

## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, implementasi, serta serangkaian pengujian yang telah dilakukan pada Sistem Dosing Nutrisi Hidroponik Berbasis ESP32 dengan Algoritma Kontrol PID, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Mikrokontroler ESP32 mampu membaca data kepekatan nutrisi dari sensor TDS secara akurat berkat penerapan *median filtering* dan kompensasi suhu dari sensor DS18B20. Sistem juga terbukti mampu mengendalikan tiga aktuator pompa dosing (A, B, dan Air Baku) secara halus dan proporsional menggunakan sinyal *Pulse Width Modulation* melalui driver motor L298N.
- Metode penjadwalan gain heuristik (*heuristic gain-scheduling*) terbukti mampu melakukan penalaan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  secara otomatis dan dinamis berdasarkan skala error. Sistem mampu mengejar berbagai target setpoint dengan sangat baik, menghasilkan persentase *overshoot* yang sangat aman (di bawah 5%), yakni 2,53% pada kenaikan 400 ke 600 ppm, dan 3,53% pada kenaikan 600 ke 800 ppm, dengan rata-rata *steady-state error* di bawah 4 ppm.
- Berdasarkan pengujian komparatif, algoritma PID Adaptif terbukti berhasil mengatasi dilema antara kecepatan dan kestabilan yang terjadi pada parameter statis. PID Adaptif mampu menghasilkan waktu naik (*rise time*) yang sangat cepat (215,6 detik), hampir setara dengan sistem manual paling agresif (209,3 detik). Namun, di saat sistem manual agresif tersebut menghasilkan lonjakan hingga 2,75% yang memicu aktuator air baku, algoritma adaptif justru mampu meredam lonjakan hingga nyaris nol (0,20%) dengan *steady-state error* yang tetap aman di angka 5,07 ppm.
- Sistem PID adaptif menunjukkan ketahanan yang tinggi terhadap gangguan eksternal. Saat sistem mengalami penurunan kepekatan nutrisi secara mendadak sebesar lebih dari 40 ppm akibat penambahan air murni,

algoritma mampu merespons seketika dan memulihkan kondisi larutan kembali ke ambang batas aman dalam waktu singkat dengan *overshoot* maksimal 5,00%.

- Penggunaan parameter deadband sebesar 10 ppm terbukti sangat krusial dan efektif dalam mencegah aktuator dari kondisi hidup-mati secara terus-menerus. Mekanisme ini menjaga umur pakai mekanis pompa sembari memastikan nutrisi tidak berlebihan.
- Pemantauan data secara jarak jauh berhasil diimplementasikan dengan pengiriman data setiap 15 detik secara real-time ke dashboard aplikasi Blynk dan pencatatan riwayat ke Google Spreadsheet. Kestabilan sistem juga diperkuat dengan adanya fitur Web Server lokal dan mode pemulihan *Access Point*, yang memungkinkan sistem tetap beroperasi dan dapat dikonfigurasi ulang meskipun jaringan internet utama mengalami kegagalan.

## 6.2 Saran

Berdasarkan perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan dan penyempurnaan penelitian di masa mendatang:

- Sistem saat ini baru berfokus pada pengendalian kepekatan nutrisi dan pemantauan suhu. Mengingat tingkat keasaman (pH) sangat krusial dalam penyerapan nutrisi oleh akar tanaman hidroponik, penelitian selanjutnya sangat disarankan untuk mengintegrasikan sensor pH beserta aktuator pompa tambahan khusus untuk cairan pH Up dan pH Down.
- Meskipun penggunaan pompa DC dengan driver L298N berbasis PWM telah terbukti berhasil, akurasi dosing dalam volume (mililiter) yang sangat kecil masih bisa ditingkatkan. Pengembangan selanjutnya dapat mempertimbangkan penggunaan pompa peristaltik berbasis motor stepper beserta driver khususnya untuk mendapatkan takaran injeksi nutrisi yang jauh lebih presisi.

- Penalaan PID secara adaptif berbasis penjadwalan gain heuristik telah memberikan hasil yang baik. Namun, untuk menangani dinamika sistem yang lebih kompleks dan non-linear, dapat dilakukan komparasi dengan metode algoritma cerdas lainnya, seperti Fuzzy Logic Controller (FLC) yang dipadukan dengan PID (Fuzzy-PID).
- Pengujian purwarupa yang dilakukan menggunakan tangki berkapasitas 5 liter. Untuk tahap selanjutnya, sistem ini perlu diuji coba pada instalasi greenhouse skala menengah hingga skala industri dengan melibatkan tanaman hidup. Hal ini bertujuan untuk mengobservasi daya tahan perangkat secara jangka panjang sekaligus menganalisis dampak langsung keakuratan kendali nutrisi terhadap kualitas dan kuantitas hasil panen.
- Sistem saat ini bergantung pada koneksi internet untuk pencatatan riwayat ke Google Spreadsheet. Sebagai pengembangan sistem failsafe tingkat lanjut, dapat ditambahkan modul MicroSD Card pada ESP32 atau menggunakan mini-PC sebagai database lokal agar data tidak hilang apabila terjadi gangguan koneksi internet dalam waktu yang lama.