Sistem Monitoring NPK Tanah Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Tanaman Cabai

Jefri Lianda[1*], Zulkifli[2], Adam[3], Selfy Apriyanti[4], Marzuarman[5], Kamaluddin Yusuf[6]
[1-5]Politeknik Negeri Bengkalis, Indonesia
[6]PT. Sinergie Bangun Internusa, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : *jefri@polbeng.ac.id*

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada

Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026

Page: 6089-6096

DOI:

https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4048

Article History:

Received: Agustus 15, 2026

Revised: September 03, 2026

Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract : *This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based system for real-time monitoring of soil nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in chilli cultivation. The system integrates a soil NPK sensor, an ESP32 microcontroller, a communication network and an IoT monitoring interface. Testing involved four measurements comparing sensor readings with a reference NPK meter. Results indicated nitrogen concentrations of 5–6 mg/kg, phosphorus concentrations of 7–9 mg/kg and potassium concentrations of 16–20 mg/kg. Accuracy analysis yielded Mean Absolute Error (MAE) values of 0.25 mg/kg, 1.00 mg/kg and 1.75 mg/kg for N, P and K, respectively. Corresponding Root Mean Square Error (RMSE) values were 0.50 mg/kg, 1.22 mg/kg and 1.80 mg/kg. An average Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 8.06% indicated relatively low measurement error. The system enables ongoing real-time soil NPK monitoring and historical data storage. These findings suggest that the system can support more effective, efficient and informed decisions on soil nutrient management in chilli cultivation.*

Keywords: *ESP32; IoT; NPK Sensor; RMSE.*

Abstrak : Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) tanah berbasis Internet of Things (IoT) pada tanaman cabai secara real time. Sistem dirancang menggunakan sensor NPK tanah, mikrokontroler ESP32, jaringan komunikasi, dan antarmuka pemantauan berbasis IoT. Pengujian dilakukan melalui empat kali pengukuran dengan membandingkan hasil sensor terhadap alat ukur NPK referensi. Hasil pengujian menunjukkan kadar nitrogen sebesar 5–6 mg/kg, fosfor 7–9 mg/kg, dan kalium 16–20 mg/kg. Analisis akurasi menghasilkan nilai Mean Absolute Error (MAE) masing-masing sebesar 0,25 mg/kg, 1,00 mg/kg, dan 1,75 mg/kg untuk N, P, dan K. Nilai Root Mean Square Error (RMSE) berturut-turut sebesar 0,50 mg/kg, 1,22 mg/kg, dan 1,80 mg/kg. Rata-rata Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 8,06% menunjukkan tingkat kesalahan pengukuran yang relatif rendah. Sistem mampu memantau kandungan NPK tanah secara real time serta menyimpan data historis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat mendukung pengambilan keputusan pengelolaan nutrisi tanah secara lebih efektif dan efisien dalam budidaya tanaman cabai.

Kata Kunci : ESP32; IoT; Sensor NPK; RMSE

PENDAHULUAN

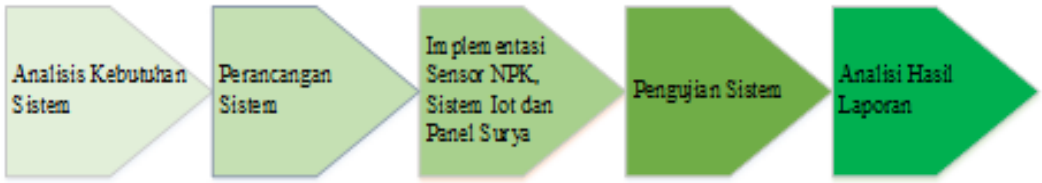
Tanaman cabai (*Capsicum annuum L.*) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak dibudidayakan oleh masyarakat. Produktivitas tanaman cabai sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Tanah yang memiliki kandungan nutrisi yang sesuai dapat mendukung perkembangan akar, pertumbuhan vegetatif, pembentukan bunga, hingga produksi buah. Sebaliknya, ketidakseimbangan unsur hara dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi tidak optimal, menurunkan produktivitas, serta meningkatkan risiko gangguan fisiologis pada tanaman. Oleh karena itu, pemantauan kondisi kesuburan tanah secara berkala menjadi salah satu aspek penting dalam penerapan budidaya tanaman cabai yang efektif dan efisien. Perkembangan teknologi di bidang pertanian saat ini semakin pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan pangan dan tuntutan efisiensi dalam proses budidaya tanaman. Salah satu teknologi yang mulai banyak diterapkan adalah *smart farming* berbasis IoT (Adriman et al., 2025; Mustaffa et al., 2024; Gunawan et al., 2022; Mallari et al., 2022). Teknologi ini memungkinkan proses pemantauan dan pengelolaan pertanian dilakukan secara otomatis dan *real time* sehingga dapat membantu petani dalam meningkatkan produktivitas serta mengurangi risiko kegagalan panen (Melvin et al., 2025; Hasyer et al., 2023).

