

ANALISIS RESPON SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR PADA HEAT EXCHANGER DENGAN METODE *DIRECT SYNTHESIS*

Teguh Graha Malle¹, Alfin Sahrin^{1*}, Erna Utami¹, Pujiyanto¹

¹Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Blora, 58315

*E-mail: alfin.sahrin@esdm.go.id

ABSTRAK

Pengendalian temperatur pada sistem *heat exchanger* merupakan elemen penting untuk menjaga stabilitas proses industri sekaligus memastikan efisiensi energi. Penelitian ini menganalisis respon sistem pengendalian suhu dengan metode *Direct Synthesis* menggunakan perangkat *heat exchanger* skala laboratorium. Proses dilakukan melalui identifikasi model matematis, perancangan parameter kendali, simulasi dengan MATLAB/Simulink, hingga implementasi langsung pada unit percobaan. Evaluasi kinerja dilakukan dengan menganalisis *rise time*, *settling time*, *overshoot*, serta *steady-state error*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Direct Synthesis* mampu memperbaiki performa sistem secara signifikan, ditandai dengan berkurangnya waktu tunak dari 396,5 detik menjadi 165,2 detik serta meniadakan *overshoot* yang sebelumnya mencapai 28%. Perubahan ini membuktikan bahwa metode *Direct Synthesis* efektif dalam meningkatkan kestabilan dan kecepatan respon sistem. Temuan ini menegaskan bahwa metode ini layak diterapkan tidak hanya di lingkungan pendidikan sebagai media pembelajaran, tetapi juga pada skala industri yang memerlukan kendali sederhana namun andal.

Kata kunci: *Direct Synthesis*, *Heat Exchanger*, Pengendalian Temperatur, Respon Sistem

1. PENDAHULUAN

Pengendalian temperatur merupakan salah satu aspek fundamental dalam proses industri, terutama pada sistem pertukaran panas (*heat exchanger*) yang banyak digunakan di bidang energi, kimia, dan manufaktur. Sistem ini berfungsi menjaga kestabilan suhu fluida agar proses produksi berlangsung secara optimal, efisien, dan aman. Ketidakstabilan temperatur dapat menyebabkan penurunan kualitas produk, peningkatan konsumsi energi, bahkan menimbulkan risiko keselamatan kerja. Oleh karena itu, diperlukan metode kendali yang handal untuk menjaga kinerja sistem tetap dalam batas operasi yang diinginkan [1].

Dalam praktiknya, sistem pengendalian temperatur sering dihadapkan pada dinamika non-linier, keterlambatan waktu (*time delay*), serta adanya gangguan eksternal yang sulit diprediksi. Oleh karena itu, pemilihan strategi kendali menjadi krusial. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Proportional-Integral-Derivative (PID) controller* karena kesederhanaan implementasi dan fleksibilitasnya. Namun, performa PID sangat bergantung pada teknik *tuning* parameter yang digunakan [2]. Untuk meningkatkan kinerja, metode *Direct Synthesis* diperkenalkan sebagai pendekatan matematis yang mampu menghasilkan parameter kendali lebih optimal dengan menurunkan orde model sistem menjadi bentuk yang lebih sederhana [3][4].

Metode *Direct Synthesis* memungkinkan perancangan parameter kendali langsung dari fungsi transfer sistem, sehingga respon yang dihasilkan lebih prediktif. Pendekatan ini terbukti mampu memperbaiki karakteristik transien seperti *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*, serta mengurangi kesalahan tunak (*steady-state error*). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan metode ini pada sistem kontrol *heat exchanger* mampu menghasilkan respon yang lebih stabil dibandingkan metode konvensional [5].

Penerapan strategi kontrol berbasis model telah menjadi landasan penting dalam meningkatkan stabilitas dan responsivitas sistem pengendalian suhu pada *heat exchanger*. Metode *Direct Synthesis* menonjol karena kemampuannya dalam merancang parameter kendali secara langsung dari fungsi transfer sistem, sehingga meminimalkan kebutuhan tuning berbasis *trial-and-error*. Tidak hanya meningkatkan kestabilan sistem, pendekatan ini juga terbukti mampu menekan *overshoot* dan waktu tunak tanpa mengorbankan robusta terhadap gangguan eksternal [6][7].

