



Sistem Pengendalian Level dan Aliran Air Menggunakan Metode *Cascade* PID pada Modul Latih RT 512 dan RT 522

Galih Tejo Bowo Laksono*, Dian Figana

Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia

Email: dian.figana@elektro.pnj.ac.id*

Keywords:

Cohen-Coon, Cascade; Flow; Level; PID (Proportional, Integral, Derivative)

ABSTRACT

This research aims to analyze the performance of water level and flow control systems on the RT 512 and RT 522 Trainer Modules using the Cascade PID control method. The trainer modules are experimental control system devices consisting of a level control plant (RT 512) and a flow control plant (RT 522) hydraulically connected. The research was conducted through open-loop data acquisition to obtain plant response curves, mathematical modeling in the form of First Order Plus Dead Time (FOPDT) transfer functions, and PID tuning parameter calculations using the Cohen-Coon method. The PID parameters obtained for the primary loop (level) are $K_p = 0.2196$, $K_i = 0.0089$, and $K_d = 0.8231$, while for the secondary loop (flow) are $K_p = 0.0861$, $K_i = 0.0871$, and $K_d = 0.1702$. Closed-loop testing was performed at a set point of 40 cm by comparing the performance of single-loop PID and Cascade PID controllers. The results showed that the Cascade PID controller produced faster transient response with rise time of 140.5 seconds, delay time of 75.5 seconds, settling time of 432.975 seconds, and steady-state error of 2.5%, compared to single-loop PID which had rise time of 271.5 seconds, delay time of 127.5 seconds, settling time of 722.464 seconds, and steady-state error of 5%. Although the overshoot of Cascade PID was higher (17.5%) compared to single-loop (5%), this value remains within the system tolerance limit. Stability analysis using the Routh-Hurwitz method confirmed that the closed-loop system is stable. This research proves that the Cascade PID method with Cohen-Coon tuning effectively improves the performance of level and flow control in systems with different dynamics, and provides practical contributions to the development of control systems in industrial processes.

Kata Kunci:

Aliran; Cohen Coon; Cascade; Level; PID (Proportional, Integral, Derivative)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pengendalian level dan aliran air pada Modul Latih RT 512 dan RT 522 menggunakan metode kontrol *Cascade* PID. Modul latihan yang digunakan merupakan perangkat eksperimen sistem kontrol yang terdiri dari plant pengendali level (RT 512) dan plant pengendali aliran (RT 522) yang saling terhubung secara hidrolik. Penelitian dilakukan melalui pengambilan data open loop untuk memperoleh kurva respon plant, kemudian pemodelan matematis dalam bentuk fungsi alih *First Order Plus Dead Time* (FOPDT), serta perhitungan parameter tuning PID menggunakan metode *Cohen-Coon*. Parameter PID yang diperoleh untuk loop primer (level) adalah $K_p = 0.2196$, $K_i = 0.0089$, dan $K_d = 0.8231$, sedangkan untuk loop sekunder (aliran) adalah $K_p = 0.0861$, $K_i = 0.0871$, dan $K_d = 0.1702$. Pengujian closed loop dilakukan pada set point 40 cm dengan membandingkan kinerja kontroler *single loop PID* dan *Cascade PID*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontroler *Cascade PID* menghasilkan respon transien yang lebih cepat dengan rise time 140.5 detik, delay time 75.5 detik, settling time 432.975 detik, dan error steady state 2.5%, dibandingkan *single loop PID* yang memiliki rise time 271.5 detik,

delay time 127.5 detik, settling time 722.464 detik, dan error steady state 5%. Meskipun *overshoot* pada *Cascade* PID lebih tinggi (17.5%) dibandingkan *single loop* (5%), nilai tersebut masih dalam batas toleransi sistem. Analisis kestabilan menggunakan metode Routh-Hurwitz memastikan bahwa sistem *closed loop* dalam kondisi stabil. Penelitian ini membuktikan bahwa metode *Cascade* PID dengan tuning *Cohen-Coon* efektif meningkatkan kinerja pengendalian level dan aliran pada sistem dengan dinamika yang berbeda, serta memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan sistem kontrol di industri proses.

PENDAHULUAN

Modul latihan kontrol dan instrument digunakan sebagai sarana dalam memberikan informasi tentang penggunaan *instrument* dari suatu sistem control (Rahman et al., 2022). Modul Latihan dibutuhkan agar mahasiswa dapat mengetahui apakah sistem kontrol yang telah dibuat dapat bekerja seperti yang diinginkan atau tidak (Aji et al., 2020; Islamiyah, 2021). Sebagai contoh, pada sistem kontrol level dan aliran untuk mempelajari sifat, karakter, dan performanya (Dethan et al., 2024). Salah satu penerapannya yaitu pengendalian level dan aliran air pada sebuah sistem Modul Latihan RT 512 dan RT 522 (Siregar et al., 2022). Modul Latihan RT 512 berfungsi mengendalikan level air dan Modul Latihan RT 522 berfungsi mengendalikan aliran air (Islamiyah, 2021). Kesenjangan penelitian (*research gap*) teridentifikasi pada terbatasnya studi yang secara komprehensif membandingkan kinerja kontroler *Cascade* PID dengan kontroler PID *single loop* pada sistem level dan aliran yang saling terinteraksi (*coupled system*). Meskipun penelitian oleh Handoko (2023) telah menerapkan metode *Cascade* Fuzzy-PID, penelitian tersebut tidak melakukan analisis kestabilan sistem secara matematis menggunakan metode *Routh-Hurwitz*. Penelitian Laksono (2023) telah menerapkan *Cascade* PID dengan tuning *Cohen-Coon*, namun belum membandingkan secara kuantitatif peningkatan kinerja respon transien antara *Cascade* PID dan *single loop* PID. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan pemodelan matematis plant (*transfer function*), tuning PID dengan metode *Cohen-Coon*, dan analisis kestabilan *Routh-Hurwitz* secara lengkap pada modul latihan RT 512 dan RT 522.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja kontroler *Cascade PID* versus *single loop* PID pada sistem level dan aliran yang terintegrasi. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan dalam pemilihan metode kontrol yang tepat untuk aplikasi industri dengan karakteristik plant serupa, yaitu sistem dengan interaksi antara dua variabel proses (level dan aliran) dan memiliki waktu mati (*dead time*). Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada: (1) perbandingan kuantitatif respon transien antara kontroler *Cascade* PID dan *single loop* PID pada plant yang sama; (2) analisis kestabilan sistem menggunakan metode *Routh-Hurwitz* untuk memastikan keandalan sistem; dan (3) pemodelan matematis plant dalam bentuk fungsi alih (*transfer function*) *FOPDT* (*First Order Plus Dead Time*) sebagai dasar perhitungan parameter tuning.

