

Sistem Distribusi Pengairan dan Monitoring Kelembapan Tanah pada Tanaman Cabai Menggunakan Teknologi Internet of Things

Irrigation Distribution System and Soil Moisture Monitoring in Chili Plants Using Internet of Things Technology

Supria¹, Wahyat², Tengku Musri³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Informatika, Politeknik Negeri Bengkalis

E-mail: ¹phiya@polbeng.ac.id, ²wahyat@polbeng.ac.id, ³musri@polbeng.ac.id

Received 20 February 2025; Revised 29 April 2025; Accepted 30 April 2025

Abstrak - Penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem pertanian modern dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan air, terutama dalam budidaya tanaman cabai yang membutuhkan kelembapan tanah optimal. Sistem pengairan tetes yang dikombinasikan dengan monitoring kelembapan tanah berbasis IoT memungkinkan otomatisasi pengairan berdasarkan kondisi real-time dari tanah, sehingga mengurangi pemborosan air serta menjaga produktivitas tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem distribusi pengairan tetes otomatis serta monitoring kelembapan tanah pada tanaman cabai dengan memanfaatkan sensor kelembapan tanah yang diintegrasikan dengan platform IoT untuk kontrol dan pemantauan jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengatur irigasi secara otomatis berdasarkan data kelembapan tanah, yang diukur dalam waktu nyata melalui sensor dan dikirimkan ke pengguna melalui aplikasi berbasis web. Implementasi sistem ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 30% dibandingkan dengan metode irigasi konvensional, serta menjaga kelembapan tanah pada tingkat yang optimal untuk pertumbuhan tanaman cabai.

Kata kunci: Internet of Things (IoT), sistem pengairan tetes, kelembapan tanah, tanaman cabai, otomatisasi irigasi

Abstract - The use of Internet of Things (IoT) technology in modern agricultural systems can improve the efficiency and effectiveness of water management, especially in the cultivation of chili plants that require optimal soil moisture. A drip irrigation system combined with IoT-based soil moisture monitoring enables irrigation automation based on real-time soil conditions, thereby reducing water wastage and maintaining crop productivity. This research aims to design and implement an automatic drip irrigation distribution system and soil moisture monitoring in chili plants by utilizing soil moisture sensors integrated with an IoT platform for remote control and monitoring. The test results show that the system is able to automatically regulate irrigation based on soil moisture data, which is measured in real time through sensors and sent to users through a web-based application. The implementation of this system can increase water use efficiency by up to 30% compared to conventional irrigation methods, as well as maintain soil moisture at an optimal level for chili plant growth.

Keywords: Internet of Things (IoT), drip irrigation system, soil moisture, chili plants, irrigation automation

1. PENDAHULUAN

Pertanian merupakan salah satu sektor yang penting dalam perekonomian, namun seringkali menghadapi tantangan dalam pengelolaan air, khususnya di daerah dengan sumber

daya air yang terbatas. Pengairan tanaman cabai secara berlebihan atau kekurangan dapat mengakibatkan penurunan produktivitas tanaman. Oleh karena itu, sistem pengairan tetes menjadi solusi yang efektif dalam mengoptimalkan penggunaan air. Teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan kemampuan untuk memantau dan mengontrol irigasi secara otomatis berdasarkan kondisi lingkungan aktual, seperti kelembapan tanah [1,2,3,4].

Tanaman cabai merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak dibudidayakan di Indonesia, termasuk di Kabupaten Bengkalis. Berdasarkan data dari Dinas Pertanian Kabupaten Bengkalis, produksi cabai di wilayah ini dalam beberapa tahun terakhir mengalami fluktuasi. Pada tahun 2022, total produksi cabai merah di Kabupaten Bengkalis mencapai sekitar 1.200 ton per tahun. Namun, tingkat produksi ini masih belum mencukupi kebutuhan lokal, terutama saat musim paceklik ketika harga cabai bisa melonjak signifikan.