Aspek pengendalian sistem yang presisi menjadi elemen kunci dalam meningkatkan kinerja operasional *heat exchanger*. Metode *Direct Synthesis* semakin banyak digunakan karena kemampuannya merancang parameter kendali secara langsung berdasarkan model matematis sistem. Pendekatan ini terbukti efektif dalam mereduksi *overshoot*, menurunkan waktu tunak, dan meningkatkan stabilitas transien tanpa memerlukan iterasi tuning yang kompleks. Dalam berbagai studi, kontrol berbasis model seperti ini memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan pendekatan konvensional, khususnya dalam menghadapi karakteristik sistem dengan time delay dan dinamika nonlinier. Keunggulan ini menjadikan metode *Direct Synthesis* sangat cocok tidak hanya untuk aplikasi skala kecil, tetapi juga untuk sistem industri yang menuntut keandalan dan kesederhanaan implementasi [8],[9].

Penelitian dengan menerapkan metode *Direct Synthesis* juga sangat relevan. Sistem *heat exchanger* skala laboratorium menjadi sarana pembelajaran yang efektif untuk memahami dinamika kontrol dan karakteristik termal proses. Implementasi *cascade control* berbasis *Direct Synthesis* mampu menghasilkan respon tanpa *overshoot* dengan waktu penetapan 183 detik. Hasil ini memberikan bukti bahwa metode tersebut dapat digunakan tidak hanya di industri, tetapi juga dalam pendidikan vokasi untuk meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap sistem kendali [10].

Selain itu, penelitian yang menekankan pentingnya evaluasi multi-objektif dalam desain *direct contact heat exchanger*. Dengan memperhatikan parameter seperti koefisien perpindahan panas volumetrik, disipasi energi, dan keseragaman distribusi temperatur, sistem dapat dioptimalkan untuk menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi [11]. Integrasi metode analisis tersebut dengan strategi kendali seperti *Direct Synthesis* dapat menghasilkan solusi yang lebih komprehensif. Sejalan dengan itu, [5] memperkenalkan kerangka integrasi antara sintesis fleksibel dan kontrol dinamis pada *heat exchanger network*. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan performa kontrol hingga 61,83% serta pengurangan biaya tahunan sebesar 14,95%. Pendekatan ini menegaskan bahwa pengendalian temperatur yang baik harus selaras dengan desain fleksibel untuk menghadapi ketidakpastian operasional.

Dalam perkembangan terakhir, topik terkait pengendalian temperatur, efisiensi energi, dan integrasi desain *heat exchanger* mendapat perhatian luas dalam literatur internasional. Penelitian-penelitian tersebut menggarisbawahi bahwa pendekatan yang menggabungkan aspek kontrol dengan optimasi termal memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan pendekatan tunggal. Oleh karena itu, penerapan metode *Direct Synthesis* dalam penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi tidak hanya terhadap stabilitas sistem kontrol, tetapi juga terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik industri [12].

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respon sistem temperatur pada *heat exchanger* skala laboratorium menggunakan metode *Direct Synthesis*. Fokus penelitian mencakup evaluasi parameter transien seperti *rise time*, *settling time*, *overshoot*, serta kesalahan tunak. Dengan pendekatan ini, diharapkan diperoleh gambaran menyeluruh mengenai efektivitas metode *Direct Synthesis* dalam meningkatkan kinerja pengendalian temperatur, serta relevansinya untuk diaplikasikan dalam skala industri maupun laboratorium.