Kontrol ketinggian level permukaan air merupakan suatu parameter yang banyak dipantau dan dianalisa perubahannya. Pada umumnya, industri membutuhkan keakuratan dalam pengukuran di setiap lini produksi. Dalam hal ini, pengukuran ketinggian atau level dan kecepatan aliran atau *flow* merupakan beberapa hal yang harus diperhatikan (Supriadi, 2015).

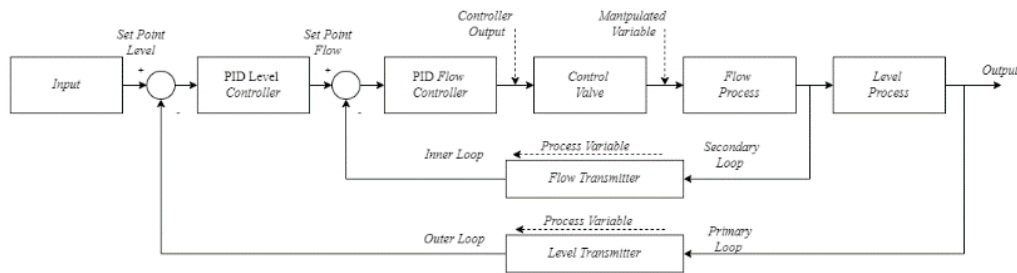
Tujuan dari pengendalian level untuk memastikan kualitas dan kuantitas bahan baku, bahan setengah jadi atau produk jadi yang akan di tampung pada suatu tangki dengan memantau atau menyesuaikan antara masukan dengan keluaran (Setiawan & Munandar, 2019).

Prinsip pada Modul Latih RT 512 dan Modul Latih RT 522 memiliki yang sama dengan *Automatic Tank Gauging* (ATG). Modul Latih RT 512 dan Modul Latih RT 522 terdiri dari *sensor*, *controller*, dan *actuator*. *Automatic Tank Gauging* (ATG) menjadi salah satu alat ukur ketinggian cairan dalam tangki, baik tangki *crude oil* maupun tangki produk dengan menggunakan sistem digital atau bekerja secara otomatis dan terus-menerus yang kemudian dihitung secara otomatis sehingga menjadi sebuah data yang akan dikirim ke *control room* (Agustha et al., 2021).

Pada penelitian ini akan dilakukan pada Modul Latih RT 512 dan Modul Latih RT 522 dengan menggunakan metode *Cascade* PID. Metode yang digunakan adalah PID Cohen-Coon yang diintegrasikan dengan software MATLAB untuk mengoptimalkan sistem kontrol yang ada pada Modul Latih RT 512 dan RT 522. Dikarenakan pada metode *Cascade* PID memiliki dua parameter PID yaitu parameter *PID loop secondary* (aliran) dan parameter *PID loop primary*(level). Tujuan dari metode *Cascade* PID adalah memperoleh respon yang ideal yang serta dapat mengurangi gangguan (*disturbance*), meningkatkan akurasi pengendalian, mendapatkan hasil pengendalian yang halus dan menambah sistem keamanan operasi (Ir. HERIYANTO, 2010).

METODE PENELITIAN

Perancangan alat merupakan bagian yang sangat penting untuk mengetahui rancangan awal dari suatu alat yang akan dibuat (Abdul Aziz & Rahmad, 2021; Jianwang, 2021). Fungsi dari sistem kontrol cascade PID untuk mengendalikan dan mempertahankan level dan aliran air pada Modul Latih RT 512 dan Modul Latih RT 522 (Siddiqui et al., 2021) untuk mendapatkan respon optimal dengan menggunakan metode Cascade PID (Pratama et al., 2024; Hady et al., 2021). Sistem dari Modul Latih RT 512 dan RT 522 merupakan sistem yang terdiri dari dua bagian yaitu *plant* pengontrol aliran dan *plant* pengontrol level (INDRIYANI, 2018). Modul Latih Level RT 512 dan *Flow* RT 522 ini terdiri atas 2 tangki pengukuran air, yaitu tangki B1 dan tangki B2. Pengukuran level dapat terlihat jelas pada tangki B1 karena terbuat dari plastik transparan. Sedangkan tangki B2 dengan *sight glass* terletak tertutup pada bagian bawah sistem untuk menampung air yang akan di alirkan ke B1 melalui pompa.