Menurut Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Bengkalis, tingkat konsumsi cabai oleh masyarakat Bengkalis diperkirakan mencapai 2.500 ton per tahun, yang menunjukkan adanya defisit produksi sekitar 1.300 ton. Defisit ini umumnya ditutupi dengan pasokan cabai dari daerah lain, seperti dari Sumatera Barat dan Jambi, yang menyebabkan ketergantungan pada pasokan eksternal serta fluktuasi harga yang tidak stabil di pasar lokal.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas sistem irigasi berbasis IoT dalam mengoptimalkan penggunaan air. Pengembangan sistem irigasi otomatis berbasis IoT yang mampu mengurangi penggunaan air hingga 40% pada tanaman hortikultura dengan memanfaatkan data real-time kelembapan tanah [5,6,7,8,9]. Arsitektur berbasis IoT yang menggunakan sensor tanah untuk memantau kondisi lingkungan pertanian, yang kemudian diintegrasikan dengan pengendalian irigasi otomatis [7,10,11].

Penggunaan IoT dalam sistem irigasi tetes dapat meningkatkan hasil tanaman dan mengurangi biaya produksi, dengan tingkat penghematan air mencapai 30% [12,13]. Solusi IoT juga dikembangkan dengan merancang sistem irigasi cerdas untuk lahan pertanian yang memungkinkan pemantauan jarak jauh dan kontrol otomatis melalui aplikasi berbasis web, sehingga memungkinkan petani untuk mengontrol irigasi tanpa harus berada di lokasi [14,15].

Penggunaan sistem irigasi yang efisien, seperti pengairan tetes berbasis IoT yang dibahas dalam penelitian ini, dapat membantu meningkatkan produktivitas tanaman cabai. Dengan optimasi pengelolaan air, kelembapan tanah dapat dijaga pada tingkat yang ideal untuk pertumbuhan tanaman cabai, sehingga diharapkan mampu meningkatkan hasil panen secara signifikan. Jika sistem ini diimplementasikan pada skala luas di Kabupaten Bengkalis, potensi produksi cabai lokal dapat meningkat hingga 20-30%, yang dapat berkontribusi dalam mengurangi defisit produksi serta meningkatkan ketahanan pangan lokal.

