

## ***Analisa response transient cascade control temperature dan pressure pada furnace PT. Z menggunakan metode direct synthesis***

Anggellieque Elma Karadeit<sup>1</sup>, Astrie Kusuma Dewi\*<sup>2</sup>

e-mail: [astrie.dewi@esdm.go.id](mailto:astrie.dewi@esdm.go.id)

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Indonesia

### **Informasi Artikel**

#### ***Riwayat Artikel***

Diterima 18 September 2023

Direvisi 09 Oktober 2023

Diterbitkan 30 Oktober 2023

#### **Kata kunci:**

*Furnace*

*PID*

*Direct synthesis*

#### **Keywords:**

*Furnace*

*PID*

*Direct synthesis*

### **ABSTRAK**

*Furnace* pada PT. Z adalah *furnace* yang berfungsi untuk memanaskan *heavy naptha* hingga mencapai *temperature* 513°C sebelum masuk ke reaktor. Pada *furnace* menggunakan sistem pengendalian *cascade temperature* dan *pressure* untuk menjaga *temperature outlet furnace* dengan mengatur besarnya tekanan *fuel gas* untuk proses pembakaran yang masuk ke *furnace*. *Temperatur Indicator Controller* berperan sebagai *master control* yang memiliki aksi *direct* dengan mode *controller Proportional Integral Derivative* (PID) yang dalam kondisi operasinya mempunyai nilai  $K_p=75$ ,  $\tau_i=375$ ,  $\tau_d=2$ . Sedangkan *Pressure Indikator Controller* berperan sebagai *sleve control* yang memiliki aksi *direct* dengan mode *controller Proportional Integral Derivative* (PID) yang dalam kondisi operasinya mempunyai nilai  $K_p=1000$ ,  $\tau_i=1500$ ,  $\tau_d=0$ . Dari hasil simulasi menggunakan kondisi aktual diperoleh *delay time* 16,302s, *settling time* 2,8288s, *rise time* 0,2686s serta terdapat *overshoot* 19,880% dan *undershoot* 1,725%. Sedangkan hasil simulasi menggunakan metode *direct synthesis* diperoleh *delay time* 33,445s, *settling time* 10,5639s, *rise time* 5,557s, *overshoot* 0,0054% dan tidak terdapat *undershoot*. Berdasarkan perbandingan antara kondisi aktual dan metode *direct synthesis* dilihat bahwa walaupun terdapat keterlambatan untuk mencapai kondisi *steady state* namun dengan metode *direct synthesis* ini, dapat menghilangkan keadaan *overshoot* dan *undershoot* yang muncul pada kondisi aktual yang dianggap dapat mengurangi kinerja sistem. Oleh karena itu metode *direct synthesis* bisa dikatakan mempunyai respon sistem yang baik.

### **ABSTRACT**

*Furnace at PT. Z is a furnace whose function is to heat heavy naptha to a temperature of 513°C before entering the reactor. The furnace uses a cascade temperature and pressure control system to maintain the furnace outlet temperature by regulating the amount of fuel gas pressure for the combustion process that enters the furnace. The Temperature Indicator Controller acts as a master control which has direct action with Proportional Integral Derivative (PID) controller mode which in operating conditions has values  $K_p=75$ ,  $\tau_i=375$ ,  $\tau_d=2$ . Meanwhile, the Pressure Indicator Controller acts as a control arm which has direct action with Proportional Integral Derivative (PID) controller mode which in its operating conditions has the values  $K_p=1000$ ,  $\tau_i=1500$ ,  $\tau_d=0$ . From the simulation results using actual conditions, the delay time was 16.302s, settling time was 2.8288s, rise time was 0.2686s and there was an overshoot of 19.880% and an undershoot of 1.725%. Meanwhile, the simulation results using the direct synthesis method obtained a delay time of 33.445s, settling time of 10.5639s, rise time of 5.557s, overshoot of 0.0054% and no undershoot. Based on a comparison between actual conditions and the direct synthesis method, it can be seen that although there is a delay in reaching steady state conditions, the direct synthesis method can eliminate overshoot and undershoot conditions that appear in actual conditions which are considered to reduce system performance. Therefore, the direct synthesis method can be said to have a good system response.*

