

Rancang Bangun Sistem Pengondisian Suhu dan Ketinggian Air dengan Metode Pid Cohen-Coon Berbasis Mikrokontroler

Ahdi Dillan Fauzan¹, Nanang Mulyono¹, Febi Ariefka Septian Putra¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : ahdi.dillan.toi21@polban.ac.id

E-mail : nanang.mulyono@polban.ac.id

E-mail : febi.ariefka@polban.ac.id

ABSTRAK

Sistem pengondisian suhu dan ketinggian air menjadi salah satu fasilitas penting pada dunia industri. Sistem Pengondisian suhu dan ketinggian air dibutuhkan untuk penggunaan *water bath* pada industri kimia agar menjaga kualitas produk yang dihasilkan, mencegah adanya kerusakan, efisiensi energi, dan respons cepat pengendali dengan kesalahan yang kecil. Penelitian ini bertujuan untuk mengondisikan air agar memperoleh suhu dan ketinggian air yang dapat mencapai kondisi *steady-state*. Selain itu, perencanaan dan pembuatan *plant* dilakukan juga pada penelitian ini, *plant* ini terdiri dari tiga tangki penunjang (air panas, air dingin, dan juga penampung) dan juga tangki utama. Pengondisian sistem ini menerapkan pendekatan kontrol *Multi-Input Multi-Output* (MIMO) dengan metode pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dan penalaan menggunakan teknik Cohen-Coon. Pengendali tersebut dibuat secara digital menggunakan mikrokontroler. Target yang akan dicapai pada penelitian ini yaitu memperoleh respons yang stabil dengan *rise-time* yang cepat dengan galat yang kecil, hasil yang stabil sesuai *set point* dan juga lebih efisien dibandingkan dengan penelitian sebelumnya.

Kata Kunci:

Suhu, Ketinggian Air, MIMO, PID Cohen-Coon, ATmega2560.

The temperature and water ketinggian control system becomes one of the important facilities in the industrial world. The temperature and water ketinggian control system are needed for various kinds of uses such as water bath in chemical industries to maintain the quality of the products produced, prevent damage, energy efficiency, and fast controller response with minimal errors. This research aims to condition the water to obtain temperature and water ketinggian that can reach the steady-state condition. In addition, the design and construction of the plant are also carried out in this research, this plant consists of three supporting tanks (hot water, cold water, and a storage tank) and also a main tank. This system control applies the Multi-Input Multi-Output (MIMO) control approach with the Proportional-Integral-Derivative (PID) controller method and tuning using the Cohen-Coon technique. The controller is made digitally using a microcontroller. The target to be achieved in this research is to obtain a stable response with fast rise-time and small errors, stable results according to the set point, and more efficient compared to previous research.

Keywords

Temperature, Water Level, MIMO, PID Cohen-Coon, ATmega2560.

1. PENDAHULUAN

Sistem pengondisian suhu dan ketinggian air menjadi salah satu fasilitas penting pada dunia industri termasuk pada industri kimia. Sistem pengondisian air dibutuhkan untuk penggunaan berbagai macam kebutuhan salah-satunya adalah *water bath* untuk keperluan ekstraksi pada bahan yang mudah terbakar seperti ethanol (titik didih 78.37 °C), ether (titik didih 34.6 °C) dan masih banyak lagi. Apabila penanganan pada pelarut yang mudah terbakar salah, seperti suhu yang berlebih maka akan mengakibatkan berbagai masalah, dimulai dari hilangnya senyawa pada bahan yang dilarutkan hingga terjadi kebakaran cairan pelarut (10).

Maka dari itu sistem pengondisian suhu dan ketinggian air secara otomatis sangat diperlukan pada implementasi ekstraksi larutan ini. Pengondisian secara otomatis dilakukan dengan cara penggunaan PID pada penstabilan suhu dan

ketinggian air pada *water bath*. Penggunaan PID telah menjadi solusi utama dalam pengondisian secara otomatis, di mana pengontrolan PID dapat memberikan respons yang cepat dan *error* yang stabil terhadap perubahan suhu *setpoint* (11).

