

GREARN.A.I. (*Green Learn With Artificial Intelligence*): Smart Greenhouse Berbasis Kecerdasan Buatan Untuk Pembelajaran Interaktif

Mhd. Hadid Luthfi Kahfi¹, Dicky Mahaputra Tarigan²
Email : mhadluthfikahfi@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi Artificial Intelligence (AI) dan Internet of Things (IoT) telah mendorong inovasi signifikan dalam bidang pertanian presisi, termasuk pengembangan smart greenhouse berbasis sistem otonom dan prediktif. Penelitian ini mengusulkan dan mengimplementasikan Grearn.A.I. (*Green Learn with Artificial Intelligence*), yaitu rumah kaca cerdas yang mengintegrasikan sensor lingkungan, sistem aktuator otomatis, dan modul analisis visual berbasis kecerdasan buatan sebagai media pembelajaran interaktif sekaligus sistem pertanian berkelanjutan. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 yang mengendalikan sensor suhu, kelembapan tanah, intensitas cahaya, pH, dan level air, serta aktuator berupa pompa air, kipas, mist maker, dan servo atap otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Grearn.A.I. mampu menjaga stabilitas iklim mikro (25–30 °C; 60–75% RH) dengan respons terhadap stres lingkungan dalam 3–5 detik dan meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 50% dibandingkan irigasi manual. Selain itu, indikator fisiologis tanaman seperti Fv/Fm dan Soil Water Content (SWC) menunjukkan pertumbuhan lebih optimal dan deteksi dini stres kekeringan pada tanaman uji. Dengan demikian, Grearn.A.I. tidak hanya meningkatkan efisiensi pertanian, tetapi juga berpotensi menjadi sarana edukatif berbasis teknologi untuk literasi AI, IoT, dan pertanian presisi menuju pengembangan inovasi hijau berkelanjutan.

Kata Kunci: *Smart Greenhouse; Artificial Intelligence (AI); Internet of Things (IoT); Pertanian Presisi; Efisiensi Air; Pembelajaran Interaktif.*

Abstract

The rapid advancement of Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) has driven significant innovations in precision agriculture, particularly in developing autonomous and predictive smart greenhouse systems. This research proposes and implements Grearn.A.I. (Green Learn with Artificial Intelligence), an intelligent greenhouse system that integrates environmental sensing devices, automatic actuators, and an AI-based visual analysis module as both an interactive learning medium and a sustainable agricultural solution. The system is developed using the ESP32-S3 microcontroller, which controls temperature, soil moisture, light intensity, pH, and water level sensors, along with actuators such as water pumps, cooling fans, mist makers, and automated roof servos. Experimental results indicate that Grearn.A.I. successfully maintains optimal microclimate conditions (25–30 °C; 60–75% RH), responds to environmental stress within 3–5 seconds, and increases water efficiency by up to 50% compared to manual irrigation. Furthermore, physiological indicators such as Fv/Fm and Soil Water Content (SWC) demonstrate enhanced plant growth and early drought stress detection. Thus, Grearn.A.I. not only improves agricultural productivity and sustainability but also serves as a technological learning platform that supports literacy in AI, IoT, and precision agriculture toward green innovation development.

Keyword: *Smart Greenhouse; Artificial Intelligence (AI); Internet of Things (IoT); Precision Agriculture; Water Efficiency; Interactive Learning.*

PENDAHULUAN

Perkembangan Artificial Intelligence (A.I.) dalam satu dekade terakhir telah memberikan dampak signifikan terhadap berbagai bidang, termasuk pertanian. Transformasi ini menjadikan sistem pertanian yang semula manual menjadi otomatis, adaptif, dan berbasis prediksi data (Katharria et al., 2025). Menurut Soussi et al. (2024), integrasi antara A.I., Internet of Things (IoT), dan sensor pintar merupakan

