

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Temuan pada bab ini memberi gambaran efektivitas sistem sekaligus batasannya. Bab ini merangkum kesimpulan utama dan memberikan saran pengembangan untuk penelitian serta penerapan di skala yang lebih luas.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *monitoring* serta kontrol otomatis kelembapan dan pH tanah tanaman stevia berbasis IoT dengan metode *Fuzzy Logic* Sugeno, dapat disimpulkan bahwa sistem ini berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan baik. Sistem terintegrasi menggunakan platform ESP32 dengan sensor kelembapan dan pH, dua aktuator (pompa air dan pompa peningkat pH), serta *dashboard* untuk pemantauan jarak jauh. Penggunaan metode *Fuzzy Logic* Sugeno menghasilkan *output* numerik yang presisi sehingga pengendalian aktuator dapat berjalan efektif dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Keunggulan metode ini melampaui pendekatan ambang (*threshold*) konvensional karena mampu menggabungkan dua parameter sekaligus, memberikan respons yang lebih halus (tidak sekadar *on-off*), dan lebih tangguh terhadap ketidakpastian kondisi tanah. Sistem mampu melakukan pemantauan secara *real-time* dan mengatur penyiraman serta pemberian larutan pH secara otomatis berdasarkan kondisi tanah yang terdeteksi.

Berbasis hasil uji laboratorium dan lapangan, sistem IoT yang dikembangkan terbukti mampu melakukan pemantauan dan kendali kelembapan serta pH tanah stevia secara andal dengan akurasi pembacaan sensor yang tinggi setelah kalibrasi: sensor kelembapan menghasilkan MAE sebesar 0,92 dan MAPE sebesar 1,43%, sedangkan sensor pH menghasilkan MAE sebesar 0,08 pH dan MAPE sebesar 1,16%. Jika dinilai relatif, galat kelembapan hanya 0,92% dari skala penuh 0 -100% (atau sekitar 4,6% dari nilai 40 - 60%), sedangkan galat pH setara 0,57% dari skala penuh 0 - 14 (atau 8% dari nilai 6,5 - 7,5). Nilai-nilai ini berada pada kisaran yang lazim diterima untuk keputusan kontrol lapang (khususnya pH yang mendekati akurasi praktis $\pm 0,1$ pH), sehingga data yang dipakai kontrol dapat dipercaya.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kondisi kelembapan dan pH tanah dalam rentang optimal yang ditetapkan, yakni kelembapan 40-60% dan pH sesuai kisaran anjuran untuk stevia, dengan proporsi waktu berada pada kondisi optimal mencapai 92,33% untuk kelembapan dan 96,67% untuk pH, jauh lebih baik dibandingkan pengendalian manual. Respons sistem bersifat *near real-time* dengan interval pembaruan kelembapan sekitar ± 5 detik dan waktu stabilisasi pembacaan pH sekitar ± 13 detik.

,Validasi terhadap sensor dan algoritma *fuzzy* menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan *error* rata-rata sangat kecil antara perhitungan manual dan keluaran mikrokontroler, membuktikan keandalan sistem untuk aplikasi di lapangan. Integrasi sistem IoT memungkinkan *monitoring* jarak jauh secara *real-time* melalui *dashboard* berbasis web, sehingga memudahkan petani dalam pengelolaan lahan stevia dengan memberikan kemudahan dan efisiensi dalam *monitoring* parameter tanah secara terus-menerus.

5.2 Saran

Berikut saran pengembangan yang berfokus pada perluasan kemampuan, ketahanan sistem, serta validitas agronomis dan ekonomis. Sistem dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan model pembelajaran mesin yang memanfaatkan deret waktu kelembapan, pH, dan cuaca untuk memperkirakan kecenderungan beberapa jam ke depan, memungkinkan irigasi atau koreksi pH dilakukan sebelum nilai melenceng. Model juga dapat digunakan untuk deteksi anomali sensor dan penalaan otomatis parameter kontrol seperti *set point*, lebar histeresis, dan durasi kerja pompa. Pendekatan adaptif ini akan membantu sistem menyesuaikan diri terhadap perubahan musiman dan variasi perilaku lahan dengan validasi ketat melalui pembagian data pelatihan dan pengujian serta pemantauan *drift* model.

Sistem perlu diarahkan menuju kemandirian energi dengan memanfaatkan panel surya, pengatur pengisian, dan baterai, disertai penganggaran energi melalui *sleep mode*, sampling adaptif, dan pengiriman data yang diringkas. Ketahanan

komunikasi dapat ditingkatkan dengan opsi jaringan jarak jauh seperti LoRaWAN dan *store and forward* agar data tidak hilang saat jaringan melemah. Keamanan perlu diperkuat melalui enkripsi, pengelolaan kredensial terpisah, dan kebijakan akses berbasis peran, serta mekanisme peringatan andal untuk pergeseran pH berulang, frekuensi aktuasi berlebihan, atau sensor yang tidak merespons.

Pengujian lapang perlu diperluas ke berbagai jenis tanah dan lokasi melalui desain percobaan teracak pada beberapa tekstur tanah, kadar bahan organik, dan kondisi pH awal yang berbeda. Performa dapat diukur dengan indikator konsisten seperti persentase waktu di dalam rentang target, deviasi rata-rata dari *set point*, dan konsistensi MAE dan MAPE hasil kalibrasi. Pilihan sensor dapat diperbarui dengan kelembapan kapasitif yang lebih tahan korosi dan pembacaan pH dengan kompensasi suhu, disertai standar prosedur kalibrasi berkala dengan larutan referensi dan pemeriksaan kesehatan sensor otomatis.

Strategi kontrol dapat dikembangkan dengan mempertahankan kendali berbasis umpan balik dengan histeresis, kemudian mengevaluasi opsi kendali multi variabel yang lebih prediktif. Penerapan pembatas durasi kerja pompa, jeda minimum antar aktivasi, dan logika kegagalan yang aman diperlukan untuk mencegah *over-dosing* atau keausan mekanis. Kelengkapan analitik agronomis dan ekonomi melalui uji perbandingan dengan praktik manual akan menilai penghematan air, stabilitas parameter, produktivitas, dan mutu daun stevia, serta membentuk rasio manfaat-biaya untuk memperjelas titik balik adopsi di tingkat petani dan memperkuat argumen pengembangan skala besar.