Produktivitas tanaman cabai sangat dipengaruhi oleh tingkat kesuburan tanah, terutama kandungan unsur hara nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Ketidakseimbangan unsur hara dalam tanah dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman terganggu, menurunkan kualitas hasil panen, bahkan menyebabkan gagal panen (Azman et al., 2023). Pada umumnya, pemantauan kesuburan tanah masih dilakukan secara manual sehingga kurang efisien dan membutuhkan waktu yang cukup lama. Penerapan sensor NPK berbasis IoT dapat menjadi solusi dalam memantau kondisi kesuburan tanah secara otomatis dan real time (Pratama et al., 2024). Sensor NPK mampu mendeteksi kandungan unsur hara tanah sehingga data yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan pemupukan yang lebih tepat. Dengan adanya sistem monitoring berbasis IoT, data kondisi tanah dapat dikirim dan dipantau melalui perangkat seperti smartphone atau komputer secara jarak jauh (Heliana et al., 2024).

Penerapan smart farming memberikan kemudahan bagi petani dalam memantau kondisi lahan secara real time sehingga keputusan pengelolaan tanaman dapat dilakukan secara lebih cepat, akurat, dan efisien. Teknologi berbasis IoT memungkinkan pemantauan otomatis terhadap parameter penting seperti kelembapan tanah, suhu lingkungan, serta kandungan nutrisi yang memengaruhi pertumbuhan tanaman (Pramudita et al., 2022). Dengan adanya sistem sensor, proses pengawasan tidak lagi dilakukan secara manual sehingga mengurangi risiko kesalahan dan meningkatkan efektivitas pengelolaan lahan pertanian (Saez et al., 2024). ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT karena memiliki fitur Wi-Fi dan Bluetooth yang terintegrasi. ESP32 mampu memproses data dari sensor kemudian mengirimkannya ke server atau aplikasi monitoring melalui jaringan internet (Lianda et al., 2024). Keunggulan ESP32 dibandingkan mikrokontroler lainnya adalah konsumsi daya yang relatif rendah, kemampuan pemrosesan data yang baik, serta mendukung berbagai jenis sensor dan modul komunikasi. Dalam penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat pengendali sistem yang bertugas membaca data dari sensor NPK, mengolah data, dan mengirimkan informasi ke platform monitoring IoT.

METODE PENELITIAN

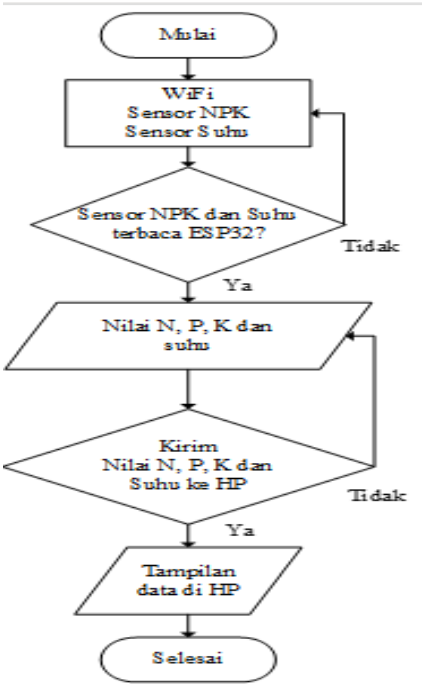
Tahapan penelitian disusun secara terstruktur dan sistematis sesuai dengan alur yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian
Sumber: Dokumen Pribadi