2. METODE

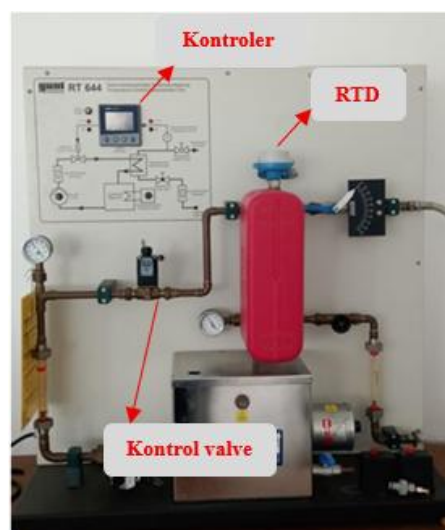
Metode penelitian disusun secara sistematis untuk memastikan setiap tahapan dapat menghasilkan data yang valid dan reliabel. Tahapan tersebut melibatkan proses identifikasi sistem, perancangan kendali, implementasi pada perangkat laboratorium, serta evaluasi kinerja.

1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan objek uji berupa *heat exchanger* tipe *shell and tube* yang tersedia di Laboratorium Instrumentasi PEM Akamigas. Fokus utama adalah menganalisis respon sistem kendali temperatur menggunakan metode *Direct Synthesis*. Tahapan penelitian meliputi identifikasi model sistem, perancangan parameter kendali, implementasi kontrol, serta evaluasi kinerja berdasarkan parameter transien. Alur penelitian ini dapat dijabarkan dalam diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan peralatan perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2 dan spesifikasi komponen yang terdapat pada sistem *heat exchanger* dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



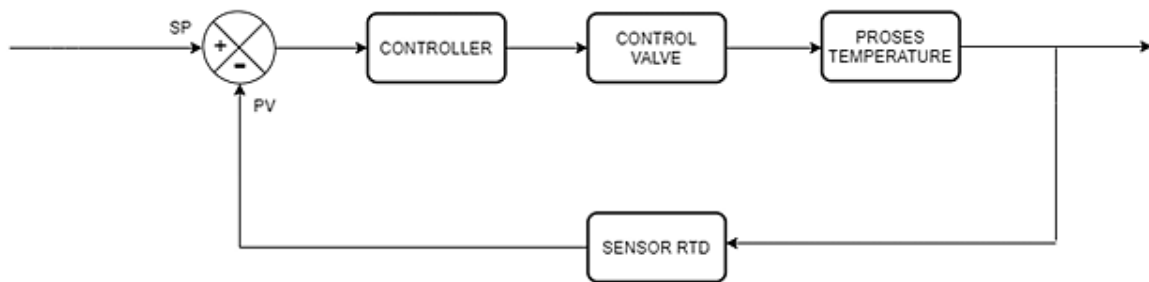
Gambar 2. Heat Exchanger

Tabel 1. Spesifikasi Komponen

No	Nama komponen	Spesifikasi
1	Resistance Temperature Detector (RTD)	Tipe <i>wire-wound</i> , range $-50^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$
2	Kontroler	Sinyal elektrik 4-20 mA, <i>reverse</i>
3	Kontrol valve	Sinyal elektrik 0-10 V, aksi ATO

2. Identifikasi Model Sistem

Langkah awal penelitian adalah memperoleh model matematis dari *heat exchanger*. Metode *step response test* digunakan dengan memberikan gangguan berupa perubahan laju alir fluida panas. Data respon keluaran berupa perubahan temperatur fluida dingin dicatat hingga mencapai kondisi tunak. Dari hasil pengujian, diperoleh model fungsi transfer orde pertama dengan *time delay* yang sesuai dengan karakteristik sistem. Metode identifikasi ini banyak digunakan dalam studi kontrol proses karena kesederhanaannya, serta kemampuannya menggambarkan perilaku sistem nonlinier secara mendekati linier dalam rentang operasi tertentu. Blok diagram yang digunakan dalam pengendalian *heat exchanger* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Kendali

Agar blok diagram dapat berfungsi dan dapat disimulasikan, maka perlu adanya fungsi alih dalam setiap blok. Untuk mendapatkan nilai fungsi alih proses temperatur dapat menggunakan Persamaan 1.

$$G_p = \frac{R}{RC_s + 1} \quad (1)$$

Untuk mencari nilai R dan C dapat dicari menggunakan Persamaan 2 dan 3.