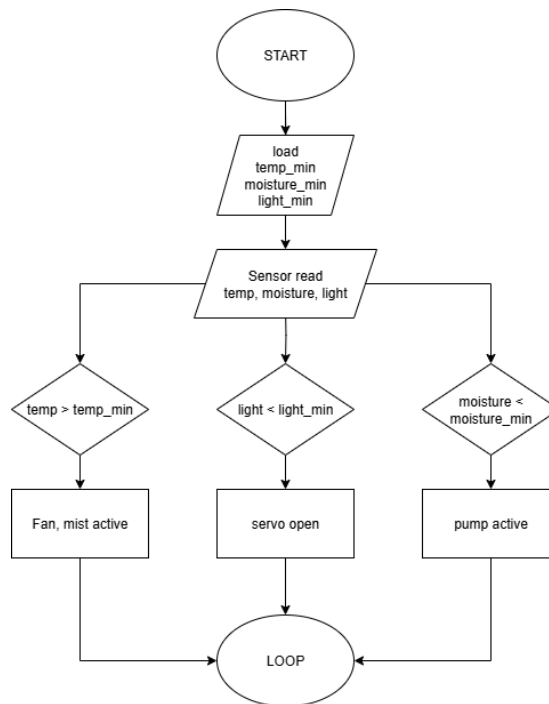
fondasi utama dalam pengembangan sistem pertanian presisi modern, khususnya pada penerapan smart greenhouse. Evolusi teknologi pada greenhouse menunjukkan pergeseran dari sistem kontrol berbasis logika fuzzy dan PID konvensional menuju penggunaan machine learning (ML) dan deep learning (DL) yang mampu memproses data lingkungan secara kompleks. Model-model seperti decision tree, random forest, dan convolutional neural networks (CNN) digunakan untuk deteksi dini penyakit tanaman, prediksi hasil panen, serta pengaturan iklim mikro berbasis data waktu nyata (Tempelaere et al., 2023; Sharma et al., 2025). Dari sisi ekonomi, laporan pasar global memperkirakan nilai smart greenhouse mencapai USD 1,8–2,3 miliar pada tahun 2025 dengan tingkat pertumbuhan tahunan (CAGR) sebesar 8,5–11% hingga 2034 (Mordor Intelligence, 2025). Penelitian fisiologi tanaman juga mengungkapkan bahwa tumbuhan merespons stres lingkungan melalui sinyal bioelektrik yang muncul dalam hitungan detik (Sukhov & Sukhova, 2021; Mudrilov et al., 2021). Sinyal ini dapat menjadi indikator dini terhadap perubahan kondisi tanaman dan berpotensi diintegrasikan dengan sistem kontrol berbasis A.I. untuk deteksi stres lebih cepat dibandingkan gejala visual. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengusulkan rancangan dan implementasi sistem Grearn.A.I. (Green + Learn + A.I.), yaitu smart greenhouse berbasis A.I. dan IoT yang berfungsi sebagai media pembelajaran interaktif sekaligus sistem pertanian presisi. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 untuk mengintegrasikan sensor suhu, kelembapan, intensitas cahaya, pH, dan level air dengan aktuator otomatis seperti pompa air, kipas, pembuat kabut, serta servo pengatur atap.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang sistem greenhouse cerdas berbasis A.I. dan IoT yang efisien; (2) menganalisis kinerja algoritma kontrol dalam menjaga iklim mikro optimal; dan (3) mengevaluasi efektivitasnya sebagai media pembelajaran berbasis teknologi. Adapun manfaat penelitian ini adalah mendukung efisiensi sumber daya pertanian, meningkatkan literasi teknologi bagi pelajar, serta memperkuat penerapan A.I. dan IoT untuk pertanian berkelanjutan di Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengusulkan rancangan dan implementasi sistem Grearn.A.I. (Green + Learn + A.I.), yaitu smart greenhouse berbasis A.I. dan IoT yang berfungsi sebagai media pembelajaran interaktif sekaligus sistem pertanian presisi. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 untuk mengintegrasikan sensor suhu, kelembapan, intensitas cahaya, pH, dan level air dengan aktuator otomatis seperti pompa air, kipas, pembuat kabut, serta servo pengatur atap. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang sistem greenhouse cerdas berbasis A.I. dan IoT yang efisien; (2) menganalisis kinerja algoritma kontrol dalam menjaga iklim mikro optimal; dan (3) mengevaluasi efektivitasnya sebagai media pembelajaran berbasis teknologi. Adapun manfaat penelitian ini adalah mendukung efisiensi sumber daya pertanian, meningkatkan literasi teknologi bagi pelajar, serta memperkuat penerapan A.I. dan IoT untuk pertanian berkelanjutan di Indonesia.