Tahapan penelitian diawali dengan analisis kebutuhan untuk mengidentifikasi parameter kesuburan tanah tanaman cabai, meliputi kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Pada tahap ini juga ditentukan kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak sistem smart farming berbasis IoT melalui studi literatur terkait sensor NPK, komunikasi data, mikrokontroler ESP32, dan panel surya. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem yang mencakup desain arsitektur smart farming, pemilihan sensor NPK, perancangan rangkaian elektronik berbasis ESP32, serta integrasi panel surya dan baterai sebagai sumber energi. Selain itu, dirancang sistem komunikasi IoT agar data hasil pengukuran dapat dikirim dan dimonitor secara real time melalui aplikasi atau dashboard monitoring. Pada tahap implementasi dilakukan perakitan dan integrasi seluruh komponen sistem, meliputi sensor NPK, mikrokontroler, modul komunikasi IoT, panel surya, dan baterai. Sistem kemudian diprogram agar mampu membaca, mengolah, dan mengirimkan data monitoring secara otomatis melalui jaringan internet.

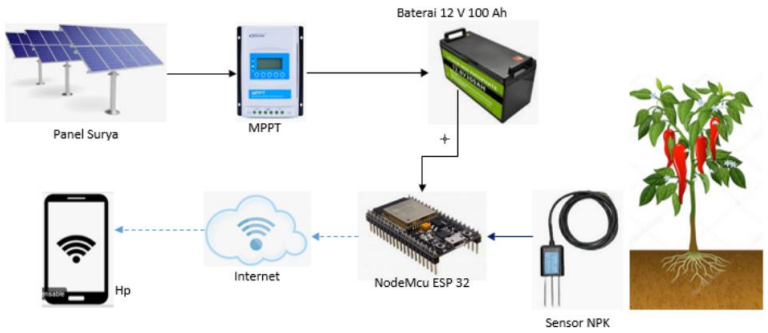
Tahap pengujian dan evaluasi dilakukan untuk mengetahui akurasi sensor NPK, kestabilan pengiriman data, efisiensi panel surya, dan kinerja sistem secara keseluruhan. Data hasil pengujian dianalisis dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem. Tahap terakhir adalah penyusunan laporan penelitian sebagai dokumentasi hasil pengembangan sistem *smart farming* berbasis IoT pada tanaman cabai. Model penelitian ini terdiri atas empat bagian utama, yaitu input, proses, output, dan hasil penelitian. Pada tahap input, komponen yang digunakan meliputi sensor NPK untuk mengukur unsur hara tanah, mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali sistem, modul IoT/WiFi untuk komunikasi data, panel surya dan baterai sebagai sumber energi, serta data unsur hara tanah tanaman cabai sebagai objek penelitian.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian
Sumber: Dokumen Pribadi

Tahap proses dimulai dengan analisis kebutuhan sistem untuk menentukan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem smart farming berbasis IoT, integrasi sensor NPK dengan mikrokontroler ESP32, serta pemasangan panel surya sebagai sumber energi mandiri. Sistem kemudian membaca kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) pada tanah, lalu mengirimkan data melalui internet sehingga dapat dimonitor secara real time menggunakan smartphone atau laptop. Tahap berikutnya meliputi pengujian akurasi sensor, kestabilan sistem, dan keandalan pengiriman data. Output penelitian berupa sistem monitoring kesuburan tanah berbasis IoT yang mampu menampilkan data N, P, dan K secara real time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor NPK, ESP32, teknologi IoT, dan panel surya mampu memantau kesuburan tanah tanaman cabai secara efektif dan membantu petani menentukan pemupukan yang tepat.

