

Kajian Prinsip Fisika pada Teknologi IoT Pertanian untuk Optimalisasi Pengelolaan Air dan Energi

Andiny Tri Febianti^{1,*}, Dini Luki Mulya Safitri¹, dan Sih Suwitaning Rahayu²

¹ Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

² Dinas Pemberdayaan Masyarakat dan Desa, Sidoarjo, Indonesia

*Email: andiny.23133@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang besar dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya air serta energi pada sektor pertanian desa, khususnya yang dikelola oleh BUMDes. Penerapan IoT tentunya tidak lepas dari prinsip-prinsip fisika yang mendasari kerja sensor, aktuator dalam melakukan transmisi data. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan prinsip fisika pada teknologi IoT pertanian serta menganalisis kontribusinya terhadap optimalisasi pengelolaan air dan energi di lingkungan desa. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan penalaran ilmiah yang bersifat konseptual-analitis dengan deduktif melalui observasi teknis lapangan terbatas dan literatur ilmiah. Hasil kajian menunjukkan bahwa hukum-hukum fisika seperti hukum Ohm, prinsip kapasitansi, hukum Bernoulli berperan penting dalam mendukung kinerja sistem irigasi otomatis berbasis IoT. Sistem ini mampu mengontrol penyiraman secara presisi berdasarkan kelembapan tanah sehingga dapat menekan pemborosan listrik. Oleh karena itu, penerapan IoT berbasis pemahaman prinsip fisika tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga relevan sebagai solusi pemberdayaan BUMDes dalam pengelolaan sumber daya air dan energi yang efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Internet of Things (IoT), Prinsip Fisika, Sistem Irigasi Otomatis

Study of Physics Principles in Agricultural IoT Technology to Optimizing Water and Energy Management

Abstract

Advances in Internet of Things (IoT) technology have opened up enormous opportunities for improving the efficiency of water and energy resource management in the rural agricultural sector, particularly that managed by village-owned enterprises (BUMDes). The application of IoT is inseparable from the principles of physics that underlie the workings of sensors and actuators in data transmission. This study aims to examine the application of physics principles in agricultural IoT technology and analyze its contribution to optimizing water and energy management in rural environments. The research method used is a conceptual-analytical scientific reasoning approach with deductive reasoning through limited technical field observations and scientific literature. The results of the study show that physical laws such as Ohm's law, the principle of capacitance, and Bernoulli's law play an important role in supporting the performance of IoT-based automatic irrigation systems. This system is capable of controlling watering precisely based on soil moisture, thereby reducing electricity waste. Therefore, the application of IoT based on an understanding of physical principles is not only technically effective but also relevant as a solution for empowering BUMDes in the efficient and sustainable management of water and energy resources.

Keywords: Internet of Things (IoT), Physical Principles, Automatic Irrigation Systems

Histori Naskah

Diserahkan: 25 Oktober 2025

Direvisi: 15 Desember 2025

Diterima: 17 Desember 2025

How to cite:

Febianti, A.T., Safitri, D.L.M., dan Rahayu, S.S. (2025). Kajian Prinsip Fisika pada Teknologi IoT Pertanian untuk Optimalisasi Pengelolaan Air dan Energi. *Dedikasi: Journal of Community Engagement and Empowerment*, 3(2), 77-88. DOI: <https://doi.org/10.58706/dedikasi.v3n2.p77-88>.

PENDAHULUAN

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah membawa dampak signifikan dalam pertanian modern, terutama dalam sistem pendukung pengelolaan air dan energi. Baik di Indonesia maupun di berbagai belahan dunia lainnya, pertanian menjadi salah satu sektor yang penting. Di tengah kekayaan sumber daya alam yang melimpah, peningkatan populasi yang signifikan berdampak pada penyempitan lahan pertanian yang berpotensi menurunkan produksi serta memicu kelangkaan pangan di masa depan (Ridwan, 2021). Sistem IoT mengintegrasikan sensor fisik, komunikasi, dan sistem kendali otomatis yang beroperasi secara terpisah untuk mengukur dan memberikan informasi tentang kondisi lingkungan untuk pertanian berdasarkan suhu, kadar air tanah, intensitas cahaya, dan ketersediaan air. Sistem ini dirancang untuk memantau keadaan lingkungan secara real-time seperti kualitas udara, suhu, kelembapan, sampai dengan kualitas airnya (Putra, dkk, 2023). Dengan prinsip dasar fisika seperti konduktivitas, tekanan fluida, dan konversi energi listrik, sistem IoT dapat mendeteksi perubahan parameter lingkungan dan mengatur penggunaan air serta energi secara efisien (Dhanaraju, dkk, 2022).

Penelitian oleh Abdelmoneim, dkk (2025) menunjukkan bahwa sensor kelembapan tanah berbasis kapasitif mampu mengukur kadar air dengan akurasi tinggi setelah dilakukan proses kalibrasi yang tepat, yang bergantung pada hukum fisika tentang perubahan permitivitas dielektrik akibat variasi kadar air dalam tanah. Sementara itu, (Agustirandi, dkk, 2024) membuktikan bahwa penerapan sensor berbiaya rendah dengan prinsip resistansi listrik pada sistem irigasi pintar dapat menghemat penggunaan air hingga 30% dibanding sistem manual. *Internet of Things* (IoT) memiliki potensi yang cukup besar dalam meningkatkan kualitas hidup pada berbagai sektor khususnya kesehatan, kota pintar, konstruksi, manajemen air, serta energi (Salsabila & Kasoni, 2021). Potensi tersebut dapat terwujud melalui penyediaan sistem dan perangkat yang memungkinkan penggunaannya dalam mengambil keputusan secara tepat (Prawiyogi & Anwar, 2023). Temuan serupa juga dikemukakan oleh Saha, dkk (2025) yang merancang sistem pertanian presisi berbasis IoT yang dikombinasikan dengan sensor suhu dan tekanan untuk memprediksi seberapa banyak kebutuhan air dan energi listrik secara adaptif berdasarkan kondisi lahan dan cuaca. Beberapa penelitian sebelumnya lebih banyak menitikberatkan pada aspek teknis IoT dan efisiensi energi semata, tanpa mengaitkan secara eksplisit prinsip-prinsip fisika yang mendasari kinerja sistem sensor dan aktuator tersebut (Abu, dkk, 2022). Berdasarkan tinjauan literatur ini, terdapat kesenjangan penelitian berupa kurangnya integrasi mendalam analisis prinsip-prinsip fisika dalam desain dan implementasi sistem IoT pertanian yang diterapkan pada pengelolaan air dan energi di tingkat BUMDes.