**Penulis Korespondensi:**

Astrie Kusuma Dewi,  
 Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang,  
 Politeknik Energi dan Mineral Akamigas,  
 Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, Jawa Tengah, Indonesia.  
 Email: [astrie.dewi@esdm.go.id](mailto:astrie.dewi@esdm.go.id)

**1. PENDAHULUAN**

Dalam industri minyak dan gas pengolahan minyak dan gas benar-benar harus diperhatikan supaya menghasilkan produk dengan kualitas dan kuantitas baik. Salah satu cara dalam peningkatan tersebut adalah dengan mengontrol proses seperti *control level*, *control flow*, *control pressure*, dan *control temperature* [1] [2]. Di PT. Z terdapat unit yang beroperasi untuk memurnikan dan meningkatkan nilai oktan *naphtha* dengan menghilangkan kontaminan yang dapat menurunkan nilai oktan seperti propan, butan, dan pentan sehingga digunakan untuk bahan bakar kendaraan motor. Pada unit ini terdapat *furnace* yang berfungsi untuk memanaskan *heavy naphtha* hingga *temperature* mencapai 513°C sebelum masuk ke *reactor* [3]. Untuk proses pemanasan berjalan secara baik sesuai dengan yang diinginkan, maka peralatan instrumentasi sangat penting untuk di terapkan *control temperature outlet furnace*. Pengontrolan *cascade temperature* dan *pressure furnace* dilakukan dengan cara mengatur laju aliran *fuel gas* yang digunakan sebagai bahan bakar proses pembakaran di dalam *furnace*. [4]

*Controller* PID merupakan kombinasi antara tiga jenis *control*, yaitu proporsional, integral, dan derivative [5]. *Controller* PID juga dianggap paling efektif karena terbukti memberikan kinerja *control* yang baik walaupun menggunakan algoritma yang sederhana serta mudah untuk dipahami [6]. Untuk memperoleh performa yang diinginkan dari *controller* PID, maka dilakukan perancangan parameter *controller* dengan metode *direct synthesis*. Selain itu, dalam menentukan metode *tuning direct synthesis* diperlukan model *plant* sebenarnya dan model *plant* yang diinginkan supaya mendapatkan parameter dari *controller* PID. Kemudian melakukan perbandingan analisa respon *transien* terhadap kondisi aktual dan metode *direct synthesis* agar mengetahui keunggulan dari *controller* yang cocok untuk dilakukan atau yang mempunyai performa *controller* yang baik.[7]

**2. METODE PENELITIAN**

Pada penelitian ini menggunakan metode pengumpulan data yang diperoleh dari data operasi di lapangan serta studi literatur. Pengumpulan data digunakan untuk melakukan perhitungan fungsi alih setiap komponen pengendalian *temperature* dan *pressure* di *furnace* PT. Z. Kemudian dilakukan tuning baik untuk keadaan aktual maupun metode *direct synthesis* menggunakan *software* MatLab. Setelah itu dibandingkan respon dari kondisi aktual dan metode *direct synthesis*. [4]

Berikut perhitungan fungsi alih yang digunakan untuk system pengendalian *temperature* dan *pressure* di *furnace* PT. Z

**2.1 Fungsi Alih Komponen Control**

Sistem *control cascade temperature* dan *pressure* pada *furnace* di PT. Z terdiri dari komponen *control*, yaitu sensor, modul VJU7, *pressure transmitter*, *controller*, *control valve*. Setiap komponen pengendalian pada *furnace* perlu diubah menjadi persamaan matematis yang dimodelkan untuk menggambarkan bentuk fisik di lapangan menjadi persamaan yang dapat dihitung dan dianalisa [8]. Permodelan tersebut dalam bentuk fungsi alih.