METODE

Desain Penelitian Penelitian ini menggunakan desain eksperimental untuk mengevaluasi kinerja sistem rumah kaca pintar Grearn.A.I. dalam mendeteksi stres tanaman dan meningkatkan pertumbuhan dibandingkan metode budidaya konvensional (Kirci et al., 2022). Dua kelompok diuji: satu menggunakan sistem Grearn.A.I. berbasis sensor IoT dengan respons otomatis, dan satu lagi menggunakan perawatan manual. Perbandingan dilakukan untuk menilai pengaruh pemantauan real-time terhadap stabilitas kondisi tumbuh dan produktivitas tanaman (Gambar1). Sistem bekerja dengan menetapkan ambang batas suhu, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya. Sensor DHT22, sensor kelembapan tanah, dan BH1750 memantau kondisi lingkungan secara berkelanjutan. Ketika suhu melebihi ambang batas, kipas dan pembuat kabut aktif; saat cahaya kurang, motor servo membuka atap otomatis; dan ketika tanah kering, pompa air menyiram tanaman. Setelah tindakan korektif dilakukan, sistem kembali memantau kondisi secara otonom untuk menjaga kesehatan dan efisiensi pertumbuhan tanaman.



Gambar 1. Diagram Alir Sistem Grearn.A.I.

Lokasi dan Periode Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika SMA Yayasan Pendidikan Shafiiyyatul Amaliyyah dan Raz Garden, Medan, Sumatera Utara. Laboratorium digunakan untuk perancangan, perakitan, dan pengujian sistem Grearn.A.I. dalam kondisi terkontrol, sedangkan Raz Garden digunakan untuk uji lapangan guna mengamati respons tanaman pada kondisi nyata. Kegiatan penelitian berlangsung dari Mei hingga Agustus 2025, mencakup tahap pengembangan, eksperimen, dan pengumpulan data.

Sumber Data dan Komponen

Data penelitian diperoleh dari dua sumber utama. Pertama, data eksperimental yang dihasilkan sensor Grearn.A.I., meliputi suhu, kelembapan, intensitas cahaya, kelembapan tanah, dan deteksi kehadiran manusia, yang direkam secara kontinu selama pengujian. Kedua, data sekunder berupa referensi dari jurnal ilmiah, buku teks, dan basis data online digunakan untuk memperkuat landasan teori dan analisis hasil penelitian. Sistem Grearn.A.I. dibangun menggunakan berbagai komponen perangkat keras yang saling terintegrasi untuk mendukung fungsi monitoring dan kontrol otomatis pada rumah kaca cerdas. Komponen utama sistem adalah mikrokontroler ESP32-S3, yang berperan sebagai pusat pemrosesan data sensor dan pengendali aktuator secara real-time. Modul tambahan Sseed Studio XIAO ESP32-S3 CAM digunakan untuk mengambil citra tanaman dan menganalisis kondisi pertumbuhan maupun stres tanaman secara visual berbasis Artificial Intelligence. Seluruh data dari sensor ditampilkan melalui layar sentuh kapasitif ESP32 3.5 inci, yang memuat parameter suhu, kelembapan, pH tanah, intensitas cahaya, serta status sistem. Sumber daya listrik disuplai oleh Power Supply 12V-10A, yang menjamin kestabilan energi bagi seluruh rangkaian. Tiga unit Soil Moisture Sensor V2 berfungsi mengukur tingkat kelembapan tanah, sementara tiga pH Meter memantau tingkat keasaman atau kebasaan media tanam dan air. Sensor BH1750 digunakan untuk mengukur intensitas cahaya matahari, sedangkan DHT22 berfungsi memantau suhu dan kelembapan udara di dalam rumah kaca. Sistem juga dilengkapi Raindrop Sensor untuk mendeteksi curah hujan eksternal dan Water Level Sensor guna memantau ketinggian air pada tangki irigasi. Untuk sistem aktuator, digunakan lima buah servo MG996R sebagai penggerak mekanik pembuka dan penutup atap secara otomatis. Proses irigasi dikendalikan oleh tiga pompa air (Water Pump) yang aktif saat kelembapan tanah rendah, serta Mist Maker yang menghasilkan kabut halus guna menurunkan suhu ketika tanaman mengalami stres panas.