Akan tetapi penggunaan PID saja pada sistem pengondisian suhu dan ketinggian air belum terlalu sempurna. Maka dari itu *tuning* Cohen-Coon digunakan untuk membuat hasil akhir suhu dan ketinggian air pada ekstraksi menjadi lebih stabil dengan respons yang cepat dan *error* yang stabil pada pengondisian yang mempunyai waktu mati (12).

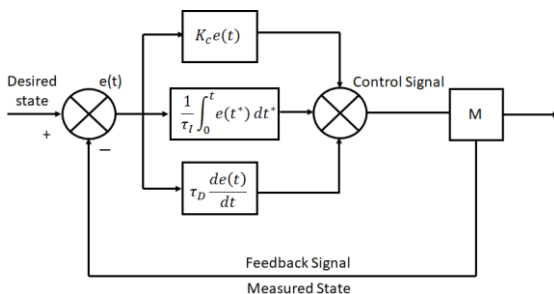
Mengimplementasikan kontrol PID harus dilakukan secara digital dan dapat memberikan kemudahan dalam pengolahan data, maka dari itu cara terbaik untuk mengimplementasikan kontrol PID bisa menggunakan mikrokontroler. Penggunaan mikrokontroler pada *plant* ini digunakan untuk pengendalian yang dilakukan secara *real-time* dan juga bisa

mengontrol *aktuator* secara otomatis untuk menjaga suhu dan ketinggian air sesuai dengan *setpoint*, dengan cara penyesuaian *output* pemanas dan pendingin secara dinamis berdasarkan sensor *feedback*, sehingga menjaga kestabilan proses ekstraksi (13).

Untuk memenuhi penggunaan pada mikrokontroler dengan I/O yang sesuai dengan berbagai protokol komunikasi maka mikrokontroler Atmega2560 pro digunakan dengan mempertimbangkan banyaknya I/O yang terpakai dan mengantisipasi penggunaan memori yang besar, dengan protokol komunikasi I2C, UART dan sebagainya, dan juga desain mikrokontroler yang kecil, menjadikan penggunaan Atmega2560 pro sangat berguna dalam pengendalian suhu dan ketinggian air (14).

2. PENGENDALIAN PID DAN COHEN-COON

2. 1.PID



Gambar 1. Diagram Block PID

PID merupakan salah satu metode pengendalian sistem yang paling banyak digunakan di dunia industri. Metode ini dirancang untuk memperbaiki performa sistem dengan mengurangi kesalahan (*error*) antara keluaran sistem dan nilai yang diinginkan (*set point*). Secara umum, bentuk persamaan PID kontinu dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Keterangan:

$u(t)$ = sinyal kendali *output*.

$e(t)$ = *error* (selisih antara *set point* dan *output* aktual):

$e(t) = r(t) - y(t)$

K_p , K_i dan K_d = konstanta kontrol untuk masing-masing aksi.

$r(t)$ = nilai *setpoint*.

$y(t)$ = nilai keluaran aktual.

PID *Controller* terdiri dari 3 jenis cara pengaturan yang saling dikombinasikan, yaitu *P (Proportional) Controller*, *I (Integral) Controller*, dan *D (Derivative) Controller*. Masing-masing memiliki parameter tertentu yang harus diset untuk dapat beroperasi dengan baik, yang disebut sebagai konstanta.

Proportional (P) controller digunakan untuk mempercepat respons aksi kontrol agar sebanding dengan *error*. Semakin besar *error*, maka sinyal kendali juga akan semakin besar.

Tujuan dari kontrol P adalah untuk mengurangi *error* secara cepat.

Rumus *proportional*:

$$u_p(t) = K_p \times e(t) \quad (2)$$

Keterangan:

K_p : konstanta *proporsional*.