- Sensor *Temperature* dan Modul VJU7

Sensor *temperature* yang digunakan adalah *thermocouple* dengan tipe E berfungsi untuk mengukur *temperature* keluar *furnace* kemudian mengasikkan tegangan dalam satuan millivolt (mV) yang selanjutnya di kirim ke modul VJU7. Untuk menghitung fungsi alih sensor *thermocouple* menggunakan persamaan 1.

$$G_s = \left( \frac{\text{output (span voltage)}}{\text{input (span temperature)}} \times \frac{\text{output (span electric signal)}}{\text{input (span voltage)}} \right) \frac{1}{Nt s+1} \quad (1)$$

Kemudian menghitung fungsi alih modul VJU7 menggunakan persamaan 2

$$G_m = \frac{\text{range of electric signal}}{\text{range of temperature}} \quad (2)$$

Untuk memperoleh fungsi alih sensor *thermocouple* dan modul VJU7 maka melakukan perkalian antara keduanya.

▪ *Controller*

Fungsi Alih *controller* dengan mode control *proportional, integral, derivative* didapat ditentukan dengan persamaan 3 berikut : [9]

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{3}$$

▪ *Proses Temperature*

Sistem *thermal* merupakan sistem perpindahan panas yang memungkinkan berpindahnya panas suatu zat ke zat yang lain. Perpindahan panas ini dapat dianalisis dalam resistansi dan kapasitansi [10]. Berdasarkan fungsi alih proses *temperature* ditentukan dengan persamaan 4.[10]

$$G_{PT}(s) = \frac{R}{RCs+1} \tag{4}$$

Untuk mencari capasitansi proses *temperature* dapat dicari menggunakan persamaan 5

$$C = m.c \tag{5}$$

Dari nilai capasitansi dapat dicari juga nilai resistansinya menggunakan persamaan 6

$$R = \frac{1}{G.c} \tag{6}$$

▪ *Pressure Transmitter*

*Pressure Transmitter* berfungsi sebagai *sensing element* untuk mengukur tekanan dari *fuel gas* yang mengalir didalam pipa untuk proses pembakaran di *furnace*, yang kemudian mengirimkan sinyal elektrik ke *controller*. Fungsi alih *pressure transmitter* seperti persamaan 7.

$$G_T = \frac{\text{span output transmitter}}{\text{span input transmitter}} \tag{7}$$

▪ *Control Valve*

*Control valve* merupakan *final control element* dari sistem *control* pada *furnace* yang berfungsi untuk mengatur bukaan untuk mengalirnya *fuel gas*. *Control valve* ini mempunyai aksi *Air To Open* (ATO) [11]. Berdasarkan persamaan 8 dapat dicari fungsi alihnya sebagai berikut :

$$G_{CV} = \frac{K_v}{\Delta_{cv} s + 1} \tag{8}$$

Sebelum masuk ke *control valve* sinyal elektrik 4-20 mA perlu di konversi menjadi sinyal pneumatik 3-15 Psi supaya bisa menggerakkan *control valve* menggunakan persamaan 9.

$$G_{I/P} = \frac{\text{span output sinyal pneumatic (Psi)}}{\text{span input sinyal elektrik (mA)}} \tag{9}$$

Kemudian mencari gain *control valve* seperti persamaan 10

$$K_{CV} = \frac{\text{output (flow maksimal-flow minimum)}}{\text{input (span signal input)}} \tag{10}$$

Maka didapat total gain *control valve* seperti persamaan 11

$$K_v = G_{I/P} \times K_{CV} \tag{11}$$

Sedangkan besarnya  $\Delta_{cv}$  dapat diperoleh dengan persamaan 12

$$\Delta_{cv} = TV(\Delta Q + R) \tag{12}$$

▪ *Proses Pressure*

Proses *pressure* pada *furnace* dapat dicari *transfer function* prosesnya melalui pendekatan matematis dengan persamaan 13 berikut : [12]

$$G_{PP} = \frac{1}{RCs+1} \tag{13}$$

Dengan mencari besarnya nilai capasitansi dan resistansi yang dinyatakan dalam persamaan 14 dan 15

$$C = \frac{m}{\Delta P} \tag{14}$$

$$R = \frac{\Delta P}{Q_{out}} \tag{15}$$

**2.2 Tuning PID Dengan Metode Direct Synthesis**

Setelah melakukan perhitungan PID sesuai kondisi aktual maka akan dilakukan pengaturan kembali nilai PID *controller* yaitu dengan metode *direct synthesis*. Oleh karena *furnace* menggunakan pengendalian *cascade* sehingga akan ada dua *controller*, yaitu sebagai berikut :