Rancangan penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem dengan metode Research and Development (R&D). Penelitian diawali dengan analisis kebutuhan sistem smart farming berbasis IoT untuk monitoring kesuburan tanah tanaman cabai. Tahap selanjutnya meliputi perancangan perangkat keras berupa sensor NPK, mikrokontroler ESP32, dan panel surya, serta perangkat lunak untuk pengolahan data. Sistem kemudian diimplementasikan dengan mengintegrasikan seluruh komponen agar mampu melakukan monitoring secara real time. Tahap akhir dilakukan pengujian akurasi sensor, kestabilan komunikasi data, dan analisis hasil untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem yang dikembangkan.

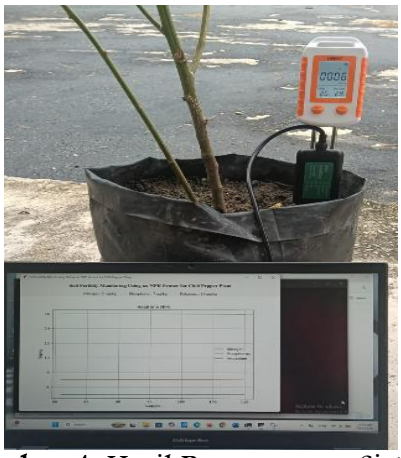


Gambar 3. Rancangan *Hardware*
Sumber: Dokumen Pribadi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan Sistem

Penelitian ini menghasilkan prototipe sistem monitoring kesuburan tanah tanaman cabai berbasis Internet of Things (IoT) yang mengintegrasikan sensor NPK, mikrokontroler ESP32, jaringan internet, dan panel surya sebagai sumber energi. Sistem dirancang untuk melakukan pengukuran kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) pada tanah secara berkala. ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendalian yang menerima data dari sensor NPK, mengolah hasil pembacaan, dan mengirimkan data melalui jaringan internet sehingga informasi kondisi tanah dapat dipantau secara *real time* menggunakan perangkat smartphone. Gambar 4 menunjukan hasil perancangan sistem monitoring kandungan NPK pada tanaman cabe.



Gambar 4. Hasil Perancangan Sistem
Sumber: Dokumen Pribadi

Hasil Pengujian Sensor NPK

Pengujian sensor NPK dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur NPK yang digunakan sebagai alat ukur pembanding. Pengujian dilakukan sebanyak empat kali terhadap parameter nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

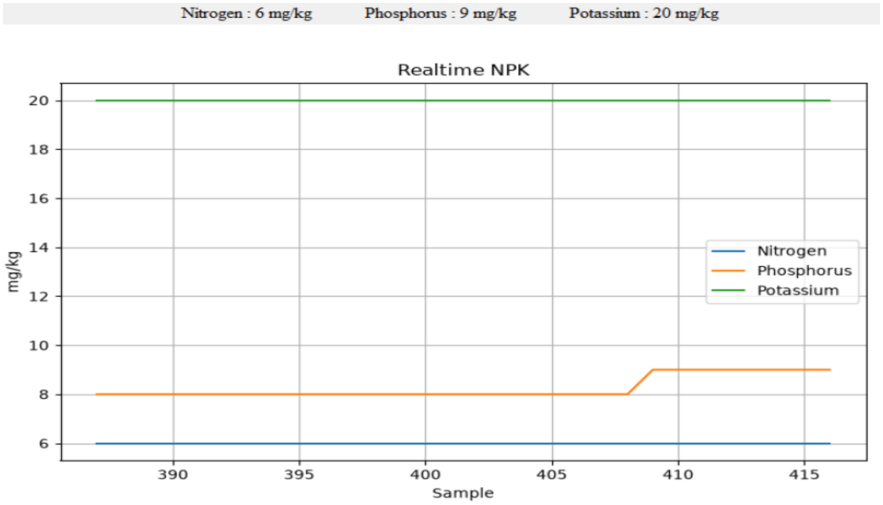
Tabel 1. Perbandingan hasil pengukuran sensor NPK dan alat ukur referensi

