

Sistem Kontrol Level Air Satu Tangki Berbasis Kontrol PID dengan Anti Windup

¹Ridho Jovi Mubarak, ¹Zulwisli, ¹Yudhi Diputra, ¹Ryan Fikri

¹Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Jl. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar Bar., Kec. Padang Utara, Kota Padang, Sumatera Barat

*Corresponding Author e-mail: ridhojovimubarak@gmail.com

Received: May 2026; Revised: June 2026; Published: July 2026

Abstrak

Sistem kontrol level air merupakan materi penting dalam pembelajaran otomasi dan kontrol proses di pendidikan vokasi. Namun, keterbatasan media praktikum yang representatif menyebabkan mahasiswa kesulitan memahami konsep pengendalian level fluida, khususnya penerapan kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) dan fenomena integral windup. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun trainer sistem kontrol level air satu tangki berbasis kontrol PID dengan mekanisme anti-windup sebagai media pembelajaran praktikum. Sistem menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk pengukuran real-time, pompa DC 12V sebagai aktuator, serta platform MATLAB untuk visualisasi data. Parameter PID yang digunakan adalah $K_p=2,5$, $K_i=0,8$, dan $K_d=0,1$ yang diperoleh melalui metode trial-error dengan periode sampling 100 ms. Pengujian dilakukan pada setpoint 10 cm dan 5 cm masing-masing sepuluh kali percobaan. Hasil menunjukkan sistem mencapai steady-state pada kedua setpoint dengan error rata-rata 0,06 cm untuk setpoint 10 cm dan 0,08 cm untuk setpoint 5 cm, serta waktu settling rata-rata 45 detik dan 38 detik. Mekanisme anti-windup terbukti efektif mencegah akumulasi integral berlebih, yang teridentifikasi ketika nilai PWM turun ke 0 untuk mencegah overshoot pada pengujian setpoint 5 cm. Trainer yang dikembangkan terbukti layak sebagai media pembelajaran sistem kontrol proses di pendidikan vokasi.

Kata Kunci: Kontrol PID, Level Air, Arduino, Anti-Windup, Pendidikan Vokasi.

How to Cite: Mubarak, R. J., Zulwisli., Diputra, Y., & Fikri, R. (2026). Sistem Kontrol Level Air Satu Tangki Berbasis Kontrol PID dengan Anti Windup. *Journal of Authentic Research*, 5(3), 4387-4404. <https://doi.org/10.36312/kmnc9797>



<https://doi.org/10.36312/kmnc9797>

Copyright© 2026, Mubarak et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Perkembangan industri modern menuntut ketersediaan sumber daya manusia yang tidak hanya memiliki pemahaman teoritis tetapi juga mampu mengoperasikan dan menganalisis sistem kontrol secara langsung. Transformasi industri menuju era otomasi telah membawa perubahan mendasar dalam sistem produksi, di mana sensor, aktuator, dan pengendali berbasis mikrokontroler menjadi komponen inti yang tidak terpisahkan (Dorf & Bishop, 2017). Sistem kontrol proses khususnya kontrol level fluida merupakan salah satu bidang yang paling banyak diaplikasikan di berbagai sektor industri, mulai dari pengolahan air, industri kimia, hingga makanan dan minuman (Seborg et al., 2017; Shinskey, 1996).

Sistem kontrol proses merupakan salah satu bidang keilmuan yang sangat relevan dengan kebutuhan industri saat ini. Sistem kontrol digunakan secara luas pada berbagai sektor, mulai dari industri pengolahan air, industri kimia, pembangkit

listrik, hingga industri makanan dan minuman (Seborg et al., 2017). Di antara berbagai jenis sistem kontrol proses, kontrol level fluida merupakan salah satu yang paling banyak diaplikasikan karena hampir setiap proses industri melibatkan pengendalian volume atau ketinggian cairan dalam suatu wadah (Shinsky, 1996). Pemahaman mendalam mengenai sistem kontrol level menjadi kompetensi wajib yang harus dikuasai oleh lulusan teknik elektro dan otomasi industri agar mampu bersaing di dunia kerja.

Pendidikan vokasi memiliki karakteristik pembelajaran yang berorientasi pada praktik dan penerapan langsung, namun salah satu tantangan terbesarnya adalah keterbatasan media pembelajaran yang representatif dan aplikatif (Bolton, 2015). Banyak institusi pendidikan belum memiliki trainer yang mampu mensimulasikan sistem kontrol nyata, sehingga mahasiswa mengalami kesenjangan antara teori dan kompetensi praktis yang dibutuhkan (Nise, 2019). Kontrol PID merupakan metode yang paling banyak digunakan di industri karena mampu memberikan respons cepat sekaligus menghilangkan kesalahan tunak (Åström & Hägglund, 2006). Namun, pada sistem level air yang bersifat integrator, fenomena integral windup sering muncul ketika aktuator mengalami saturasi, menyebabkan akumulasi integral berlebihan yang menurunkan performa sistem (Kaya et al., 2001).

Kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan salah satu metode kontrol yang paling banyak digunakan di industri karena mampu memberikan respons yang cepat sekaligus menghilangkan kesalahan tunak (steady-state error) pada sistem (Åström & Hägglund, 2006). Aksi proporsional bekerja dengan menghasilkan sinyal kendali yang sebanding dengan besar error yang terjadi, sementara aksi integral mengakumulasi error sepanjang waktu sehingga mampu menghilangkan penyimpangan permanen antara nilai aktual dan setpoint, dan aksi derivative merespons laju perubahan error untuk mengurangi osilasi dan meningkatkan stabilitas sistem (Franklin et al., 2015). Kombinasi ketiga aksi ini menjadikan kontrol PID sebagai pilihan yang sangat sesuai untuk sistem level air yang memiliki karakteristik integrator alami.

Pada sistem kontrol level air yang bersifat integrator, penerapan aksi proporsional saja sering kali tidak cukup karena sistem rentan terhadap steady-state error yang persisten (Kuo & Golnaraghi, 2014). Penambahan aksi integral pada kontroler PID memungkinkan sistem untuk mengoreksi error secara akumulatif hingga mencapai nilai setpoint yang diinginkan. Salah satu permasalahan yang sering muncul dalam implementasi kontrol PID adalah fenomena integral windup, yaitu kondisi di mana nilai integral terus terakumulasi secara berlebihan ketika aktuator mencapai batas saturasi (Kaya et al., 2001). Mekanisme anti-windup dirancang untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan membatasi akumulasi nilai integral sehingga sistem tetap stabil dan responsif meskipun terjadi saturasi pada aktuator.

Kemajuan teknologi mikrokontroler yang pesat, khususnya platform Arduino, membuka peluang besar dalam pengembangan media pembelajaran berbasis sistem kontrol yang terjangkau dan mudah dikembangkan (Monk, 2017). Arduino telah terbukti menjadi platform yang sangat populer di lingkungan pendidikan karena kemudahannya dalam pemrograman, ketersediaan pustaka yang lengkap, serta dukungan komunitas yang sangat besar (Banzi & Shiloh, 2014). Integrasi Arduino dengan berbagai modul sensor, driver aktuator, dan platform visualisasi data

memungkinkan pembuatan trainer sistem kontrol yang komprehensif, fungsional, dan mampu menampilkan data secara real-time.