▪ *Tuning Temperature Indicator Controller*

Dengan menggunakan persamaan proportional integral (PI) seperti persamaan 16 maka dapat dihitung nilai dari *Temperature Indicator Controller* yang baru. [9]

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \tag{16}$$

Untuk mencari besarnya waktu integral dan konstanta proportional menggunakan persamaan 17 dan 18

$$\tau_i = \tau \tag{17}$$

$$K_p = \frac{\tau_i}{\tau \cdot K} \tag{18}$$

▪ *Tuning Pressure Indicator Controller*

Dengan menggunakan persamaan proportional integral derivative (PID), seperti persamaan 19, yaitu memasukkan nilai gain *control valve* dan gain *proses pressure* yang telah diperoleh dari perhitungan fungsi alih agar diperoleh fungsi alih plant.

$$G_{plant} = G_{pp} \times G_{cv} \tag{19}$$

Berdasarkan fungsi alih plant maka didapat persamaan umum sistem orde 2 tanpa delay dinyatakan dalam persamaan 20 berikut : [13]

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \tag{20}$$

Selanjutnya mencari waktu integral, waktu derivative, dan konstanta proportional seperti pada persamaan 21-23.

$$\tau_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} \tag{21}$$

$$\tau_d = \frac{1}{2\zeta \cdot \omega_n} \tag{22}$$

$$K_p = \frac{2\zeta}{\tau \cdot \omega_n \cdot K} \tag{23}$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Sistem Pengendalian Furnace

*Furnace* pada PT. Z berfungsi untuk memanaskan *heavy naptha* yang akan masuk ke reactor, *furnace* tersebut bertipe box. Sistem pengendalian *cascade furnace*, digunakan untuk menjaga *temperature outlet furnace* tetap pada suhu 513°C. *Temperature outlet furnace* diukur dengan sensor *thermocouple* yang mempunyai keluaran MV kemudian akan dikonversi oleh *module VJU7* menjadi sinyal standar elektrik 4-20 mA. Selanjutnya dikirimkan ke *temperature indicator controller* untuk dibandingkan antara proses variabel dengan *set point* sehingga akan menghasilkan *error*. Dari hasil perbandingan inilah yang menjadi *inputan* untuk *pressure indicator controller*. Selanjutnya di *pressure indicator controller* juga akan dilakukan perbandingan sehingga dari hasil tersebut yang berupa *error* akan diatur menggunakan mode *control P, I, D* dan menghasilkan *manipulated variable (MV)*, yang menjadi *input* ke *control valve* agar bisa menyesuaikan bukaan.

#### 3.2 Fungsi Alih Komponen Control Furnace

- Sensor *thermocouple* dan modul VJU7

Dengan menggunakan persamaan 1 diperoleh hasil fungsi alih *thermocouple* sebagai berikut:

$$G_s = \left( \frac{43,075 - 24,964 \text{ mV}}{575 - 350 \text{ }^\circ\text{C}} \times \frac{20 - 4 \text{ mA}}{43,075 - 24,964} \times \frac{575 - 350 \text{ }^\circ\text{C}}{20 \text{ mA}} \right) \frac{1}{s + 1}$$

$$G_s = \frac{1}{s + 1}$$

Kemudian didapat fungsi alih modul VJU7 seperti persamaan 2

$$G_m = \frac{20 - 4 \text{ mA}}{575 - 350 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,071$$

