

APLIKASI TUNING DENGAN METODE COHEN-COON PADA PENGENDALI SUHU AIR (SE 404) SECARA SIMULASI DAN PRAKTIKUM

Moch. Ikhsan Wahyudi, Zakijah Irfin, Profiyanti Hermien Suharti, Heny Dewajani
Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
mochikhsanwahyudi16@gmail.com ; [zakijah.irfin@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Tuning merupakan proses penentuan parameter pengontrol untuk mendapatkan nilai respon kontrol yang optimal. Respon suatu *plant* dapat diatur melalui pemilihan parameter-parameter kendali yang tepat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan respon dari pengendali suhu air ditinjau dari *Integral Absolute Error* (IAE), *overshoot*, dan *response time* menggunakan metode Cohen-Coon yang dilakukan secara simulasi menggunakan Scilab 6.1.1 dan praktikum. Pada sistem pengendalian terdapat beberapa variabel diantaranya *process variable*, *manipulated variable*, *set point*, dan *disturbance*. Penelitian diawali dengan melakukan *tuning* pada mode *open loop* untuk menentukan persamaan fungsi hantar proses. Kemudian, nilai K_p , τ_i , dan τ_D dihitung menggunakan persamaan tuning metode Cohen-Coon dengan memasukkan nilai K_p 0,21; τ 6,5 detik; τ_D 2,28 detik; dan τ_C 4,39 detik. Tahap akhir dari penelitian ini yaitu analisis hasil respon *tuning* dari metode Cohen-Coon secara simulasi dan praktikum. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, sistem kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) cenderung menghasilkan respon *tuning* yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kontrol lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol terbaik pada pengendali suhu air yaitu *Proportional Integral Derivative Controller* yang menghasilkan respon berupa *offset*, *overshoot*, dan *response time* berturut-turut sebesar 7,159%; 0,163; dan 24,030 detik pada hasil praktikum.

Kata kunci: *offset*, *open loop*, *overshoot*, *respon time*, *tuning*

ABSTRACT

Tuning is the process of determining controller parameters to obtain optimal control response values. The response of a plant can be regulated through the selection of appropriate control parameters. This research aims to analyze and compare the response of the water temperature controller in terms of Integral Absolute Error (IAE), overshoot, and response time using the Cohen-Coon method which is carried out in simulation using Scilab 6.1.1 and practicum. In the control system there are several variables including process, manipulated variable, set point, and disturbance. The research begins with tuning in open loop mode to determine the process delivery function equation. Then, the values of K_p , τ_i , and τ_D are computed using the tuning equation Cohen-Coon method by entering the K_p value of 0.21 τ 6.5 seconds; τ_D 2.28 seconds; and τ_C 4.39 seconds. The final stage of this research is the analysis of the tuning response results of the Cohen-Coon method in simulation and practice. Based on the research that has been done, the control systems of Proportional Integral Derivative (PID) system tends to produce a better tuning response compared to other control systems. This shows that the best control system in the water temperature controller is the Proportional Integral Derivative Controller which produces responses in the form of offset, overshoot, and response time of 7.159%; 0.163; and 24.030 seconds respectively in the results of the practicum.

Keywords: *offset*, *open loop*, *overshoot*, *response time*, *tuning*



1. PENDAHULUAN

Kemajuan pesat dalam sistem pengendalian saat ini dipicu oleh permintaan industri akan sistem yang dapat bekerja dengan tingkat keakuratan dan kecepatan yang sangat tinggi. Oleh karena itu, memiliki sistem kendali yang dapat memenuhi kebutuhan dengan kecepatan dan keakuratan yang tinggi sangatlah penting [1]. Sistem pengendalian suhu air merupakan salah satu aplikasi penting dan banyak digunakan dalam sistem kendali non-linier [2]. Pada umumnya, sistem ini banyak diterapkan dalam berbagai industri, terutama dalam industri pengolahan minuman seperti cokelat, susu, dan berbagai produk minuman lainnya [3]. Dalam praktiknya, salah satu metode yang paling efektif untuk mengatur sistem pengendalian adalah melalui proses *tuning*. *Tuning* merupakan proses penyesuaian parameter pengendali guna menghasilkan output sesuai dengan yang diinginkan, mengoptimalkan sistem proses, dan meminimalkan adanya *error* [4].