$$R = \frac{h}{Q_{in}} \quad (2)$$

$$C = \frac{v}{h} \quad (3)$$

Dimana h adalah panjang *heat exchanger*, Q_{in} adalah aliran masuk, dan v adalah volume, sedangkan untuk mencari fungsi alih kontroler dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{is}} + T_d s \right) \quad (4)$$

Untuk mendapatkan nilai fungsi alih kontrol valve dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 5.

$$K_v = K_{cv} \times G_{act} \times G_{body} \quad (5)$$

Nilai K_{cv} , G_{act} , dan G_{body} adalah perbandingan nilai *output* dengan nilai *input*. Masing-masing nilai *output* dan *input* disesuaikan dengan variabel *gain* kontrol valve, *gain* aktuator, dan *gain* bodi. Untuk mencari fungsi alih sensor RTD dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 6.

$$\text{Gain RTD} = \frac{\text{output}}{\text{input}} \quad (6)$$

Untuk melakukan *tuning* kontrol PID dengan metode *direct synthesis* pada temperatur kontroler dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 7.

$$G_p = G_p(\text{temperatur}) \times G_{cv} \quad (7)$$

Dari hasil Persamaan 7, kemudian digunakan untuk tuning pada persamaan kontrol PID yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8.

$$G_c(s) = \frac{K}{\frac{1}{\omega_n} s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (8)$$

3. Perancangan Kontrol dengan Metode *Direct Synthesis*

Setelah model sistem diperoleh, perancangan parameter kendali dilakukan dengan pendekatan *Direct Synthesis*. Prinsip dasar metode ini adalah merumuskan fungsi transfer pengendali berdasarkan fungsi transfer sistem yang diinginkan (*desired closed-loop response*). Dengan demikian, sistem dapat dipaksa mengikuti respon ideal seperti *first-order plus time delay model (FOPTD)*. Metode *Direct Synthesis* menghasilkan parameter *Proportional* (K_p), *Integral* (T_i), dan *Derivative* (T_d) yang lebih presisi dibandingkan metode konvensional, sehingga mampu menekan *overshoot* dan mempercepat waktu tunak. Untuk mencari nilai T_i , T_d , dan K_p dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 9 sampai 11. Nilai τ dan ω diperoleh ketika mendesain kontroler dengan menggunakan orde kedua untuk menghasilkan sistem yang mempunyai performansi yang sesuai dengan keinginan. Dimana τ merupakan konstanta waktu dari sistem (model yang diinginkan) yaitu 50 detik, sedangkan ω adalah frekuensi natural.

$$T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} \quad (9)$$

$$T_d = \frac{1}{2\zeta\omega_n} \quad (10)$$

$$K_p = \frac{2\zeta}{\tau * \omega_n K_C} \quad (11)$$

4. Implementasi Sistem Kendali

Implementasi sistem kendali dilakukan dengan bantuan perangkat komputer yang terhubung ke pengendali digital. Perangkat lunak MATLAB/Simulink digunakan untuk simulasi awal dan validasi parameter kendali, sedangkan implementasi nyata dilakukan pada *heat exchanger* laboratorium. Sinyal kendali diberikan pada aktuator pengatur laju alir, sementara sinyal keluaran berupa temperatur cairan diukur dengan sensor RTD yang terhubung ke *data acquisition system (DAQ)*. Penggunaan simulasi sebelum eksperimen nyata dianggap penting untuk meminimalkan risiko kesalahan dan mempercepat proses optimasi.