Sehingga fungsi alih untuk Sensor *thermocouple* dan modul VJU7 adalah  $\frac{0,071}{s+1}$

- *Controller*

Terdapat dua *controller* dalam sistem pengendalian *cascade furnace*, yaitu *master control loop* ialah *temperature indicator controller* dan *slave control loop* ialah *pressure indicator controller*. Berdasarkan persamaan 3 diperoleh fungsi alih controller sebagai berikut :

$$G_c(s) = 75 \left( 1 + \frac{1}{375s} + 2s \right) = \frac{56250s^2 + 28125s + 75}{375s}$$

$$G_c(s) = 1000 \left( 1 + \frac{1}{1500s} + 0 \right) = \frac{1500000s + 1000}{1500s}$$

- Proses *Temperature*

Dari persamaan 5 dan 6 diperoleh besarnya kapasitansi dan resistansi sebagai berikut :

$$C = 24,48$$

$$R = 0,03s$$

Sehingga dari nilai kapasitansi dan resistansi diperoleh fungsi alih proses temperature seperti persamaan 4.

$$G_{PT} = \frac{0,0296}{0,7246s + 1}$$

- *Pressure Transmitter*

Berdasarkan persamaan 7 diperoleh fungsi alih *pressure transmitter* sebagai berikut:

$$G_T = 8$$

- *Control Valve*

Dengan menggunakan persamaan 9 – 12 dapat diperoleh fungsi alih *control valve* seperti persamaan 8 sebagai berikut :

$$G_{I/P} = 0,75$$

$$K_{cv} = 0,105$$

$$K_v = 0,07875$$

$$\Delta cv = 2,6544$$

$$G_{cv} = \frac{0,07875}{2,6544s + 1}$$

- Proses *Pressure*

Dari persamaan 14 dan 15 diperoleh besarnya kapasitansi dan resistansi sebagai berikut :

$$C = 17,490$$

$$R = 0,0042$$

Sehingga dari nilai kapasitansi dan resistansi diperoleh fungsi alih proses *pressure* seperti persamaan 13.

$$G_{PP} = \frac{1}{0,07345s + 1}$$

### 3.3 *Tuning PID Dengan Metode Direct Synthesis*

- *Tuning Temperature Indicator Controller*

Dengan menggunakan persamaan 16 diperoleh *tuning direct synthesis* Proportional dan Integral, yaitu :

$$G(s) = \frac{0,0296}{0,7246s + 1}$$

Besarnya waktu integral  $\tau_i = \tau = 0,7246$

Besarnya penguatan proportional  $K_p = 6,119$

- *Tuning Pressure Indicator Controller*

Berdasarkan persamaan 19 diperoleh gain plant, sebagai berikut :

$$G_{plant} = \frac{0,07875}{0,1949s^2 + 2,7279s + 1}$$

Dari gain plant dapat memperoleh hasil seperti yang dinyatakan dalam persamaan 21 – 23 untuk mencari waktu integral, waktu derivative, dan konstanta proportional.