Pemahaman terhadap Hukum Ohm, tekanan hidrostatik, perpindahan kalor, serta karakteristik kelistrikan dan sifat material sensor merupakan aspek yang sangat krusial dalam menjamin keandalan, akurasi, dan efisiensi jangka panjang suatu sistem. Oleh karena itu, pertanyaan penelitian dalam studi ini dirumuskan sebagai berikut: bagaimana prinsip-prinsip fisika diimplementasikan dalam sistem *Internet of Things* IoT pertanian untuk pengelolaan air dan energi, serta bagaimana integrasi prinsip-prinsip tersebut dapat meningkatkan efisiensi operasional Badan Usaha Milik Desa BUMDes secara ilmiah dan terukur. Sejalan dengan pertanyaan tersebut, tujuan penelitian ini adalah menganalisis hubungan antara prinsip-prinsip fisika dan kinerja sistem IoT dalam konteks pertanian, serta mengevaluasi penerapan prinsip-prinsip tersebut dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan energi di lingkungan BUMDes. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menawarkan implementasi teknis sistem IoT, tetapi juga memberikan kontribusi konseptual melalui pendekatan ilmiah berbasis fisika yang memperkuat keunikan dan relevansi sistem yang diusulkan dalam kerangka pengembangan pertanian berbasis teknologi.

Pemahaman terhadap konsep-konsep fundamental fisika, seperti Hukum Ohm, perpindahan kalor, tekanan hidrostatik, serta konversi energi elektromagnetik, merupakan prasyarat penting dalam perancangan sistem *Internet of Things* (IoT) yang andal, stabil, dan berkelanjutan. Penelitian yang dilakukan oleh Wibowo dkk. (2021) mengemukakan pengembangan sistem pemantauan suhu dan kelembapan pada budidaya jamur. Namun demikian, sistem tersebut masih terbatas pada fungsi monitoring tanpa dilengkapi mekanisme pengendalian otomatis, serta hanya berfokus pada parameter suhu dan kelembapan. Pemahaman yang

mendalam mengenai prinsip fisika yang mendasari kinerja perangkat IoT memungkinkan pengembangan desain sistem yang lebih optimal, sehingga penggunaan air dan energi dalam sektor pertanian, khususnya yang dikelola oleh Badan Usaha Milik Desa (BUMDes), dapat ditingkatkan efektivitas dan keberlanjutannya. Selain itu, pemanfaatan teknologi IoT memungkinkan pengguna melakukan pemantauan secara real time dalam budidaya hidroponik sehingga dapat meningkatkan kualitas hasil tanaman (Siskandar dkk., 2020).

Meskipun demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait integrasi prinsip-prinsip fisika dengan implementasi IoT pada tingkat BUMDes dalam konteks pengelolaan sumber daya air dan energi secara efisien. Studi-studi sebelumnya cenderung menitikberatkan pada aspek teknis operasional perangkat dan belum mengkaji secara mendalam dimensi penalaran fisika yang mendasari sistem tersebut. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengkaji prinsip-prinsip fisika yang diimplementasikan dalam teknologi IoT pertanian serta menganalisis bagaimana penerapan prinsip-prinsip tersebut dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan energi di lingkungan BUMDes berdasarkan pendekatan ilmiah yang didukung oleh data lapangan dan telaah literatur mutakhir.

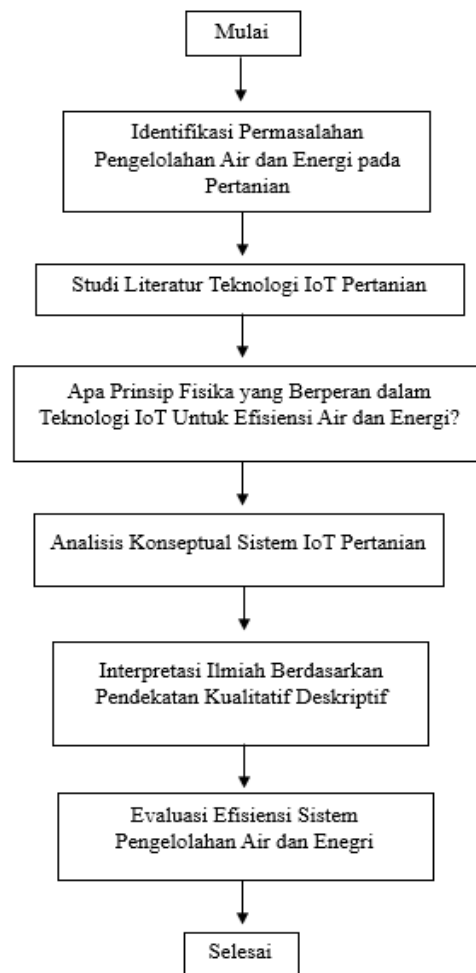
METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan kerangka analisis deduktif berdasarkan penalaran ilmiah untuk mengkaji penerapan prinsip-prinsip fisika dalam sistem Internet of Things (IoT) pertanian. Desain penelitian disusun secara sistematis sehingga dapat direplikasi melalui tahap-tahap perencanaan, implementasi, pengumpulan data, analisis, dan evaluasi konseptual. Tahap awal melibatkan identifikasi masalah pengelolaan air dan energi dalam sistem IoT pertanian di lingkungan BUMDes. Selanjutnya, variabel fisika yang relevan ditentukan, termasuk variabel listrik seperti tegangan, arus, resistansi, dan daya; variabel fluida seperti tekanan dan laju aliran; serta variabel termal seperti suhu dan transfer panas. Tahap berikutnya adalah pemetaan komponen sistem IoT, seperti sensor suhu, sensor kelembaban tanah, pompa air otomatis, modul daya, dan mikrokontroler ESP32, ke hukum fisika yang mendasarinya, seperti Hukum Ohm, Hukum Bernoulli, prinsip resistivitas, dan konservasi energi.