$e(t)$: *error* saat ini.

Integral (I) controller digunakan untuk mengakumulasi kesalahan yang terjadi sebelumnya untuk menghilangkan *error steady state*. Bagian integral meningkatkan sinyal kendali seiring berjalannya waktu jika *error* tetap ada.

Rumus *integral*:

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

Keterangan:

K_i : konstanta *integral*.

Integral dari *error* mengakumulasi kesalahan dari waktu ke waktu.

Derivative (D) controller memperkirakan arah dan laju perubahan *error*, dan memberikan aksi kendali yang bertujuan untuk meredam gerakan sistem (seperti *overshoot* atau *oscillation*). Ini dilakukan dengan melihat turunan dari *error* terhadap waktu.

Rumus *derivative* :

$$u_d(t) = K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Keterangan:

K_d : konstanta derivatif.

$\frac{de(t)}{dt}$: laju perubahan *error* terhadap waktu.

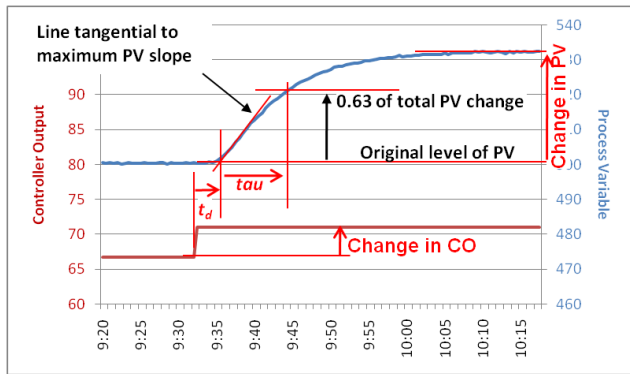
2. 2. Cohen-Coon

Metode Cohen-Coon adalah salah satu teknik *tuning* parameter PID yang berbasis pada model sistem orde satu dengan waktu tunda (*First-Order Plus Dead Time, FOPDT*). Dari respons ini, tiga parameter: G_p , τ , dan t_d ditemukan. K adalah kondisi mapan keluaran dibagi dengan perubahan langkah *input*, τ adalah konstanta waktu efektif dari respons orde pertama, dan t_d merupakan waktu mati (8). Dengan rumus PID pada metode Cohen-Coon bisa dilihat dari tabel di bawah ini :

Tabel 1. Rumus PID dengan tuning Cohen-Coon

	Controller Gain	Integral Time	Derivative Time
P Controller:	$K_c = \frac{1.03}{g_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.34 \right)$		
PI Controller:	$K_c = \frac{0.9}{g_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.092 \right)$	$T_i = 3.33 t_d \frac{\tau + 0.092 t_d}{\tau + 2.22 t_d}$	
PD Controller:	$K_c = \frac{1.24}{g_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.129 \right)$		$T_D = 0.27 t_d \frac{\tau - 0.324 t_d}{\tau + 0.129 t_d}$
PID Controller: (Noninteracting)	$K_c = \frac{1.35}{g_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.185 \right)$	$T_i = 2.5 t_d \frac{\tau + 0.185 t_d}{\tau + 0.611 t_d}$	$T_D = 0.37 t_d \frac{\tau}{\tau + 0.185 t_d}$

Dimana pengambilan data bisa didapatkan melalui gambar diawah ini.



Gambar 2. Grafik Pengambilan data PID

Keterangan :

CO = *Controller Output* atau *Setpoint*

PV = *Process Variable* (Suhu yang terukur)

t_d = perbedaan waktu antara perubahan CO dan perpotongan garis *tangensial* dan level PV asli

τ = perbedaan waktu antara persimpangan pada akhir waktu mati, dan PV mencapai 63% dari total perubahannya.