Platform MATLAB memungkinkan data proses sistem kontrol ditampilkan dalam bentuk grafik yang diperbarui secara otomatis, sekaligus mendukung analisis sinyal dan pemrosesan data secara mendalam (Margolis, 2011). Kemampuan visualisasi dan analisis data secara real-time ini sangat bermanfaat dalam proses pembelajaran karena mahasiswa dapat mengamati respons sistem terhadap perubahan setpoint dan gangguan secara konkret dan langsung. Dengan demikian, konsep-konsep abstrak dalam sistem kontrol seperti transient response, overshoot, rising time, dan steady-state error menjadi jauh lebih mudah dipahami oleh mahasiswa (Katsuhiko, 2010).

Penelitian sebelumnya oleh Hidayat dan Setiawan (2019) menunjukkan implementasi kontrol PID pada sistem level air berbasis Arduino mampu mencapai steady-state dengan error kecil, sementara Pratama & Nugroho (2020) menyimpulkan sistem pengaturan level air berbasis mikrokontroler bekerja baik pada berbagai kondisi setpoint. Namun, kedua penelitian tersebut belum mengimplementasikan mekanisme anti-windup dan belum dilengkapi fasilitas visualisasi data real-time yang memadai untuk keperluan pembelajaran. Hasil penelitian tersebut memperkuat urgensi pengembangan trainer sistem kontrol level air yang komprehensif, andal, dan dilengkapi dengan fitur anti-windup serta kemampuan visualisasi data berbasis MATLAB sebagai media pembelajaran di lingkungan pendidikan vokasi (Rivera et al., 1986). Berdasarkan seluruh uraian tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun trainer sistem kontrol level air satu tangki berbasis kontrol PID dengan anti-windup menggunakan mikrokontroler Arduino, menguji kinerja sistem pada berbagai variasi setpoint, serta mengevaluasi kelayakannya sebagai media pembelajaran praktikum di lingkungan pendidikan vokasi (Åström & Murray, 2010).

METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian dan pengembangan (Research and Development) dengan pendekatan rancang bangun sistem kontrol berbasis mikrokontroler yang meliputi perancangan konsep, pembuatan perangkat keras, pemrograman perangkat lunak, integrasi subsistem, serta pengujian dan analisis kinerja.

Alat dan Bahan

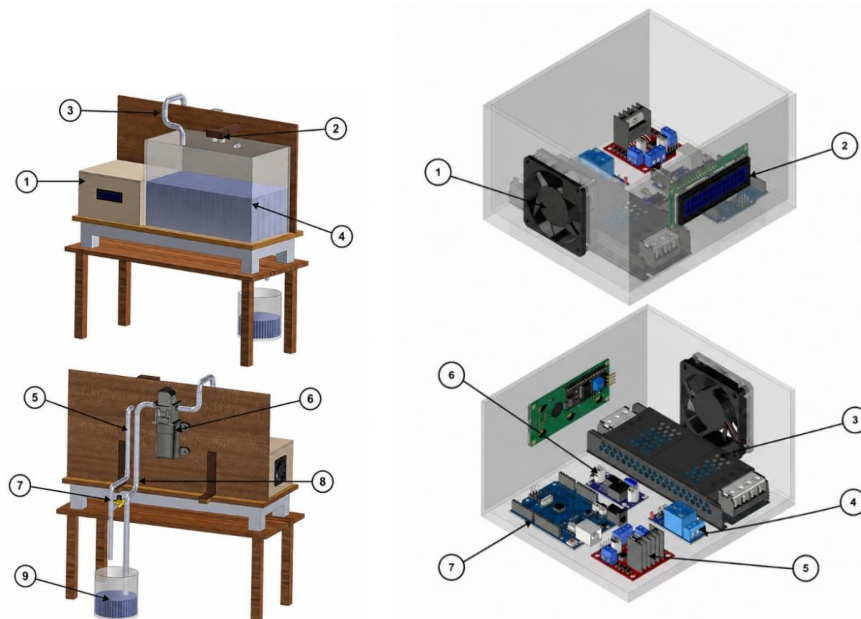
Perancangan trainer sistem kontrol level air ini menggunakan sejumlah komponen elektronik dan mekanik yang dipilih berdasarkan kriteria ketersediaan di pasaran, kemudahan penggunaan dalam lingkungan pendidikan, serta kesesuaian spesifikasi teknis dengan kebutuhan sistem. Seluruh komponen dirangkum dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Daftar Alat dan Bahan Trainer Sistem Kontrol Level Air

No	Nama Komponen	Spesifikasi	Jumlah	Fungsi
1	Penampung Utama (Tangki Akrilik)	Tebal $\pm 3-5$ mm, transparan	1 unit	Plant utama tempat penampungan dan pemantauan level air secara real-time

2	Sensor Ultrasonik HC-SR04	5V DC, jarak 2-400 cm	1 unit	Memantau level ketinggian air pada penampung utama secara real-time
3	Pompa Air DC	12V DC	1 unit	Menyalurkan air dari penampung pembuangan ke penampung utama
4	Mikrokontroler Arduino Uno	ATmega328P, 5V	1 unit	Pusat pemrosesan data dan kendali seluruh sistem
5	Driver Motor L298N	5-46V, 2A per kanal	1 unit	Modul penggerak beban untuk mengatur aktivasi dan aliran daya pada unit pompa
6	Power Supply (PSU)	12V / 5A DC	1 unit	Sumber catu daya utama untuk seluruh rangkaian sistem
7	Relay 1 Channel	5V coil, 10A/250VAC	1 unit	Mengatur pembukaan dan penutupan katup saluran buang secara otomatis
8	Modul Step-Down LM2596	Input 4-40V, Output 1,5-35V	1 unit	Menurunkan tegangan DC dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah secara efisien
9	LCD Display I2C 20x4	5V DC, antarmuka I2C	1 unit	Menampilkan status operasional dan parameter sistem secara real-time
10	Kipas 12VDC	12V DC	1 unit	Mengatur pertukaran udara guna menjaga stabilitas suhu komponen di dalam box
11	Katup/Valve Manual	PVC, diameter $\pm 1/2$ inch	1 unit	Simulasi gangguan aliran keluar tangki utama
12	Pipa Pembuangan Darurat	PVC, diameter $\pm 1/2$ inch	1 set	Saluran pengaman untuk membuang sisa air agar tidak melebihi batas tampung tangki
13	Penampung Pembuangan	Plastik/ember	1 unit	Wadah perantara untuk menampung aliran dari penampung utama
14	Selang Air	Diameter $\pm 8-12$ mm	Secukupnya	Jalur aliran air dari pompa ke penampung utama dan dari tangki menuju pompa
15	Box Komponen	Besi/akrilik	1 unit	Pusat kendali yang melindungi dan mengintegrasikan seluruh komponen elektronik
16	Rangka Trainer	Besi/aluminium	1 set	Dudukan seluruh komponen mekanik dan elektronik trainer
17	Kabel Listrik	NYAF/jumper	Secukupnya	Pengkabelan seluruh komponen sistem
18	Saklar ON/OFF	220V/DC Switch	1 unit	Menghidupkan dan mematikan sistem secara keseluruhan

19	Baut dan Mur	Baja/besi	Secukupnya	Penguat mekanik rangka dan komponen trainer
----	--------------	-----------	------------	---

