

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis sistem pengendalian laju aliran air berbasis OpenPLC menggunakan metode PID, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. OpenPLC berbasis ESP32 berhasil diimplementasikan sebagai pengendali utama pada sistem pengendalian laju aliran air. Program pengendalian dibuat menggunakan Function Block Diagram (FBD) dan dijalankan melalui OpenPLC Runtime pada ESP32. Sistem menggunakan dua buah ESP32 dengan pembagian fungsi, yaitu ESP32 OpenPLC untuk menjalankan logika pengendalian dan Function Block CTRL_PID, sedangkan ESP32 pendukung menangani pembacaan sensor serta penerapan sinyal kendali pada perangkat keras. Komunikasi antara kedua ESP32 dapat bekerja dua arah melalui jalur pin-to-pin berbasis PWM–RC–ADC. Pada pengujian jalur kendali, peningkatan PWM OpenPLC dari 0, 22.000, 32.000, hingga 44.000 menghasilkan peningkatan tegangan keluaran RC filter dari 0,0924 V, 1,113 V, 1,594 V, hingga 2,150 V, yang diikuti peningkatan nilai ADC dan Motor PWM. Jalur feedback dari sensor YF-S201 menuju OpenPLC juga dapat meneruskan perubahan laju aliran hingga menjadi process variable yang digunakan oleh CTRL_PID.
2. Pengujian open-loop menunjukkan bahwa perubahan nilai PWM terutama memengaruhi besar laju aliran kondisi tunak, sedangkan rise time relatif tidak banyak berubah. Pada PWM 22.000 diperoleh kondisi tunak sebesar 1072 mL/min, rise time 9,56 s, overshoot 2,61%, dan settling time 70 s. Pada PWM 30.000 diperoleh kondisi tunak sebesar 2057 mL/min, rise time 9,32 s, overshoot 1,14%, dan settling time 21 s. Pada PWM 44.000 diperoleh kondisi tunak sebesar 2990 mL/min, rise time 9,53 s, overshoot 1,00%, dan settling time 20 s. Titik kerja PWM 30.000 digunakan untuk memperoleh *process reaction curve* karena mewakili daerah operasi menengah sistem.
3. Metode Ziegler–Nichols open-loop dapat digunakan untuk memperoleh parameter awal pengendali PID, tetapi parameter tersebut belum sesuai

untuk langsung digunakan sebagai parameter akhir pada plant aktual. Berdasarkan *process reaction curve* diperoleh dead time $L = 6,104s$, kemiringan maksimum respons $R = 247,714 \text{ mL/min/s}$, dan perubahan masukan $\Delta u = 30.000$. Hasil perhitungan menghasilkan parameter awal CTRL_PID sebesar $KP = 23,809$, $TN = 12,208s$, dan $TV = 3,052s$. Parameter tersebut kemudian digunakan sebagai *initial tuning* dan selanjutnya disesuaikan melalui proses *fine tuning* berdasarkan respons aktual sistem.