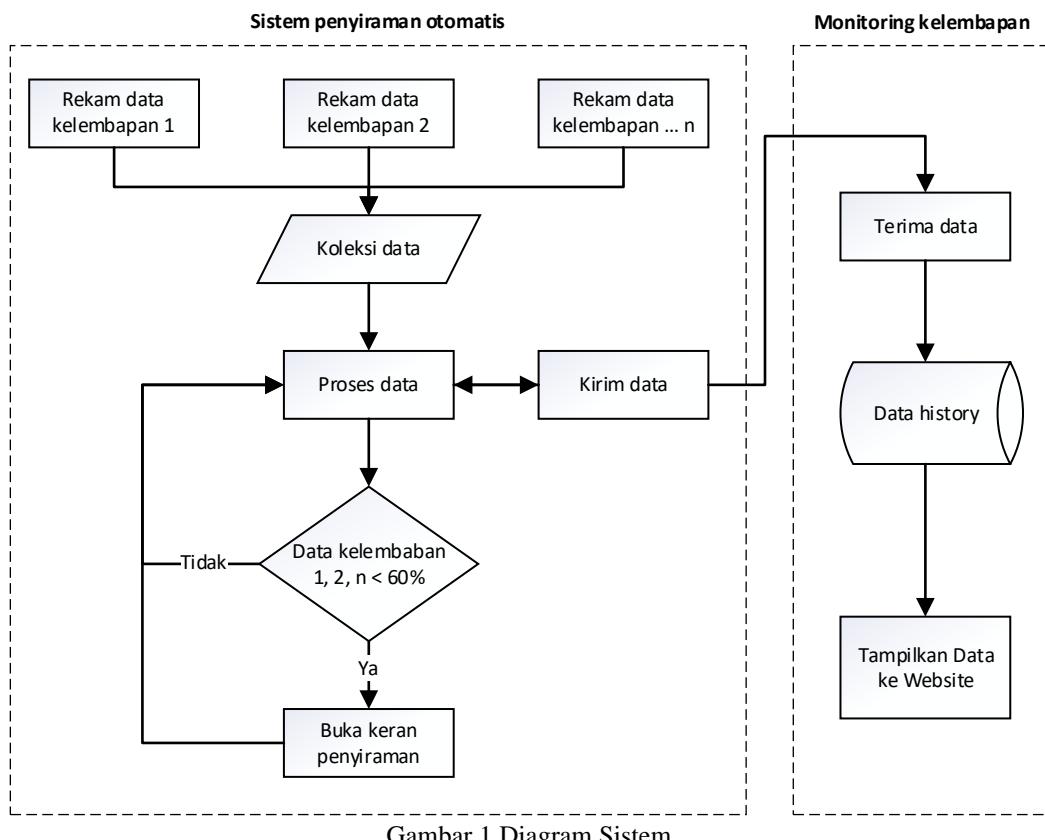
Dari permasalahan diatas, maka diusulkan Sistem Distribusi Pengairan dan Monitoring Kelembapan Tanah pada Tanaman Cabai Menggunakan Teknologi Internet of Things. Dengan adanya penerapan teknologi IoT pada sistem irigasi tetes di tanaman cabai, diharapkan dapat memberikan solusi dalam mengatasi permasalahan irigasi di Kabupaten Bengkalis yang saat ini menghadapi tantangan dalam pemenuhan kebutuhan air pertanian yang efisien dan berkelanjutan. Penerapan solusi irigasi cerdas ini tidak hanya bertujuan untuk menghemat penggunaan air, tetapi juga untuk menjaga stabilitas kelembapan tanah sehingga pertumbuhan tanaman dapat dioptimalkan, mengurangi pemborosan sumber daya, dan meningkatkan hasil pertanian.

Penelitian ini mengusulkan kebaruan dalam tiga aspek utama yaitu implementasi langsung sistem irigasi tetes otomatis berbasis IoT pada lahan tanaman cabai di Kabupaten Bengkalis dengan pengukuran multi-titik kelembapan tanah secara real-time, sehingga mencerminkan kebutuhan aktual di berbagai zona lahan. Integrasi sistem monitoring dan pengendalian berbasis aplikasi web/mobile yang dapat menampilkan data grafik, mengatur ambang batas kelembapan, dan mengontrol pompa secara manual maupun otomatis. Fokus pada efisiensi penggunaan air di wilayah dengan potensi kekeringan musiman dan keterbatasan pasokan air, sehingga lebih sesuai untuk petani kecil di daerah pesisir seperti Kabupaten

Bengkalis. Dengan pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya membuktikan keandalan teknologi IoT dalam mengelola irigasi, tetapi juga memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan produktivitas pertanian dan efisiensi sumber daya air di tingkat lokal.

2. METODE PENELITIAN

Terdapat beberapa tahapan pada sistem monitoring dan distribusi pengairan pada tanaman cabai menggunakan teknologi internet of things yaitu sistem penyiraman otomatis dan sistem monitoring tingkat kelembaban. Adapun tahapan sistem yang diusulkan dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