No.	Sensor NPK (mg/kg)			Alat Ukur NPK (mg/kg)		
	N	P	K	N	P	K
1	6	8	20	6	9	22
2	6	9	20	6	9	22
3	6	8	20	5	10	22
4	5	7	16	5	8	17

Sumber: Dokumen Pribadi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai nitrogen yang terbaca oleh sensor berada pada rentang 5–6 mg/kg, sedangkan alat ukur referensi menghasilkan nilai 5–6 mg/kg. Untuk parameter fosfor, sensor menghasilkan nilai 7–9 mg/kg, sedangkan alat ukur referensi menghasilkan nilai 8–10 mg/kg. Sementara itu, nilai kalium yang terbaca oleh sensor berada pada rentang 16–20 mg/kg, sedangkan alat ukur referensi menghasilkan nilai 17–22 mg/kg. Perbedaan nilai antara sensor dan alat ukur referensi menunjukkan adanya deviasi hasil pengukuran. Deviasi tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik sensor, kondisi tanah, homogenitas sampel, posisi sensor pada tanah, serta karakteristik alat ukur yang digunakan sebagai pembanding. Meskipun demikian, pola perubahan nilai yang dihasilkan sensor relatif mengikuti hasil pengukuran alat referensi, terutama pada parameter nitrogen.

Untuk mengetahui tingkat kesalahan pengukuran sensor NPK, dilakukan analisis menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). MAE digunakan untuk mengetahui rata-rata besarnya kesalahan absolut antara hasil pengukuran sensor dan alat referensi, sedangkan RMSE memberikan gambaran mengenai besarnya kesalahan dengan memberikan bobot lebih besar terhadap kesalahan yang lebih tinggi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai MAE untuk parameter nitrogen sebesar 0,25 mg/kg, fosfor sebesar 1,00 mg/kg, dan kalium sebesar 1,75 mg/kg. Sementara itu, nilai RMSE untuk nitrogen sebesar 0,50 mg/kg, fosfor sebesar 1,22 mg/kg, dan kalium sebesar 1,80 mg/kg.



Gambar 5. Grafik monitoring kandungan NPK
Sumber: Dokumen Pribadi

Gambar 5 menunjukkan hasil pembacaan sensor terhadap kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium pada tanah. Berdasarkan grafik, kandungan nitrogen terukur sebesar 6 mg/kg dan relatif stabil selama proses pengamatan. Kandungan kalium juga menunjukkan nilai yang konstan sebesar 20 mg/kg. Sementara itu, kandungan fosfor pada awal pengamatan berada pada nilai 8 mg/kg dan mengalami peningkatan menjadi 9 mg/kg pada sekitar sampel ke-408, kemudian kembali stabil hingga akhir pengamatan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis sensor NPK mampu membaca dan menampilkan perubahan kandungan unsur hara tanah secara real-time, sehingga dapat digunakan untuk mendukung pemantauan kondisi kesuburan tanah pada tanaman cabai.

Tabel 2. Hasil analisis kesalahan pengukuran sensor NPK

Parameter	MAE (mg/kg)	RMSE (mg/kg)
Nitrogen (N)	0,25	0,50
Fosfor (P)	1,00	1,22
Kalium (K)	1,75	1,80

Sumber: Dokumen Pribadi

Berdasarkan Tabel 2, parameter nitrogen memiliki nilai kesalahan paling rendah dibandingkan parameter lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor nitrogen paling mendekati alat ukur referensi. Parameter fosfor memiliki tingkat kesalahan yang lebih besar, sedangkan parameter kalium menunjukkan nilai MAE dan RMSE paling tinggi. Meskipun demikian, selisih tersebut masih relatif kecil dalam konteks pengujian awal dan menunjukkan bahwa sensor dapat digunakan sebagai bagian dari sistem monitoring NPK, dengan catatan diperlukan proses kalibrasi lebih lanjut apabila sistem akan digunakan untuk pengukuran yang lebih presisi. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa RMSE pada seluruh parameter lebih besar daripada MAE. Kondisi tersebut menunjukkan adanya beberapa pengukuran yang memiliki selisih lebih besar terhadap alat referensi, khususnya pada parameter fosfor dan kalium. Oleh karena itu, peningkatan akurasi sistem dapat dilakukan melalui kalibrasi sensor menggunakan lebih banyak sampel tanah dan pengujian pada kondisi tanah yang berbeda.