$$\tau_i = 2,7278$$

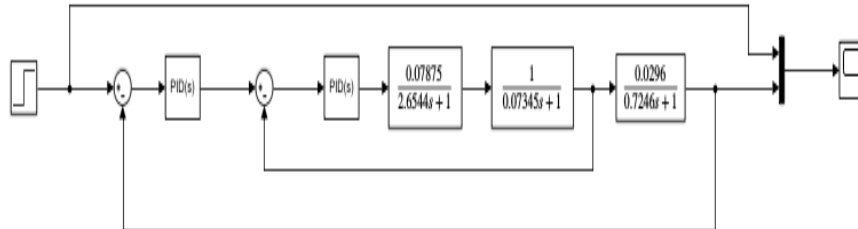
$$\tau_d = 0,0714$$

$$K_p = 34,6528$$

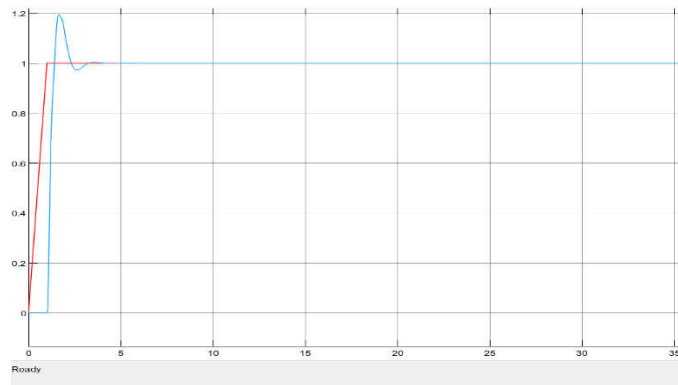
### 3.4 Respon Aktual

Tabel 1. PID Controller Aktual

32-TIC-002	32-PIC-033
K <sub>p</sub> : 75	K <sub>p</sub> : 1000
T <sub>i</sub> : 375	T <sub>i</sub> : 1500
T <sub>d</sub> : 2	



Gambar 1. Rangkaian Simulasi Sesuai Kondisi Aktual



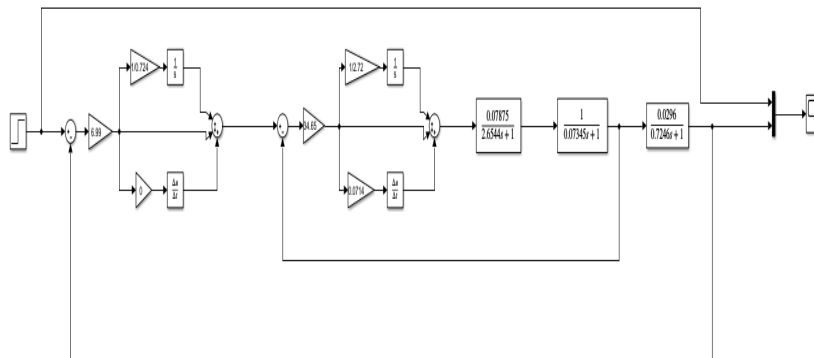
Gambar 2. Grafik Respon Hasil Simulasi Kondisi Aktual

Berdasarkan konfigurasi simulasi Matlab dilihat pada gambar 1 menghasilkan grafik respon beresilasi seperti pada gambar 2 dengan pengaturan 50s sehingga didapatkan *delay time* 16,302s, *settling time* 2,8288s, *rise time* 0,2686s, *overshoot* 19,880%, dan *undershoot* 1,725%

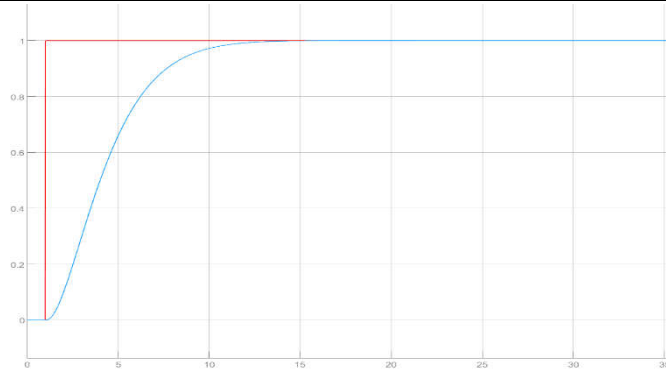
### 3.5 Respon Tuning Direct Synthesis

Tabel 2. Nilai Perhitungan Dengan Metode *Direct Synthesis*

32-TIC-002	32-PIC-033
K <sub>p</sub> : 6,119	K <sub>p</sub> : 34,6528
T <sub>i</sub> : 0,7246	T <sub>i</sub> : 2,7278
	T <sub>d</sub> : 0,0714