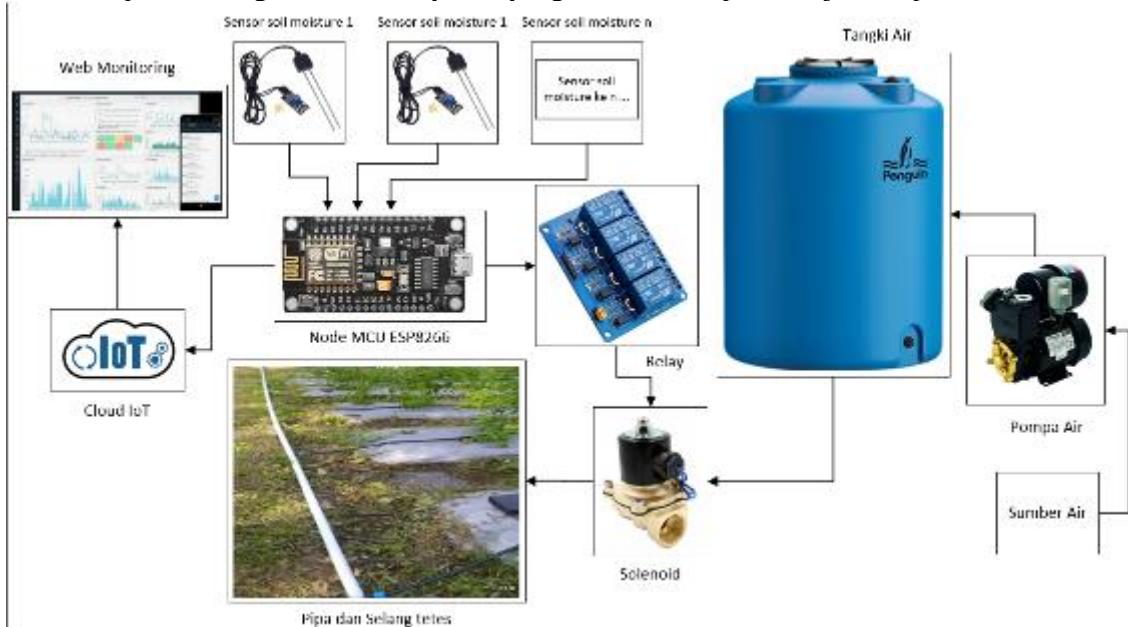


Gambar 1 Diagram Sistem

Arsitektur sistem terdiri dari komponen IoT yang saling terhubung untuk mengelola irigasi dan pemantauan kelembaban tanah. Sensor Kelembaban Tanah (Soil Moisture Sensor) ditempatkan di berbagai titik di lahan cabai untuk mengukur tingkat kelembaban tanah secara real-time. Sensor kelembaban terhubung ke microcontroller yang akan menerima dan mengirimkan data ke server cloud. IoT Gateway digunakan untuk menghubungkan perangkat keras (sensor dan microcontroller) ke internet dan mengirimkan data ke cloud. Database Server digunakan sebagai tempat penyimpanan data yang dikirimkan dari perangkat IoT. Server ini menyimpan data kelembaban tanah, serta status pompa air yang diaktifkan atau dinonaktifkan. Web Server untuk host aplikasi untuk pengelolaan data irigasi, memberikan laporan, dan menampilkan status tanah. Pengguna dapat memantau kondisi kelembaban tanah dan mengontrol sistem irigasi secara otomatis maupun manual melalui Aplikasi Mobile/Web.

Untuk merekam data kelembaban 1, 2 sampai ke n menggunakan sensor kelembaban atau sensor soil moisture. Sensor soil moisture di pasang pada beberapa bagian pada media tanaman cabai untuk mendapatkan data kelembaban pada beberapa area yang berbeda. Data kelembaban akan diproses menggunakan Node MCU ESP8266. Jika terdapat data kelembaban dari sensor soil

moisture kurang dari 60% maka node MCU akan mengaktifkan relay yang akan membuka solenoid, sehingga keran terbuka dan air akan mengalir ke media tanam melalui pipa dan selang tetes. Adapun rancangan hardware system yang diusulkan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Perancangan Sistem