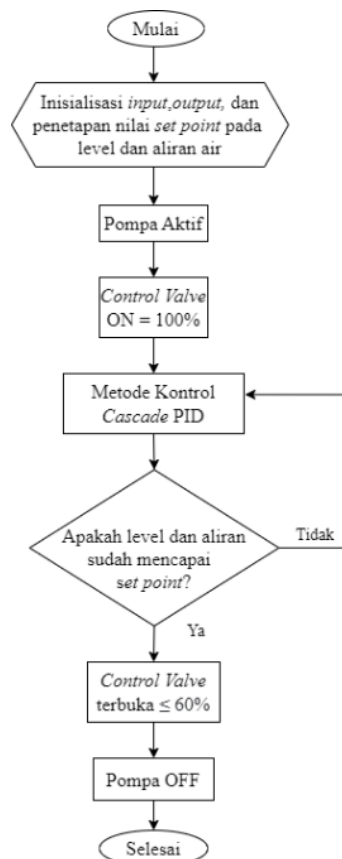
Gambar 3. Diagram Blok *Feedback Cascade PID*

Sumber: Diolah oleh penulis berdasarkan Heriyanto (2010).

Terdapat blok *input*, proses dan *output* pada sistem pengaturan level dan aliran air yang akan diterapkan pada Modul Latih RT 512 dan RT 522. Pada blok *input* pada sistem ini terdiri dari sensor tekanan yang berfungsi untuk mengukur ketinggian atau level air yang berada di dalam tangki transparan B1 dan sensor aliran Elektromagnetik yang berfungsi untuk mendeteksi laju aliran yang mengalir pada pipa.

Blok proses pada sistem ini terdiri dari *Programmable Logic Controller* (PLC) yang akan mengolah data dari sensor tekanan dan sensor aliran elektromagnetik. Kemudian, hasil dari pengolahan data tersebut dikirim ke *motorised control valve*.

Blok *output* merupakan blok yang terdapat komponen untuk menghasilkan atau mengeluarkan data yang telah diproses pada blok proses. *control valve* sebagai aktuator yang berfungsi untuk mengatur keluaran air sesuai dengan *set point*.



Gambar 4. Flowchart *Cascade PID*

Sumber: Diolah oleh penulis (2026).

Berikutnya *flowchart* dengan metode kontrol *Cascade PID*. Langkah awal yang dilakukan pada sistem dengan melakukan inisialisasi pada *input* dan *output* serta penetapan *set point* level 40 cm. Setelah itu, pompa akan menyala. Kemudian *control valve* aktif dengan bukaan *valve* 100%. Selanjutnya air akan mengalir ke tangki B1, sensor tekanan akan mendeteksi level air di tangki tersebut dan sensor aliran elektromagnetik akan mendeteksi aliran air yang mengalir pada pipa. Dan metode kontrol *Cascade PID* akan bekerja.

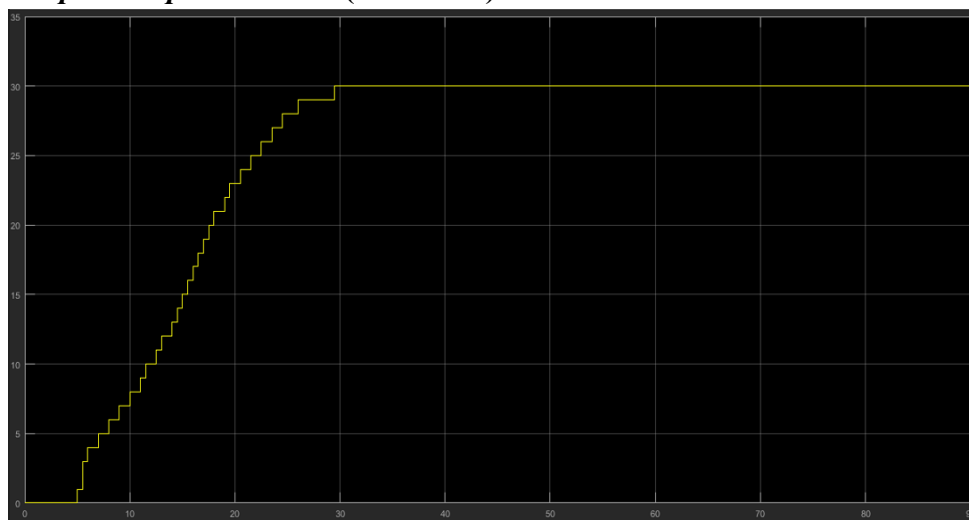
Jika level air pada tangki B1 sudah sesuai dengan *set point* (40 cm) maka *control valve* akan menjaga bukaan katup sebesar $\leq 60\%$ agar tetap pada level *set point* (40cm), sedangkan jika level air pada tangki B1 belum mencapai *set point* level (40 cm) maka sistem akan kembali ke proses sebelumnya. Ketika *set point* pada sistem ini tercapai, pompa akan mati dan proses selesai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hasil Pengujian

Pengujian untuk mengetahui hasil respon dan kestabilan level, aliran dan secara *cascade* pada Modul Latih RT 512 dan RT 522 terhadap *set point* yang telah ditetapkan sebesar 40 cm pada tangki level.

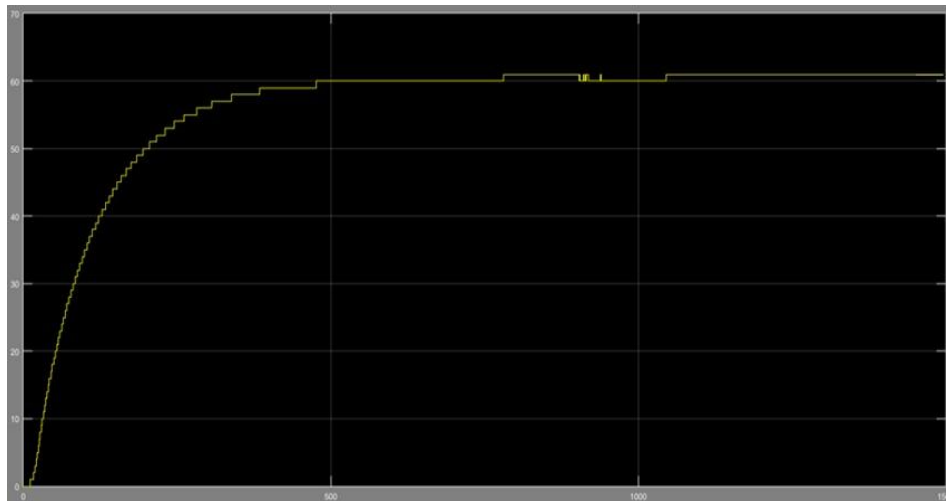
Pengujian *Open Loop* Aliran Air (Sekunder)



Gambar 5. Grafik *Open Loop* Aliran Pada Matlab

Sumber: Hasil simulasi MATLAB R2024a, diolah oleh penulis (2026).