G_p = *Gain Process* perubahan PV (dalam %) / perubahan CO (dalam %) ($G_p = 1$)

Adapun penggunaan PID dengan metode Cohen-Coon terdapat kelebihan dan kelemahan dalam penggunaannya, salah-satunya adalah

– Kelebihan:

1. Sistematis dan mudah diterapkan pada proses dengan *dead time*.
2. Memberikan hasil *tuning* yang lebih presisi untuk sistem FOPDT.
3. Dapat meningkatkan stabilitas dan mengurangi osilasi pada sistem kontrol

– Keterbatasan:

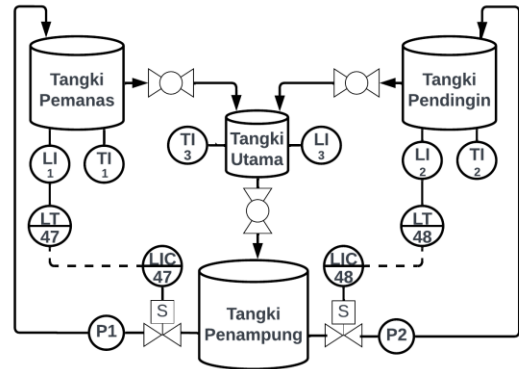
1. Kurang cocok untuk proses non-linear atau yang tidak dapat dimodelkan sebagai FOPDT.
2. Sensitif terhadap *noise* dan gangguan pada data proses.
3. Akurasi sangat bergantung pada ketepatan identifikasi parameter model proses

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini terbagi dalam tiga fase, yaitu tahap awal, tahap perancangan dan realisasi, serta pengujian dan laporan. Pada tahap awal, dilakukan identifikasi permasalahan serta kajian literatur untuk memahami pendekatan kendali suhu dan level air yang relevan. Selanjutnya, tahap perancangan dan realisasi mencakup pembangunan mini plant, perancangan sistem kendali berbasis PID dengan *tuning* Cohen-Coon, serta integrasi perangkat keras dan lunak menggunakan mikrokontroler Atmega2560 Pro. Terakhir, tahap pengujian dan laporan dilakukan melalui pengujian sistem guna menilai apakah kriteria performa seperti overshoot, rise time, dan steady state error telah terpenuhi, kemudian hasilnya disusun dalam bentuk laporan akhir.

3. 1. Sistem Pengondisian Air

Plant sistem pengondisian air berfungsi sebagai pengatur suhu dan level air dalam tangki, yang terdiri dari tangki sumber (tangki pemanas dan tangki pendingin), tangki utama, dan juga tangki penampung seperti pada gambar II. 1.



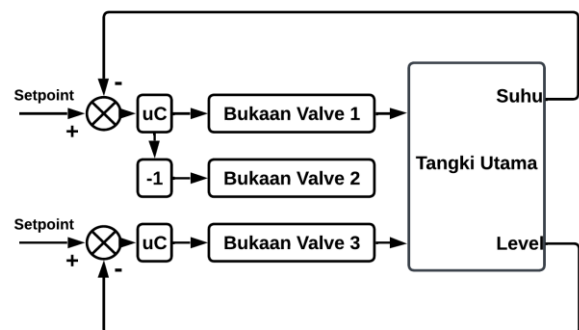
Gambar 3. Perancangan Sistem Pengondisian Plant

Dengan realisasi plant seperti gambar 3.



Gambar 4. Realisasi Hardware

3. 2. Pengendalian Sistem Pengondisian Air



Gambar 5. Diagram block sistem kendali MIMO

Berdasarkan gambar III. 3 bisa ditarik kesimpulan bahwa *plant* menggunakan sistem MIMO dengan bukaan valve 1, 2, dan 3 sebagai masukan dan suhu dan level sebagai

keluaran yang akan dikendalikan. Dimana pengendalian suhu akan berubah-ubah selama *plant* dijalankan, sedangkan ketinggian air akan konstan *low* dan *high* dan tidak dapat dirubah.