Desain perangkat keras terdiri dari beberapa komponen yang saling terhubung untuk mendukung operasi sistem. Microcontroller NodeMCU digunakan untuk menerima data dari sensor kelembapan tanah dan mengirimkan data tersebut ke cloud melalui modul WiFi. Sensor ini ditempatkan di lahan tanaman cabai untuk mengukur kelembapan tanah. Sensor ini terhubung ke microcontroller. Pompa air dikontrol oleh relay yang dihubungkan dengan microcontroller untuk mengaktifkan dan menonaktifkan aliran air sesuai dengan kondisi kelembapan tanah. berfungsi sebagai saklar elektronik yang menghubungkan dan memutuskan aliran listrik ke pompa air berdasarkan sinyal dari microcontroller. Sistem membutuhkan suplai listrik yang stabil untuk menjaga operasi perangkat keras, termasuk microcontroller dan pompa air.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil implementasi sistem irigasi tetes berbasis Internet of Things (IoT), hasil uji coba fungsional sistem, serta pembahasan terkait kinerja dan manfaat sistem dalam meningkatkan efisiensi irigasi tanaman cabai di Kabupaten Bengkalis.

3.1 Hasil Implementasi

Sistem irigasi tetes berbasis IoT berhasil diimplementasikan di lahan percobaan seluas 500 meter persegi dengan tanaman cabai. Implementasi ini mencakup pengintegrasian perangkat keras, perangkat lunak, serta aplikasi mobile/web sebagai antarmuka pengguna dapat ditunjukkan pada Gambar 3.

Hasil implementasi Perangkat Keras seperti Sensor Kelembapan Tanah berhasil dipasang pada 5 titik yang berbeda di lahan percobaan, dengan kedalaman sensor sekitar 15 cm untuk mendeteksi kelembapan di zona akar tanaman cabai. Microcontroller NodeMCU digunakan untuk menghubungkan sensor kelembapan ke sistem cloud melalui koneksi WiFi. Pompa Air yang terhubung dengan relay dikontrol oleh microcontroller, dan mampu menyalakan dan mematikan aliran air sesuai dengan data kelembapan tanah yang dikirimkan oleh sensor. Sistem ini

menggunakan catu daya 12V DC untuk menjalankan seluruh perangkat keras.



Gambar 3 Hasil Implementasi Sistem

Hasil dari implementasi perangkat Lunak menunjukkan bahwa data kelembapan tanah dikirimkan ke server cloud dan disimpan di database MongoDB, yang digunakan untuk pemantauan dan pengambilan keputusan irigasi otomatis. Aplikasi web dan mobile yang diimplementasikan menggunakan framework Laravel (backend) dan Vue.js (frontend) menampilkan status real-time kelembapan tanah dan kontrol pompa air. Aplikasi dilengkapi dengan fitur pengaturan ambang batas kelembapan tanah untuk mengatur kapan pompa air akan aktif atau nonaktif secara otomatis.

Antarmuka Pengguna seperti Dashboard Aplikasi menampilkan data kelembapan tanah dalam bentuk grafik yang diperbarui secara real-time. Pengguna dapat melihat setiap sensor di lokasi yang berbeda, serta status pompa air (aktif/nonaktif). Kontrol Manual memungkinkan pengguna untuk mengaktifkan atau menonaktifkan pompa air secara langsung melalui aplikasi.

3.2 Hasil Pengujian

Sistem diuji dalam dua skenario: otomatisasi irigasi berdasarkan kelembapan tanah dan kontrol manual oleh pengguna melalui aplikasi. Uji coba dilakukan selama periode 30 hari pada lahan percobaan.

Uji Coba Otomatisasi Irigasi dilakukan untuk mengukur keberhasilan sistem dalam melakukan irigasi secara otomatis. Selama uji coba, ambang batas kelembapan tanah ditetapkan pada 40%. Jika kelembapan turun di bawah 40%, sistem akan secara otomatis mengaktifkan pompa air, dan akan mematikannya kembali setelah kelembapan tanah mencapai 50%. Hasil Irigasi Otomatis menunjukkan bahwa dari 30 hari percobaan, sistem berhasil menjaga kelembapan tanah di atas ambang batas minimum (40%) selama 96% dari waktu operasional. Pompa air aktif rata-rata selama 2 jam per hari, dengan siklus aktif dan nonaktif yang konsisten sesuai dengan kondisi kelembapan tanah. Hal ini memastikan tanaman mendapatkan cukup air tanpa pemborosan. Dibandingkan dengan metode irigasi manual (gaya konvensional), penggunaan air berkurang hingga 30% karena irigasi hanya dilakukan ketika kelembapan tanah turun di bawah ambang batas yang ditetapkan.

