

BAB 4

PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini berhasil mencapai tujuan yang telah ditetapkan serta memberikan solusi terhadap permasalahan yang diidentifikasi. Kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

1. Permasalahan terkait keterbatasan pemantauan (*monitoring*) secara *real-time* dan pengendalian otomatis pada sistem irigasi berhasil diatasi melalui pengembangan platform berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem yang dibangun mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara presisi serta menyediakan fasilitas kendali aktuator yang terintegrasi antara perangkat keras dan layanan *backend*.
2. Permasalahan tidak tersedianya mekanisme penyiraman yang adaptif berhasil diatasi melalui penerapan metode *Fuzzy Inference System* (FIS). Metode ini memungkinkan sistem menentukan keputusan penyiraman berdasarkan multivariabel kondisi lingkungan aktual (kelembapan tanah, suhu udara, dan kelembapan udara). Dengan demikian, keputusan penyiraman menjadi lebih proporsional, mencegah potensi terjadinya *overwatering* maupun *underwatering*.
3. Permasalahan terkait kerentanan arsitektur IoT terhadap gangguan konektivitas berhasil diatasi melalui implementasi pendekatan *edge-cloud computing*. Pemrosesan data dan logika kendali mandiri yang dijalankan pada perangkat *edge* (Raspberry Pi dan ESP32) memungkinkan penyiraman tetap beroperasi meskipun terjadi gangguan jaringan luring (*offline*). Mekanisme penyanggaan data (*data buffering*) memastikan integritas data tetap terjaga saat koneksi kembali normal.
4. Permasalahan terkait interpretasi data mentah dan latensi instruksi kendali berhasil diatasi melalui pembangunan antarmuka pengguna berbasis *web* dengan arsitektur *Single Page Application* (SPA). Penggunaan *framework* React memastikan visualisasi data telemetri yang masif dapat ditampilkan secara interaktif, sementara integrasi *WebSocket* memungkinkan instruksi kendali manual ke aktuator mekanis (motor *stepper* dan pompa) tereksekusi secara *real-time* tanpa terpotong oleh proses pemuatan ulang (*reload*) halaman.
5. Berdasarkan evaluasi keberhasilan dari seluruh fase pengujian, purwarupa (*prototype*) sistem ini dinyatakan layak untuk digunakan. Infrastruktur perangkat lunak—yang mencakup aplikasi *web*, peladen komputasi awan

(*cloud server*), dan pemrosesan *edge*—telah terbukti stabil. Akan tetapi, mengingat infrastruktur fisik mekanis yang dibangun masih berupa purwarupa, kelayakan implementasi fisik saat ini direkomendasikan untuk skala kecil atau simulasi *greenhouse*.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah mampu menjawab seluruh permasalahan utama yang menjadi fokus penelitian. Implementasi teknologi IoT, metode *Fuzzy Inference System*, arsitektur *edge-cloud*, dan antarmuka SPA terbukti mampu menghasilkan sistem irigasi cerdas yang adaptif, andal, serta memiliki kelayakan operasional untuk dikembangkan lebih lanjut.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, perancangan, dan kesimpulan yang telah diuraikan, terdapat beberapa rekomendasi pengembangan yang dapat diajukan untuk meningkatkan kemampuan, keandalan, dan kualitas sistem di masa mendatang:

1. Pengembangan Antarmuka Web dan Penambahan Sensor: Arsitektur *web SPA* saat ini dapat ditingkatkan menjadi *Progressive Web App* (PWA) agar sistem dapat diinstal layaknya aplikasi *native* pada perangkat seluler operator, lengkap dengan fitur *push notification* untuk peringatan anomali suhu atau kelembapan. Selain itu, fungsionalitas pemantauan dapat diperkaya dengan mengintegrasikan parameter sensor agronomis tambahan, seperti sensor pH tanah dan NPK (kandungan nutrisi).
2. Peningkatan Algoritme Penyiraman Adaptif: Metode *Fuzzy Inference System* (FIS) yang digunakan saat ini dapat dikembangkan menjadi model hibrida dengan mengintegrasikan pendekatan berbasis data seperti *Machine Learning*. Hal ini akan memungkinkan sistem untuk mempelajari pola kebutuhan air tanaman secara mandiri berdasarkan rekam jejak historis. Penggabungan API prakiraan cuaca eksternal (misalnya data BMKG) juga disarankan untuk mencegah sistem melakukan penyiraman saat cuaca diprediksi hujan.
3. Penguatan Arsitektur dan Keamanan IoT: Keandalan sistem dapat ditingkatkan melalui penerapan mekanisme redundansi jaringan (*failover*), seperti penggunaan modul seluler (GSM/4G) atau teknologi LoRaWAN sebagai jalur komunikasi cadangan ketika koneksi internet utama mengalami gangguan. Peningkatan protokol keamanan melalui enkripsi *Transport Layer Security* (TLS) pada *broker* MQTT dan *endpoint* API, serta autentikasi perangkat yang lebih ketat, sangat krusial sebelum sistem diimplementasikan pada skala produksi.

4. Peningkatan Skala Purwarupa (*Hardware Upscaling*): Mengingat infrastruktur mekanis saat ini masih berstatus purwarupa skala kecil, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan *upscaling* perangkat keras. Penggunaan aktuator motor *stepper* dengan torsi yang lebih besar, rel linier berskala industri, serta material pelindung komponen yang tahan terhadap korosi dan cuaca ekstrem (standar IP65/IP67) sangat direkomendasikan agar sistem siap diimplementasikan secara permanen pada lahan *greenhouse* komersial.

Melalui pengembangan pada keempat aspek tersebut, rancang bangun sistem irigasi cerdas ini diharapkan tidak hanya berhenti sebagai purwarupa akademis, melainkan dapat bertransformasi menjadi solusi pertanian presisi (*precision agriculture*) yang optimal, adaptif, andal, dan berdaya guna tinggi bagi industri pertanian di masa mendatang.