Salah satu sistem pengendalian yang paling umum diaplikasikan dalam dunia industri saat ini merupakan *Proportional Integral Derivative* (PID). PID adalah sebuah sistem *feedback control* yang memerlukan pengaturan secara kontinyu dan tepat untuk mencapai hasil yang diinginkan [5]. Performa suatu *plant* dapat dioptimalkan dengan baik melalui pemilihan parameter kendali yang tepat dan sesuai [6]. Penentuan parameter yang sesuai biasanya didapatkan dari metode *tuning* yang tepat. Penelitian mengenai pengendalian suhu pada tangki pemanas air menggunakan PID *controller* berbasis Arduino Uno telah dilakukan [7]. Berdasarkan respon sistem yang dihasilkan menunjukkan bahwa sistem kendali PID dapat menghasilkan nilai *error* maksimum sebesar 0,3°C, yang masih dalam batas toleransi. Hal ini menunjukkan keefektifan sistem PID dalam aplikasi pengendalian suhu air.

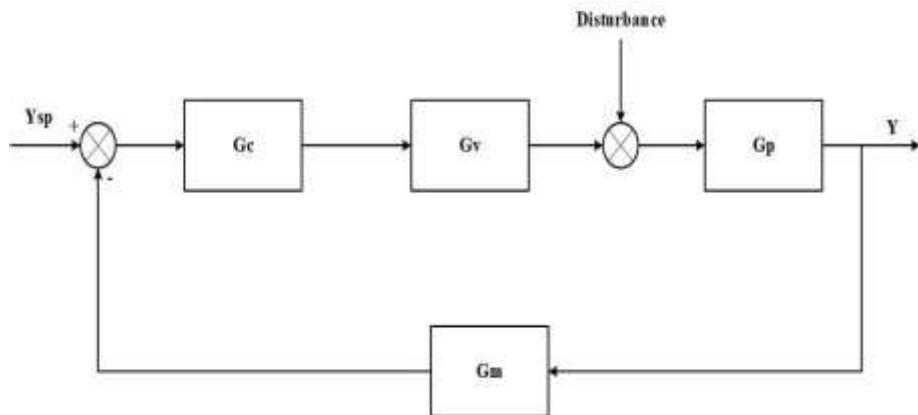
Sistem kontrol PID adalah salah satu metode yang paling sering diterapkan dalam pengendalian suhu [8]. Hal ini dikarenakan terbukti efektif dalam berbagai aplikasi, termasuk pengendalian inkubator [9]. Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode PID dapat dioptimalkan lebih lanjut dengan menggabungkannya pada teknik *Disturbance Observer* (DOB) untuk menangani gangguan dari luar sistem. Namun, ketiga konstanta yang terlibat dalam kontrol PID perlu dilakukan *tuning* secara akurat untuk memastikan sistem dapat berfungsi dengan optimal. Berbagai metode *tuning* telah dikembangkan, termasuk pendekatan klasik seperti metode Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon berbasis algoritma evolusi dan *Artificial Intelligence* [10]. Meskipun demikian, penelitian terkait pengendalian suhu air dengan metode Cohen-Coon masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan mengaplikasikan dan membandingkan *tuning* metode Cohen-Coon pada pengendali suhu air (SE 404) secara simulasi menggunakan Scilab dan praktikum.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dan membandingkan respon dari pengendali suhu air ditinjau dari *Integral Absolute Error* (IAE), *overshoot*, dan *response time* menggunakan metode Cohen-Coon secara simulasi menggunakan Scilab 6.1.1 dan praktikum. Pemilihan metode ini didasarkan pada kemampuannya untuk meminimalkan fungsi objektif, yang dalam hal ini adalah nilai *error* melalui perhitungan *Integral Time Absolute Error* (ITAE) [11]. Penelitian ini dilakukan dengan mengubah *Set Point* (SP) pada sistem servo berupa nilai suhu air pendingin dingin keluar *heat exchanger*. Pendekatan ini merupakan salah satu bentuk keterbaruan dalam pengendalian suhu air yang belum pernah dilakukan. Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan terutama dalam penggunaan pengendali suhu air (SE

404), memperluas aplikasi parameter untuk ketepatan pengendalian suhu, dan keandalan pengendalian suhu air dalam berbagai aplikasi industri.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah, yaitu: (1) Penentuan fungsi hantar proses, (2) Penentuan parameter pengendali *tuning* metode Cohen-Coon, dan (3) Analisis respon hasil *tuning* secara simulasi dan praktikum. Sistem pengendali suhu air memiliki diagram blok seperti disajikan pada Gambar 1 [12].