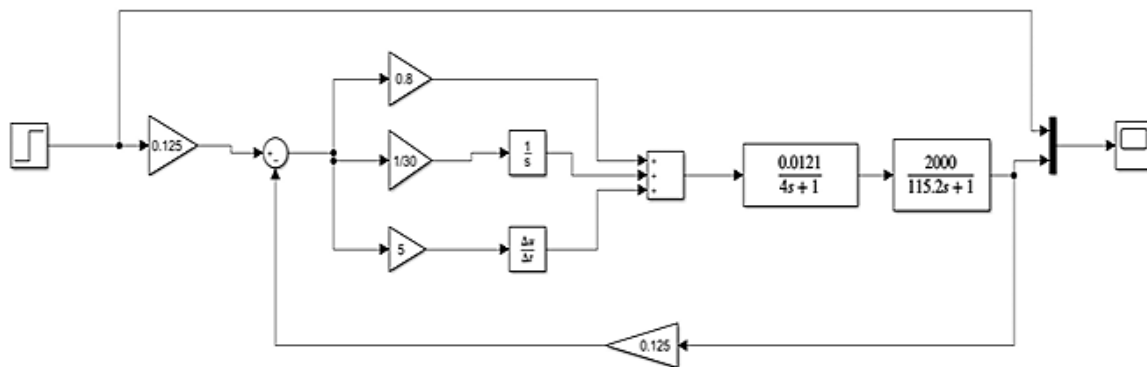
5. Parameter Evaluasi Kinerja

Kinerja sistem kendali dianalisis menggunakan parameter standar dalam teori kontrol, yaitu:

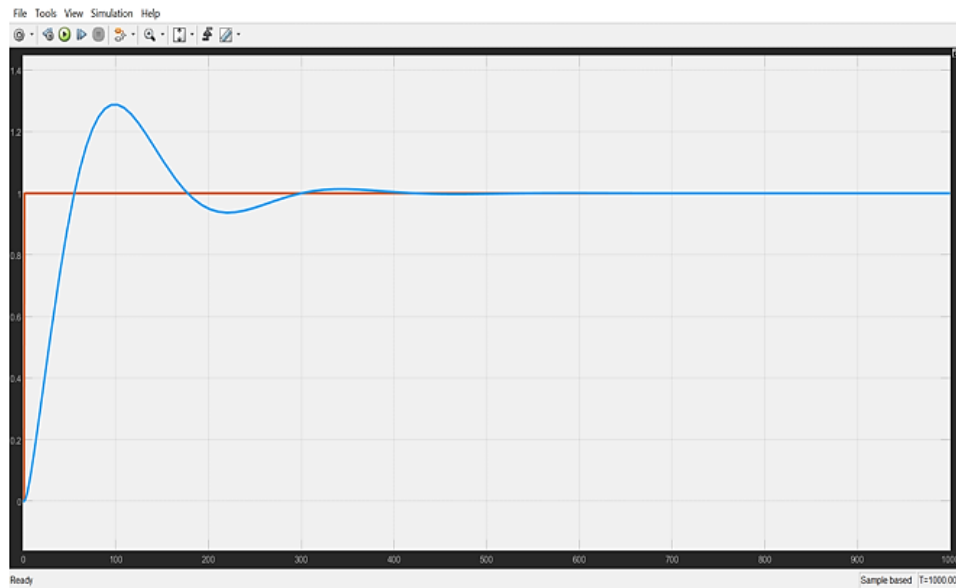
- Waktu naik (*rise time*) yaitu waktu yang dibutuhkan keluaran sistem mencapai 90% dari nilai *setpoint*.
 - Waktu tunak (*settling time*) yaitu waktu hingga respon berada dalam $\pm 5\%$ dari *setpoint*.
 - Overshoot* yaitu deviasi maksimum terhadap *setpoint*.
 - Kesalahan tunak (*steady-state error*) yaitu selisih antara nilai keluaran akhir dan *setpoint*.
- Evaluasi ini sesuai dengan standar dalam studi kontrol proses yang menekankan kestabilan sistem dan minimisasi energi kendali.

3. PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi *setpoint* temperatur pada *heat exchanger* dan mencatat respon sistem kondisi sebelum (kondisi aktual) dan setelah pengendali *Direct Synthesis* diterapkan. Parameter yang dianalisis meliputi *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady-state error*. Hasil model data aktual dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5. Sedangkan hasil nilai parameter kondisi aktual dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 4. Model Simulasi Aktual

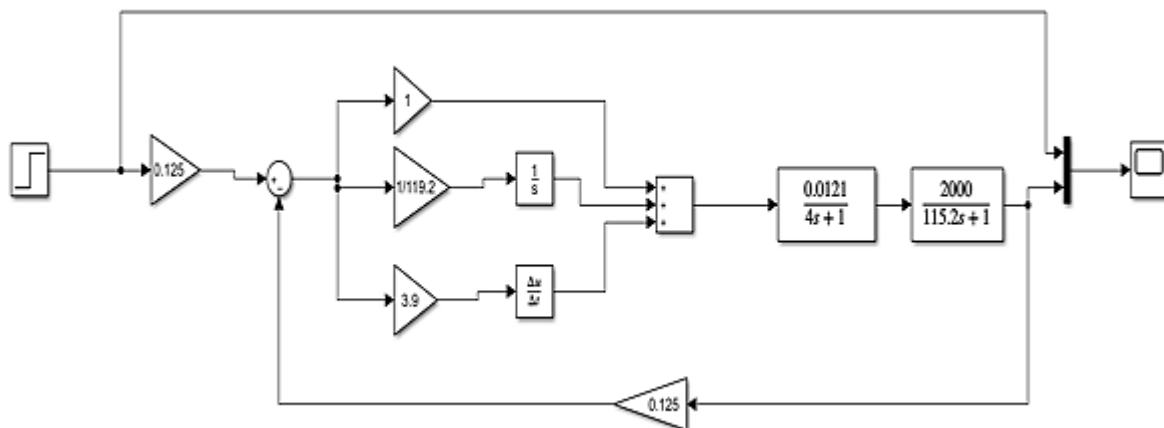


Gambar 5. Grafik Respon Data Aktual Kontrol Temperatur

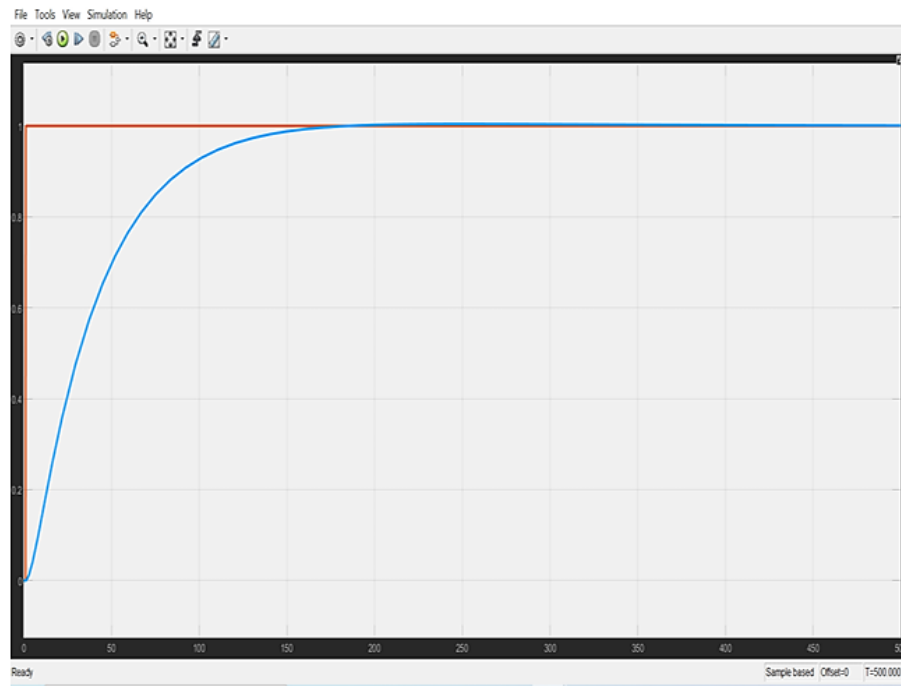
Tabel 2. Parameter Kondisi Aktual

Parameter	Kondisi aktual
<i>Time Delay</i>	1 s
<i>Settling Time ($\pm 0.5\%$)</i>	396,5 s
<i>Time Constant</i>	33,2 s
<i>Rise Time</i>	39,9 s,
<i>Overshoot</i>	28% di 105,5 s