Komponen 4 Channel Relay dan 2 Channel Relay berfungsi sebagai saklar penghubung antara sinyal tegangan rendah dari ESP32-S3 dengan perangkat bertegangan tinggi. Pendinginan tambahan disediakan oleh kipas 12V berukuran 12×12 cm untuk menjaga sirkulasi udara di dalam rumah kaca. Selain itu, sistem dilengkapi dengan sensor deteksi manusia HLK LD-2410 yang bekerja menggunakan gelombang radar untuk memantau kehadiran operator di sekitar sistem. Dua unit Step Down Converter digunakan untuk menurunkan tegangan dari sumber daya utama agar sesuai dengan kebutuhan masing-masing modul. Keseluruhan komponen ini dirancang untuk bekerja secara terpadu, menghasilkan sistem greenhouse cerdas yang efisien, responsif, dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

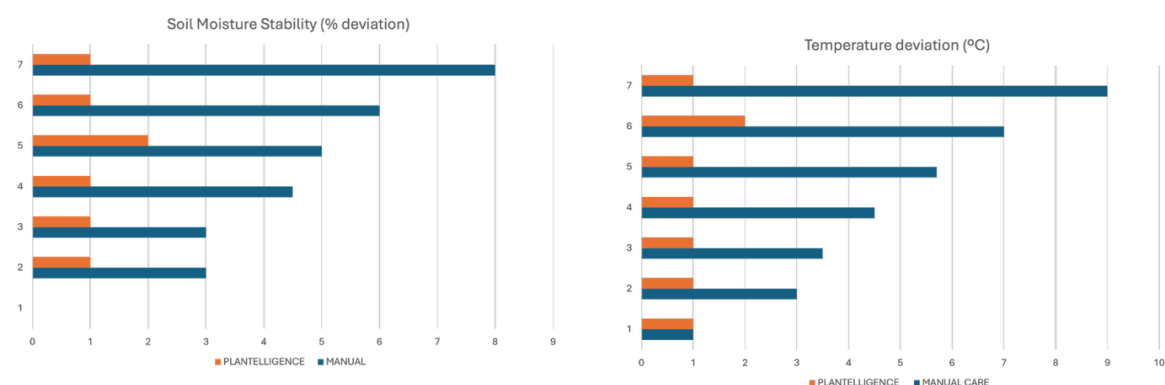
Kalibrasi dan Validasi Sensor

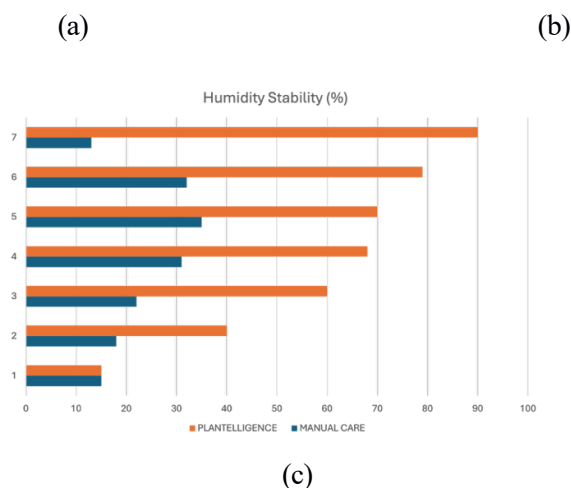
1. Sensor kelembapan tanah dikalibrasi terhadap kadar air gravimetrik untuk memastikan akurasi tinggi, sejalan dengan Agustirandi dkk. (2021) yang memperoleh korelasi kuat (R^2 hingga 0,98).
2. pH meter dikalibrasi harian menggunakan buffer pH 4,0; 7,0; dan 10,0, sesuai Shehata dkk. (2023) yang menunjukkan kalibrasi akurat dan bebas bias.
3. Sensor DHT22 divalidasi dengan termohidrometer, menunjukkan RMSE 1,48 °C dan 3,18% RH serta korelasi kuat ($r = 0,81-0,85$) (Wardani dkk., 2023).
4. Sensor BH1750 dikalibrasi dengan meter lux standar, menunjukkan korelasi tinggi ($R^2 = 0,99$) (Polat, 2022).
5. Sensor tingkat air divalidasi terhadap pengukuran manual dengan hasil konsisten dan presisi tinggi (Demir dkk., 2025).
6. Sensor hujan diuji pada kondisi basah–kering terkontrol dan menunjukkan deteksi andal (Clemens, 2024).