Gambar 3. Rangkaian Simulasi Dengan *Direct Synthesis*

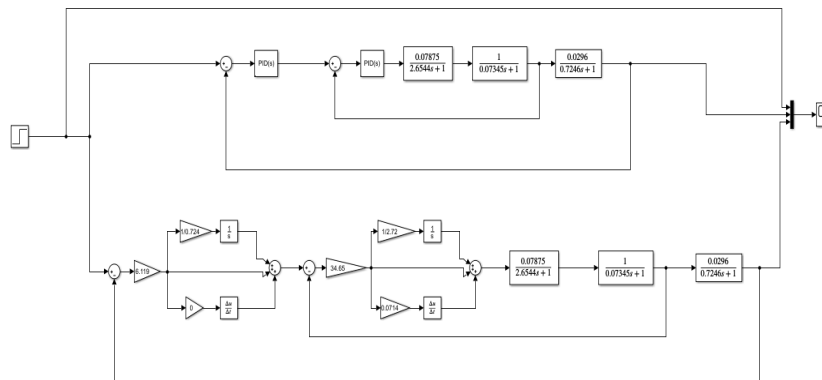


Gambar 4. Grafik Respon Hasil Simulasi Dengan *Direct Synthesis*

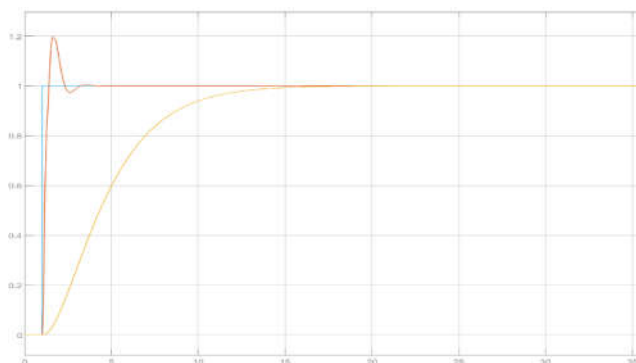
Konfigurasi dari simulasi MatLab seperti gambar 3 menghasilkan grafik respon tanpa overshoot seperti gambar 4 yang diseting waktu sampelnya 50s didapatkan *delay time* 33,445s, *settling time* 10,5639s, *rise time* 5,557s, *overshoot* 0,0054% dan tidak terdapat *undershoot*.

### 3.6 Perbandingan Respon Aktual dan Respon *Direct Synthesis*

Dari respon actual dan respon *direct synthesis* yang telah diperoleh akan dibandingkan keduanya seperti gambar 5 dengan melihat beberapa parameter meliputi *delay time*, *settling time*, *rise time*, *overshoot* dan *undershoot* yang muncul pada grafik perbandingan hasil respon seperti gambar 6.



Gambar 5. Rangkaian Simulasi Kondisi Aktual dan *Direct Synthesis*



Gambar 6. Grafik Respon Hasil Simulasi Kondisi Aktual dan *Direct Synthesis*

Tabel 3 Perbandingan Kondisi Aktual dan *Direct Synthesis*

Parameter	Actual	Direct synthesis
Delay Time	16,302s	33,445s
Settling Time	2,8288s	10,5639s
Rise Time	0,2686	5,557s
Overshoot	19,880%	0,0054%
Undershoot	1,725%	

Pada Tabel 3 perbandingan kondisi aktual dengan metode *direct synthesis* menunjukkan bahwa pada kondisi aktual dilapangan mempunyai *delay time* 16,209s, *settling time* 2,8288s, *rise time* 0,2686s serta terdapat *overshoot* 19,880% dan *undershoot* 1,725% sedangkan jika dibandingkan dengan metode *direct synthesis* memiliki *delay time* 33,445s, *settling time* 10,5639s, *rise time* 5,557s, *overshoot* 0,0054% dan tidak terdapat *undershoot*.

Dari grafik ditunjukkan bahwa yang mencapai kondisi *steade state* lebih cepat adalah kondisi aktual dilapangan namun untuk mencapai keadaan tersebut terdapat *overshoot* dan *undershoot* yang mana dapat mengakibatkan kerusakan pada sistem maupun mengurangi kinerja sistem. Oleh karena itu dengan menggunakan metode *direct synthesis* ini dapat menghilangkan keadaan ketika *output* tidak sesuai dengan nilai yang diinginkan baik itu *overshoot* maupun *undershoot*, walaupun memiliki keterlambatan kondisi *steade state* jika dibanding kondisi aktual.