Pada uji coba kontrol manual, pengguna dapat menyalakan dan mematikan pompa air melalui aplikasi mobile atau web, tanpa mengandalkan sensor kelembapan tanah. Sistem merespon perintah pengguna dengan baik, tanpa adanya keterlambatan yang signifikan. Saat pengguna menyalakan pompa air melalui aplikasi, pompa aktif dalam waktu 2-3 detik. Begitu

juga ketika pompa dimatikan, respon yang sama tercatat. Antarmuka pengguna dinilai mudah diakses dan intuitif. Pengguna dapat dengan mudah melihat status pompa dan data kelembapan tanah di setiap lokasi sensor. Data kelembapan tanah yang terkumpul selama 30 hari dianalisis, dan grafik berikut menunjukkan fluktuasi kelembapan tanah di berbagai titik lahan percobaan. Sistem berhasil menjaga kelembapan tanah dalam rentang optimal antara 40%-50%, yang merupakan rentang ideal untuk pertumbuhan tanaman cabai.

Tabel 1 Hasil pengujian fungsionalitas

Komponen yang di uji	Hasil Pengujian	Status	Keterangan
Pembacaan Sensor Kelembapan Tanah	Sensor berhasil membaca kelembapan tanah secara real-time pada 5 titik berbeda	Berhasil	Pembacaan sensor konsisten, data terkirim ke server cloud tanpa delay signifikan
Pengiriman Data ke Server Cloud	Data kelembapan tanah dari sensor berhasil dikirim ke database server	Berhasil	Pengiriman data menggunakan WiFi berjalan lancar, rata-rata waktu pengiriman sekitar 2-3 detik.
Otomatisasi Irrigasi Berdasarkan Sensor	Pompa air otomatis menyala ketika kelembapan < 40% dan mati saat > 50%	Berhasil	Pompa aktif otomatis sesuai dengan ambang batas yang telah ditentukan. Rata-rata waktu respon sekitar 5 detik.
Kontrol Manual Pompa Air Melalui Aplikasi	Pompa air dapat dihidupkan dan dimatikan melalui aplikasi mobile/web	Berhasil	Kontrol manual bekerja dengan baik, rata-rata waktu respon sekitar 2-3 detik setelah tombol kontrol ditekan di aplikasi.
Dashboard Monitoring Real-Time	Data kelembapan tanah ditampilkan di dashboard aplikasi dalam bentuk grafik	Berhasil	Grafik kelembapan real-time ditampilkan dengan baik, dan perubahan data terlihat setiap pembaruan yang terjadi pada sensor.
Pengaturan Ambang Batas Kelembapan	Ambang batas kelembapan dapat diubah melalui aplikasi	Berhasil	Pengguna dapat mengatur ambang batas secara fleksibel untuk mengatur kapan pompa aktif dan nonaktif.
Penyimpanan Data Historis	Data kelembapan tanah dan status pompa tersimpan di database untuk laporan historis	Berhasil	Data historis kelembapan dan status pompa tersimpan dengan baik di database, dan dapat diakses melalui aplikasi dalam bentuk laporan bulanan.
Stabilitas Sistem	Sistem berjalan stabil selama 30 hari uji coba	Berhasil	Tidak ada gangguan signifikan pada sistem selama periode uji coba, namun koneksi internet yang stabil diperlukan untuk operasi optimal.