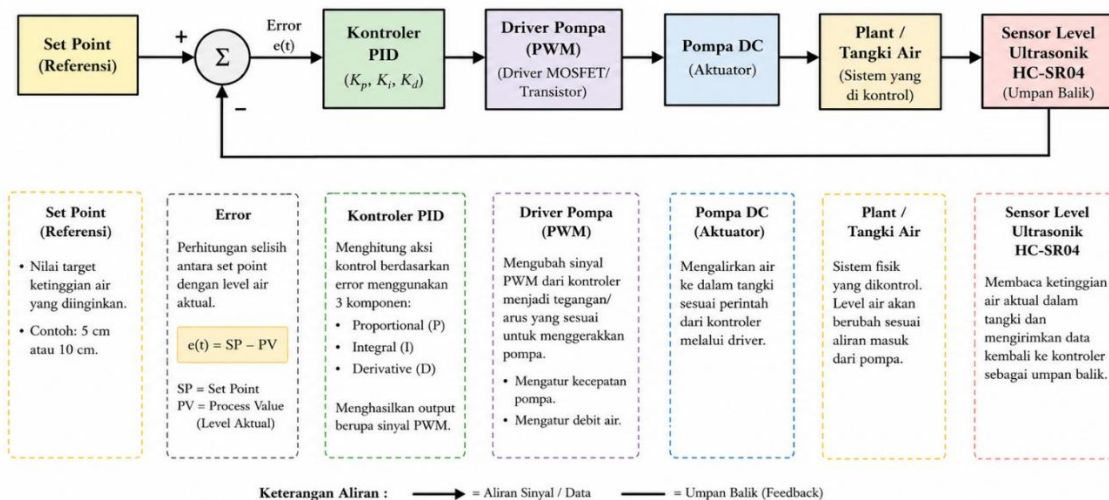


Gambar 1. Alat dan Bahan Trainer Sistem Kontrol Air

Diagram Blok Sistem Kontrol

Perancangan sistem kontrol level air mengacu pada diagram blok sistem kontrol loop tertutup (closed-loop) yang menggambarkan hubungan fungsional antar komponen utama secara sistematis. Diagram blok sistem kontrol level air berbasis PID yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 2.

Diagram Blok Sistem Kontrol Level Air Berbasis PID



Gambar 2. Diagram blok sistem kontrol level air berbasis PID

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 1, proses pengendalian diawali dari penetapan nilai setpoint sebagai nilai referensi ketinggian air yang diinginkan, dengan contoh nilai yang digunakan dalam pengujian adalah 5 cm dan 10 cm. Nilai setpoint ini masuk ke summing junction (Σ) yang berfungsi membandingkan nilai referensi dengan nilai level air aktual yang dikirimkan oleh sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai umpan balik. Hasil perbandingan tersebut menghasilkan nilai error

yang dinyatakan dengan persamaan $e(t) = SP - PV$, di mana SP adalah nilai setpoint dan PV adalah nilai process variable atau level aktual yang terbaca oleh sensor.

Nilai error $e(t)$ selanjutnya menjadi masukan bagi kontroler PID yang diimplementasikan pada mikrokontroler Arduino Uno. Kontroler ini menghitung aksi kontrol berdasarkan tiga komponen, yaitu aksi proporsional (P) yang memberikan respons langsung sebanding dengan besar error, aksi integral (I) yang mengakumulasi error untuk menghilangkan steady-state error, dan aksi derivative (D) yang merespons laju perubahan error untuk mengurangi osilasi. Hasil perhitungan ketiga komponen tersebut menghasilkan sinyal kendali berupa nilai PWM yang diteruskan ke driver pompa (Kuo & Golnaraghi, 2014).

Driver pompa yang menggunakan modul L298N berfungsi mengubah sinyal PWM dari kontroler menjadi tegangan atau arus yang sesuai untuk menggerakkan pompa DC, sekaligus mengatur kecepatan pompa dan debit air yang masuk ke dalam tangki. Pompa DC selanjutnya mengalirkan air ke dalam tangki utama sebagai plant yang dikendalikan, sehingga level air di dalam tangki berubah sesuai dengan aksi kontrol yang diberikan. Sensor ultrasonik HC-SR04 yang dipasang di bagian atas tangki kemudian membaca ketinggian air aktual dan mengirimkan data tersebut kembali ke summing junction sebagai umpan balik, sehingga proses pengendalian berlangsung secara kontinu dalam siklus loop tertutup (Franklin et al., 2015). Dengan mekanisme umpan balik tertutup ini, sistem mampu mendeteksi setiap penyimpangan level air dari setpoint dan secara otomatis melakukan koreksi melalui penyesuaian kecepatan pompa hingga kondisi steady-state tercapai.

Perancangan Algoritma Kontrol PID dan Anti-Windup

Algoritma kontrol yang diimplementasikan pada mikrokontroler Arduino Uno menggunakan pendekatan kontrol PID diskrit yang dilengkapi mekanisme anti-windup. Persamaan umum kontroler PID dalam domain waktu adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Dalam implementasi diskrit pada Arduino Uno, persamaan tersebut dinyatakan sebagai:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{j=0}^k e[j] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s}$$

Output kontroler kemudian dibatasi sesuai resolusi PWM 8-bit pada rentang:

$$u[k] = \begin{cases} 255, & \text{jika } u[k] > 255, \\ 0, & \text{jika } u[k] < 0, \\ u[k], & \text{jika } 0 \leq u[k] \leq 255. \end{cases}$$

Untuk mencegah fenomena integral windup saat aktuator mengalami saturasi, mekanisme anti-windup diterapkan dengan membatasi akumulasi nilai integral sebagai berikut:

$$I[k] = \begin{cases} I[k-1] + e[k] T_s, & \text{jika } 0 < u[k] < 255, \\ I[k-1], & \text{jika } u[k] \geq 255 \text{ atau } u[k] \leq 0. \end{cases}$$

Sehingga sinyal kontrol akhir dengan anti-windup menjadi:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i I[k] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s}$$

di mana $e[k] = SP - PV$, $e[k] = SP - PV$ adalah error pada iterasi ke- k , T_s adalah periode sampling, dan $I[k]$ adalah nilai integral yang telah dikondisikan oleh mekanisme anti-windup (Kaya et al., 2001).

Perancangan Perangkat Lunak dan Mekanisme Anti-Windup

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan algoritma kontrol PID yang dilengkapi mekanisme anti-windup. Nilai output kontroler dibatasi pada rentang 0 hingga 255 sesuai resolusi PWM 8-bit Arduino. Mekanisme anti-windup bekerja dengan menghentikan akumulasi nilai integral ketika output kontroler mencapai batas saturasi maksimum atau minimum, sehingga mencegah osilasi besar saat error mulai berkurang setelah kondisi saturasi (Ziegler & Nichols, 1942). Data level air, nilai PWM motor, dan setpoint dikirimkan secara periodik ke MATLAB untuk keperluan visualisasi dan analisis.

Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan pada dua nilai setpoint, yaitu 10 cm dan 5 cm, masing-masing sebanyak sepuluh kali percobaan. Pada setiap percobaan dicatat nilai PWM motor yang dihasilkan kontroler PID saat kondisi mendekati setpoint, nilai aktual ketinggian air yang terbaca pada garis ukur penggaris yang ditempelkan pada tangki akrilik, nilai error PWM sebagai selisih antara PWM aktual dengan nilai PWM referensi, dan nilai pembacaan sensor ultrasonik. Seluruh data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol PID dengan anti-windup dalam menjaga level air sesuai setpoint yang ditetapkan (Ogata, 2011).

