek Ekonomi

Keberlanjutan ekonomi menekankan pada kemampuan suatu sistem atau praktik untuk tetap bertahan dan berkembang dalam jangka panjang tanpa merusak stabilitas ekonomi. Dalam konteks pertanian vertikal, keberlanjutan ekonomi mencakup pengelolaan sumber daya yang efisien, pengurangan biaya operasional, dan penciptaan peluang ekonomi yang stabil bagi produsen maupun konsumen.

TABEL VII
TABEL KONTRIBUSI PERTANIAN VERTIKAL TERHADAP KEBERLANJUTAN EKONOMI

No.	Manfaat	Ref
1.	Mengurangi energi, kemasan, dan bahan bakar <i>untuk</i> mengangkut makanan	[11], [28]
2.	Mengubah sampah menjadi aset dengan proses daur ulang	[11]
3.	Meningkatkan pertumbuhan ekonomi masyarakat lokal	[11], [28]
4.	Menyediakan hasil panen yang lebih tinggi	[11]

V. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan pertanian vertikal memberikan dampak positif yang signifikan. Beberapa poin utama yang dapat disimpulkan antara lain:

- 1) Penerapan IoT pada pertanian vertikal mampu mengoptimalkan penggunaan air, energi, dan lahan dengan sistem irigasi tertutup serta pencahayaan buatan berbasis LED. Teknologi ini memungkinkan pengurangan konsumsi air hingga 90% dibandingkan dengan metode pertanian konvensional.
- 2) Dengan mengurangi kebutuhan lahan pertanian, pertanian vertikal berkontribusi dalam mengurangi deforestasi dan degradasi tanah. Selain itu, kontrol lingkungan berbasis IoT yang lebih baik mengurangi penggunaan pestisida dan pupuk kimia yang dapat mencemari ekosistem.
- 3) Meskipun membutuhkan investasi awal yang tinggi, pertanian vertikal menawarkan keuntungan jangka panjang melalui peningkatan produktivitas, siklus panen yang lebih cepat, serta pengurangan biaya transportasi karena lokasinya yang lebih dekat dengan konsumen.

4) Model pertanian ini dapat membuka peluang kerja baru di sektor pertanian perkotaan dan teknologi pertanian. Selain itu, akses masyarakat terhadap produk pangan segar dan berkualitas dapat meningkat, mendukung ketahanan pangan dan kesehatan masyarakat.

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan IoT pada pertanian vertikal terbukti mampu meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi sumber daya dalam produksi pangan perkotaan. Pengembangan lebih lanjut dapat difokuskan pada kajian bagaimana meningkatkan otomatisasi dan integrasi sistem cerdas untuk memantau dan mengoptimalkan kondisi lingkungan secara *real-time*. Selain itu IoT dapat dikombinasikan dengan energi terbarukan seperti tenaga surya dan *smart grid* untuk mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan keberlanjutan operasional. Teknologi ini juga membuka peluang untuk pengelolaan lahan yang lebih efisien di lingkungan urban melalui pemantauan berbasis *cloud* dan pengendalian jarak jauh, yang mendukung produksi pangan berkelanjutan dengan manajemen limbah yang lebih baik, seperti penggunaan media tanam biodegradable dan sistem daur ulang nutrisi yang dikendalikan secara otomatis.