Gambar 1. Diagram blok logika proses pengendali suhu air

Metode kurva reaksi merupakan salah satu cara dalam melakukan penentuan fungsi hantar proses [13]. Metode ini diperoleh ketika pengendali suhu dalam mode manual dan ditunggu hingga *Process Variable* (PV) mencapai nilai konstan (*steady state*). Selanjutnya diberi perubahan input (%PO) dalam bentuk fungsi *step* (*step test*) dan pengamatan dilakukan hingga diperoleh nilai PV konstan berikutnya. Kurva yang diperoleh disebut kurva reaksi untuk kemudian dilakukan identifikasi parameter fungsi transfer menggunakan hasil *step test*.

Pengendali suhu dapat dimodelkan sebagai *First Order Process plus Dead Time* (FOPDT) dengan persamaan umum dalam bentuk fungsi *laplace* menggunakan Persamaan (1).

$$G_p = \frac{K_p}{\tau_p s} e^{-t_d s} \quad (1)$$

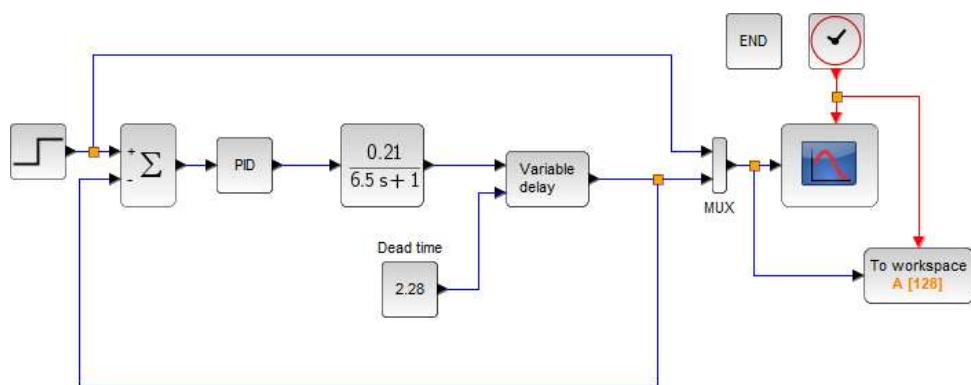
Dimana G_p merupakan fungsi hantar proses, K_p merupakan *process gain*, τ_p merupakan *time constant process*, dan t_d merupakan *dead time* atau waktu keterlambatan respon proses [14].

Penentuan parameter pengendali pada *tuning* dilakukan dengan menggunakan metode kurva reaksi atau dikenal dengan metode Cohen-Coon untuk perubahan *set point* (*servo system*). Pada percobaan metode ini, persamaan yang digunakan terdiri dari pengendali *Proportional* (P), *Proportional Integral* (PI), *Proportional Derivative* (PD), dan *Proportional Integral Derivative* (PID). Parameter seperti *proportional gain* atau K_c , t_i atau *integral time*, dan τ_D atau *derivative time* diperoleh dari hasil penentuan fungsi hantar proses yang kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan *tuning* pada Tabel 1 [14].

Tabel 1. Persamaan *tuning* dengan metode Cohen-Coon

Tipe Pengendali	Parameter
<i>Proportional</i> (P)	$K_c = \frac{1}{K_p} \frac{\tau}{\tau_d} \left(1 + \frac{\tau_d}{3\tau} \right)$
<i>Proportional Integral</i> (PI)	$K_c = \frac{1}{K_p} \frac{\tau}{\tau_d} \left(\frac{9}{10} + \frac{\tau_d}{12\tau} \right)$ $\tau_I = \tau_d \left(\frac{30 + 3 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)}{9 + 20 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)} \right)$
<i>Proportional Derivative</i> (PD)	$K_c = \frac{1}{K_p} \frac{\tau}{\tau_d} \left(\frac{5}{4} + \frac{\tau_d}{6\tau} \right)$ $\tau_D = \tau_d \left(\frac{6 + 2 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)}{22 + 3 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)} \right)$
<i>Proportional Integral Derivative</i> (PID)	$K_c = \frac{1}{K_p} \frac{\tau}{\tau_d} \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_d}{4\tau} \right)$ $\tau_I = \tau_d \left(\frac{32 + 6 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)}{13 + 8 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)} \right)$ $\tau_D = \tau_d \left(\frac{4}{11 + 2 \left(\frac{\tau_d}{\tau} \right)} \right)$