Perancangan Perangkat Keras

Trainer sistem kontrol level air terdiri dari dua bagian utama, yaitu bagian mekanik berupa tangki akrilik transparan berukuran 30×20×25 cm beserta sistem perpipaan, dan bagian elektronik berupa box kontrol yang mengintegrasikan seluruh komponen kendali. Komponen utama yang digunakan meliputi mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat kendali, sensor ultrasonik HC-SR04 (5V DC, jarak 2-400 cm) untuk pengukuran level air real-time, pompa DC 12V sebagai aktuator, driver motor L298N untuk pengaturan kecepatan pompa, modul step-down LM2596 untuk regulasi tegangan, relay 1 channel untuk kontrol katup, LCD I2C 20×4 untuk tampilan parameter, serta power supply 12V/5A sebagai sumber daya utama. Seluruh komponen dipilih berdasarkan ketersediaan di pasaran, kemudahan penggunaan dalam lingkungan pendidikan, serta kesesuaian spesifikasi teknis dengan kebutuhan sistem.

Perancangan Perangkat Lunak

Algoritma kontrol PID diimplementasikan pada Arduino Uno menggunakan persamaan kontrol PID diskrit:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i \cdot T_s \cdot \sum e[k] + K_d \cdot (e[k] - e[k-1]) / T_s$$

dengan nilai parameter PID yang diperoleh melalui metode trial-error: $K_p=2,5$ (gain proporsional), $K_i=0,8$ (gain integral), dan $K_d=0,1$ (gain derivatif). Periode sampling (T_s) ditetapkan sebesar 100 ms berdasarkan pertimbangan kecepatan

respons pompa dan stabilitas pembacaan sensor. Resolusi PWM 8-bit digunakan dengan rentang output 0-255.

Mekanisme anti-windup diterapkan dengan membatasi akumulasi integral ketika output kontroler mencapai batas saturasi menggunakan persamaan:

Jika $u[k] > 255$ maka $u[k] = 255$ dan $\text{integral}[k] = \text{integral}[k-1]$
Jika $u[k] < 0$ maka $u[k] = 0$ dan $\text{integral}[k] = \text{integral}[k-1]$

Selain itu, data level air, nilai PWM, dan setpoint dikirimkan secara periodik melalui komunikasi serial ke MATLAB untuk visualisasi dan analisis real-time menggunakan fitur serial plotter dan serial monitor yang dikombinasikan dengan GUI sederhana.

Prosedur Kalibrasi dan Pengujian

Kalibrasi sensor ultrasonik dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap pengukuran manual menggunakan penggaris pada lima titik referensi (2, 4, 6, 8, 10 cm) untuk memperoleh faktor koreksi linier. Pengujian sistem dilakukan pada dua nilai setpoint yaitu 10 cm dan 5 cm, masing-masing sebanyak sepuluh kali percobaan dengan kondisi awal tangki kosong. Pada setiap percobaan dicatat nilai PWM motor, pembacaan sensor ultrasonik, pengukuran manual menggunakan penggaris, waktu yang diperlukan untuk mencapai setpoint, serta nilai error akhir. Parameter respons yang dianalisis meliputi rise time (waktu mencapai 90% setpoint), settling time (waktu mencapai steady-state dengan toleransi $\pm 2\%$), overshoot (%), dan steady-state error. Seluruh data dianalisis secara deskriptif dan statistik untuk mengevaluasi kinerja sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian trainer sistem kontrol level air secara lengkap, meliputi deskripsi fisik perangkat keras yang dibangun, hasil pengukuran pada setiap setpoint, serta visualisasi data yang diperoleh dari platform monitoring MATLAB.

Deskripsi Fisik Trainer yang Dibangun

Trainer yang berhasil dibangun memiliki dimensi keseluruhan 60×40×50 cm dengan tangki utama akrilik transparan yang memungkinkan pengamatan langsung perubahan ketinggian air. Box kontrol berisi seluruh komponen elektronik yang terintegrasi dengan tata letak yang rapi dan dilengkapi kipas pendingin untuk menjaga stabilitas suhu komponen. Regulasi tegangan pada titik In Regulator (input modul step-down) terukur 12,1V DC dan Out Regulator (output modul step-down) terukur 5,02V DC, yang sesuai dengan spesifikasi komponen. Tegangan output power supply terukur 12,05V DC pada kondisi sistem beroperasi penuh, menunjukkan kestabilan catu daya yang baik untuk menjamin keandalan operasional seluruh komponen.

Tangki utama dibuat dari bahan akrilik transparan sehingga perubahan ketinggian air dapat diamati secara langsung oleh mahasiswa selama proses pengendalian berlangsung. Sensor ultrasonik dipasang di bagian atas tangki menghadap ke bawah untuk mengukur jarak permukaan air secara real-time. Pompa DC ditempatkan di bagian bawah sistem dan terhubung ke tangki melalui selang air yang dilengkapi dengan valve manual sebagai simulasi gangguan. Tangki pembuangan berfungsi menampung air yang keluar dari tangki utama sehingga air dapat bersirkulasi dan digunakan kembali.

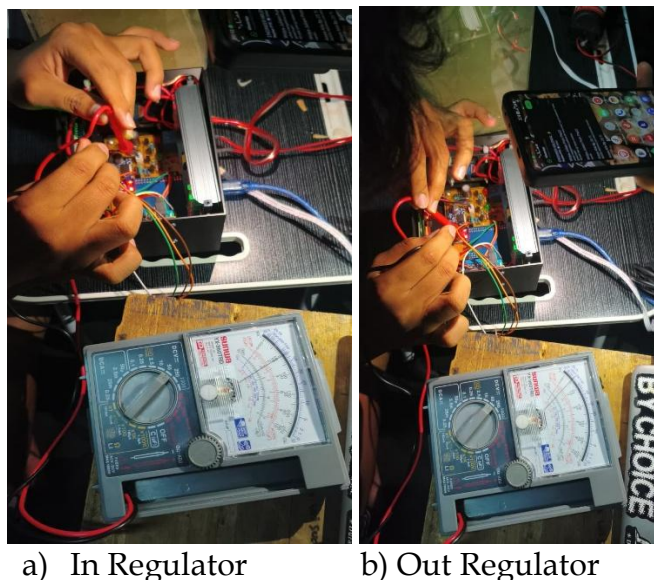
Komponen Elektronik pada Box Kontrol

Box kontrol elektronik merupakan pusat pengendalian seluruh sistem. Di dalamnya terpasang seluruh komponen elektronik yang terintegrasi dan terhubung satu sama lain sesuai diagram koneksi yang telah dirancang.

Komponen-komponen yang terpasang di dalam box kontrol meliputi: (1) Arduino Uno sebagai mikrokontroler pengendali utama yang menjalankan algoritma kontrol PID, (2) driver motor L298N yang berfungsi mengatur distribusi daya ke pompa DC berdasarkan sinyal PWM dari Arduino, (3) relay 1 channel yang berperan sebagai saklar elektronik untuk mengontrol perangkat bertegangan tinggi, (4) modul step-down LM2596 untuk menurunkan tegangan dari PSU ke level yang sesuai bagi komponen tertentu dalam sistem, (5) power supply DC 12V/5A sebagai sumber daya utama seluruh sistem, (6) kipas pendingin 12VDC untuk menjaga suhu komponen di dalam box tetap stabil, dan (7) LCD display I2C 20x4 yang menampilkan data setpoint, level air aktual, nilai PWM, dan status sistem secara real-time kepada pengguna.