Pengujian *Open Loop* Level Air (Primer)



Gambar 6. Grafik *Open Loop* Level Pada Matlab

Sumber: Hasil simulasi MATLAB R2024a, diolah oleh penulis (2026).

Pemodelan Matematika

Loop Sekunder

Setelah pengujian pengambilan data sekunder (aliran), kemudian melakukan pemodelan matematika dalam bentuk *transfer function* (fungsi alih) dengan menggunakan pendekatan metode FOPDT (*First Orde Plus Dead Time*). Berdasarkan grafik gambar 5 didapatkan nilai-nilai parameter sebagai berikut :

Nilai maksimum *output* = 30

Nilai minimum *output* = 0

Kemudian,

Δ = Nilai maksimum *output* – Nilai minimum *output*

$\Delta = 30 - 0$

Maka, nilai $\Delta = 30$

Selanjutnya,

δ = Nilai maksimum *input* – Nilai minimum *input*

$\delta = 1 - 0$

Maka, nilai $\delta = 1$

Untuk mendapatkan nilai *gain* K_p , menggunakan persamaan.

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta}$$

$$K_p = \frac{30}{1}$$

Didapat nilai $K_p = 30$

Lalu, untuk mendapatkan $t_{63\%}$ menggunakan persamaan.

$$63\% \Delta = \Delta (0.63)$$

$$63\% \Delta = 30 \times 0.63$$

$$63\% \Delta = 18.9$$

$$t_{63\%} = 16.5 \text{ s}$$

Dan untuk mendapatkan $t_{28\%}$ menggunakan persamaan.

$$28\%\Delta = \Delta (0.28)$$

$$28\%\Delta = 30 \times 0.28$$

$$28\%\Delta = 8.4$$

$$t_{28\%} = 9.5 \text{ s}$$

Kemudian perhitungan untuk mendapatkan nilai τ menggunakan persamaan.

$$\tau = 1.5 (t_{63\%} - t_{28\%})$$

$$\tau = 1.5 (16.5 - 9.5)$$

$$\tau = 1.5 (7)$$

$$\tau = 10.5 \text{ s}$$

Dan untuk mendapatkan nilai L menggunakan persamaan.

$$L = t_{63\%} - \tau$$

$$L = 16.5 - 10.5$$

$$L = 6 \text{ s}$$

Selanjutnya mencari nilai fungsi alih (*transfer function*) dengan menggunakan persamaan.

$$Gp(s) = \frac{Kp}{\tau(s) + 1} e^{-Ls}$$

$$Gp(s) = \frac{30}{10.5(s) + 1} e^{-6s}$$

Loop Primer

Selanjutnya perhitungan pemodelan matematika pada hasil pengujian pengambilan data *loop primer* (level). Pemodelan matematika ini dalam bentuk *transfer function* (fungsi alih) dengan menggunakan pendekatan metode FOPDT (*First Orde Plus Dead Time*). Berdasarkan grafik gambar 6 didapatkan nilai-nilai parameter sebagai berikut :

Nilai maksimum *output* = 61

Nilai minimum *output* = 0

Kemudian,

$$\Delta = \text{Nilai maksimum } output - \text{Nilai minimum } output$$

$$\Delta = 61 - 0$$

Maka, nilai $\Delta = 61$

Selanjutnya,

$$\delta = \text{Nilai maksimum } input - \text{Nilai minimum } input$$

$$\delta = 1 - 0$$

Maka, nilai $\delta = 1$

Untuk mendapatkan nilai *gain* Kp, menggunakan persamaan.

$$Kp = \frac{\Delta}{\delta}$$

$$Kp = \frac{61}{1}$$

Didapat nilai $Kp = 61$

Lalu, untuk mendapatkan $t_{63\%}$ menggunakan persamaan.

$$63\%\Delta = \Delta (0.63)$$

$$63\%\Delta = 61 \times 0.63$$

$$63\%\Delta = 38.43$$

$$t_{63\%} = 114 \text{ s}$$

Dan untuk mendapatkan $t_{28\%}$ menggunakan persamaan.

$$28\% \Delta = \Delta (0.28)$$

$$28\% \Delta = 61 \times 0.28$$

$$28\% \Delta = 17.08$$

$$t_{28\%} = 45 \text{ s}$$

Kemudian perhitungan untuk mendapatkan nilai τ menggunakan persamaan.

$$\tau = 1.5 (t_{63\%} - t_{28\%})$$

$$\tau = 1.5 (114 - 45)$$

$$\tau = 1.5 (69)$$

$$\tau = 103.5 \text{ s}$$

Dan untuk mendapatkan nilai L menggunakan persamaan.

$$L = t_{63\%} - \tau$$

$$L = 114 - 103.5$$

$$L = 10.5 \text{ s}$$

Selanjutnya mencari nilai fungsi alih (*transfer function*) dengan menggunakan persamaan.

$$Gp(s) = \frac{Kp}{\tau(s) + 1} e^{-Ls}$$

$$Gp(s) = \frac{61}{103.5(s) + 1} e^{-10.5s}$$

Perancangan Pengendalian PID

Dalam menentukan parameter masukan PID, diperlukan tiga parameter masukan PID yang sesuai dengan tabel diatas yaitu parameter K (*gain*), τ (*constant time*), t_d (*transport delay*).Berikut ini tabel aturan metode Cohen-Coon :