#### 4. KESIMPULAN

Metode *direct synthesis* digunakan untuk mengatur kembali nilai PID controller, yaitu *Temperature Indikator Controller* dan *Pressure Indikator Controller*. Sehingga diperoleh nilai *Temperature Indikator Controller*, yaitu  $K_p = 6,119$  dan  $\tau_i = 0,7246$  sedangkan nilai *Pressure Indikator Controller*, yaitu  $K_p = 34,6528$ ,  $\tau_i = 2,7278$ ,  $\tau_d = 0,0714$ . Dari controller PID aktual diperoleh nilai *delay time* 16,302s, *settling time* 2,8288s, *rise time* 0,2686, *overshoot* 19,880%, dan *undershoot* 1,725%. Sedangkan dengan metode *direct synthesis* didapat *delay time* 33,445s, *settling time* 10,5639s, *rise time* 5,557s, *overshoot* 0,0054% dan tidak terdapat *undershoot*. Perbandingan dari controller aktual dan metode *direct synthesis* menunjukkan bahwa pada kondisi aktual grafik beresilasi sebelum mencapai keadaan *steady state*. Namun menggunakan metode *direct synthesis* tidak terdapat osilasi untuk mencapai keadaan *steady state* sehingga bisa dikatakan menggunakan metode *direct synthesis* lebih baik.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] CNSC Technical Training Group, "Basic Instrumentation Measuring Devices and," *Sci. React. Fundam. Instrum. Control* 7, 2003.
- [2] W. Bolton, *Instrumentation and Control Systems, Third Edition*. 2021. doi: 10.1016/C2020-0-00286-0.
- [3] K. Lita and V. E. Sari, "Evaluasi Kinerja dan Efisiensi Furnace (31-F-101) pada Naptha Hydrotreating Unit," 2017.
- [4] Y. V. P. K. Y V Pavan Kumar, "Cascaded PID Controller Design for Heating Furnace Temperature Control," *IOSR J. Electron. Commun. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 76–83, 2013, doi: 10.9790/2834-0537683.
- [5] R. N. Amalia and Wijaya Kusuma, "Desain Simulasi dan Analisa Closed Loop Boost Converter Terintegrasi Solar PV Berbasis PID," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 48–53, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i1.1078.
- [6] I. Control, *Anti-windup strategies*, no. 9781846285851. 2006. doi: 10.1007/1-84628-586-0\_3.
- [7] N. E. Helwig, S. Hong, and E. T. Hsiao-wecksler, *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title*.
- [8] N. Taufiqulmajid and E. Utami, "Analisa Pengendalian Temperature Outlet Furnace Dengan Metode Pid-Fuzzy Gain Scheduling," *Nauval Taufiqulmajid, SNTEM*, vol. 1, no. November, pp. 973–984, 2021.
- [9] C. Buku Asli, *KONTROL PID UNTUK PROSES INDUSTRI Beragam Struktur dan Metode Tuning PID praktis (Iwan Setiawan)*. 2008.
- [10] P. N. Paraskevopoulos, *Modern control engineering*. 2017. doi: 10.1201/9781315214573.
- [11] Emerson Fisher, "Control valve handbook 5 edition," *Emerson Autom. Solut.*, p. 338, 2005.
- [12] Y. E. Konoralma and A. Surya Wardhana, "Analisa Respon Transient Pada Pressure Control System Tangki Tk-8006 Dengan Metode Direct Synthesis Di Lapangan Pt. Xyz," *Yoslin Eslin Konoralma, SNTEM*, vol. 1, no. November, pp. 1060–1068, 2021.
- [13] Prihatama Kunto Wicaksono, "Pengendalian Pergerakan Hover Quadcopter Hover Movement Control of Quadcopter Using Artificial Neural Network Pid," *Tugas Akhir ITS*, 2016.