Alat penelitian terdiri dari lembar pengamatan teknis terstruktur, pedoman dokumentasi spesifikasi perangkat, dan kuesioner berbasis Google Form yang didistribusikan setelah kegiatan sosialisasi di desa. Sosialisasi dilakukan dengan manajer BUMDes dan pejabat desa untuk menjelaskan sistem IoT pertanian yang digunakan dan prinsip-prinsip fisika yang mendasarinya. Setelah kegiatan, tautan Google Form dibagikan kepada peserta untuk mengumpulkan data mengenai pemahaman, persepsi mereka tentang efisiensi air dan energi, serta pengalaman mereka dalam menggunakan sistem tersebut dalam praktik. Prosedur pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap perangkat IoT pertanian yang diimplementasikan, mencatat karakteristik teknis seperti jenis sensor, tegangan operasi, daya pompa, dan konfigurasi sumber energi, kemudian dilengkapi dengan tinjauan dokumen teknis berupa lembar data sensor dan manual operasi peralatan.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dan analitis menggunakan pendekatan deduktif. Data teknis yang diperoleh dianalisis menggunakan persamaan fisika dasar seperti hubungan antara tegangan, arus, dan resistansi dalam Hukum Ohm, prinsip aliran fluida dalam sistem pompa air berdasarkan konsep Bernoulli, serta perhitungan efisiensi daya listrik. Data yang diperoleh dari Google Forms dianalisis melalui tabulasi persentase dan interpretasi deskriptif untuk melihat hubungan antara penerapan prinsip-prinsip fisika dan persepsi efisiensi sistem di tingkat BUMDes. Validitas data diperkuat melalui triangulasi antara hasil pengamatan teknis, dokumentasi perangkat, dan tanggapan kuesioner.

Gambar 1 menunjukkan alur pendekatan kualitatif deskriptif dalam artikel "*Kajian Prinsip Fisika pada Teknologi IoT Pertanian untuk Optimalisasi Pengelolaan Air dan Energi*". Proses dimulai dari identifikasi permasalahan pengelolaan air dan energi pada sistem IoT pertanian, kemudian dilanjutkan dengan kajian konsep fisika yang relevan seperti hukum Bernoulli, hukum Ohm, resistivitas, dan kekekalan energi. Tahap berikutnya adalah analisis desain sistem serta interpretasi prinsip fisika pada komponen alat dan alur kerjanya. Setelah itu dilakukan evaluasi konseptual melalui pertanyaan kunci di tengah proses untuk menilai apakah prinsip fisika telah diterapkan secara tepat dan efisien. Jika belum sesuai, dilakukan revisi analisis dan penyempurnaan kajian sedangkan jika sudah sesuai, proses dilanjutkan pada penarikan kesimpulan ilmiah serta rekomendasi optimalisasi sistem IoT pertanian. Alur ini menunjukkan bahwa penelitian berfokus pada analisis konseptual dan logis berbasis teori untuk memahami dan meningkatkan kinerja teknologi secara ilmiah.



Gambar 1. Flowchart Pendekatan Kualitatif Deskriptif

Fokus penelitian ini membahas tanggung jawab prinsipal fisika bahwa efisiensi pengelolaan air dan energi juga mempengaruhi peningkatan ekonomi dari Badan Usaha Milik Desa BUMDes. Penelitian ini merupakan pengamatan pada setiap komponen IoT dalam hukum fisika yang relevan, seperti hukum Ohm pada aliran listrik, hukum Bernoulli pada sistem air, dan hukum konduksi panas pada sensor suhu. Setiap penalaran disusun secara logis untuk menggambarkan bagaimana proses fisis tersebut mendukung kinerja sistem IoT pertanian secara menyeluruh. Dengan desain seperti ini, penelitian diharapkan mampu memberikan pemahaman ilmiah yang sistematis tentang penerapan fisika dalam teknologi pertanian berbasis IoT di tingkat desa. Objek kajian dalam penelitian ini adalah komponen fisik dan sistem kerja IoT pertanian yang digunakan dalam pengelolaan sumber daya air dan energi oleh BUMDes. Data diperoleh dari hasil observasi teknis lapangan terbatas di Dinas Pemberdayaan Masyarakat dan Desa Kabupaten Sidoarjo serta kajian teknis terhadap perangkat IoT yang telah diterapkan dalam sistem pertanian cerdas (smart farming). Selain itu, digunakan pula data sekunder berupa dokumentasi teknis dan panduan operasional alat untuk menelusuri hubungan antara spesifikasi perangkat dengan prinsip fisika yang bekerja di dalamnya.

Setiap komponen IoT misalnya sensor kelembapan tanah, sistem pengaliran air, dan modul daya ditelusuri berdasarkan hukum fisika yang relevan. Contohnya, sensor kelembapan dianalisis melalui konsep resistivitas bahan terhadap kadar air, pompa air melalui prinsip fluida dinamis (Hukum Bernoulli dan kontinuitas aliran), serta sistem energi melalui konsep efisiensi listrik dan kalor. Hubungan antar variabel fisis seperti tegangan, arus, tekanan, debit, dan suhu dijelaskan menggunakan persamaan fisika dasar untuk menunjukkan keterkaitan langsung antara konsep teoritis dan implementasinya dalam IoT pertanian. Hasil analisis ini kemudian diinterpretasikan untuk menggambarkan bagaimana penerapan hukum fisika mendukung efektivitas teknologi IoT bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan sumber daya dalam kegiatan pertanian di tingkat desa. Dengan metode ini, penelitian diharapkan menghasilkan penjelasan ilmiah yang tidak hanya menjabarkan prinsip kerja alat, tetapi juga mengungkap keterpaduan antara fisika, teknologi, dan pemberdayaan masyarakat desa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis sistem Internet of Things (IoT) pertanian yang diterapkan oleh BUMDes menunjukkan adanya penerapan langsung hukum-hukum fisika pada pengelolaan air dan energi listrik. Di Indonesia, bidang pertanian berperan penting dalam menopang perekonomian nasional. Oleh sebab itu, pengembangan serta penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sektor pertanian perlu terus diperluas dan dioptimalkan guna meningkatkan produktivitas serta efisiensi pengelolaan sumber daya (Harsanto, 2020). Sistem IoT pertanian ini menggunakan prinsip dasar fisika dalam pengukuran kelembapan tanah, aliran fluida, serta efisiensi energi listrik dan mekanik pada proses irigasi otomatis. Sensor kapasitif bekerja berdasarkan prinsip perubahan permitivitas tanah, di mana kandungan air yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan tanah menyimpan muatan listrik. Kapasitansi dinyatakan sebagai komponen utama seperti sensor kelembapan kapasitif, mikrokontroler Arduino Uno, dan pompa air, bekerja secara terpadu berdasarkan besaran-besaran fisika seperti kapasitansi, resistansi, tekanan fluida, debit aliran, dan energi listrik.