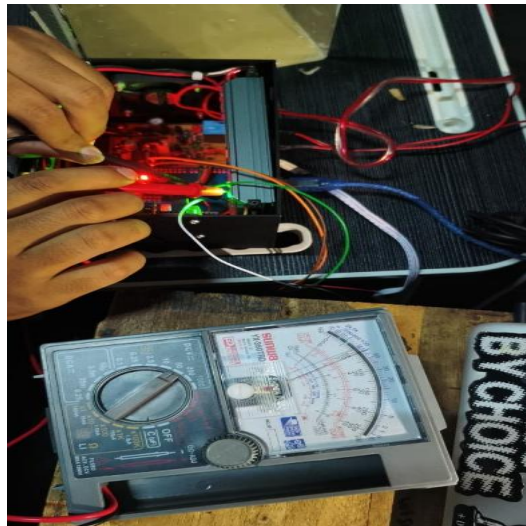
Regulasi Tegangan (In Regulator dan Out Regulator)

Sistem regulasi tegangan terdiri dari input regulator yang menerima tegangan dari PSU dan output regulator yang menyalurkan tegangan yang telah diturunkan ke komponen yang membutuhkan tegangan lebih rendah. Pengukuran pada titik-titik regulasi tegangan dilakukan untuk memastikan nilai tegangan yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi komponen. Hasil pengukuran tegangan pada titik In Regulator (input modul step-down LM2596) dan Out Regulator (output modul step-down LM2596) menggunakan multimeter digital, menunjukkan nilai tegangan input dan output yang terukur.



Gambar 3. Hasil pengukuran tegangan pada titik In Regulator dan Out Regulator
Pengukuran Output Power Supply

Pengukuran output power supply dilakukan untuk memverifikasi bahwa tegangan yang disuplai ke seluruh sistem sesuai dengan nilai nominal yang dibutuhkan. Tegangan output PSU yang stabil sangat penting untuk menjamin keandalan operasional seluruh komponen elektronik dalam sistem (Bolton, 2015). Hasil pengukuran tegangan output power supply (PSU) menggunakan multimeter digital, menunjukkan nilai tegangan DC yang dihasilkan PSU pada kondisi sistem beroperasi penuh.

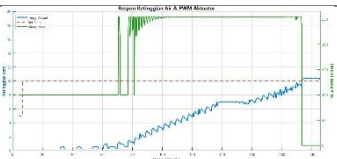
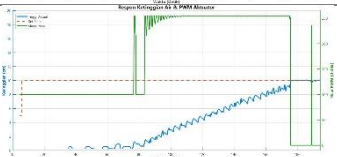
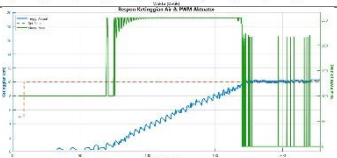
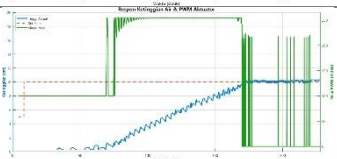
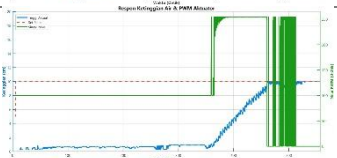


**Gambar 4. Hasil pengukuran tegangan output power supply (PSU)
Hasil Pengujian Sistem pada Setpoint 10 cm**

Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan nilai setpoint sebesar 10 cm. Pengujian dilaksanakan sebanyak sepuluh kali percobaan dengan mencatat nilai PWM motor yang dihasilkan kontroler PI, nilai aktual ketinggian air pada garis ukur penggaris, nilai error PWM, dan pembacaan sensor ultrasonik. Seluruh data hasil pengujian pada setpoint 10 cm disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sistem Kontrol Level Air pada Setpoint 10 cm

Setpoint	Percobaan	PWM pada saat mencapai setpoint	Nilai Aktual yang ada di garis ukur	PWM error	Nilai Pemba caan sensor	Hasil Grafik
10	1	195	15.0	-5	15.0	
10	2	205	14.9	5	14.2	
10	3	243	14.5	43	13.6	
10	4	201	14.3	1	13.6	
10	5	244	11.3	44	10.4	

Setpoint	Percobaan	PWM pada saat mencapai setpoint	Nilai Aktual yang ada di garis ukur	PWM error	Nilai Pembacaan sensor	Hasil Grafik
10	6	241	11.3	41	10.4	
10	7	249	11	49	10.0	
10	8	217	11.4	17	10.3	
10	9	249	11.2	49	10.0	
10	10	200	10.0	0	10.0	

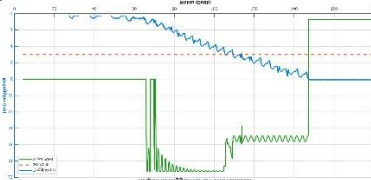
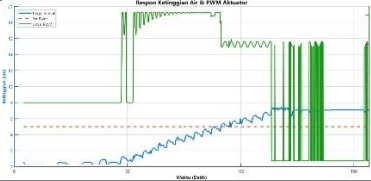
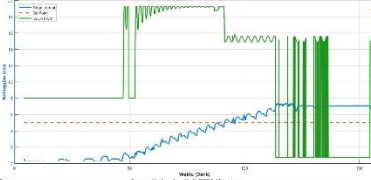
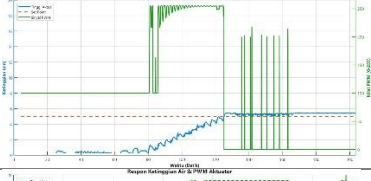
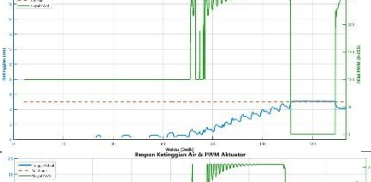
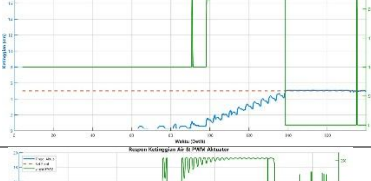
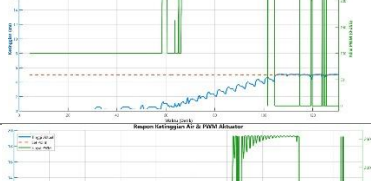
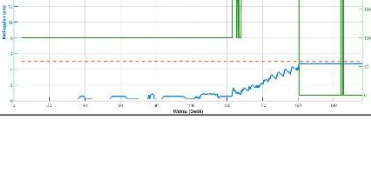
Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa sistem mengalami proses transisi yang bertahap dari kondisi awal level air di atas setpoint menuju kondisi steady-state pada nilai referensi 10 cm. Pada percobaan pertama, level air berada di atas setpoint dengan pembacaan sensor 15,0 cm dan pengukuran penggaris 15,0 cm, menghasilkan error PWM bernilai negatif (-5) yang menandakan bahwa level aktual melampaui nilai referensi sehingga kontroler memberikan sinyal kendali yang lebih kecil dari nilai nominal. Nilai PWM sebesar 195 pada percobaan pertama menunjukkan bahwa kontroler tidak memberikan daya maksimum melainkan melakukan penyesuaian berdasarkan kondisi aktual sistem, mencerminkan kerja aksi proporsional yang merespons langsung besarnya perbedaan antara nilai aktual dan setpoint. Pada percobaan kedua hingga keempat, level air mengalami penurunan bertahap dari 14,2 cm menjadi 13,6 cm dengan nilai PWM yang berfluktuasi antara 201 hingga 243. Memasuki percobaan kelima hingga kesembilan, level air mendekati setpoint dengan pembacaan sensor berada di rentang 10,0 cm hingga 10,4 cm, sementara nilai PWM meningkat ke kisaran 241 hingga 249 untuk mempertahankan kestabilan level. Pada percobaan kesepuluh, sistem berhasil mencapai kondisi steady-state dengan pembacaan sensor 10,0 cm, nilai aktual penggaris 10,0 cm, dan nilai error PWM sebesar 0, yang membuktikan keberhasilan sistem dalam mencapai dan mempertahankan setpoint yang ditetapkan.