REFERENSI

- [1] Haque, A. K. M. B., Bhushan, B., & Dhiman, G. (2022). Conceptualizing smart city applications: Requirements, architecture, security issues, and emerging trends. *Expert Systems*, 39(5), e12753. <https://doi.org/10.1111/exsy.12753>.
- [2] Halgamuge, M. N., Bojovschi, A., Fisher, P. M., Le, T. C., Adeloju, S., & Murphy, S. (2021). Internet of Things and autonomous control for vertical cultivation walls towards smart food growing: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127094.
- [3] Arabzadeh, V., Miettinen, P., Kotilainen, T., Herranen, P., Karakoc, A., Kumm, M., & Rautkari, L. (2023). Urban vertical farming with a large wind power share and optimised electricity costs. *Applied Energy*, 331, 120416.
- [4] National Geographic. (n.d.). Feeding 9 billion. Retrieved from <https://www.nationalgeographic.com/foodfeatures/feeding-9-billion>.
- [5] Adedibu, Peter Adeolu. "Ecological problems of agriculture: impacts and sustainable solutions." *ScienceOpen preprints* (2023).
- [6] Efendi, R., & Sagita, D. (2022). Teknologi pertanian masa depan dan peranannya dalam menunjang ketahanan pangan. *Sultra Journal of Mechanical Engineering*, 1(1), 1-12.
- [7] Raj, P., Maurya, P. K., Darjee, S., & Rout, S. (2023). Sustainable Farmer-Friendly Technologies for Soil Management. *ADVANCED FARMING TECHNOLOGY*, 34.
- [8] Barui, P., Ghosh, P., & Debangshi, U. (2022). Vertical farming-an overview. *Plant Archives* (09725210), 22(2).
- [9] Tooy, Dedie, et al. "Towards Global Food Security: Vertical Farming as an Innovative Solution." *J Intern. of Futures Studies* 6.3 (2023): 335-347.
- [10] Qaiser, M. Z., Roshan, R., Raj, K., Alam, N., & Rizvi, Z. K. (2024). Vertical Farming: Exploring the Potential of The Future.
- [11] Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R. H., Bahar, F. A., Bhat, M. A., Nazir, A., ... & Ahngar, T. A. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 11(2), 1175-1195.
- [12] Lagiman, L. (2021). Pertanian Berkelanjutan: Untuk Kedaulatan Pangan Dan Kesejahteraan Petani.
- [13] Tooy, Dedie, et al. "Towards Global Food Security: Vertical Farming as an Innovative Solution." *J Intern. of Futures Studies* 6.3 (2023): 335-347.
- [14] Kaiser, Elias, et al. "Vertical farming goes dynamic: optimizing resource use efficiency, product quality, and energy costs." *Frontiers in Science* 2 (2024): 1411259.
- [15] Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiladis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. *Energies*, 16(4), 1690. <https://doi.org/10.3390/en16041690>.
- [16] Naskali, A. T., Pinarer, O., & Tolga, A. C. (2022). Vertical farming: under climate change effect. *Environment and climate-smart food production*, 259-284.
- [17] Ezzahoui, I., Abdelouahid, R. A., Taji, K., & Marzak, A. (2021). Hydroponic and Aquaponic Farming: Comparative Study Based on Internet of things IoT technologies. *Procedia Computer Science*, 191, 499-504.
- [18] Fasciolo, B., Awouda, A., Bruno, G., & Lombardi, F. (2023). A smart aeroponic system for sustainable indoor farming. *Procedia CIRP*, 116, 636-641.
- [19] Van Gerrewey, T., Boon, N., & Geelen, D. (2021). Vertical farming: The only way is up?. *Agronomy*, 12(1), 2.[26]
- [20] Gurung, Lalendra & Rawal, Janak & Joshi, Ganesh & Rc, Puspa & Mandal, Ashmita. (2024). Vertical Farming in Urban Agriculture: Opportunities, Challenges, and Future Directions. 10.26480/bda.02.2024.89.95.
- [21] Zhou, Y. (2024). Technological Innovation and Significance of Vertical Farming System in High-Density Urban Areas. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 579, p. 03001). EDP Sciences.
- [22] Shao, Y., Li, J., Zhou, Z., Hu, Z., Zhang, F., Cui, Y., & Chen, H. (2021). The effects of vertical farming on indoor carbon dioxide concentration and fresh air energy consumption in office buildings. *Building and Environment*, 195, 107766.
- [23] Hossain, A., Sarkar, S., Rahman, M. A., Bhatt, R., Garai, S., Saha, S., ... & Meena, R. S. (2021). Ecological intensification for sustainable agriculture in South Asia. *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*, 171-213.
- [24] Kumar, R., Singh, M., & Gupta, A. (2021). IoT Applications in Smart Agriculture: A Review. *Journal of Agricultural Technology*, 17(5), 89-104.
- [25] Chen, L., Zhao, X., & Li, Y. (2022). IoT-Driven Vertical Farming for Sustainable Urban Agriculture. *Sustainable Agriculture Journal*, 12(3), 56-67.
- [26] Ali, M., Ahmed, S., & Zaman, T. (2023). Enhancing Vertical Farming through IoT and AI Integration: A Sustainable Approach. *Journal of Smart Agriculture Systems*, 8(2), 45-59.
- [27] Rathor, A. S., Choudhury, S., Sharma, A., Nautiyal, P., & Shah, G. (2024). Empowering vertical farming through IoT and AI-Driven technologies: A comprehensive review. *Heliyon*.
- [28] Ibrahim, L. A., Shaghaleh, H., El-Kassar, G. M., Abu-Hashim, M., Elsadek, E. A., & Alhaj Hamoud, Y. A. (2023). A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. *Water* 2023, 15, 4310.
- [29] Nesheli, S. A., & Salaj, A. T. (2024). Urban farming for social benefit. *IFAC-PapersOnLine*, 58(3), 351-356.
- [30] Shrivastava, A., Nayak, C. K., Dilip, R., Samal, S. R., Rout, S., & Ashfaq, S. M. (2023). Automatic robotic system design and development for vertical hydroponic farming using IoT and big data analysis. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3546-3553.
- [31] Yadav, S., & Swamy, V. (2022). IOT based Vertical Farming using PH calibration and controlling. In *Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communication (ICICC)*.
- [32] Dadheech, P., Kumar, A., Singh, V., Raja, L., & Poonia, R. C. (2021). A neural network-based approach for pest detection and control in modern agriculture using internet of things. In *Smart agricultural services using deep learning, big data, and IoT* (pp. 1-31). IGI Global.
- [33] Kour, K., Gupta, D., Gupta, K., Dhiman, G., Juneja, S., Viriyasitavat, W., Mohafez, H., & Islam, M. A. (2022). Smart-Hydroponic-Based Framework for Saffron Cultivation: A Precision Smart Agriculture Perspective. *Sustainability*, 14(3), 1120.
- [34] Ng, H. T., Tham, Z. K., Rahim, N. A. A., Rohim, A. W., Looi, W. W., & Ahmad, N. S. (2023). IoT-enabled system for monitoring and controlling vertical farming operations. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*, 12(3), 453.
- [35] Naranjani, B., Najafianashrafi, Z., Pascual, C., Agulto, I., & Chuang, P. Y. A. (2022). Computational analysis of the environment in an indoor vertical farming system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186, 122460.
- [36] Kabir, M. S. N., Reza, M. N., Chowdhury, M., Ali, M., Samsuzzaman, Ali, M. R., Lee, K. Y., & Chung, S.-O. (2023). Technological Trends