HASIL

Stabilitas Lingkungan

Gambar 3 menunjukkan bahwa suhu dan kelembapan di dalam rumah kaca tetap terjaga dalam rentang optimal dan deviasi minimal (25-30 oC dan 60-75% RH) selama periode pemantauan terus-menerus selama 7 hari. Tingkat stabilitas ini sejalan dengan temuan Wardihani dkk. (2024), yang menunjukkan pengendalian iklim yang efektif melalui sistem IoT berbasis MQTT untuk rumah kaca pintar. Mekanisme pengendalian serupa telah terbukti efektif dalam pengelolaan lingkungan pada sistem hidroponik, memastikan Kesehatan tanaman di bawah kondisi eksternal yang fluktuatif (Attia dkk., 2025). Hasil stabilitas kelembapan lingkungan disajikan pada Gambar 3.

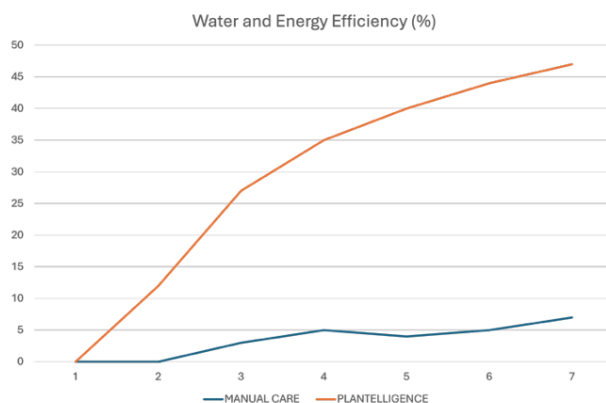




Gambar 3. (a) Stabilitas Kelembaban Tanah dalam 7 hari, (b) Penyimpangan Suhu dalam 7 hari, (c) Stabilitas Kelembaban Udara dalam 7 hari

Efisiensi Air dan Energi

Penggunaan air dalam Grearn.A.I. berkurang hampir 50% dibandingkan dengan irigasi manual, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Efisiensi ini dicapai melalui irigasi presisi berdasarkan umpan balik kelembaban tanah, yang mencegah baik penyiraman berlebihan maupun stres kekeringan. Peningkatan serupa dilaporkan pada sistem hidroponik otomatis, yang menghemat hingga 90% air tanpa mengurangi hasil panen (Attia dkk., 2025). Selain itu, operasi ventilasi dan penyemprotan uap yang dioptimalkan meminimalkan konsumsi energi, sejalan dengan temuan serupa dalam kerangka kerja pertanian hemat energi berbasis IoT (Wardihani dkk., 2024).