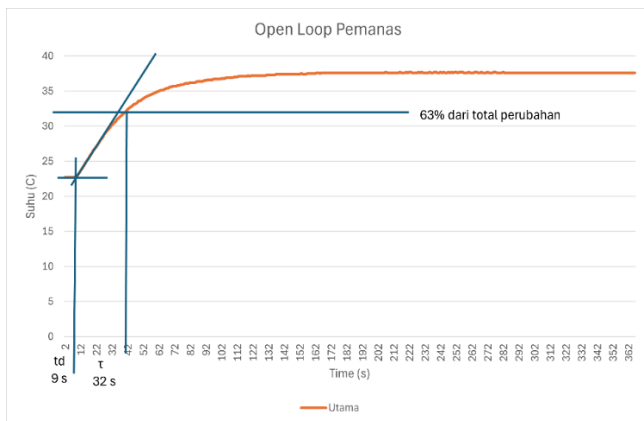
Berdasarkan gambar III.1 dan III.3 di saat *setpoint* dimasukkan, maka mikrokontroler akan menghitung bukaan *valve* 1 dan 2 untuk mengatur suhu pada tangki utama agar suhu mencapai suhu *setpoint*. Pada saat ketinggian air tangki utama sudah mencapai batas maksimum maka *valve* 3 akan membuka agar menjaga ketinggian air agar tidak berlebih, dan bila pada tangki sumber sudah habis maka pompa 1 dan 2 akan menyala agar menyediakan air pada tangki sumber untuk menjaga *plant* berjalan secara otomatis.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian *plant* terdiri dari dua tahap pengujian. Tahap pertama akan dilakukan pengujian berdasarkan *open loop* untuk mendapatkan nilai G_p , t_d , dan τ , dari keluaran tangki utama dan tahap kedua adalah pengujian berdasarkan *close loop* untuk menguji keberhasilan pengujian *open loop plant* sistem pengondisian air.

4. 1. Pengujian Open Loop

4. 1. 1. Pengujian Open Loop Heater



Gambar 6. Grafik pengujian open loop heater

Berdasarkan grafik gambar grafik IV.1. *setpoint* yang dimasukkan adalah 37°C dan didapatkan waktu mati (t_d) sebesar 9 detik, perbedaan waktu tunda hingga 63% perubahan suhu aktual (τ) sebesar 32 detik, dan besar perubahan suhu aktual dibagi perubahan *setpoint* (G_p) = 1.

Dan bila dimasukkan pada rumus Cohen-Coon maka

Parameter *Proporsional*

$$K_p = \frac{1.35}{G_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.185 \right)$$

Parameter *Integral*

$$T_i = 2.5t_d \frac{\tau + 0.185t_d}{\tau + 0.611t_d}$$

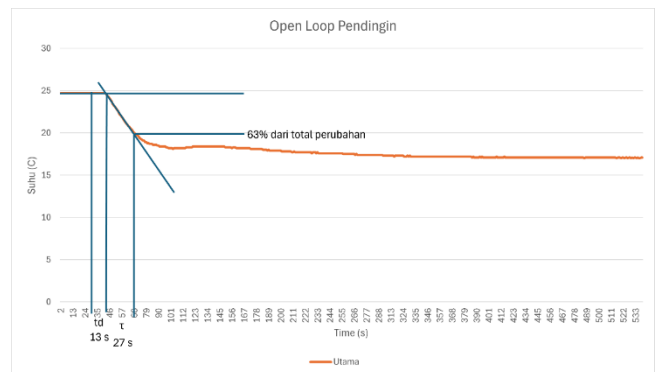
Parameter *Derivative*

$$T_d = 0.37t_d \frac{\tau}{\tau + 0.185t_d}$$

Maka didapatkan parameter sebesar

Parameter	Nilai parameter
K_p	5.05575
T_i	20.2005 s
T_d	3.165498 s

4. 1. 2. Pengujian Open Loop Cooler



Gambar 7. Grafik pengujian open loop cooler

Berdasarkan grafik gambar grafik IV.2. *setpoint* yang dimasukkan adalah 37°C dan didapatkan waktu mati (t_d) sebesar 13 detik, perbedaan waktu tunda hingga 63% perubahan suhu aktual (τ) sebesar 27 detik, dan besar perubahan suhu aktual dibagi perubahan *setpoint* (G_p) = 1