Gambar 2. Ilustrasi Kerja Alat (Shafiyullah, 2022)

Proses pada gambar tersebut dimulai ketika sensor kelembapan tanah yang dipasang di lahan pertanian melakukan pembacaan tingkat kadar air dalam tanah secara berkala. Data dari sensor tersebut kemudian dikirimkan ke alat utama (mikrokontroler) untuk diproses dan ditampilkan sebagai informasi kondisi kelembapan tanah saat itu. Setelah diproses, data diteruskan melalui jaringan WiFi dan disimpan ke dalam database sehingga dapat diakses secara daring. Petani atau pengguna dapat memantau kondisi tanah secara real-time melalui ponsel, dan ketika kelembapan tanah berada di bawah atau di atas batas yang telah ditentukan, sistem akan memberikan notifikasi sebagai peringatan agar tindakan seperti penyiraman dapat segera dilakukan. Dengan sistem ini, pemantauan kondisi lahan menjadi lebih praktis dan membantu petani mengambil keputusan secara lebih cepat dan tepat.

Pembahasan hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan hukum-hukum fisika pada sistem IoT pertanian memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi sumber daya. Sensor kelembapan berbasis resistansi menunjukkan hubungan langsung antara konduktivitas tanah dan kadar air. Semakin tinggi kandungan air, semakin banyak ion yang dapat menghantarkan arus listrik, sehingga resistansi menurun (Himanshu, dkk., 2021). Perbedaan tegangan yang dihasilkan sensor ini diubah menjadi sinyal digital melalui mikrokontroler, yang kemudian mengaktifkan pompa air otomatis. Kapasitansi dari sensor kapasitif dapat ditulis pada Persamaan (1).

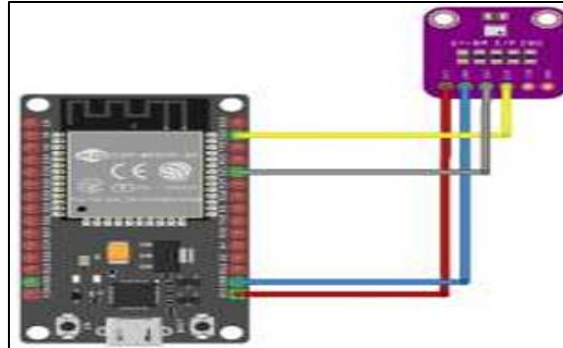
$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

Pada persamaan (1), ϵ adalah permitivitas medium (dalam hal ini campuran tanah-air), A adalah luas sensor, dan d adalah jarak antar pelat elektroda. Ketika tanah basah, nilai ϵ meningkat sehingga kapasitansi meningkat. Mikrokontroler mengubah perubahan kapasitansi tersebut menjadi perubahan tegangan yang dibaca oleh ADC. Perubahan tegangan mengikuti hukum Ohm dapat ditulis pada Persamaan (2).

$$V = I R \quad (2)$$

Sesuai dengan Persamaan (2), ketika nilai tegangan sensor menunjukkan kelembapan di bawah ambang batas yang telah diprogram, sinyal digital dikirim ke relay untuk menyalakan pompa. Relay bekerja sebagai saklar elektromagnetik yang memungkinkan arus berdaya lebih besar mengalir dari sumber energi menuju pompa. Sistem pompa air otomatis merupakan penerapan praktis dari Hukum Bernoulli dan kontinuitas aliran. Pompa harus mempertahankan keseimbangan tekanan agar debit air stabil. Ketika tekanan fluida di dalam pipa menurun akibat perubahan ketinggian atau diameter pipa, pompa menyesuaikan kecepatan rotasi impeller

untuk menjaga v dan Q konstan. Berdasarkan perhitungan sebelumnya, energi yang dibutuhkan untuk menaikkan air setinggi 2 m hanya sekitar 30 kJ/kg dengan efisiensi 70%, menunjukkan bahwa sistem fisika dirancang agar kerja mekanik tidak berlebihan (Garcia, dkk., 2020). Informasi hasil pembacaan sensor berupa suhu, kelembapan, dan tekanan udara diproses terlebih dahulu oleh mikrokontroler ESP32, kemudian dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi menuju modem sebagai media komunikasi. Selanjutnya, data tersebut diterima dan disimpan ke dalam dua tabel pada basis data untuk proses pemantauan dan pengolahan lebih lanjut. Proses transmisi dari ESP32 ke modem berlangsung menggunakan gelombang elektromagnetik pada pita frekuensi 2,4 GHz.



Gambar 3. Rangkaian Pembacaan Suhu dan kelembapan (Aditsan dkk, 2024)

Proses ini melibatkan beberapa kajian fisika terkait gelombang, daya pancar, redaman ruang bebas, kualitas sinyal, dan energi transmisi.

- (a) Sifat Gelombang Wi-Fi Hubungan matematis antara frekuensi (f) dan panjang gelombang (λ) diberikan oleh Persamaan (3).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

dengan:

$c = 3 \times 10^8$ m/s (kecepatan cahaya),

$f = 2,4109$ Hz

sehingga diperoleh $\lambda = 0,125$ m.