Tipe	Kp	Ti	Td
P	$\left(\frac{\tau}{Kt_d}\right)\left(1 + \frac{t_d}{3\tau}\right)$	-	-
PI	$\left(\frac{\tau}{Kt_d}\right)\left(0.9 + \frac{t_d}{12\tau}\right)$	$t_d \left(\frac{30 + \frac{3t_d}{\tau}}{9 + \frac{20t_d}{\tau}}\right)$	-
PID	$\left(\frac{\tau}{Kt_d}\right)\left(\frac{4}{3} + \frac{t_d}{4\tau}\right)$	$t_d \left(\frac{32 + \frac{6t_d}{\tau}}{13 + \frac{8t_d}{\tau}}\right)$	$t_d \left(\frac{4}{11 + \frac{2t_d}{\tau}}\right)$

Gambar 7. Aturan Tuning PID Metode Cohen-Coon

Sumber: Cohen & Coon (1953), diadaptasi oleh penulis.

Loop Sekunder (Aliran)

Setelah mendapatkan nilai *transfer function* $Gp(s)$, parameter τ dan L. maka selanjutnya melakukan perhitungan untuk *Tuning* PID pada aliran dengan aturan metode Cohen-Coon seperti yang ditunjukkan pada tabel 1.

Parameter PID

a) Nilai *Proportional* (P)

$$Kp = \left(\frac{T}{K_L}\right)\left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T}\right)$$

$$Kp = 0.086111057$$

b) Nilai *Integral* (I)

$$T_i = L \left(\frac{32 + 6 \frac{L}{T}}{13 + 8 \frac{L}{T}} \right)$$

$$T_i = 12.09756096$$

Selanjutnya perhitungan nilai K_i

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_i = \frac{0.08611057}{12.09756096}$$

$$\mathbf{K_i = 0.007118051}$$

c) Nilai *Derivative* (D)

$$T_d = L \left(\frac{4}{11 + 2 \frac{L}{T}} \right)$$

$$T_d = 1.97647056$$

Selanjutnya perhitungan nilai K_d

$$K_d = K_p \times T_d$$

$$K_d = 0.086111057 \times 1.97647056$$

$$\mathbf{K_d = 0.1701959691}$$

Terdapat optimalisasi perancangan PID dengan *single loop* sekunder. Sehingga didapat hasil $\mathbf{K_p = 0.086111057}$, $\mathbf{K_i = 0.087118051}$ dan $\mathbf{K_d = 0.9701959691}$.

Loop Primer (Level)

Setelah mendapatkan nilai *transfer function* $G_p(s)$, parameter τ dan L . maka selanjutnya melakukan perhitungan untuk *Tuning* PID pada level dengan aturan metode Cohen-Coon seperti yang ditunjukkan pada tabel 1.

Parameter PID

a) Nilai *Proportional* (P)

$$K_p = \left(\frac{T}{K_L} \right) \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T} \right)$$

$$\mathbf{K_p = 0.2195550187}$$

b) Nilai *Integral* (I)

$$T_i = L \left(\frac{32 + 6 \frac{L}{T}}{13 + 8 \frac{L}{T}} \right)$$

$$T_i = 24.7901325$$

Selanjutnya perhitungan nilai K_i

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_i = \frac{0.2195550187}{24.7901325}$$

$$\mathbf{K_i = 0.0088565488}$$

c) Nilai *Derivative* (D)

$$T_d = L \left(\frac{4}{11 + 2 \frac{L}{T}} \right)$$

$$T_d = 3.749029725$$

Selanjutnya perhitungan nilai K_d

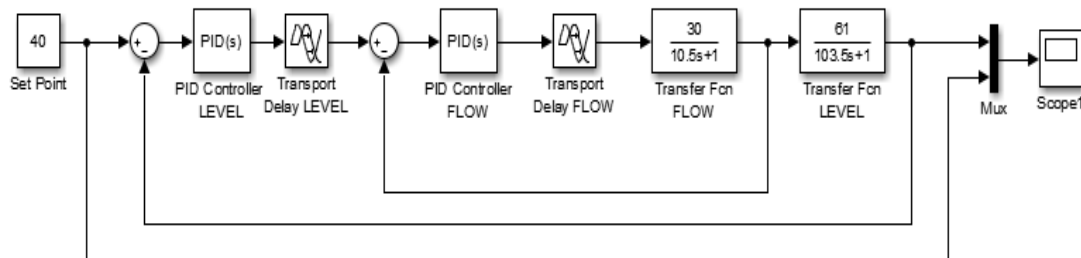
$$K_d = K_p \times T_d$$

$$K_d = 0.2195550187 \times 3.749029725$$

$$K_d = 0.8231182914$$

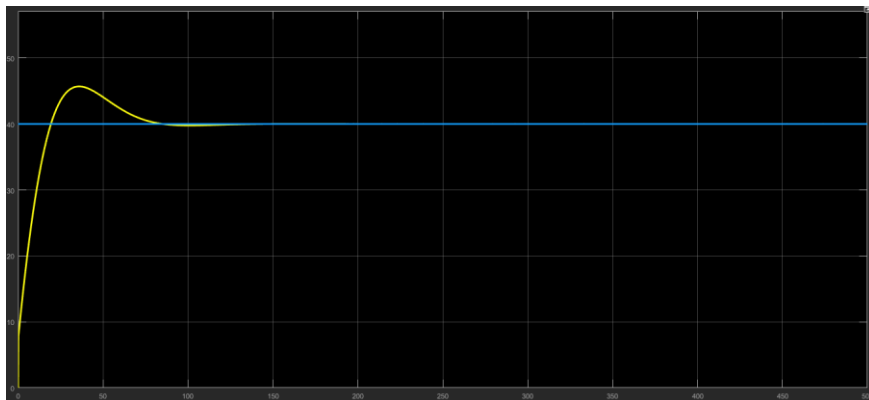
Pengujian Respon *Cascade* PID

Setelah mendapatkan nilai K_p , K_i dan K_d pada sistem *single loop* aliran dan *single loop* level. Kemudian melakukan simulasi pada simulink matlab dengan parameter yang telah didapat. Berikut ini adalah blok diagram simulasi pada matlab. Pengujian respon dilakukan dengan memberikan *set point* = 40 cm.