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, sistem yang dikembangkan telah menunjukkan kemampuan untuk mengintegrasikan sensor NPK dengan ESP32 dan teknologi IoT untuk memperoleh informasi kandungan unsur hara tanah. Hasil pengujian terhadap alat referensi menunjukkan bahwa sensor mampu menghasilkan nilai N, P, dan K dengan pola yang relatif mendekati hasil pengukuran alat pembanding. Nilai MAE dan RMSE yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat kesalahan pengukuran yang perlu diperhatikan, tetapi sensor memiliki potensi untuk digunakan dalam sistem monitoring kondisi tanah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) tanah berbasis Internet of Things (IoT) pada tanaman cabai. Sistem mampu membaca dan menampilkan data kandungan NPK secara real time. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kandungan nitrogen relatif stabil pada 6 mg/kg dan kalium pada 20 mg/kg, sedangkan fosfor mengalami peningkatan dari 8 mg/kg menjadi 9 mg/kg pada sekitar sampel ke-408 sebelum kembali stabil. Hasil pengujian menghasilkan nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,25 mg/kg untuk nitrogen, 1,00 mg/kg untuk fosfor, dan 1,75 mg/kg untuk kalium. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan kandungan NPK tanah dengan tingkat kesalahan pengukuran yang berbeda pada setiap unsur, sehingga berpotensi mendukung pemantauan kondisi hara tanah secara lebih praktis dan efisien.

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan kalibrasi sensor dengan jumlah sampel yang lebih banyak dan karakteristik tanah yang beragam untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Pengembangan sistem juga perlu mencakup integrasi sensor pH, kelembapan, dan suhu tanah serta penambahan fitur penyimpanan data historis dan notifikasi otomatis. Bagi praktisi pertanian, sistem ini dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu pemantauan unsur hara tanah untuk mendukung pengambilan keputusan pemupukan tanaman cabai. Dari sisi kebijakan, hasil penelitian ini dapat menjadi pertimbangan dalam pengembangan program digitalisasi pertanian melalui pemanfaatan teknologi IoT untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan pertanian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih dan apresiasi kepada P3M Politeknik Negeri Bengkalis atas dukungan dan kepercayaan melalui Dana PNBP Penelitian Tahun 2026. Dukungan tersebut menjadi motivasi bagi penulis dalam meningkatkan kualitas penelitian dan menghasilkan inovasi yang bermanfaat bagi masyarakat. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada PT. Sinergie Bangun Internusa atas dukungan, kerja sama, dan kolaborasi yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Semoga kerja sama yang telah terjalin dapat terus berlanjut dan memberikan kontribusi positif bagi kemajuan ilmu pengetahuan, teknologi, masyarakat, dan Politeknik Negeri Bengkalis.

DAFTAR PUSTAKA

Adriman, R., Fitria, M., Rahmadi, T. R., & Afdhal, A. (2025). Biopesticides spraying system for thrips pest control on chili plants using Internet of Things. *In 2025 International Conference on Computer Sciences, Engineering, and Technology Innovation (ICoCSETI)* (pp. 950–955). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICoCSETI63724.2025.11019078

Al-Aziz, F. N., & Suryani, E. (2024). System dynamics modeling to increase the productivity of chili pepper through good agricultural practices in East Java. *Procedia Computer Science*, 234, 733–740. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.03.094

Azhan, N. H., Azhariddin, N. M., & Ismail, M. B. (2023). Development of solar-powered IoT smart irrigation system for chili crops cultivation in greenhouse. *In 2023 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)* (pp. 100–105). *IEEE.* https://doi.org/10.1109/ICE2T58637.2023.10540533