Pada penelitian ini, percobaan *tuning* metode Cohen-Coon dilakukan secara simulasi menggunakan *software* berupa Scilab 6.1.1 dan praktikum di laboratorium, guna menganalisis serta mengoptimalkan pengendalian pada berbagai jenis sistem. Setelah dilakukan penelitian, hasil simulasi menggunakan Scilab digunakan untuk menganalisis respon sistem secara simulatif, sementara hasil praktikum digunakan untuk melakukan eksperimen langsung guna memverifikasi hasil simulasi dan menguji efektivitas pengaturan parameter pada sistem secara aktual. Adapun diagram blok dari simulasi menggunakan Scilab 6.1.1 disajikan pada Gambar 2.

**Gambar 2.** Diagram blok simulasi *tuning* menggunakan Scilab

Tahapan akhir dari penelitian ini adalah analisis hasil respon hasil *tuning*. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan performa masing-masing respon yang dihasilkan. Performa respon yang baik ditunjukkan dengan adanya nilai *overshoot* minimum, *decay ratio* %, *response time* minimum, dan *offset* minimum yang dihitung menggunakan *Integral Absolute Error* (IAE) [15]. Adapun persamaan dalam perhitungan *offset* menggunakan IAE adalah sebagai berikut.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

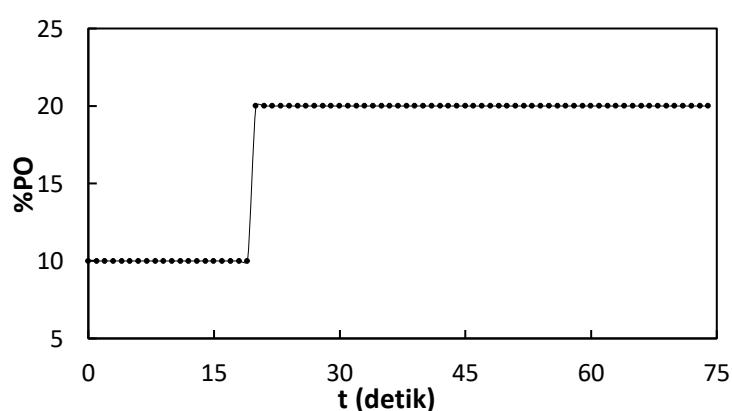
Dimana $e(t)$ adalah *error* yang diperoleh dari pengurangan nilai *set point* terhadap nilai keluaran yang terukur. Pengukuran ini menjumlahkan atau mengintegrasikan kesalahan mutlak dari detik pertama sampai waktu tertentu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Diagram blok sistem pengendalian proses pada pengendali suhu air disajikan pada Gambar 1. Sistem tersebut merupakan sistem pengendali *close loop* (lup tertutup) karena adanya umpan balik dari proses yang terjadi. Y_{sp} merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan *set point* atau suhu yang ditentukan pada *plant*, yaitu sebesar 45°C . Kemudian Y_{sp} dibandingkan dengan hasil pengukuran G_m (*sensor* atau *measurement*) dan menjadi masukan bagi G_c (*controller*). Setelah itu, G_c memberikan sinyal kendali ke G_v (*control valve*). Selanjutnya, *disturbance* berupa laju alir air dingin mempengaruhi *output* dari G_v dan menjadi masukan bagi G_p (proses). Keluaran G_p (Y) adalah *output* dari rangkaian sistem pengendali. Apabila nilai Y belum sama dengan *set point* yang ditentukan (Y_{sp}), maka nilai tersebut diumpan balikkan ke awal proses untuk disesuaikan kembali agar *set point* bisa tercapai sesuai nilai yang diinginkan [12]. Adapun hasil dan pembahasan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