Gambar 8. Blok Diagram Simulink Cascade PID Pada Matlab

Sumber: MATLAB Simulink R2024a, diolah oleh penulis (2026).

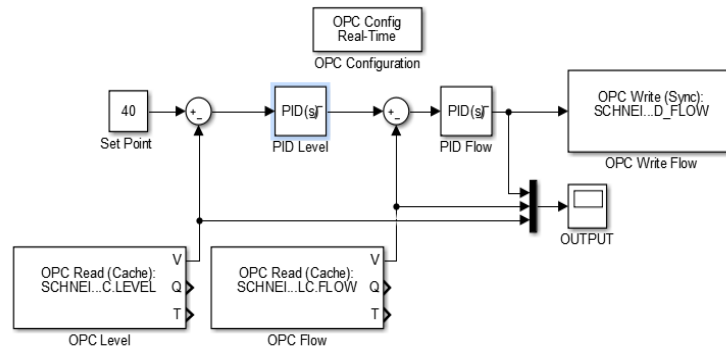


Gambar 9. Grafik Simulink Cascade PID Pada Matlab

Sumber: Hasil simulasi MATLAB Simulink R2024a, diolah oleh penulis (2026).

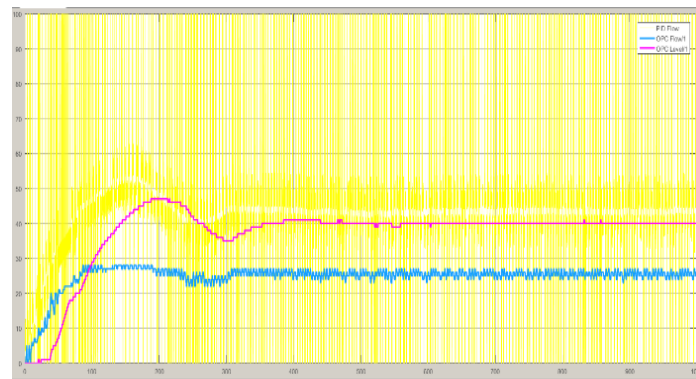
Hasil grafik yang diperoleh dari simulink pada blok diagram simulasi *cascade* PID. Sistem telah mencapai *set point* dengan *rise time* (TR) 14.582 detik, *delay time* (TD) sebesar 2.178 detik, *overshoot* sebesar 15.698%, *settling time* (TS) sebesar 124.153 detik, *peak time* (TP) sebesar 33.140 detik dan *error steady state* 0%.

Kemudian dilakukan pengujian dengan menggunakan alat modul latih RT 512 dan RT 522 dengan sistem *cascade* PID. Dimana nilai parameter PID aliran digunakan untuk *loop secondary* dan *loop primary* menggunakan nilai parameter PID level. Pengujian respon dilakukan dengan memberikan *set point* = 40 cm pada tangki level. Berikut ini blok diagram pada sistem *cascade* PID.



Gambar 10. Blok Diagram Sistem *Cascade* PID Pada Matlab

Sumber: Diolah oleh penulis menggunakan MATLAB Simulink R2024a.



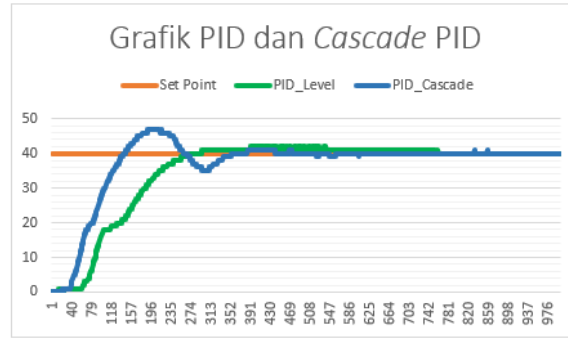
Gambar 11. Hasil Pengujian *Cascade* PID

Sumber: Hasil pengujian penulis (2026).

Didapat hasil respon *rise time* (TR) 140.5 detik, *delay time* (TD) sebesar 75.5 detik, *overshoot* sebesar 17.5%, *settling time* (TS) sebesar 432.975 detik, *peak time* (TP) sebesar 187.5 detik dan *error steady state* 2.5%.

Analisa Data

Hasil dari pengujian sistem *Cascade* PID dan *Single Loop* Level pada Modul Latih RT 512 dn RT 522 memiliki perbedaan respon. Terlihat pada sistem *cascade* memiliki respon dan *steady state* yang lebih cepat dengan kondisi stabil, namun memiliki *overshoot* sebesar 17.5% dikarenakan respon dari *loop flow* (Sekunder) telah mencapai stabil lebih dulu serta memiliki *error steady state* sebesar 2.5% dan batas nilai toleransi sistem sebesar 5%-10%. Dan pada PID level *single loop*, terlihat memiliki *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan *cascade* yaitu sebesar 5%, namun memiliki respon serta kestabilan terhadap *set point* dengan waktu cukup lama serta memiliki *error steady state* sebesar 2.5% dan batas nilai toleransi sistem sebesar 5%-10%. Dengan nilai *set point* yang diatur 40 cm pada ketinggian tangki level.