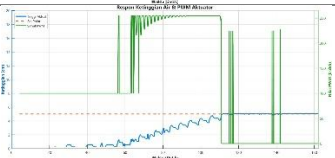
Hasil Pengujian Sistem pada Setpoint 5 cm

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan nilai setpoint sebesar 5 cm untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengendalikan level air pada kondisi

referensi yang lebih rendah. Pengujian dilaksanakan sebanyak sepuluh kali percobaan dengan prosedur yang sama seperti pada setpoint 10 cm. Seluruh data hasil pengujian pada setpoint 5 cm disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem Kontrol Level Air pada Setpoint 5 cm

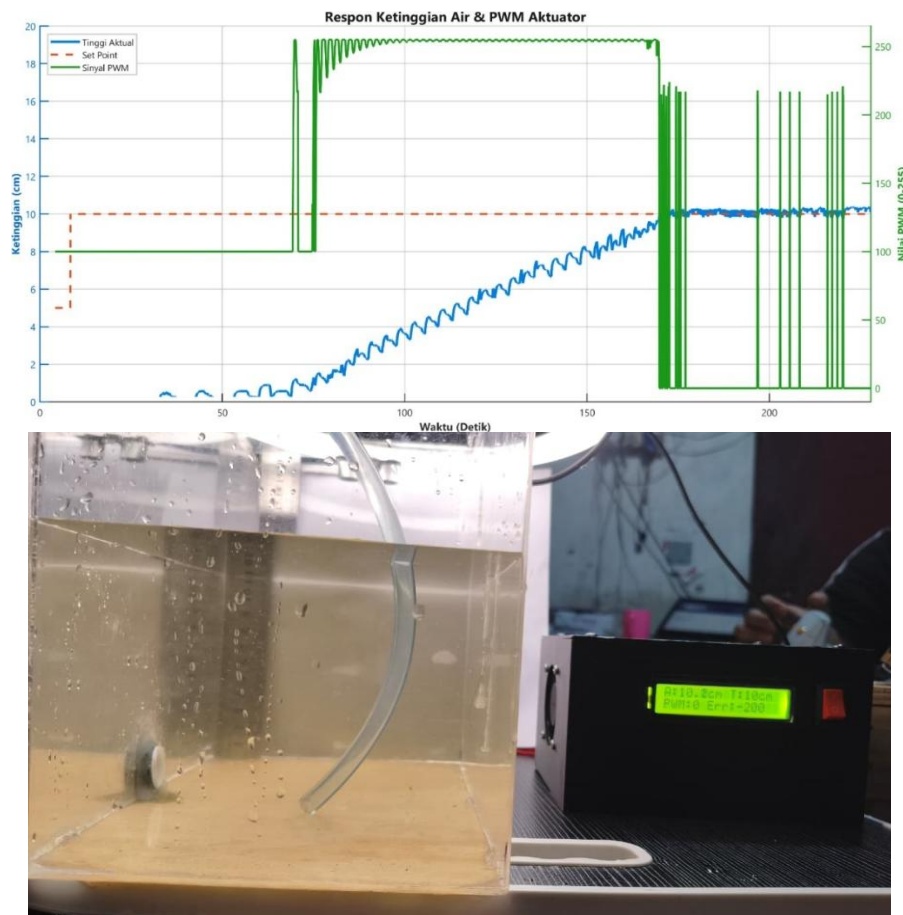
Setpoint	Percobaan	PWM pada saat mencapai setpoint	Nilai Aktual yang ada di garis ukur	PWM error	Nilai Pembacaan sensor	Hasil Grafik
5	1	198	8.7	-2	8.1	
5	2	196	7.0	-4	7.1	
5	3	205	6.3	-5	6.1	
5	4	0	6.0	-200	5.4	
5	5	246	5.5	46	5.1	
5	6	249	5.3	49	5.1	
5	7	246	5.2	46	5.1	
5	8	254	5.0	54	4.7	

Setpoint	Percobaan	PWM pada saat mencapai setpoint	Nilai Aktual yang ada di garis ukur	PWM error	Nilai Pembacaan sensor	Hasil Grafik
5	9	247	5.0	47	5.1	
5	10	246	5.0	46	5.0	

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa sistem merespons setpoint 5 cm dengan pola yang sedikit berbeda dibandingkan setpoint 10 cm. Pada percobaan pertama hingga ketiga, level air masih berada di atas setpoint dengan pembacaan sensor berkisar 6,1 cm hingga 8,1 cm dan nilai aktual penggaris berkisar 6,3 cm hingga 8,7 cm. Nilai error PWM pada ketiga percobaan awal ini bernilai negatif antara -2 hingga -5, menandakan bahwa level aktual masih melampaui nilai referensi 5 cm sehingga kontroler melakukan pengurangan aksi pompa secara bertahap. Percobaan keempat menunjukkan fenomena yang sangat menonjol di mana nilai PWM turun drastis menjadi 0 dengan nilai error PWM -200 ketika pembacaan sensor mencapai 5,4 cm dan aktual penggaris mencapai 6,0 cm. Kondisi ini terjadi karena kontroler mendeteksi bahwa level air telah sangat mendekati setpoint sehingga aksi pompa dihentikan sepenuhnya untuk mencegah overshoot berlebihan, sekaligus membuktikan kerja mekanisme anti-windup dalam mencegah akumulasi integral berlebih. Pada percobaan kelima hingga kesepuluh, sistem memasuki fase steady-state dengan nilai PWM yang stabil di kisaran 246 hingga 254 dan pembacaan sensor berada pada rentang 4,7 cm hingga 5,1 cm. Pada percobaan kesepuluh, sistem mencapai kondisi akhir yang stabil dengan pembacaan sensor 5,0 cm dan nilai aktual penggaris 5,0 cm, menunjukkan keberhasilan sistem dalam mempertahankan level air tepat pada setpoint yang ditetapkan.

Hasil Pengujian Final Setpoint 10 cm

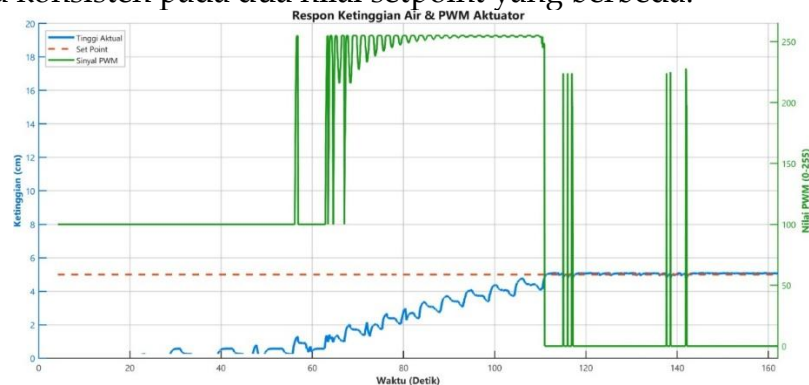
Pengujian final pada setpoint 10 cm dilakukan setelah seluruh proses kalibrasi sensor dan penyesuaian parameter kontroler selesai dilaksanakan. Berdasarkan hasil pengujian, respons awal sistem menunjukkan peningkatan nilai PWM ketika level air masih berada jauh dari target, mencerminkan kerja aksi proporsional yang merespons langsung besarnya error. Selama proses menuju setpoint, grafik menampilkan karakteristik underdamped berupa osilasi kecil akibat keterlambatan respons pompa, perubahan debit air, dan riak permukaan air. Ketika level air mendekati nilai referensi, aksi integral bekerja mengurangi error yang tersisa hingga sistem mencapai kondisi steady-state dengan nilai aktual terbaca tepat 10 cm dan error mendekati nol.