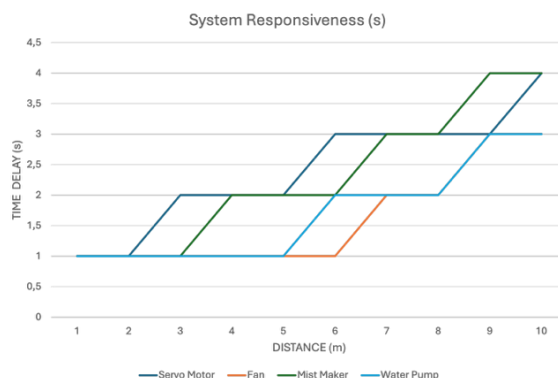


Gambar 4. dalam 7 Hari

Grafik Efisiensi Air

Responsivitas Sistem

Sistem menunjukkan responsivitas yang cepat terhadap kondisi stres. Misalnya, ketika suhu melebihi 35 °C, baik kipas angin maupun pembuat kabut diaktifkan dalam waktu 3-5 detik, memastikan stabilisasi yang cepat. Tingkat kinerja ini mencerminkan kemajuan dalam sistem pemantauan IoT yang didukung A.I, yang menekankan kontrol prediktif dan integrasi sensor multimodal (Hoseinzadeh dkk., 2024). Seperti yang dirangkum dalam Gambar 5, ESP32-S3 memproses masukan sensor dengan keandalan tinggi, membuktikan kesesuaiannya untuk otomatisasi rumah kaca yang berkelanjutan.



Gambar 5. Responsivitas Sistem Grearn.A.I. melalui aplikasi seluler

Indikator Kesehatan dan Pertumbuhan Tanaman

Penilaian kesehatan dan kinerja pertumbuhan tanaman di bawah stres kekeringan (DS) dan penyiraman ulang (RW) dilakukan menggunakan parameter fisiologis non-destruktif dan destruktif. Parameter non-destruktif, yaitu kandungan air tanah (SWC) dan rasio F_v/F_m (efisiensi kuantum maksimum PSII), terbukti sebagai indikator yang sensitif dan andal. Stres kekeringan yang berkepanjangan (T2 dan T3) secara signifikan mengurangi nilai F_v/F_m , mencerminkan penghambatan fotosintesis PSII, sedangkan penyiraman kembali mengembalikannya ke tingkat yang sebanding dengan tanaman yang terairi dengan baik

(WW). Hal ini menyoroti pentingnya parameter tersebut sebagai indikator awal stres fisiologis akibat kekeringan (He et al., 2025). Pertumbuhan tanaman ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pertumbuhan Tanaman dalam 30 Hari

PEMBAHASAN

Sistem Grearn.A.I. terbukti mampu berfungsi secara andal sebagai rumah kaca pintar berbasis kecerdasan buatan (AI) dan *Internet of Things* (IoT) dengan menjaga kestabilan lingkungan mikro (suhu, kelembapan udara, dan kelembapan tanah) dalam rentang optimal, meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 50%, serta merespons perubahan kondisi secara cepat dalam 3–5 detik. Integrasi sensor DHT22, BH1750, sensor kelembapan tanah, pH meter, sensor hujan, dan sensor level air dengan aktuator otomatis seperti kipas, pompa air, mist maker, dan motor servo atap yang

dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32-S3 menghasilkan sistem pemantauan dan pengendalian *real-time* yang efektif. Tanaman yang dibudidayakan menggunakan sistem ini menunjukkan pertumbuhan dan kesehatan lebih baik dibandingkan metode manual, dengan parameter Fv/Fm dan SWC menandakan kemampuan deteksi dini stres kekeringan dan pemulihan cepat melalui irigasi otomatis. Secara keseluruhan, Grearn.A.I. tidak hanya meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian, tetapi juga berpotensi menjadi media pembelajaran interaktif yang mendukung penerapan teknologi AI, IoT, dan sensor pintar dalam pendidikan dan inovasi pertanian berkelanjutan menuju transisi energi dan pangan hijau di era digital.