- and Engineering Issues on Vertical Farms: A Review. *Horticulturae*, 9(11), 1229.
- [37] Ghazal, S., Munir, A., & Qureshi, W. S. (2024). Computer vision in smart agriculture and precision farming: Techniques and applications. *Artificial Intelligence in Agriculture*.
- [38] Kim, J., Park, H., Seo, C., Kim, H., Choi, G., Kim, M., Kim, B., & Lee, W. (2024). Sustainable and Inflatable Aeroponics Smart Farm System for Water Efficiency and High-Value Crop Production. *Applied Sciences*, 14(11), 4931.
- [39] Dwikiarta, I. M. S., Sastra, N. P., & Wiharta, D. M. (2021). Kinerja jaringan sensor nirkabel untuk model smart building. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 20(2), 211.
- [40] Wiradani, P. A. P., Jasa, L., & Rahardjo, P. (2022). Analisis Perbandingan Produktivitas Material Budidaya Akuaponik Berbasis IoT (Internet of Things) dengan Budidaya Akuaponik Konvensional. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 21(2), 263.
- [41] Chowdhury, M., Islam, M.N., Reza, M.N. *et al.* Sensor-Based Nutrient Recirculation for Aeroponic Lettuce Cultivation. *J. Biosyst. Eng.* 46, 81–92 (2021).
- [42] Akateva, L. V., Kalinin, V. A., Ivanov, V. K., Ivanov, A. V., & Kholkin, A. I. (2022). Development of an automated vertical farm module for growing plants using additive technology. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 56(4), 618-625.
- [43] Wei, Z., & Fang, W. (2024). UV-NDVI for real-time crop health monitoring in vertical farms. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100462.

{ Halaman ini sengaja di kosongkan }