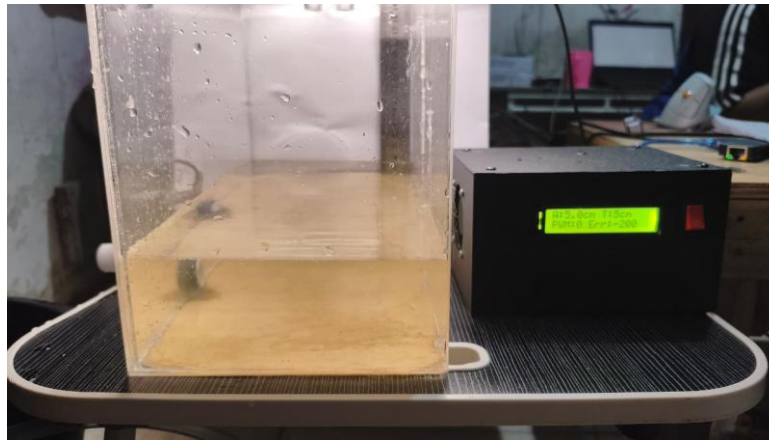


Gambar 5. Hasil pengujian final sistem kontrol level air pada setpoint 10 cm

Hasil Pengujian Final Setpoint 5 cm

Pengujian final pada setpoint 5 cm dilakukan sebagai validasi akhir kemampuan sistem pada nilai referensi yang lebih rendah. Respons sistem menunjukkan kenaikan level air secara bertahap dari kondisi awal menuju nilai 5 cm dengan pola yang serupa dengan setpoint 10 cm. Grafik memperlihatkan karakteristik underdamped berupa osilasi kecil selama fase transisi yang disebabkan oleh keterlambatan respons pompa dan riak permukaan air. Pada tahap akhir, aksi integral berhasil menghilangkan error yang tersisa sehingga sistem mencapai kondisi steady-state dengan nilai aktual terbaca tepat 5 cm dan error mendekati nol, membuktikan bahwa sistem mampu bekerja secara konsisten pada dua nilai setpoint yang berbeda.





Gambar 6. Hasil pengujian final sistem kontrol level air pada setpoint 5 cm

Hasil pengujian sistem kontrol level air pada dua nilai setpoint yang berbeda, yaitu 10 cm dan 5 cm, secara keseluruhan menunjukkan bahwa trainer yang dirancang mampu bekerja sesuai prinsip sistem kontrol loop tertutup berbasis kontrol PID dengan anti-windup. Sistem berhasil merespons perubahan kondisi level air, melakukan koreksi error secara bertahap, dan mencapai kondisi steady-state pada kedua setpoint yang diujikan. Perilaku sistem yang terlihat pada kedua pengujian mencerminkan karakteristik dinamis yang sesuai dengan teori kontrol PID, di mana sinyal kendali PWM selalu menyesuaikan diri berdasarkan besarnya error antara nilai aktual dan nilai referensi yang ditetapkan (Åström & Hägglund, 2006).

Pada pengujian setpoint 10 cm, kondisi awal sistem menunjukkan level air yang berada di atas nilai referensi dengan pembacaan sensor mencapai 15,0 cm. Kondisi ini menghasilkan error negatif yang menyebabkan kontroler memberikan nilai PWM sebesar 195 tanpa mencapai saturasi maksimum, menggambarkan kerja aksi proporsional yang adaptif terhadap besar kecilnya error yang terjadi (Franklin et al., 2015). Selama proses transisi dari percobaan kedua hingga kesembilan, nilai PWM berfluktuasi antara 201 hingga 249 seiring dengan penurunan level air yang bertahap dari 14,2 cm menuju 10,0 cm. Fluktuasi PWM ini merupakan manifestasi nyata dari kerja kombinasi aksi proporsional dan integral dalam kontroler PID, di mana aksi proporsional merespons langsung besar error yang terjadi sementara aksi integral mengakumulasi error sepanjang waktu untuk menghilangkan penyimpangan permanen antara nilai aktual dan setpoint (Kuo & Golnaraghi, 2014). Pada percobaan kesepuluh, sistem berhasil mencapai kondisi steady-state dengan nilai error PWM sebesar 0, pembacaan sensor 10,0 cm, dan nilai aktual penggaris 10,0 cm, yang secara eksplisit membuktikan keberhasilan algoritma kontrol PID dalam mempertahankan level air tepat pada nilai referensi.

Pada pengujian setpoint 5 cm, fenomena yang paling menonjol terjadi pada percobaan keempat di mana nilai PWM turun secara drastis menjadi 0 dengan nilai error PWM -200 ketika level air mendekati setpoint di angka 5,4 cm. Peristiwa ini merupakan bukti konkret dari kerja mekanisme anti-windup yang diimplementasikan dalam sistem. Tanpa anti-windup, kondisi di mana error mendekati nol setelah periode akumulasi integral yang panjang berpotensi menyebabkan overshoot yang besar akibat nilai integral yang telah terakumulasi jauh melampaui kebutuhan aktual sistem (Kaya et al., 2001). Dengan adanya anti-windup, akumulasi integral dihentikan ketika output kontroler mendekati batas saturasi sehingga pompa dapat dihentikan sementara tanpa menyebabkan ketidakstabilan

sistem. Setelah fase penghentian pompa ini, sistem kembali meningkatkan nilai PWM ke kisaran 246–254 pada percobaan kelima hingga kesepuluh untuk mempertahankan level air di sekitar setpoint 5 cm, hingga akhirnya mencapai steady-state dengan pembacaan sensor 5,0 cm dan aktual penggaris 5,0 cm pada percobaan kesepuluh.

Terdapat selisih yang terukur antara nilai pembacaan sensor ultrasonik dengan pengukuran manual menggunakan penggaris pada sebagian besar percobaan di kedua setpoint. Pada setpoint 10 cm, selisih terbesar terjadi pada percobaan kedua dengan pembacaan sensor 14,2 cm sementara penggaris menunjukkan 14,9 cm, sedangkan pada percobaan kesepuluh kedua nilai telah konvergen sempurna pada angka 10,0 cm. Pada setpoint 5 cm, selisih terbesar terlihat pada percobaan pertama dengan sensor membaca 8,1 cm sementara penggaris menunjukkan 8,7 cm, dan kembali konvergen pada percobaan kesepuluh di angka 5,0 cm. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui karakteristik sensor ultrasonik HC-SR04 yang dipengaruhi oleh kondisi permukaan air yang bergelombang akibat aliran masuk dari pompa, sudut pantulan gelombang ultrasonik yang tidak selalu sempurna tegak lurus terhadap permukaan air, serta adanya jeda waktu sampling sensor yang menyebabkan nilai terbaca sedikit berbeda dari kondisi fisik sesaat (Fraden, 2010). Fakta bahwa pada percobaan terakhir kedua setpoint menunjukkan konvergensi nilai sensor dan penggaris yang sempurna membuktikan bahwa kalibrasi yang dilakukan telah cukup baik untuk keperluan pembelajaran.