3.1 Penentuan Fungsi Hantar Proses

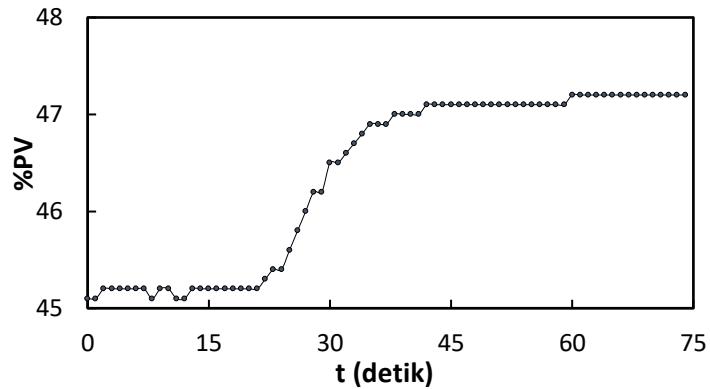
Karakteristik proses dinyatakan sebagai *transfer function* (fungsi hantar) *process*. Penentuan fungsi hantar ditentukan dengan menggunakan fungsi *step* pada perubahan sebesar $+10\%$ dari persen bukaan *valve* (%PO). Adapun hasil fungsi *step* untuk penelitian ini disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Grafik *input* penentuan fungsi hantar

Berdasarkan grafik pada Gambar 3 dan Gambar 4, selanjutnya dapat dilakukan penentuan fungsi hantar dengan mengikuti karakter *First Order Process plus Dead Time* (FOPDT) [16]. Dimana, nilai K_p yang merupakan *process gain* sebesar 0,21; τ_p yang merupakan *time constant process* 6,50; dan τ_d yang merupakan *dead time* sebesar 2,28. Sehingga jika nilai tersebut dimasukkan pada Persamaan (1) diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{0,21}{6,50s+1} e^{-2,28s} \quad (3)$$



Gambar 4. Grafik *output* penentuan fungsi hantar

3.2 Penentuan Parameter Tuning Metode Cohen-Coon

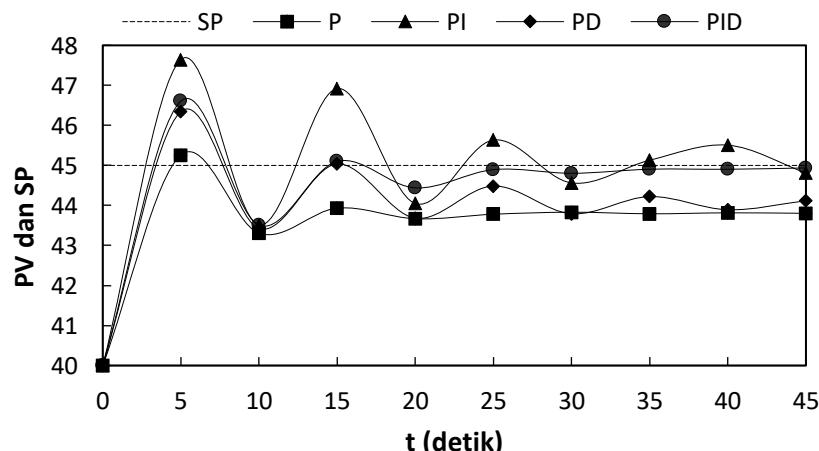
Mode *open loop* diperlukan untuk mengetahui parameter berupa nilai K_p , τ_i , dan τ_D melalui respon sistem FOPDT. Dimana respon sistem FOPDT yang didapatkan selanjutnya disubstitusikan ke dalam persamaan pada Tabel 1 untuk dilakukan *tuning* metode Cohen-Coon [14]. Adapun hasil perhitungan nilai PB , τ_i , dan τ_D disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *tuning* metode Cohen-Coon

Tipe Controller	K_p	PB	τ_i (detik)	τ_D (detik)
Proportional (P)	15,2	6,6	-	-
Proportional Integral (PI)	12,6	7,9	4,4	-
Proportional Derivative (PD)	17,8	5,6	-	0,5
Proportional Integral Derivative (PID)	19,3	5,2	4,9	0,8