Nilai ini menunjukkan bahwa gelombang Wi-Fi memiliki panjang gelombang sekitar 12,5 cm yang relatif besar sehingga mampu merambat dengan baik di ruang terbuka maupun menembus penghalang ringan seperti dinding dan vegetasi. Karakteristik ini mendukung penggunaan Wi-Fi sebagai media komunikasi data pada sistem IoT pertanian.

- (b) Daya Sinyal yang Diterima (Persamaan Friis)

Daya sinyal yang diterima modul penerima pada jarak R dinyatakan oleh Persamaan (4).

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (4)$$

dengan:

P_r = daya sinyal yang diterima,

P_t = daya pancar,

G_t dan G_r = penguatan antena pemancar dan penerima,

R = jarak antar perangkat.

Persamaan ini menunjukkan bahwa daya sinyal menurun secara kuadrat terhadap jarak. Oleh karena itu, penempatan node IoT dan penguatan antena menjadi faktor penting agar komunikasi data tetap andal di area pertanian.

- (c) Redaman Ruang Bebas (Free Space Path Loss / FSPL)

Redaman sinyal selama perambatan di udara dinyatakan pada Persamaan (5).

$$FSPL = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5)$$

Sebagai contoh, untuk jarak $R = 5 \text{ m}$ dan $\lambda = 0,125 \text{ m}$, diperoleh $FSPL \approx 46.46 \text{ dB}$. Nilai FSPL yang cukup besar menunjukkan adanya pelemahan sinyal, namun masih dalam batas wajar untuk komunikasi IoT jarak dekat, sehingga data sensor dapat diterima dengan baik.

(d) Kualitas Sinyal (Signal-to-Noise Ratio / SNR)

Total gangguan (noise) termal dinyatakan pada Persamaan (6).

$$N = kTB \quad (6)$$

dengan:

$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (konstanta Boltzmann),

T = suhu sistem (Kelvin),

B = bandwidth (Hz).

Rasio kualitas sinyal dinyatakan pada Persamaan 7.

$$SNR = \frac{P_r}{N} \quad (7)$$

Nilai SNR yang lebih tinggi menunjukkan tingkat kualitas data yang diterima semakin baik dan lebih minim gangguan. Dalam konteks IoT pertanian, SNR yang tinggi memastikan data kelembapan tanah dikirim secara akurat tanpa kesalahan pembacaan.

(e) Kapasitas Kanal (Teorema Shannon)

Kapasitas maksimum kanal komunikasi dinyatakan oleh:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (8)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan SNR secara langsung meningkatkan kapasitas kanal, sehingga data sensor dapat dikirim lebih cepat dan lebih stabil. Hal ini sangat penting untuk sistem monitoring real-time.

(f) Energi yang diperlukan untuk transmisi data oleh ESP32 dinyatakan sebagai:

$$E = P \times t \quad (9)$$

Dengan contoh:

$P = 0,10 \text{ W}$,

$t = 0,008 \text{ s}$,

maka $E = 0,0008 \text{ J}$. Nilai energi yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa sistem IoT sangat efisien dan cocok untuk aplikasi pertanian berkelanjutan dengan sumber daya listrik terbatas.

(g) Analisis Kerja Pompa dan Aliran Air

Energi listrik yang digunakan pompa selama satu siklus penyiraman dihitung dengan persamaan (9).

Dengan $P = 10 \text{ W}$ dan $t = 600 \text{ s}$, diperoleh $E = 6000 \text{ J}$. Jika pompa bekerja 4 kali sehari, maka energi total adalah $E_{\text{harian}} = 24000 \text{ J}$.

(h) Debit dan Volume Air

Debit aliran air ditentukan oleh:

$$Q = A \cdot v \quad (10)$$

Dengan $A = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ dan $v = 0,25 \text{ m/s}$, maka $Q = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Adapun volume air selama 600 s sebesar $V = 15 \text{ L}$. Volume ini cukup untuk menjaga kelembapan tanah tanpa menyebabkan kejenuhan air.

(i) Gaya Kapiler dan Stabilitas kelembapan Tanah

Air yang masuk ke pori-pori tanah dipertahankan oleh gaya kapiler yang dipengaruhi oleh tegangan permukaan dan ukuran pori tanah. Tekanan kapiler dinyatakan oleh:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \tag{11}$$

Semakin kecil jari-jari pori tanah, semakin besar kemampuan tanah menahan air. Sistem IoT memastikan air diberikan dalam jumlah optimal sehingga keseimbangan antara gaya gravitasi dan gaya kapiler tetap terjaga.

(j) Sistem Kendali Umpan Balik (Feedback Loop)

Sistem menggunakan kendali berbasis error:

$$Error = Moisture_{target} - Moisture_{sensor} \tag{12}$$

- a. Jika Error > 0 berarti pompa menyala
- b. Jika Error = 0 berarti pompa mati

Sistem ini membentuk keseimbangan dinamis yang menjaga kelembapan tanah berada pada rentang ideal tanpa campur tangan manual.

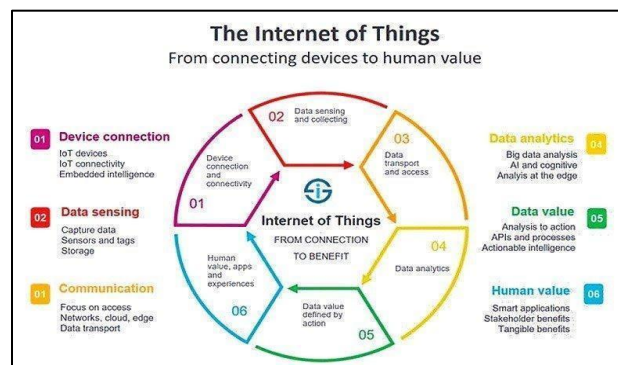
(k) Perbandingan Penyiraman Manual dan Sistem IoT