Dan bila dimasukkan pada rumus Cohen-Coon maka

Parameter *Proporsional*

$$K_p = \frac{1.35}{G_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.185 \right)$$

Parameter *Integral*

$$T_i = 2.5t_d \frac{\tau + 0.185t_d}{\tau + 0.611t_d}$$

Parameter *Derivative*

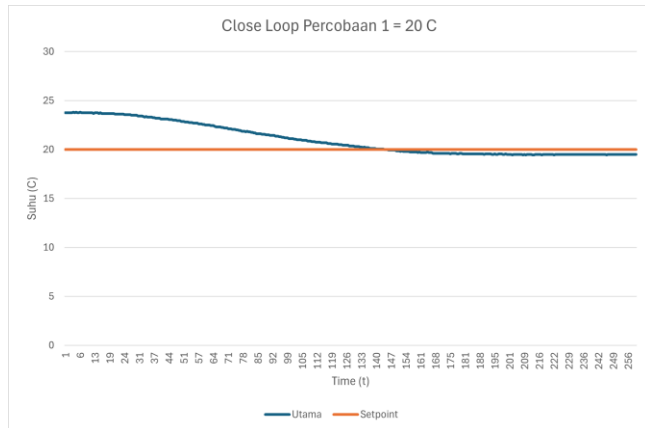
$$T_d = 0.37t_d \frac{\tau}{\tau + 0.185t_d}$$

Maka didapatkan parameter sebesar

Parameter	Nilai Parameter
K_p	3.0537
T_i	27.3494 s
T_d	4.417023 s

4. 2. Pengujian Close Loop

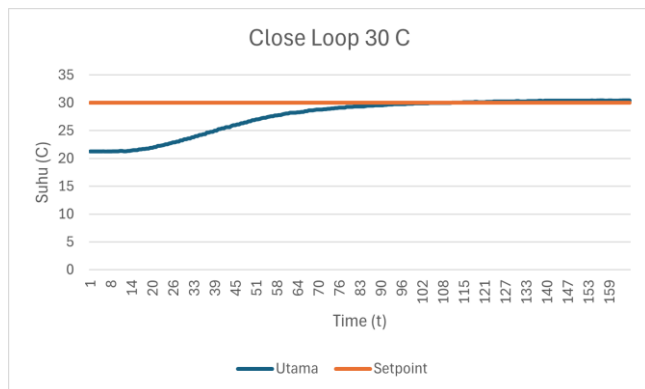
4. 2. 1. Pengujian setpoint 20 °C



Gambar 8. Grafik pengujian close loop 20 °C

Berdasarkan gambar IV.3, sistem pengondisian air merespons suhu 20 °C dengan *rise time* (T_r) 115 detik yang dibutuhkan suhu untuk mencapai suhu *setpoint* dimulai dari 10 % hingga 90 % suhu *setpoint*. Tidak terjadi *overshoot*, karena suhu tidak melewati suhu *setpoint*. Setelah respons mendekati nilai *setpoint*, suhu berada dalam batas toleransi sebesar $\pm 5\%$ (19 °C - 21°C) sebesar 200 detik, yang menjadi *settling time* (T_s). Pada akhir pengujian, suhu stabil pada 19.5 °C, menghasilkan *error steady-state* (ess) sebesar 2.5%.