3.3 Tuning Metode Cohen-Coon Secara Simulasi

Berdasarkan Tabel 2 diketahui beberapa nilai K_p , τ_i , dan τ_D untuk dilakukan *tuning* pada masing-masing tipe *controller*. Setelah nilai tersebut didapatkan selanjutnya diaplikasikan pada Scilab 6.1.1. Adapun respon yang dihasilkan dari hasil simulasi dengan memasukkan nilai sesuai tipe *controller* disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hasil simulasi *tuning* metode Cohen-Coon

Berdasarkan grafik di atas selanjutnya dapat dilakukan analisis hasil simulasi berupa *response time* dan *offset* menggunakan *Integral of the Absolute Value of the Error* (IAE) [14]. Adapun hasil analisis parameter tersebut disajikan pada Tabel 3.

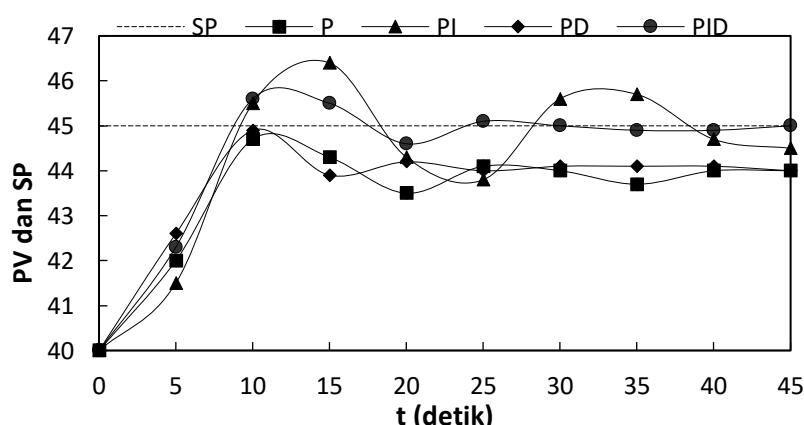
Tabel 3. Analisis respon hasil *tuning* metode Cohen-Coon sistem Servo

Tipe Controller	Overshoot	Response time (s)	IAE (%)
Proportional (P)	0,393	29,688	12,506
Proportional Integral (PI)	0,432	43,820	11,564
Proportional Derivative (PD)	0,542	27,647	11,072
Proportional Integral Derivative (PID)	0,341	24,688	6,939

Berdasarkan analisis respon hasil *tuning* secara simulasi menggunakan Scilab 6.1.1, diketahui bahwa untuk *controller* tipe *proportional process variable* (PV) sangat lama untuk mencapai *Set Point* (SP). Dengan kata lain masih terdapat *offset* yang sangat besar, sehingga untuk mengurangi adanya *offset* digunakan *controller* tipe *Proportional Integral* (PI) sebagai alternatif. Berdasarkan respon yang dihasilkan, diketahui bahwa *offset* sudah dapat diminimalkan walaupun sangat lama untuk mencapai kondisi *steady state* [17]. Setelah itu, sebagai alternatif kedua digunakan *controller* tipe *Proportional Derivative* (PD). Berdasarkan analisis diketahui bahwa respon yang dihasilkan berbanding terbalik dengan respon pada saat menggunakan pengendali PI. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali tipe PD sudah dapat meminimalkan *response time* walaupun masih terdapat *offset* yang cukup besar [18]. Oleh karena itu, *Proportional Integral Derivative* (PID) *controller* digunakan sebagai alternatif terakhir untuk meminimalkan *offset* dan mempercepat respon pengendali [19]. Berdasarkan respon yang dihasilkan, diketahui bahwa *offset* dan *response time* sudah dapat diminimalkan. Sehingga, tipe *controller* terbaik yang digunakan untuk mencapai atau mendekati SP adalah PID *Controller*.

