

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring dan kontrol konsentrasi nutrisi pada mixing tank fertigasi berbasis ESP32, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem monitoring dan kontrol *mixing tank* berbasis ESP32 berhasil diimplementasikan dengan mengintegrasikan sensor TDS, sensor level, pompa, dan agitator. *Finite State Machine* (FSM) mampu mengatur tahapan operasi sistem mulai dari pemeriksaan kondisi awal, pengisian, pencampuran, pemeriksaan TDS, *dosing*, hingga kondisi larutan siap digunakan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh *state* utama dapat dijalankan sesuai urutan dan kondisi transisi yang dirancang tanpa ditemukan *state* yang terlewat atau kesalahan transisi.
2. Sensor TDS dan sensor level dapat digunakan sebagai masukan sistem monitoring dan kontrol setelah melalui proses kalibrasi dan pengujian. Kalibrasi sensor TDS menggunakan regresi polinomial orde tiga menghasilkan koefisien determinasi sebesar 0,9789, yang menunjukkan tingkat kecocokan yang tinggi antara keluaran sensor dan nilai TDS acuan pada rentang pengujian. Pengujian sensor level menunjukkan bahwa karakteristik dan tingkat penyimpangan pembacaan berbeda pada masing-masing sensor dan rentang pengukuran, sehingga hasil kalibrasi digunakan sebagai dasar koreksi pembacaan sebelum diterapkan pada sistem.
3. Pengendali *fuzzy* berhasil diterapkan untuk menentukan durasi aktivasi pompa nutrisi berdasarkan *error* dan *delta error*. Pada lima pengujian parameter final dengan data sensor yang valid, konsentrasi akhir berada pada rentang 492,7–528,3 ppm terhadap *setpoint* 500 ppm, dengan rata-rata *error* akhir absolut sebesar 11,28 ppm atau 2,26%. Sistem membutuhkan 2–5 kali *dosing* dengan rata-rata 3,6 kali *dosing*, yang menunjukkan bahwa jumlah aksi kendali menyesuaikan kondisi awal dan respons TDS selama proses pengendalian.

4. Evaluasi menggunakan *Integral Absolute Error* (IAE) menunjukkan nilai yang berbeda sesuai kondisi awal dan durasi proses pengendalian. Pada lima pengujian parameter final diperoleh IAE pada rentang 810,63–39.475,80 ppm·s. Kondisi awal yang lebih jauh dari *setpoint* dan waktu pengendalian yang lebih panjang cenderung menghasilkan akumulasi *error* yang lebih besar. Oleh karena itu, IAE digunakan untuk menggambarkan akumulasi penyimpangan selama proses pengendalian dan melengkapi evaluasi berdasarkan *error* akhir serta jumlah *dosing*.
5. Hasil penalaan menunjukkan bahwa parameter final mampu mengurangi jumlah pengulangan *dosing* dibandingkan tahapan pengembangan sebelumnya. Pada parameter awal tercatat hingga 97 kali *dosing*, sedangkan pada parameter final sistem membutuhkan 2–5 kali *dosing* pada lima kondisi awal yang diuji. Penurunan tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh perubahan parameter *fuzzy*, tetapi juga oleh peningkatan konsentrasi premix dan kondisi awal TDS. Dengan demikian, peningkatan kinerja pada parameter final merupakan hasil interaksi antara parameter pengendali dan karakteristik aktual *plant*, sehingga tidak dapat dikaitkan hanya dengan perubahan pengendali *fuzzy*.
6. Dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang menggunakan *error* dan *delta error* sebagai masukan *fuzzy* serta durasi aktuator sebagai keluaran, sistem yang dikembangkan menunjukkan kesamaan prinsip pengendalian tetapi diterapkan pada karakteristik *plant* dan prosedur operasi yang berbeda. Penelitian terdahulu melaporkan IAE sebesar 1341, 1119, dan 1547, sedangkan penelitian ini menghasilkan IAE 810,63–39.475,80 ppm·s. Nilai tersebut tidak digunakan untuk menentukan metode yang lebih unggul secara langsung karena terdapat perbedaan *setpoint*, kondisi awal, durasi pengujian, dan karakteristik *plant*. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa pendekatan *fuzzy* berbasis *error* dan *delta error* dengan keluaran durasi aktuator dapat diterapkan pada pengendalian TDS dengan konfigurasi sistem yang berbeda.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan keterbatasan yang ditemukan selama penelitian, beberapa pengembangan yang disarankan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Menambahkan *flowmeter* dan mengembangkan pengaturan debit pompa menggunakan PWM. Sistem saat ini menentukan jumlah larutan berdasarkan durasi aktivasi pompa sehingga volume aktual yang masuk ke *mixing tank* belum diukur secara langsung. Penambahan *flowmeter* memungkinkan sistem mengetahui debit dan volume aktual setiap *dosing*, sedangkan penggunaan PWM memungkinkan aksi kendali mengatur tidak hanya durasi, tetapi juga debit pompa. Dengan demikian, sistem dapat dikembangkan dari *time-based dosing* menuju pengendalian berbasis volume atau debit yang lebih representatif terhadap kondisi aktual.
2. Menggunakan sensor TDS atau EC dengan spesifikasi yang lebih tinggi serta menambahkan kompensasi temperatur. Sensor yang digunakan masih sesuai pada daerah operasi sekitar 500 ppm, tetapi menunjukkan peningkatan *error* pada konsentrasi yang lebih tinggi. Penggunaan sensor dengan rentang pengukuran dan kestabilan yang lebih baik, disertai pengukuran temperatur larutan, dapat meningkatkan kualitas pembacaan TDS/EC serta mengurangi pengaruh perubahan temperatur terhadap hasil pengukuran.
3. Mengembangkan pengendalian agitator secara adaptif menggunakan PWM. Hubungan antara nilai PWM dan kecepatan motor dapat dimanfaatkan untuk menyesuaikan kecepatan agitator berdasarkan fase proses. Kecepatan yang lebih tinggi dapat digunakan setelah *dosing* untuk membantu homogenisasi, kemudian diturunkan ketika konsentrasi mulai stabil sehingga proses pencampuran dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem.
4. Menambahkan pengukuran konsentrasi larutan premix secara langsung. Pada sistem saat ini konsentrasi premix diasumsikan konstan dan belum dimonitor secara langsung. Penambahan sensor TDS/EC pada tangki premix memungkinkan sistem mengetahui perubahan konsentrasi larutan akibat

endapan maupun variasi kondisi larutan sehingga informasi tersebut dapat digunakan dalam pengembangan aksi *dosing* yang lebih adaptif.

5. Melakukan pengujian pada variasi *setpoint*, konsentrasi premix, dan kondisi tanaman yang lebih luas. Penelitian saat ini berfokus pada pengendalian TDS menuju *setpoint* tertentu. Pengujian selanjutnya dapat dilakukan menggunakan beberapa nilai *setpoint* dan konsentrasi premix serta mempertimbangkan kebutuhan nutrisi pada fase pertumbuhan tanaman yang berbeda sehingga kemampuan sistem dapat dievaluasi pada kondisi operasi yang lebih beragam.
6. Mengembangkan sistem menuju pengendalian multivariabel. Sistem saat ini menggunakan TDS sebagai parameter konsentrasi total dan belum membedakan kandungan unsur N, P, dan K secara individual. Penelitian selanjutnya dapat mengintegrasikan parameter lain seperti EC, pH, temperatur, debit, dan level cairan sehingga keputusan pengendalian dapat mempertimbangkan lebih banyak karakteristik larutan dan kondisi sistem.