DAFTAR RUJUKAN

- Agustirandi, B. (2024). Analysis, comparison, calibration, and application of low-cost soil moisture sensors in smart agriculture based on the Internet of Things. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 22(5), 1035–1048.
- Attia, M., Belghar, N. E., Driss, Z., & Soltani, K. (2025). Automated hydroponic system measurement for smart greenhouses in Algeria. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 14(1), 111-130.
- Clemens, C., Jobst, A. E., Radschun, M., Himmel, J., & Kanoun, O. (2024). Signal processing and calibration of a low-cost inductive rain sensor for raindrop detection and precipitation calculation. *Measurement*, 227, 114286.
- Correa-Quiroz, J. J., Toribio-Barrueto, M. A., & Castro-Vargas, C. (2025). IoT System with ESP32 for Smart Drip Irrigation and Climate Monitoring in Greenhouses. *Emerging Science Journal*, 9(3), 1133-1157.
- Demir, F. (2025). A real-time water level and discharge monitoring station. *Applied Sciences*, 15(4), 1910.
- He, J., Goh, K. J., Qin, L., Shen, Y., & Rahardjo, H. (2025). Identifying plant health indicators of five tropical perennials using certain leaf physiological traits during drought stress and re-watering. *Horticulturae*, 11(3), 230.
- Hoseinzadeh, M., & Garcia, D., A. (2024). Ai-driven innovations in greenhouse agriculture: Reanalysis of sustainability and energy efficiency impacts. *Energy Conversion and Management: X*, 24, Article 100701.
- Katharria, A., Rajwar, K., Pant, M., Snasel, V., & Deep, K. (2025). Information Fusion in Smart Agriculture: Machine Learning Applications and Future Research Directions. *Available at SSRN 5187083*.
- Kirci, P., Ozturk, E., & Celik, Y. (2022). A novel approach for monitoring of smart greenhouse and flowerpot parameters and detection of plant growth with sensors. *Agriculture*, 12(10), 1705.
- Mordor Intelligence. (2025). *Smart Greenhouse Market Size, Share, Growth & Industry Analysis (2025 – 2030)*. Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-greenhouse-market>
- Mudrilov, M., Ladeynova, M., Grinberg, M., Balalaeva, I., & Vodeneev, V. (2021). Electrical Signaling of Plants under Abiotic Stressors: Transmission of Stimulus-Specific Information. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 10715(2).
- Nemlaha, E., Štřelec, P., Horák, T., Kováč, S., & Tanuška, P. (2022). Suitability of MQTT and REST communication protocols for AIoT or IIoT devices based on ESP32 S3. In *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software* (pp. 225-233). Cham: Springer International Publishing.
- Polat, M. Y. (2022). An Arduino-based cost effective and portable luxmeter. *Ziraat Mühendisligi*, (377), 19-25.
- Sharma, R. K., Kaur, J., Feng, G., Huang, Y., Kumar, C., Wang, Y., ... & Dhillon, J. (2025).

Maize and soybean yield prediction using machine learning methods: a systematic literature review. *Discover Agriculture*, 3(1), 64.

- Shehata, A. B., AlAskar, A. R., Aldosari, R. A., & AlMutairi, F. R. (2023). Characterization of the calibration results of glass electrode pH-meters using buffer solutions certified by different producers. *European Journal of Applied Sciences*, 11(6), 14–22.
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, 24(8), 2647.
- Sukhov, V., & Sukhova, E. (2021). Electrical Signals, Plant Tolerance to Actions of Stressors, and Programmed Cell Death: Is Interaction Possible?. *Plants*, 10, 1704(20).
- Tempelaere, A., Phan, H. M., Van De Looverbosch, T., Verboven, P., & Nicolai, B. (2023). Non-destructive internal disorder segmentation in pear fruit by X-ray radiography and AI. *Computers and Electronics in Agriculture*, 212, 108142.
- Wang, Y., Zhang, Q., Yu, F., Zhang, N., Zhang, X., Li, Y., & Zhang, J. (2024). Progress in research on deep learning-based crop yield prediction. *Agronomy*, 14(10), 2264.
- Wardani, I. K., Ichniarsyah, A. N., Telaumbanua, M., Priyonggo, B., Fil'aini, R., Mufidah, Z., & Dewangga, D. A. (2023). The feasibility study: Accuracy and precision of DHT22 in measuring the temperature and humidity in the greenhouse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1230(1), Article 012146.
- Wardihani, E. D., Purwanto, P., & Sari, D. (2024). Monitoring and controlling of IoT-based greenhouse parameters with the MQTT protocol. *JNTETI*, 13(1), 38-43.