Tabel 1. Perbandingan Penggunaan Sistem IoT dengan Penyiraman Manual

Aspek	Penyiraman Manual	Sistem IoT
Waktu penyiraman	Berdasarkan dugaan	Berdasarkan data kelembapan
Volume air	Tidak terkontrol	Terukur (±15 L/siklus)
Ketersediaan air untuk akar	Fluktuatif	Stabil
Konsumsi energi	Tidak dihitung	Terukur (2400 J/siklus)
Efisiensi kerja petani	Rendah	Tinggi

Tabel 1 menunjukkan perbandingan antara metode penyiraman manual dan sistem IoT berdasarkan beberapa aspek utama, meliputi waktu penyiraman, volume air, ketersediaan air untuk akar, konsumsi energi, dan efisiensi kerja petani. Berdasarkan tabel tersebut, sistem IoT memberikan pengendalian penyiraman yang lebih terukur dan stabil dibandingkan metode manual yang cenderung bergantung pada perkiraan. Sistem IoT memberikan kendali presisi berbasis fisika, bukan kebiasaan.

Analisis fisika ini juga menunjukkan bagaimana konsep teoritis dapat diterjemahkan ke dalam inovasi teknologi nyata di tingkat desa. Hukum Bernoulli memastikan aliran fluida yang efisien; prinsip kelistrikan seperti Hukum Ohm mendukung efisiensi penggunaan energi; serta keseluruhan sistem mencerminkan prinsip konservasi energi melalui optimalisasi konsumsi daya pada perangkat IoT dan sistem otomasi pertanian berbasis teknologi cerdas (Soussi, dkk, 2025).



Gambar 3. Internet of Things (Fihqina, 2023)

Gambar 3 menggambarkan konsep dasar *Internet of Things* (IoT), mulai dari proses koneksi perangkat, pengambilan data melalui sensor, komunikasi data, analisis, hingga menghasilkan nilai bagi pengguna. Diagram ini menunjukkan bagaimana sistem IoT mengintegrasikan perangkat fisik dan analisis data untuk mendukung pengambilan keputusan secara otomatis.

Secara konseptual, hal ini sejalan dengan temuan Mohammadi, dkk (2018), yang menekankan pentingnya penguasaan prinsip fisika dalam desain IoT berdaya rendah. Dengan memanfaatkan pemahaman hukum-hukum alam, sistem IoT pertanian dapat berfungsi secara efisien, berkelanjutan, dan relevan untuk pemberdayaan masyarakat desa melalui BUMDes.

Dengan memahami mekanisme fisika yang mendasari sistem ini, pengelolaan dan pemanfaatannya menjadi lebih efisien dan mandiri, sehingga Badan Usaha Milik Desa (BUMDes) tidak lagi bergantung pada teknisi profesional dalam operasionalnya. Pemahaman tersebut juga memungkinkan petani mengoptimalkan penggunaan air secara berbasis perhitungan ilmiah, bukan sekadar perkiraan, yang berdampak pada peningkatan efisiensi irigasi. Implikasi lebih lanjut adalah stabilitas produktivitas pertanian yang lebih terjaga, khususnya pada musim kemarau, serta peluang pengembangan sistem ke skala yang lebih luas melalui integrasi modul jaringan berbasis *Internet of Things* (IoT).

Ini menunjukkan bahwa fisika bukan hanya konsep abstrak, tetapi alat pengambil keputusan teknis di tingkat desa. Setelah sinyal listrik dihasilkan, mikrokontroler yang terintegrasi (ESP8266) berperan sebagai unit pemrosesan awal sistem. Perangkat ini kemudian mengkonversi sinyal analog menjadi informasi digital melalui mekanisme analog-to-digital conversion (ADC) sebelum data diproses lebih lanjut. Di sini terjadi konsep fisika gelombang dan elektronika dasar, yaitu bagaimana informasi dalam bentuk variasi amplitudo listrik dapat direpresentasikan sebagai kode biner sehingga dapat dipahami oleh sistem komputasi.

Data digital yang telah terbentuk kemudian dikirimkan melalui jaringan komunikasi, misalnya WiFi. Pada tahap ini, terjadi proses transmisi gelombang elektromagnetik. Gelombang radio pada frekuensi tertentu membawa paket data yang berisi informasi yang sebelumnya diperoleh sensor. Hal tersebut sesuai dengan prinsip fisika bahwa semakin tinggi frekuensi sinyal, semakin cepat data dapat dikirim, namun jangkauan akan lebih pendek. Karena itu, IoT sering memanfaatkan jaringan lokal (LAN / WiFi) untuk menyeimbangkan antara kecepatan dan stabilitas sinyal. Data yang sudah sampai pada server atau database kemudian dapat dianalisis. Dalam tahap ini, berbagai metode komputasi digunakan untuk mengekstrak pola dan informasi penting. Secara fisika, data ini mencerminkan keadaan nyata di lingkungan sehingga informasi digital tersebut tetap berakar pada fenomena fisik nyata yang diukur. Misalnya, tren kenaikan suhu yang terekam sensor merupakan representasi digital dari perubahan energi panas di lingkungan.

Hasil analisis data kemudian ditujukan untuk menghasilkan nilai guna bagi manusia. Data yang ditampilkan melalui dashboard, grafis, atau sistem peringatan dini pada dasarnya membantu manusia mengambil keputusan berdasarkan fenomena fisik yang terjadi di dunia nyata. Hal tersebut menunjukkan bahwa arah pengembangan IoT di masa mendatang tidak hanya berfokus pada aspek otomatisasi semata, tetapi juga perlu menekankan penguatan kemampuan analisis serta pengambilan keputusan yang didasarkan pada pemrosesan data secara komprehensif (Alfassa, dkk, 2025). Dengan kata lain, IoT menghubungkan dunia fisik (real) dengan dunia digital (virtual), sehingga manusia dapat memahami, mengontrol, atau mengotomatisasi kondisi tertentu secara lebih efektif. Tahap pengendalian (controlling) dalam pengelolaan pertanian berbasis IoT menjadi komponen krusial untuk menjamin setiap proses operasional berlangsung selaras dengan rencana serta standar yang telah ditentukan (Hikmatunnisa, dkk, 2024). Kegiatan ini mencakup pemantauan berkelanjutan terhadap kondisi tanaman maupun kinerja sistem, seperti pemantauan kelembapan tanah, kualitas air, serta kandungan nutrisi yang diukur melalui sensor IoT. Daft (2020) menjelaskan bahwa fungsi pengendalian meliputi penetapan tolok ukur yang jelas, evaluasi hasil yang diperoleh, serta pelaksanaan tindakan perbaikan apabila ditemukan ketidaksesuaian dengan target yang direncanakan.