3.4 Tuning Metode Cohen-Coon Secara Praktikum

Berdasarkan Tabel 2 diketahui beberapa parameter K_c , τ_i , dan τ_D untuk dilakukan *tuning* pada masing-masing tipe *controller*. Setelah nilai tersebut didapatkan selanjutnya diaplikasikan pada alat pengendali suhu air (SE 404). Adapun respon *tuning* yang dihasilkan dari hasil praktikum disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik respon hasil praktikum *tuning* metode Cohen-Coon

Berdasarkan grafik pada Gambar 6, selanjutnya dapat dilakukan analisis hasil respon yang dihasilkan berupa *overshoot*, *response time*, dan *offset* menggunakan *Integral of the Absolute Value of the Error* (IAE) [14]. Adapun hasil analisis parameter tersebut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisis respon hasil praktikum *tuning* metode Cohen-Coon

Tipe Controller	Overshoot	Respon time (s)	IAE (%)
<i>Proportional</i> (P)	0,206	39,971	12,989
<i>Proportional Integral</i> (PI)	0,291	38,714	11,915
<i>Proportional Derivative</i> (PD)	0,203	29,971	11,352
<i>Proportional Integral Derivative</i> (PID)	0,163	24,030	7,159

Berdasarkan analisis respon *tuning* hasil praktikum menggunakan metode Cohen-Coon, diketahui bahwa *controller* tipe *proportional Process Variable* (PV) tidak mencapai *Set Point* (SP). Dengan kata lain masih terdapat *offset* yang sangat besar, sehingga untuk mengurangi *offset* digunakan *controller* tipe *Proportional Integral* (PI) sebagai alternatif. Berdasarkan analisis respon, diketahui bahwa PI *controller* membentuk pola kritis yang menuju arah stabil dan membutuhkan waktu yang sangat lama untuk mencapai SP pada kondisi *steady state* [17]. Setelah itu, sebagai alternatif kedua digunakan *controller* tipe *Proportional Derivative* (PD). Berdasarkan respon yang dihasilkan, diketahui bahwa SP hampir tercapai walaupun masih terdapat *offset* yang cukup besar [18]. Oleh karena itu, *Proportional Integral Derivative* (PID) *Controller* digunakan sebagai alternatif terakhir. *Controller* tipe ini digunakan untuk meminimalkan *offset* dan mempercepat respon pengendali [20]. Berdasarkan respon yang dihasilkan, diketahui bahwa SP telah berada pada kondisi *steady state* saat 24,030 detik. Sehingga, tipe *controller* terbaik yang digunakan untuk mencapai atau mendekati SP pada kondisi *steady state* adalah PID *controller*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada penentuan fungsi hantar proses diketahui bahwa pengendali suhu air (SE 404) memiliki *dead time* atau waktu keterlambatan yang lebih kecil dibandingkan *time constant*. Berdasarkan analisis hasil respon *tuning* metode Cohen-Coon diketahui bahwa parameter hasil simulasi mendekati sama dengan respon hasil praktikum ditinjau dari nilai *offset*, *overshoot*, dan *response time*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem pengendalian terbaik untuk digunakan dalam pengendali suhu air (SE 404) adalah *Proportional Integral Derivative* (PID) *controller* dengan nilai *offset* 7,159%. Hal ini dikarenakan PID *controller* memberikan respon berupa *offset* dan *response time* yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan tipe pengendali lainnya.

Berdasarkan analisis hasil respon *tuning* metode Cohen-Coon secara simulasi menggunakan Scilab dan praktikum diperoleh hasil yang sangat baik. Namun, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan mengeksplorasi *metode* tuning lainnya. Penelitian tersebut dapat difokuskan pada pengendali suhu air (SE 404) dengan tipe pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID). Penggunaan pengendali tipe PID dalam penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan kinerja yang lebih optimal dan efisien.