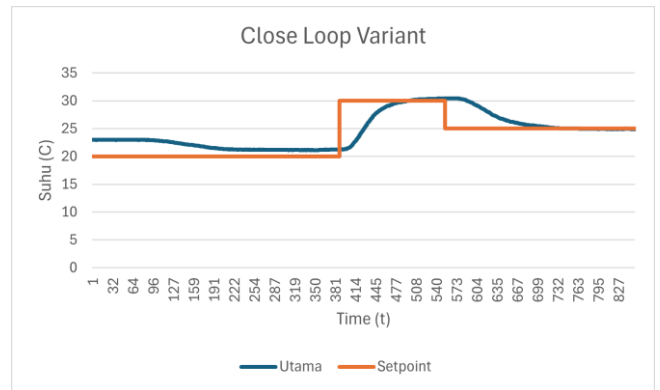
4. 2. 2. Pengujian setpoint 30 °C



Gambar 9. Grafik pengujian close loop 30 °C

Berdasarkan gambar IV.4, sistem pengondisian air merespons suhu 30°C dengan *rise time* (T_r) 67 detik yang dibutuhkan suhu untuk mencapai suhu *setpoint* dimulai dari 10 % hingga 90 % suhu *setpoint*. Tidak terjadi *overshoot*, karena suhu tidak melewati suhu *setpoint*. Setelah respons mendekati nilai *setpoint*, suhu berada dalam batas toleransi sebesar $\pm 5\%$ (28.5 °C - 31.5 °C) sebesar 166 detik, yang menjadi *settling time* (T_s). Pada akhir pengujian, suhu stabil pada 30.44 °C, menghasilkan *error steady-state* (ess) sebesar 1.45%.

4. 2. 3. Pengujian setpoint variant



Gambar 10. Grafik pengujian close loop variant

- *Setpoint* 20 °C

Berdasarkan gambar di atas, sistem pengondisian air merespons suhu 20°C dengan *rise time* (T_r) 93 detik yang dibutuhkan suhu untuk mencapai suhu *setpoint* dimulai dari 10 % hingga 90 % suhu *setpoint*. Tidak terjadi *overshoot*, karena suhu tidak melewati suhu *setpoint*. Setelah respons mendekati nilai *setpoint*, suhu berada di luar batas toleransi sebesar $\pm 5\%$ (19 °C - 21°C) sebesar 247 detik, yang menjadi *settling time* (T_s). Pada akhir pengujian, suhu stabil pada 21.19 °C, menghasilkan *error steady-state* (ess) sebesar 5.62%.

- *Setpoint* 30 °C

Berdasarkan gambar di atas, sistem pengondisian air merespons suhu 30°C dengan *rise time* (T_r) 67 detik yang dibutuhkan suhu untuk mencapai suhu *setpoint* dimulai dari 10 % hingga 90 % suhu *setpoint*. Tidak terjadi *overshoot*, karena suhu tidak melewati suhu *setpoint*. Setelah respons mendekati nilai *setpoint*, suhu berada dalam batas toleransi sebesar $\pm 5\%$ (28.5 °C - 31.5°C) sebesar 162 detik, yang menjadi *settling time* (T_s). Pada akhir pengujian, suhu stabil pada 30.44 °C, menghasilkan *error steady-state* (ess) sebesar 1.45%.

- *Setpoint* 25 °C

Berdasarkan gambar di atas, sistem pengondisian air merespons suhu 20°C dengan *rise time* (T_r) 109 detik yang dibutuhkan suhu untuk mencapai suhu *setpoint* dimulai dari 10 % hingga 90 % suhu *setpoint*. Tidak terjadi *overshoot*, karena suhu tidak melewati suhu *setpoint*. Setelah respons mendekati nilai *setpoint*, suhu berada dalam batas toleransi sebesar $\pm 5\%$ (23.75 °C - 26.25°C) sebesar 211 detik, yang menjadi *settling time* (T_s). Pada akhir pengujian, suhu stabil pada 24.87 °C, menghasilkan *error steady-state* (ess) sebesar 0.52%.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang dilakukan selama pengerjaan tugas akhir ini, dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol PID dengan menggunakan metode Cohen-Coon, mampu memberikan performa pengendalian