Gambar 12. Grafik Respon Sistem PID dan *Cascade* PID Pada Matlab
 Sumber: Hasil simulasi dan pengujian menggunakan MATLAB Simulink R2024a, diolah oleh penulis (2026).

Tabel 1. Perbandingan PID Level *Singel Loop* dan *Cascade* PID

Hasil Perbandingan	Bentuk Pengujian	
	<i>Cascade</i> PID	<i>Single Loop</i>
<i>Rise time</i> (TR)	140.5 detik	271.5 detik
<i>Delay time</i> (TD)	75.5 detik	127.5

Tabel 2. Lanjutan Perbandingan PID Level *Singel Loop* dan *Cascade* PID

Hasil Perbandingan	Bentuk Pengujian	
	<i>Cascade</i> PID	<i>Single Loop</i>
<i>Settling time</i> (TS)	432.975 detik	722.464 detik
<i>Overshoot</i>	17.5%	5%
<i>Peak time</i> (TP)	187.5 detik	391 detik
<i>Error steady state</i> (ess)	2.5%	2.5%

Analisis Kestabilan Sistem Menggunakan Routh Hurwitz

Loop Sekunder

Gain Controller

$$G_c(s) = K_P(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_P}{T_i s} + K_P T_d s$$

$$G_c(s) = 0.086111057 + \frac{0.086111057}{12.09756096s} + 0.086111057 \times 1.97647056s$$

$$G_c(s) = \frac{2.058956111s^2 + 1.04172787s + 0.086111057}{12.09756096s}$$

Gain Proses

$$G_p(s) = \frac{30}{10.5s + 1}$$

Hitung Fungsi Alih *Open Loop*

$$G(s) = G_p(s) \times G_c(s)$$

$$G(s) = \left(\frac{30}{10.5s+1} \right) \times \left(\frac{2.058956111s^2 + 1.04172787s + 0.086111057}{12.09756096s} \right)$$

$$G(s) = \frac{61.76868333s^2 + 31.2518361s + 2.58333171}{127.0243901s^2 + 12.09756096s}$$

$$G_s(s) = \frac{G(s)}{G(s) + 1}$$

$$G_s(s) = \frac{7846.129s^4 + 4761.995s^3 + 706.215s^2 + 31.252s}{23981.325s^4 + 7835.366s^3 + 852.566s^2 + 31.252s}$$

Tabel 3. Perbandingan PID Level *Singel Loop* dan *Cascade* PID

Orde	Kolom 1	Kolom 2	Kolom 3
s^4	23981.325	852.566	0
s^3	7846.129	31.252	0
s^2	756.914	0	0
s^1	31.252	0	0
s^0	0	0	0

Berdasarkan Tabel 3. yang diatas, diperoleh koefisien *polynomial* dari persamaan karakteristik sistem yang selalu bernilai positif. Sesuai dengan teori Routh Hurwitz yang menyatakan dengan syarat bahwa apabila kolom pertama deret Routh bernilai positif maka sistem kontrol tersebut adalah stabil.

Loop Primer

Gain Controller

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s$$

$$G_c(s) = (0.2195550187 + \frac{0.2195550187}{24.7901325s} + 0.2195550187 \times 3.749028725s)$$

$$G_c(s) = \frac{20.405211s^2 + 5.442678s + 0.219555}{24.7901325s}$$

Gain Proses

$$G_p(s) = \frac{61}{103s + 1}$$

Hitung Fungsi Alih *Open Loop*

$$G(S) = G_p(S) \times G_c(S)$$

$$G(S) = \left(\frac{61}{103.5S + 1} \right) \times \left(\frac{20.405211s^2 + 5.442678s + 0.219555}{24.7901325S} \right)$$

$$G(S) = \frac{1244.717871s^2 + 332.003358s + 13.392855}{2565.778714s^2 + 24.7901325S}$$

$$G(S) = \frac{G(S)}{G(S) + 1}$$

$$G(S) = \frac{3193670.618s^4 + 882703.870s^3 + 42593.587s^2 + 332.011s}{9776891.027s^4 + 1009915.859s^3 + 43208.138s^2 + 332.011s}$$

Tabel 4. Perbandingan PID Level *Singel Loop* dan *Cascade* PID

Orde	Kolom 1	Kolom 2	Kolom 3
s^4	9,776,891.027	43,208.138	0
s^3	100,9915.859	332.011	0
s^2	39,993.974	0	0
s^1	332.011	0	0
s^0	0	0	0

KESIMPULAN

Penelitian yang dilakukan pada Sistem Pengendalian Level dan Aliran Modul Latih RT 512 dan RT 522 dengan menggunakan metode Kontrol Cascade PID dapat mencapai kondisi set point yang telah ditentukan. Dan sistem dapat beroperasi dengan stabil dengan acuan menggunakan analisis kestabilan Routh-Hurtwiz.

Sistem Pengendalian Level dan Aliran Modul Latih RT 512 dan RT 522 dengan menggunakan metode Kontrol *Cascade* PID dapat mencapai kondisi *set point* yang telah ditentukan. Dengan Parameter PID level (Primer) dengan $K_p = 0.2195550187$, $K_i = 0.0088565488$, dan $K_d = 0.8231182914$. Dan parameter PID aliran (Sekunder) dengan $K_p = 0.086111057$, $K_i = 0.087118051$, dan $K_d = 0.9701959691$.

Hasil dari percobaan simulasi dan implementasi kontrol PID *single loop* dan *Cascade* memiliki perbedaan respon. Dimana respon menggunakan kontroler *Cascade* PID lebih cepat mencapai kestabilan *set point* dibandingkan dengan menggunakan kontroler PID *single loop*. hasil respon transien kontrol *Cascade* PID yang dapat mencapai *settling time* selama 432.975 detik, *rise time* selama 140.5 detik, *delay time* selama 75.5 detik, dengan percobaan *set point* 40 cm, *overshoot* mencapai $\pm 17.5\%$ dikarenakan respon dari *loop flow* (Sekunder) telah mencapai stabil lebih dulu.