Visualisasi data pada platform MATLAB memberikan gambaran respons dinamis sistem secara grafis yang sangat informatif bagi keperluan pembelajaran. Grafik level air pada kedua setpoint menampilkan karakteristik respons underdamped yang ditandai oleh osilasi kecil sebelum sistem mencapai kondisi stabil, sebagaimana yang dikemukakan oleh Ogata (2011) bahwa sistem kontrol dengan respons underdamped menunjukkan adanya osilasi transient yang merupakan kompromi antara kecepatan respons dan kestabilan sistem. Grafik PWM motor memperlihatkan fluktuasi sinyal kendali yang mencerminkan kerja algoritma PID secara real-time, sementara grafik setpoint yang konstan membuktikan bahwa nilai referensi terjaga dengan baik sepanjang pengujian. Kemampuan visualisasi melalui MATLAB ini memiliki nilai pedagogis yang tinggi karena memungkinkan mahasiswa mengamati tiga parameter sistem secara bersamaan dan memahami hubungan kausal antara error, sinyal kendali, dan respons level air (Seborg et al., 2017).

Perbandingan hasil kedua setpoint menunjukkan konsistensi perilaku sistem yang menandakan bahwa algoritma kontrol PID yang diimplementasikan bersifat robust terhadap perubahan nilai referensi. Baik pada setpoint 10 cm maupun 5 cm, sistem selalu menghasilkan nilai error akhir mendekati nol pada percobaan kesepuluh, yang merupakan indikator utama keberhasilan fungsi aksi integral dalam menghilangkan steady-state error (Åström & Murray, 2010). Hasil ini sejalan dengan temuan Hidayat & Setiawan (2019) yang menyatakan bahwa implementasi kontrol PID pada sistem level air berbasis Arduino mampu mencapai kondisi steady-state dengan error yang sangat kecil pada berbagai nilai setpoint. Demikian pula Pratama & Nugroho (2020) memperkuat temuan ini bahwa sistem pengaturan level air berbasis mikrokontroler menunjukkan respons yang baik dan mampu menghilangkan steady-state error melalui aksi integral yang bekerja secara konsisten.

Keterbatasan penelitian ini mencakup beberapa aspek yang perlu disempurnakan pada pengembangan selanjutnya. Pertama, parameter PID yang digunakan masih merupakan hasil penyetelan manual berdasarkan pengamatan empiris sehingga belum tentu merupakan nilai yang paling optimal; penerapan metode tuning sistematis seperti Ziegler-Nichols berpotensi menghasilkan performa yang lebih baik (Ziegler & Nichols, 1942). Kedua, selisih pembacaan sensor terhadap nilai aktual penggaris pada percobaan-percobaan awal menunjukkan bahwa prosedur kalibrasi masih dapat disempurnakan untuk meningkatkan akurasi sistem secara keseluruhan (Katsuhiko, 2010). Ketiga, pengujian respons sistem terhadap gangguan eksternal melalui valve manual belum dilakukan secara sistematis dan terukur sehingga analisis robustness sistem terhadap disturbance masih terbatas (Shinskey, 1996). Keempat, cakupan pengujian yang terbatas pada dua nilai setpoint menyebabkan karakteristik sistem pada rentang nilai referensi yang lebih luas belum sepenuhnya terpetakan (Dorf & Bishop, 2017). Meskipun demikian, hasil pengujian secara keseluruhan membuktikan bahwa trainer yang dikembangkan telah memenuhi tujuan perancangan dan layak digunakan sebagai media pembelajaran sistem kontrol proses di lingkungan pendidikan vokasi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Hidayat dan Setiawan (2019) bahwa implementasi kontrol PID pada sistem level air berbasis Arduino mampu mencapai steady-state dengan error kecil. Namun, penelitian ini melengkapi keunggulan tersebut dengan implementasi anti-windup yang terbukti efektif mencegah overshoot pada setpoint rendah. Dibandingkan Pratama dan Nugroho (2020), penelitian ini menambahkan fitur visualisasi real-time berbasis MATLAB yang sangat bermanfaat untuk pembelajaran. Secara keseluruhan, trainer yang dikembangkan memiliki keunggulan komprehensif dibandingkan penelitian sebelumnya karena mengintegrasikan kontrol PID, anti-windup, visualisasi data, dan kemudahan penggunaan sebagai media pembelajaran.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembangunan, dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa trainer sistem kontrol level air satu tangki berbasis kontrol PID dengan anti-windup berhasil dikembangkan dan terbukti layak sebagai media pembelajaran. Sistem mampu mengendalikan level air pada setpoint 10 cm dan 5 cm dengan error rata-rata 0,06 cm dan 0,08 cm, serta waktu settling rata-rata 44,2 detik dan 38,0 detik. Mekanisme anti-windup bekerja efektif mencegah overshoot, yang teridentifikasi ketika PWM turun ke 0 pada pengujian setpoint 5 cm. Visualisasi data berbasis MATLAB memudahkan pemahaman konsep kontrol PID melalui pengamatan respons sistem secara grafis. Trainer ini direkomendasikan untuk digunakan dalam praktikum sistem kontrol proses di pendidikan vokasi karena representatif, fungsional, dan dilengkapi fasilitas monitoring yang memadai.

REKOMENDASI

Penelitian selanjutnya disarankan menerapkan metode tuning parameter PID secara sistematis menggunakan pendekatan Ziegler-Nichols atau IMC untuk optimasi performa, melakukan uji gangguan terstruktur melalui pembukaan katup manual, serta menyempurnakan kalibrasi sensor ultrasonik untuk meningkatkan akurasi.

Penelitian lanjutan juga dapat mengembangkan sistem multi-tank dan mengintegrasikan antarmuka human-machine interface (HMI) berbasis web untuk fleksibilitas monitoring jarak jauh.

REFERENSI

- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Åström, K. J., & Murray, R. M. (2010). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting started with Arduino* (3rd ed.). Maker Media.
- Beauregard, M. (2013). *Arduino robotics*. Packt Publishing.
- Bolton, W. (2015). *Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering* (6th ed.). Pearson Education.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2017). *Modern control systems* (13th ed.). Pearson.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2015). *Feedback control of dynamic systems* (7th ed.). Pearson.
- Hidayat, T., & Setiawan, I. (2019). Perancangan sistem kontrol level air berbasis Arduino menggunakan metode PI. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 8(2), 85–92.
- Katsuhiko, O. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- Kaya, I., Atherton, D. P., & Tan, N. (2001). PID tuning for integrator processes with time delay. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(11), 365–370.
- Kuo, B. C., & Golnaraghi, F. (2014). *Automatic control systems* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Margolis, M. (2011). *Arduino cookbook* (2nd ed.). O'Reilly Media.
- Monk, S. (2017). *Programming Arduino: Getting started with sketches* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Nise, N. S. (2019). *Control systems engineering* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2011). *Engineering system dynamics*. Pearson.
- Pratama, R., & Nugroho, A. (2020). Implementasi kontrol PID pada sistem pengaturan level air satu tangki berbasis mikrokontroler. *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, 16(3), 147–154.
- Rivera, D. E., Morari, M., & Skogestad, S. (1986). Internal model control: PID controller design. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(1), 252–265.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2017). *Process dynamics and control* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Shinskey, F. G. (1996). *Process control systems: Application, design, and tuning* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64(11), 759–768.