Hasil analisis dan penerapan sistem IoT pada kendali kelembapan tanah ini memiliki implikasi yang signifikan terhadap pengembangan ilmu fisika terapan, teknik elektro, dan teknologi pendidikan sains. Dari sudut pandang fisika, penelitian ini memperkuat pemahaman terhadap konsep-konsep dasar fisika, namun pemodelan matematis yang lebih mendalam terhadap fenomena yang terlibat dirasa belum sepenuhnya dilakukan. Seperti analisis mengenai interaksi kompleks antara kelembapan tanah, dinamika aliran air, serta pengaruh kondisi lingkungan terhadap kestabilan sinyal dan kinerja sensor juga masih bersifat sederhana dan

terbatas pada skala prototipe. Meskipun demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa fisika berperan sebagai fondasi utama dalam perancangan sistem cerdas berbasis sensor dan komunikasi nirkabel, sehingga berpotensi memberikan manfaat nyata bagi masyarakat khususnya pada lingkungan terbuka seperti pertanian.

Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi pada bidang rekayasa sistem dan Internet of Things (IoT) dengan menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kendali umpan balik (*feedback control*) mampu meningkatkan efisiensi energi dan penggunaan sumber daya air secara terukur. Integrasi antara model fisika, sensor kelembapan, dan algoritma kendali sederhana menghasilkan sistem yang adaptif dan stabil, sehingga membuka peluang pengembangan lebih lanjut menuju sistem pertanian presisi (*precision agriculture*). Secara keseluruhan, perkembangan tersebut mencerminkan adanya transformasi mendasar dalam sistem irigasi modern, di mana pemanfaatan teknologi mampu meningkatkan kemampuan adaptasi serta efisiensi pengelolaan pertanian secara lebih optimal (Aisyah, dkk, 2025). Dalam konteks keilmuan pendidikan, temuan ini juga berimplikasi sebagai contoh konkret pembelajaran kontekstual fisika, di mana peserta didik dapat mengaitkan konsep abstrak dengan aplikasi nyata, sehingga mendukung peningkatan literasi sains, keterampilan berpikir kritis, dan pemahaman lintas disiplin.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi prinsip-prinsip fisika dalam desain dan implementasi sistem Internet of Things (IoT) berbasis ESP32 berhasil mendukung tujuan penelitian, yaitu menganalisis hubungan antara mekanisme fisik sensor dan kinerja sistem, serta mengevaluasi kontribusi mereka terhadap efisiensi pengelolaan air dan energi di lingkungan BUMDes. Sistem yang dikembangkan tidak hanya mampu memantau suhu, kelembapan, dan tekanan udara secara real-time, tetapi juga menunjukkan bahwa pemahaman tentang konversi energi, karakteristik listrik, dan transmisi gelombang elektromagnetik memainkan peran penting dalam meningkatkan akurasi, stabilitas, dan efisiensi konsumsi daya dibandingkan dengan sistem pemantauan konvensional yang tidak secara eksplisit mengintegrasikan analisis fisika. Secara lebih luas, temuan ini memiliki implikasi untuk memperkuat praktik pertanian berkelanjutan melalui optimasi penggunaan air dan energi berbasis data presisi, sehingga mendukung efisiensi sumber daya dan ketahanan produksi jangka panjang. Sebagai peta jalan untuk penelitian lebih lanjut, perlu dilakukan pengujian sistem di bawah berbagai kondisi lingkungan dan musim yang berbeda untuk menilai ketahanan dan konsistensi kinerja sensor, serta mengevaluasi skalabilitas pada skala kecil, menengah, dan besar untuk memastikan stabilitas jaringan, efisiensi energi, dan efektivitas pengelolaan sumber daya saat diterapkan pada berbagai tingkatan operasi pertanian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bapak Utama Alan Deta, S.Pd., M.Pd., M.Si selaku Dosen Pembimbing Lapangan (DPL) yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan perhatian selama proses penelitian ini berlangsung. Selain itu, ucapan terima kasih ditujukan kepada Dinas Pemberdayaan Masyarakat dan Desa (DPMD) serta BUMDes yang telah memberikan dukungan, akses informasi, dan fasilitas sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Seluruh bantuan, dukungan, dan kerjasama yang diberikan sangat berarti dalam penyelesaian penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Andiny Tri Febianti: Conceptualization, Methodology, Validation, Visualitation, Formal Analysis, Resources, Investigation, Writing - Original Draft, Data Curation, dan Project Administration; **Dini Luki Mulya Safitri:** Methodology, Visualization, Investigation, Resources, dan Writing - Original Draft; dan **Sih Suwitaning Rahayu:** Project Administration, Funding Acquisition, dan Supervision. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir dari naskah ini.

PERNYATAAN KETERSEDIAAN DATA

Data yang mendukung temuan dalam penelitian ini tersedia dari para penulis atas permintaan yang wajar, dengan mempertimbangkan persetujuan etik dan peraturan institusi yang berlaku.

PERNYATAAN BEBAS KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat mempengaruhi hasil yang dilaporkan dalam naskah ini.

PERNYATAAN ETIKA PENELITIAN DAN PUBLIKASI

Para penulis menyatakan bahwa penelitian dan penulisan naskah ini telah mematuhi standar etika penelitian dan publikasi, sesuai dengan prinsip ilmiah, serta bebas dari plagiasi.