Hasil simulasi model dan respon sistem dengan menggunakan *tuning direct synthesis* dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7. Sedangkan hasil nilai parameternya dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 6. Model Simulasi *Tuning Direct Synthesis*

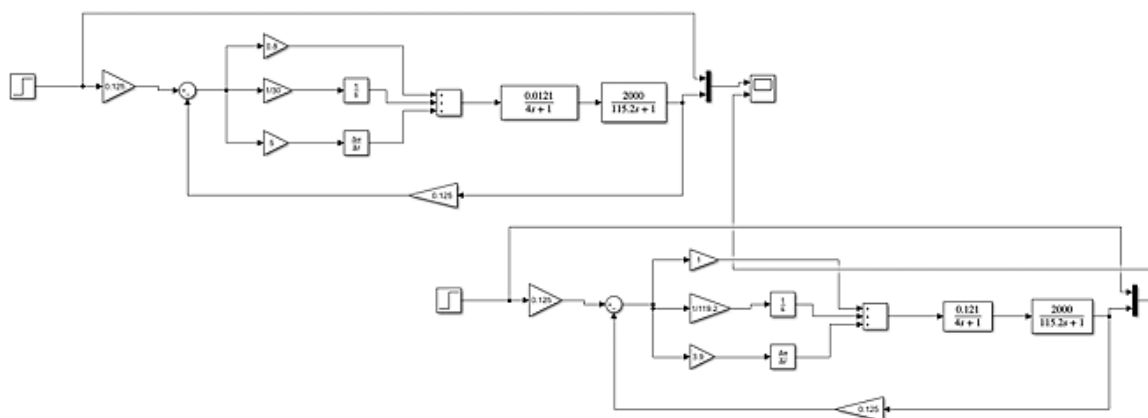


Gambar 7. Grafik Respon Data *Tuning Direct Synthesis*

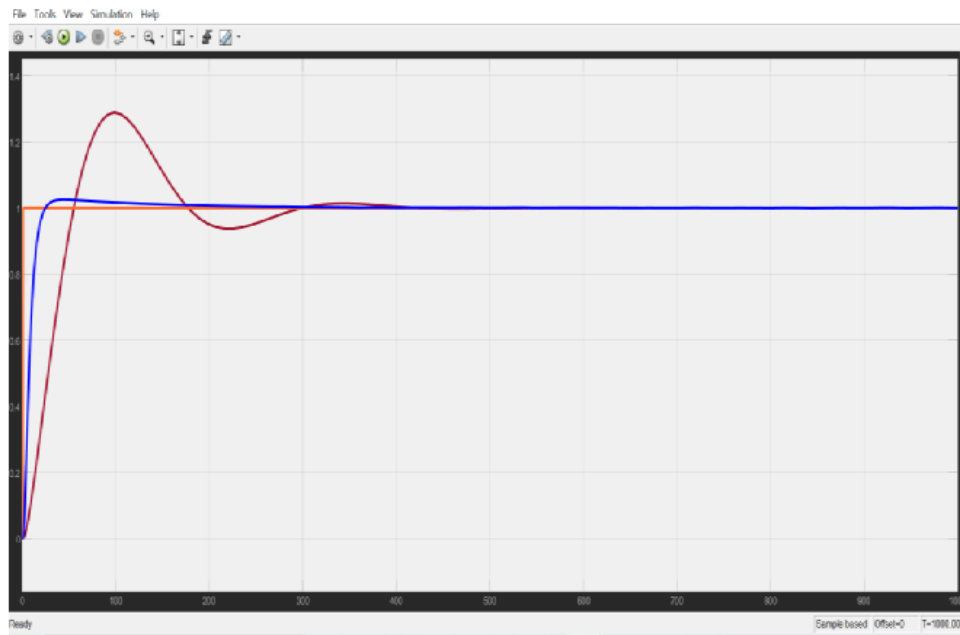
Tabel 3. Parameter *Direct Synthesis*

Parameter	Kondisi <i>Tuning</i>
<i>Time Delay</i>	1 s
<i>Settling Time</i> ($\pm 0.5\%$)	165,2 s
<i>Time Constant</i>	41,9 s
<i>Rise Time</i>	81,3 s
<i>Overshoot</i>	-