Azman, M. A. D. B., Jumaat, S. A., Johar, M. A., & Abu Bakar, U. S. (2023). Development of automated nutrient composition control for fertigation system using IoT application. *In 2023 IEEE 3rd International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)* (pp. 179–184). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICPEA56918.2023.10093152

Gunawan, T. S., Kamarudin, N. N., Kartiwi, M., & Effendi, M. R. (2022). Automatic watering system for smart agriculture using ESP32 platform. *In 2022 IEEE 8th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)* (pp. 185–189). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSIMA55652.2022.9928950

Hasyer, M. A., et al. (2023). IoT-powered pest management system for chili plants: Analyzing the effects of various light spectrum towards pest and plant health. *In 2023 IEEE Asia-Pacific*

Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE) (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/CSDE59766.2023.10487659

Heliana, B., Samodra, B., & Solang, M. A. (2024). Design optimization of nutrient and water application in chili plant based on living lab in Parepare City. *In 2024 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)* (pp. 1–7). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICISS62896.2024.10751386

Lianda, J., Agustiawan, A., Adam, A., Custer, J., Antika, R., & Marzuarman. (2026). A real time IoT monitoring and safety cutoff system for electric vehicle batteries using the BLYNK platform. *Jurnal Teknik Informatika*, 19(1), 52–61. https://doi.org/10.15408/jti.v19i1.47098

Mallari, A. R. D., Tabanera, C. M. T., & Balbin, J. R. (2022). Implementation of smart greenhouse system with mobile application for vegetative plants in urban environment setting. *In 2022 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/TENSYMP54529.2022.9864451

Melvin, J. M., Nor, D. M., Saputri, F. R., Chua, K. L., Ali, A. R., & Abdallah, F. S. (2025). IntelliGrow: Image processing with IoT alert for pests and diseases classification in chili plant. *In 2025 4th International Conference on Smart Cities, Automation & Intelligent Computing Systems (ICON-SONICS)* (pp. 69–73)

Mustaffa, M. R., & Rizal, N. S. N. (2024). IoT-based monitoring of chili plant growth. *In 2024 6th International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS) (pp. 1–6). IEEE.* https://doi.org/10.1109/ICORIS63540.2024.10903908

Pramudita, B. A., Mahdika, M. I. F., Putri, N. K. R. P., Hartaman, A., & Rodiana, I. M. (2022). Monitoring and controlling system of chili aquaponics cultivation based on the Internet of Things. *2022 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob),* 1–6. https://doi.org/10.1109/APWiMob56856.2022.10014320

Pratama, R. P., Fakhurroja, H., Bangkit, H., & Pramesti, D. (2024). Prediction of NPK fertilizer in chili plants using SARIMA model. *In 2024 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICISS62896.2024.10751445

Rao, C. K., Sahoo, S. K., & Yanine, F. F. (2026). A review of IoT enabled intelligent smart energy management for photovoltaic power forecasting and generation. *Unconventional Resources,* 9, 100279. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100279

Saez Rojas, J. I., et al. (2024). An IoT-based prototype for optimizing agricultural irrigation: A case study in the Biobío region of Chile. *Procedia Computer Science,* 238, 1009–1014

Sania, H., Fevria, R., Vauzia, & Razak, A. (2024). Effect of sensor and based NPK on the growth of pakcoy (Brassica rapa L.) cultivation hydroponic. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(1), 807–813. https://doi.org/10.29303/jbt.v25i1.8514

Sinchai, A., Ardkaew, C., & Jaiyen, T. (2026). Low–cost IoT–enabled organic pH control system for smart aquaponic production in urban agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 242, 111255. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111255

Suwandi, F. A., Fakhrurroja, H., & Pramesti, D. (2025). Transforming chili agriculture with interactive IoT dashboards using a design thinking approach. *In 2025 IEEE International Conference on Artificial Intelligence for Learning and Optimization (ICoAILO)* (pp. 269–274). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICoAILO66760.2025.11156015