PERNYATAAN PEMANFAATAN TEKNOLOGI ASISTIF

Para penulis menyatakan bahwa Kecerdasan Buatan Generatif (*Generative Artificial Intelligence*) dan teknologi asistif lainnya tidak digunakan secara berlebihan dalam proses penelitian dan penulisan naskah ini. Secara khusus, ChatGPT untuk *brainstorming* ide. Para penulis telah meninjau dan menyunting semua konten yang dihasilkan AI guna memastikan ketepatan, kelengkapan, serta kepatuhan terhadap standar etika dan ilmiah. Tim Penulis bertanggung jawab penuh atas naskah versi akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmoneim, A.A., Al Kalaany, C.M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. *Sensors*, **25**(2), 343. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25020343>
- Abu, N.S., Bukhari, W.M., Ong, C.H., Kassim, A.M., Izzudidin, T.A., Sukhaimi, M.N., Norasikin, M.A., & Rasid, A.F.A. (2022). Internet of things applications in precision agriculture: A review. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, **3**(3), 338-347. DOI: <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i3.14159>.
- Aditsan, A., Wiediartini, W., Rachmadita, R.N., Erawati, I., Budiawati, R., Utari, D.A., & Ardliyana, T. (2024). Pengenalan sistem IoT pada pemanfaatan kebutuhan sehari-hari di lingkungan Karang Taruna, Kecamatan Driyorejo, Gresik. *Jurnal Cakrawala Maritim*, **7**(1), 21-32. DOI: <https://doi.org/10.35991/jcm.v7i1.13>.
- Agustirandi, B., Inayah, I., Aminah, N.S., & Budiman, M. (2024). Analysis comparison, calibration, and application of low-cost soil moisture sensors for smart agriculture. *Telkomnika: Telecommunication Computing Electronics and Control*, **22**(5), 1221-1230. DOI: <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v22i5.25703>.
- Aisyah, N., Ulhaq, E.D., Dharmawan, A., & Purbakawaca, R. (2025). Design of an iot-based smart irrigation system using soil moisture sensors for water efficiency. *Journal Online of Physics*, **11**(1), 89-97. DOI: <https://doi.org/10.22437/jop.v11i1.48928>.
- Alfassa, A.I., Zhafira, A., Sifa, R.Y., Sari, E.K., Indriani, N., & Hidayah, N. (2025). Literature review: pemanfaatan internet of things (IoT) di sektor pertanian, peternakan, dan perikanan. *Jurnal Perangkat Lunak*, **7**(2), 198-209. DOI: <https://doi.org/10.32520/jupel.v7i2.4237>.
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliapuremal, R. (2022). Smart farming: Internet of Things (IoT)-Based sustainable agriculture. *Agriculture*, **12**(10), 1745. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>.
- Garcia, L., Parra, L., Jimenez, J.M., & Lloret, J. (2020). IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, **20**(4), 1042. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20041042>.
- Harsanto, B. (2020). Inovasi Internet of Things pada sektor pertanian: pendekatan analisis scientometrics. *Informatika Pertanian*, **29**(2), 111-122. DOI: <https://doi.org/10.21082/ip.v29n2.2020.p111-122>
- Hikmatunnisa, A.N., Ramadayanti, W., & Nuryati, R. (2024). Analisis manajemen produksi pertanian hidroponik berbasis IoT (Internet of Things) di wisata edukasi arjuna farm Kecamatan Tamansari Kota Tasikmalaya. *Mikroba: Jurnal Ilmu Tanaman, Sains dan Teknologi Pertanian*, **1**(3), 111-125. DOI: <https://doi.org/10.62951/mikroba.v1i3.164>.
- Himanshu, S.K., Fan, Y., Ale, S. & Bordovsky, J. (2021). Simulated efficient growth-stage-based deficit irrigation strategies for maximizing cotton yield, crop water productivity and net returns. *Agricultural Water Management*, **250**, 106840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106840>.
- Mohammadi, M., Al-Fuqaha, A., Sorour, S., & Guizani, M. (2018). Deep learning for IoT big data and streaming analytics: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **20**(4), 2923-2960. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2844341>.
- Prawiyogi, A.G., & Anwar, A.S. (2023). Perkembangan Internet Of Things (Iot) pada sektor energi: Sistematis literatur review. *jurnal Mentari: Manajemen, Pendidikan dan Teknologi Informasi*, **1**(2), 187-197. DOI: <https://doi.org/10.34306/mentari.v1i2.254>.

- Putra, F.P.E., Mahmud, M.A., & Maqom, I.S. (2023). Pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis Internet Of Things (IoT) di kampus. *Digital Transformation Technolog*, **3**(2), 996-1001. DOI: <https://doi.org/10.47709/digitech.v3i2.3457>.
- Ridwan, M., & Sari, K.M. (2021). Penerapan IoT dalam sistem otomatisasi kontrol suhu, kelembapan, dan tingkat keasaman hidroponik. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, **10**(4), 481-487. DOI: <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i4.481-487>.
- Saha, G., Shahrin, F., Khan, F.H., Meshkat, M.M., & Azad, A.A.M. (2025). Smart IoT-driven precision agriculture: land mapping, cropprediction, and irrigation system. *PLOS ONE*, **20**(3), e0319268. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319268>
- Salsabila, S. & Kasoni, D. (2021). Prototype smart home berbasis internet of things untuk meningkatkan efisiensi penggunaan listrik. *Jurnal Teknik Informatika STMIK Antar Bangsa*, **7**(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.51998/jti.v7i1.345>.
- Siskandar, R., Fadhil, M.A., Kusumah, B.R., Irmansyah, I., & Irzaman, I. (2020). Internet of Things: Automatic plant watering system using Android. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, **9**(4), 297- 310. DOI: <https://doi.org/10.23960/jtepl.v9i4.297-310>.
- Soussi, A., Zero, E., Ouammi, A., Zejli, D., Zahmoun, S., & Sacile, R. (2025). Smart greenhouse farming: a review towards near zero energy consumption. *Discover Cities*, **2**, 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44327-025-00096-w>.
- Wibowo, Y., Prasetyadana, F.E., & Suryadharna, B. (2021). Implementasi monitoring suhu dan kelembapan pada budidaya jamur tiram dengan IoT. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, **10**(3): 380-391. DOI: <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-l.v10i3.380-391>.