REFERENSI

- [1] A. Ramadhani dan L. Sakti Ramba, "Sistem Pengaturan Suhu Air Menggunakan Kendali PID berbasis LabVIEW," *Telekomunikasi, Kendali, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 2, hal. 35–46, 2016.
- [2] N. Jha, U. Singh, T. K. Saxena, dan A. Kapoor, "Online Adaptive Control for Non Linear Processes Under Influence of External Disturbance," *International Journal of Artificial Intelligence and Expert System*, vol. 2, no. 2, hal. 36–46, 2011.
- [3] O. P. Verma, R. Singla, dan R. Kumar, "Intelligent Temperature Controller for Water-Bath System," *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 9, hal. 1178–1184, 2012.
- [4] P. H. Suharti dan Z. Irfin, "Tuning Metode Good Gain pada Sistem Pengendali tanpa Dead Time, Studi Kasus: Modul Pengendali Tekanan (PCT-14)," *Rekayasa Proses Industri Kimia*, Malang, hal. 55–60, 2017.
- [5] I. H. Akyuz, E. Yolacan, H. M. Ertunc, dan Z. Bingul, "PID And State Seedback Control of a Single-Link Flexible Joint Robot Manipulator," *Mechatronics*, Turkey, 2011, hal. 409–414.
- [6] P. Gunoto, B. S. Mubarok, M. Panjaitan, dan A. Silitonga, "Perancangan Dispenser Air Panas Terprogram Dengan Kontrol PID," Batam, 2023.
- [7] A. Megido dan E. Ariyanto, "Sistem Kontrol Suhu Air Menggunakan Pengendali PID dan Volume Air pada Tangki Pemanas Air Berbasis Arduino Uno," *Gema Teknologi*, vol. 18, no. 4, hal. 21–28, 2015.
- [8] N. R. Utami, I. P. Handayani, dan R. F. Iskandar, "Kontrol Suhu dan Analisis Transfer Panas Konveksi pada Central Processing Unit (CPU)," *e-Proceeding of Engineering*, Bandung, hal. 726–735, 2017.
- [9] B. Nurcahya, I. W. Widhiada, dan I. D. G. A. Subagia, "Sistem Kontrol Kestabilan Suhu pada Inkubator Bayi Berbasis Arduino Uno dengan Matlab/Simulink," *Jurnal Ilmiah Nasional dalam Bidang Ilmu Teknik Mesin*, vol. 2, no. 1, hal. 35–42, 2016.
- [10] Y. A. K. Utama, "Design of PID Disturbance Observer with Neuro Fuzzy Inverse Model for Precise Temperature Control in Infant Incubator," *Advanced Mechanical and Electrical Engineering*, Surabaya, hal. 179–184, 2020.
- [11] Y. A. K. Utama dan D. T. Hidayat, "Desain Metode PID-Simulated Annealing Sebagai Kontrol Temperatur Pada Inkubator Bayi," *Jurnal Elektronik Universitas Islam Lamongan*, vol. 5, no. 1, hal. 342–348, 2020.
- [12] P. H. Suharti dkk., *Modul Praktikum Pengendalian Proses*, 1 ed. Malang: Jurusan Teknik Kimia, 2020.
- [13] P. H. Suharti, K. Sa'diyah, M. R. Hernanda, dan R. M. Sarida, "Aplikasi Tuning Metode Cohen-Coon pada Pengendali pH di Tangki Netralisasi, Unit Pengolahan Limbah," Malang, 2019.
- [14] D. R. Coughanowr dan S. E. LeBlanc, *Process systems analysis and control*, 3 ed. Texas: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [15] I. H. Kurniawan dan L. Hayat, "Perbandingan Metode Tuning PID pada Pengaturan Kecepatan Motor DC Berbasis Programable Logic Controller," *Techno*, vol. 17, no. 1, hal. 33–42, 2016.

- [16] I. G. P. W, T. Hudaya, dan Philander, "Studi Dinamika Proses Distilasi Reaktif Dalam Produksi 2-Ethylhexyl-Dodecanoate Menggunakan Aspen Plus Dynamics: Fungsi Alih Antara Komposisi Produk Terhadap Beban Reboiler dan Laju Refluks," *Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, Yogyakarta, hal. 1–8, 2017.
- [17] M. I. Ma'arif, F. I. Adhim, dan F. Istiqomah, "Implementasi Metode PID untuk Mengontrol Posisi Motor Servo pada Sistem Sortir Berat Adonan," *Jurnal Teknik Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, vol. 10, no. 2, hal. 352–359, 2021.
- [18] I. Setiawan, *Kontrol PID Untuk Proses Industri*, 1 ed. Surabaya: PT Elex Media Komputindo, 2015.
- [19] N. N. Rokhmah, "Kendali Kecepatan Motor DC dengan Metode PID Berbasis Arduino Uno," Cimahi, 2018.
- [20] S. Rahmani, S. A. Rosana, dan G. H. Tian, "Pengaplikasian Kontroler PID Pada Sistem Kontrol Level Ketinggian Air Menggunakan MATLAB," *Telekomunikasi, Kendali, dan Elektronika Terapan*, vol. 10, no. 2, hal. 174–181, 2022.