4. Hasil fine tuning menunjukkan bahwa parameter $Kp=3,5$, $Ki=3,5$, $Kd=0,35$ merupakan parameter yang lebih sesuai digunakan sebagai satu konfigurasi pengendali pada tiga daerah operasi yang diuji. Pemilihan $KP = 3,5$ terutama memberikan perbaikan yang sangat besar pada setpoint 1000 mL/min, yaitu menurunkan maximum overshoot dari 245,94% pada $KP = 5$ menjadi 9,36%. Pada setpoint 2000 dan 3000 mL/min, perubahan KP tidak memberikan perubahan overshoot yang besar karena respons awal juga dipengaruhi oleh saturasi keluaran, dinamika plant, serta keterlambatan jalur pengukuran. Dengan demikian, parameter akhir dipilih sebagai kompromi untuk digunakan pada seluruh rentang pengujian, bukan karena menghasilkan nilai terbaik pada setiap parameter di seluruh titik kerja.
5. Pengujian closed-loop menunjukkan bahwa Function Block CTRL_PID mampu mempertahankan rata-rata process variable sangat dekat dengan setpoint 1000, 2000, dan 3000 mL/min. Pada setpoint 1000 mL/min diperoleh rata-rata PV 1001,11 mL/min dengan bias 0,111%, RMSE 48,75 mL/min atau 4,875%, serta 70,59% data berada dalam batas $\pm 5\%$ dan 96,08% dalam batas $\pm 10\%$. Pada setpoint 2000 mL/min diperoleh rata-rata PV 2003,17 mL/min dengan bias 0,158%, RMSE 55,44 mL/min atau 2,772%, serta 90,20% data berada dalam batas $\pm 5\%$ dan 100% dalam batas $\pm 10\%$. Pada setpoint 3000 mL/min diperoleh rata-rata PV 3003,32 mL/min dengan bias 0,111%, RMSE 117,46 mL/min atau 3,915%, serta 78,00% data berada dalam batas $\pm 5\%$ dan 98,00% dalam batas $\pm 10\%$. Berdasarkan

parameter relatif steady-state, setpoint 2000 mL/min memberikan performa tracking terbaik dari ketiga kondisi pengujian.

6. Sensor YF-S201 merupakan feedback utama pengendalian PID, sedangkan JSN-SR04T berfungsi sebagai sensor level dan interlock pengisian, bukan sebagai process variable PID laju aliran. Hasil pengujian JSN-SR04T pada enam kondisi menunjukkan error pembacaan sebesar 1,33% hingga 4,17% dengan rata-rata error 2,56%. Ketika level air mencapai LEVEL_SP, kondisi LEVEL_OK digunakan untuk menghentikan pompa dengan membuat perintah PWM menjadi nol. Dengan demikian, penghentian pompa karena level merupakan fungsi interlock dan tidak menunjukkan bahwa loop PID flow mengalami kegagalan

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan selama proses pengujian, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Mengembangkan metode tuning yang mempertimbangkan perubahan karakteristik plant pada beberapa daerah operasi. Penggunaan satu parameter $KP = 3,5$, $TN = 1s$, dan $TV = 0,1s$ telah memberikan tracking steady-state yang baik, tetapi karakteristik transien berbeda pada setpoint rendah, menengah, dan tinggi. Penelitian selanjutnya dapat menerapkan *gain scheduling*, *setpoint-dependent tuning*, atau metode tuning lain sehingga setiap daerah operasi memperoleh parameter yang lebih sesuai
2. Mengurangi overshoot pada fase awal melalui pengaturan transisi setpoint dan pembatasan perubahan keluaran kendali. Overshoot tinggi pada setpoint 2000 mL/min berkaitan dengan keluaran kendali yang mencapai batas maksimum pada awal respons. Pengembangan berikutnya dapat menerapkan *setpoint ramp*, pembatas laju perubahan keluaran (*output slew rate*), atau strategi *soft-start* sehingga pompa tidak langsung menerima perintah kendali maksimum ketika error awal masih besar.

3. Memperbesar rentang representasi process variable atau memperbaiki proses scaling sensor. Batas flow sekitar 3500 mL/min menyebabkan nilai process variable dapat mendekati kondisi *clipping* pada respons transien. Rentang pengukuran yang lebih luas akan membantu memperoleh nilai puncak respons yang lebih representatif dan mengurangi keterbatasan analisis overshoot pada daerah operasi tinggi.
4. Mengevaluasi kembali desain filtering berdasarkan kompromi antara peredaman noise dan keterlambatan respons. Filter yang lebih kuat dapat menghasilkan pembacaan yang lebih halus, tetapi juga dapat menambah keterlambatan pada loop kontrol. Oleh karena itu, nilai koefisien filter maupun konstanta waktu RC sebaiknya ditentukan berdasarkan pengujian respons closed-loop, bukan hanya berdasarkan kehalusan grafik.