Untuk menilai keunggulan sistem yang dikembangkan, dilakukan perbandingan terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan, seperti yang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan Penelitian Ini dengan Penelitian Sebelumnya

Penelitian	Fokus	Output	Kekurangan	Peningkatan pada penelitian ini
Wang & Li (2021)	Irrigasi Otomatis Berbasis Kelembapan	Sistem Berbasis Sensor, Tidak Real-Time	Tidak Ada Dashboard Dan Pengaturan Ambang	Sistem real-time dengan dashboard dan kontrol ambang
Kaur & Sharma (2020)	Review Sistem Irrigasi IoT	Teori Efisiensi Air, Tanpa Implementasi	Tidak Ada Studi Kasus Tanaman Tertentu	Implementasi langsung pada tanaman cabai
Hussain & Ahmad (2022)	Irrigasi Otomatis Konsep Simulasi	Simulasi Kelembapan Tanah Berbasis IoT	Belum Diuji Lapangan	Implementasi lapangan dan pengujian stabilitas sistem
Yadav & Ranjan (2023)	Irrigasi semi-otomatis untuk tanaman cabai	Pompa diaktifkan manual berdasarkan waktu	Tidak responsif terhadap kondisi tanah.	Otomatis berdasarkan kelembapan aktual tanah

3.3 Pembahasan

Hasil uji coba menunjukkan bahwa penerapan sistem irigasi tetes berbasis IoT ini mampu mengurangi penggunaan air hingga 30% dibandingkan metode konvensional. Hal ini terjadi karena irigasi hanya dilakukan ketika tanah benar-benar membutuhkan air, yang dapat diketahui secara akurat oleh sensor kelembapan tanah. Selain itu, pengaturan otomatisasi irigasi membantu menghindari pemborosan air yang sering terjadi dalam irigasi manual, terutama saat air diberikan secara berlebihan.

Meskipun uji coba produktivitas belum dilakukan dalam skala besar, hasil dari uji coba

awal menunjukkan bahwa menjaga kelembapan tanah secara optimal berpotensi meningkatkan hasil panen cabai. Dengan menjaga kelembapan tanah dalam kisaran yang tepat, tanaman dapat tumbuh dengan lebih baik tanpa mengalami stress air, yang biasanya mengakibatkan penurunan produktivitas.

Sistem ini dirancang agar dapat digunakan oleh petani dengan mudah. Hasil uji coba antarmuka aplikasi menunjukkan bahwa pengguna dapat memantau kondisi lahan dan mengontrol irigasi dengan cepat dan efisien. Fitur kontrol manual memberikan fleksibilitas tambahan, terutama jika pengguna ingin menyesuaikan operasi sistem secara langsung tanpa mengandalkan otomatisasi.

Meskipun sistem ini menunjukkan kinerja yang baik, terdapat beberapa tantangan dan keterbatasan yaitu kinerja sistem sangat bergantung pada stabilitas koneksi internet di lapangan. Di beberapa area di Kabupaten Bengkalis, koneksi internet yang tidak stabil dapat mengganggu pengiriman data dari sensor ke server cloud. Sensor kelembapan tanah dan perangkat keras lainnya memerlukan perawatan berkala untuk memastikan kinerja yang optimal, terutama jika digunakan dalam jangka waktu yang lama dan terkena cuaca ekstrem. Sistem ini memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan fitur-fitur seperti menggunakan machine learning untuk memprediksi kebutuhan irigasi berdasarkan data historis cuaca dan kelembapan tanah. Selain itu, Mengintegrasikan sensor cuaca (misalnya curah hujan) untuk memberikan kontrol irigasi yang lebih presisi.