REFERENSI

- Abdul Aziz, A. N., & Rahmad, R. (2021). Experimental study of level and flow control. *Progress in Engineering Application and Technology*, 2(1), 813–822.
- Agustha, D. N., Wardhana, A. S., & Triyanto, R. H. (2021). *Preliminary perancangan metering system pada proses custody transfer produk LPG di PT. XYZ. Jurnal Teknologi Energi dan Mineral*, 1(November), 962–972.
- Aji, K. P., Darusalam, U., & Nathasia, N. D. (2020). Perancangan sistem presensi untuk pegawai dengan RFID berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP8266. *JOINTECS (Journal of Information Technology and Computer Science)*, 5(1), 25–32.
- Baradkar, A. M., Dalvi, P. S., Yadav, D. M., Patil, S. P., Pawar, P. P., & Chaudhari, H. (2021). Review on design and fabrication of electromagnetic flowmeter. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 9(5), 67–73.
- Beck, K. J., Barfuss, S. L., Sharp, Z. B., & Moon, T. K. (2021). An alternative analysis method for evaluating electromagnetic flowmeter performance. *AWWA Water Science*, 3(5), e1242. <https://doi.org/10.1002/aws2.1242>
- Dethan, M. A., Oematan, H. M., & Windya, Y. E. C. (2024). Aplikasi sistem presensi berbasis RFID untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan kehadiran. *Jurnal Media Informatika Budidarma*, 8(1), 1–10.
- Ge, L., Chen, J., Tian, G., Zeng, W., Huang, Q., & Hu, Z. (2020). Study on a new electromagnetic flow measurement technology based on differential correlation detection. *Sensors*, 20(9), Article 2489. <https://doi.org/10.3390/s20092489>
- Hadi, S., Nugroho, A., & Prasetyo, E. (2023). Implementasi sensor tekanan untuk monitoring level cairan berbasis programmable logic controller. *Jurnal Teknik Elektro*, 15(2), 120–128.
- Hady, M. A., Yusuf, M., Fatoni, A., & Arifin, I. (2021). Self-tuning PID-genetic algorithm controller for steam drum boiler water level control system. *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering*, 5(2), 57–64. <https://doi.org/10.12962/jaree.v5i2.102>
- Heriyanto, H. (2010). *Pengendalian proses*. Proses Pengendalian Kimia.
- INDRIYANI, M. D. (2018). *Monitoring sistem automatic transfer switch–main failure (ATS–MF) dengan pembebanan bertingkat menggunakan Arduino Mega 2560 berbasis Internet of Things (IoT)* [Skripsi, Universitas Diponegoro].
- Islamiyah, R. (2021). *Sistem kontrol level dan aliran air menggunakan metode Cohen–Coon pada Modul Latih RT 512 dan RT 522* [Skripsi, Politeknik Negeri Jakarta].
- Jianwang, H. (2021). Direct data-driven control for cascade control system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, Article 1465493. <https://doi.org/10.1155/2021/1465493>
- Li, Z., Wang, H., Liu, Y., & Chen, X. (2021). Pressure sensor-based liquid level measurement and monitoring system for industrial applications. *Sensors*, 21(18), Article 6112. <https://doi.org/10.3390/s21186112>
- Mahnke, W., Leitner, S.-H., & Damm, M. (2020). *OPC Unified Architecture*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60767-3>

- Pratama, M. R., Siregar, A., & Putra, D. A. (2024). *Sistem pengendalian level dan aliran air menggunakan metode Cascade PID pada Modul Latih RT 512 dan RT 522* [Skripsi, Politeknik Negeri Jakarta].
- Profanter, S., Rickert, M., Knoll, A., Biffel, S., & Fromm, J. (2021). OPC UA and REST: Bridging industrial interoperability and IoT applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(8), 5586–5595. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3037753>
- Rahman, M. A., Sutanto, H., Nalle, C. Y. A., & Fandi, F. (2022). Rancang bangun modul praktikum dan trainer sistem kontrol berbasis remote laboratory sebagai media pembelajaran jarak jauh. *JPB: Jurnal Patria Bahari*, 2(2).
- Ramos, P. M., Silva, G., & Martins, R. C. (2022). *Pressure sensor applications for liquid level measurement in industrial automation: A review*.
- Setiawan, I. R., & Munandar, A. (2019). Pengaruh perubahan luas bukaan katup untuk air keluar dari dalam tangki pada sistem pengendalian tinggi muka air. *TELKA: Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, 5(1), 31–42. <https://doi.org/10.15575/telka.v5n1.31-42>
- Siddiqui, M. A., Anwar, M. N., Laskar, S. H., & Mahboob, M. R. (2021). A unified approach to design controller in cascade control structure for unstable, integrating and stable processes. *ISA Transactions*, 114, 331–346. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.038>
- Siregar, R., Siahaan, A. P., & Simanjuntak, M. (2022). Implementasi kendali PID pada sistem level dan flow berbasis programmable logic controller. *Jurnal ELKOMIKA*, 10(2), 284–296.
- Supriadi, D. (2015). Rancang bangun sistem pengendalian ketinggian air menggunakan sensor ultrasonic berbasis PLC (*Programmable Logic Controller*). *TEDC*, 9(3), 192–196.
- Wang, X., Liu, Y., Zhang, H., & Li, Z. (2021). Study on a new electromagnetic flowmeter based on three-value trapezoidal wave excitation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 78, Article 101882. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101882>
- Zhang, C., & Fang, H. (2021). Review of sewage flow measuring instruments. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2089–2098. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.031>