suhu yang efektif dan stabil. Sistem menunjukkan respons yang sangat baik terhadap perubahan *setpoint* dengan tidak adanya *overshoot* atau *undershoot* dengan *error steady state* yang bagus kurang dari 5%, dengan *rise time* tercepat pada 67 detik dan *settling time* tercepat pada 162 detik. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan PID dengan metode Cohen-Coon efektif digunakan untuk pengendalian suhu yang stabil seperti pada sistem ini, penggunaan PID Cohen-Coon pun bisa digunakan pada sistem dengan perbedaan waktu antar perubahan *setpoint* dengan *rise time* suhu aktual yang pendek.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan berupa dana dan fasilitas yang telah diberikan. Bantuan tersebut sangat mendukung dan bermanfaat selama proses pelaksanaan penelitian ini hingga penelitian ini bisa berjalan dengan lancar dan mendapatkan hasil yang diinginkan

DAFTAR PUSTAKA

1. Ivanova D, Valov N, Deyanov M. Application of the genetic algorithm for cascade control of a HVAC system. MATEC Web Conf. 2019. doi:10.1051/mateconf/2019
2. Legweel KMB, Lazić DV, Ristanović MR, Lozanović S'ajić JV. The performance of PIP-cascade controller in HVAC system. Therm Sci. 2014;18(Suppl 1):S213–S220. doi:10.2298/TSCI130812183L
3. Bai J, Bai J. Development an Adaptive Incremental Fuzzy PI Controller for a HVAC System. 2013.
4. Tang A, Yang L, Zeng T, Yu Q. Cascade control method of sliding mode and PID for PEMFC air supply system. Energies. 2023;16(1). doi:10.3390/en16010228
5. Gulan M, Salaj M, Rohal'-Ilkiv B. Application of adaptive multivariable generalized predictive control to a HVAC system in real time. Arch Control Sci. 2014;24(1):67–84. doi:10.2478/acsc-2014-0005
6. Rohit RA, Padmasine KG. IoT-based centralized governing system for industrial automation using Raspberry Pi. Int J Res Publ Rev. 2023;4(3):4675–4681. doi:10.55248/gengpi.2023.4.3.33742
7. Busu N, Isa NM, Hariri A, Hussein M. The comparison of P, PI and PID strategy performance as temperature controller in active iris damper for centralized air conditioning system. J Adv Res Fluid Mech Therm Sci. 2023;102(2):143–154. doi:10.37934/arfm.102.2.143154
8. Xue H, Lv H, Xiao Y, Wang X. Cascade PID control systems based on DNA strand displacement with application in polarization of tumor-associated macrophages. IEEE Access. 2023;11:38563–38577. doi:10.1109/ACCESS.2023.3267738
9. Abood LH, Kadhim NN, Mohammed YA. Dual stage cascade controller for temperature control in greenhouse. Bull Electr Eng Inform. 2023;12(1):51–58. doi:10.11591/eei.v12i1.4328
10. Putri AR, Rahayu PN, Putri I. Food warmer system based on DHT-22. 2020.
11. Ivanova D, Valov N, Deyanov M. Application of the genetic algorithm for cascade control of a HVAC system. MATEC Web Conf. 2019. doi:10.1051/mateconf/2019
12. Espejel-Blanco DF, et al. HVAC control system using predicted mean vote index for energy savings in buildings. Buildings. 2022;12(1). doi:10.3390/buildings12010038
13. Almabrok A, Psarakis M, Dounis A. Fast tuning of the PID controller in an HVAC system using the Big Bang-Big Crunch algorithm and FPGA technology. Algorithms. 2018;11(10). doi:10.3390/a11100146
14. Kumavat M, Thale S. Analysis of CSTR temperature control with PID, MPC & hybrid MPC-PID controller. ITM Web Conf. 2022;44:01001. doi:10.1051/itmconf/20224401001
15. Introduction to industrial automation. [Internet]. Available from: <http://taylorandfrancis.com>