Dari hasil uji coba sistem irigasi tetes berbasis IoT ini, terbukti bahwa sistem mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan menjaga kelembapan tanah dalam rentang optimal untuk pertumbuhan tanaman cabai. Sistem yang diusulkan memberikan solusi yang efektif dalam menghadapi tantangan irigasi pada lahan cabai di Kabupaten Bengkalis. Selain itu, kemudahan penggunaannya melalui aplikasi mobile/web menjadikannya praktis bagi petani lokal dalam mengelola irigasi secara real-time. Potensi pengembangan sistem di masa depan dapat lebih meningkatkan produktivitas pertanian dan ketahanan pangan di wilayah tersebut.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem irigasi tetes berbasis Internet of Things (IoT) yang diusulkan dalam penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan memantau kelembapan tanah pada tanaman cabai di Kabupaten Bengkalis. Dengan mengintegrasikan sensor kelembapan, microcontroller, dan aplikasi mobile/web, sistem ini mampu mengatur irigasi secara otomatis dan menyediakan kontrol manual bagi pengguna. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem dapat menjaga kelembapan tanah dalam rentang optimal antara 40% hingga 50% dengan tingkat keberhasilan mencapai 96% selama 30 hari pengujian. Penggunaan air berkurang hingga 30% dibandingkan metode konvensional, dan antarmuka pengguna terbukti intuitif dan mudah diakses. Stabilitas sistem juga terjaga dengan baik, meskipun koneksi internet yang stabil menjadi faktor penting untuk kinerja optimal. Sebagai saran untuk pengembangan ke depan, sistem ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan Integrasi Fitur Prediksi Menggunakan algoritma machine learning untuk memprediksi kebutuhan irigasi berdasarkan data historis dan kondisi cuaca. Menambahkan sensor cuaca untuk mendapatkan informasi lebih akurat mengenai kondisi lingkungan yang mempengaruhi kebutuhan air. Menerapkan teknologi energi terbarukan, seperti panel surya, untuk menyediakan daya yang berkelanjutan bagi perangkat keras di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Musri, Tengku, et al. "CO and NO₂ concentration monitoring based on internet of things." AIP Conference Proceedings. Vol. 2665. No. 1. AIP Publishing, 2023.
- [2] Parameswaran, M., et al., 2020. Smart irrigation using IoT: A comparative study. Journal of Cleaner Production, 275, 124197.

- [3] Shahbaz, M., et al., 2021. Precision irrigation management in water-scarce regions: An IoT-based approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106318.
- [4] Zhu, X., et al., 2020. IoT-based smart irrigation system for rice cultivation. *Agricultural Water Management*, 234, 106260.
- [5] Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2021). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 21(13), 4753. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112598>
- [6] Díaz, F., et al., 2020. IoT solutions for efficient water management in rural agriculture. *Agricultural Water Management*, 240, 106315.
- [7] Chavhan, S. M., Pradhan, S., & Mishra, P. (2020). IoT enabled smart irrigation system for improving water use efficiency in precision agriculture. *Materials Today: Proceedings*, 32, 617-622. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.669>
- [8] Kumar, R., et al., 2021. IoT-enabled smart irrigation system for smallholder farms: A case study. *Journal of Agricultural Water Management*, 245, 106441.
- [9] Chaudhary, S., et al., 2020. A review of IoT based irrigation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176, 105923.
- [10] Amanullah, M., et al., 2020. IoT-based irrigation system for optimizing water use in vegetable farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105221.
- [11] Ahmed, A., et al., 2021. Predictive irrigation management using IoT and machine learning. *Agricultural Systems*, 187, 103023.
- [12] Bhushan, B., Bhattacharya, R., & Ghosh, S. (2021). IoT-enabled irrigation management system for resource-optimized precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105862>
- [13] Guzmán, L., et al., 2021. IoT in agriculture: Reducing water wastage in desert farming. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5), 3045.
- [14] Kamel, A. M., El-Mahallawy, M. S., & Ali, M. M. (2020). Design and implementation of IoT-based smart irrigation system for large-scale farms. *Journal of Building Engineering*, 28, 101164. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101164>
- [15] Li, Z., et al., 2021. IoT-driven smart irrigation for horticultural crops. *Smart Agriculture Technologies*, 11, 124551.