Dari hasil kondisi aktual dan setelah melalui *tuning direct synthesis* tersebut, kemudian dilanjutkan dengan penyandingan hasil agar dapat diketahui lebih detail dari penelitian yang didapatkan. Hasil penyandingan hasil model dan respon sistem dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9. Sedangkan hasil nilai parameternya dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 8. Model Simulasi Aktual dan *Tuning Direct Synthesis*



Gambar 9. Grafik Respon Data Aktual dan *Tuning Direct Synthesis*

Tabel 4. Parameter Aktual dan *Direct Synthesis*

Parameter	Kondisi aktual	Kondisi Tuning
<i>Time Delay</i>	1 s	1 s
<i>Settling Time</i> ($\pm 0.5\%$)	396,5 s	165,2 s
<i>Time Constant</i>	33,2 s	41,9 s
<i>Rise Time</i>	39,9 s	81,3 s
<i>Overshoot</i>	28% di 105,5 s	-

Hasil eksperimen memperlihatkan perbedaan yang jelas antara kondisi aktual sistem dan hasil setelah penerapan metode *Direct Synthesis*. Pada kondisi awal, respon sistem menunjukkan adanya *overshoot* sebesar 28% dan waktu tunak hampir 400 detik. Hal ini mencerminkan keterbatasan kendali konvensional dalam merespons dinamika thermal *heat exchanger* yang dipengaruhi oleh faktor nonlinieritas serta keterlambatan waktu. Setelah dilakukan *tuning* dengan *Direct Synthesis*, performa sistem meningkat secara signifikan. Waktu tunak menurun menjadi sekitar 165 detik, sementara *overshoot* dapat dihilangkan sepenuhnya. Namun terjadi kenaikan *rise time* dari 39,9 detik menjadi 81,3 detik, peningkatan *rise time* terjadi karena sistem dikondisikan untuk menghindari *overshoot* dan menghasilkan respon yang lebih halus. *Trade-off* ini umum dalam desain kendali dan sesuai dengan preferensi kestabilan sistem.

Perbaikan ini menunjukkan bahwa metode *Direct Synthesis* mampu menghasilkan parameter kendali yang lebih adaptif terhadap karakteristik sistem, sehingga respon yang dicapai lebih stabil dan efisien. Hasil ini sejalan dengan berbagai penelitian terkini yang menekankan pentingnya strategi kendali berbasis model matematis dalam mengatasi keterbatasan kontrol konvensional. Selain memberikan keunggulan teknis, penerapan metode ini juga relevan, karena menyajikan gambaran nyata bagaimana pendekatan matematis dapat diterjemahkan menjadi solusi praktis.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode *Direct Synthesis* mampu memperbaiki kinerja sistem pengendalian temperatur pada *heat exchanger*. Respon sistem yang semula memiliki *overshoot* sekitar 28% dengan waktu tunak hampir 400 detik, berubah menjadi

lebih stabil dengan waktu tunak sekitar 165 detik dan *overshoot* yang dapat dihilangkan sepenuhnya. Hasil ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menggarisbawahi efektivitas pendekatan *Direct Synthesis* maupun integrasi desain dan kendali berbasis model matematis.

Penelitian sebelumnya menegaskan bahwa penerapan *Direct Synthesis* pada sistem kontrol suhu cairan mampu menghasilkan respon yang lebih cepat tanpa *overshoot* signifikan, sehingga lebih efisien dibandingkan metode *tuning* konvensional [3]. Temuan ini selaras dengan hasil penelitian ini, di mana stabilitas sistem meningkat signifikan setelah penerapan metode tersebut. Selain itu, [5] mengungkapkan bahwa integrasi antara sintesis dan kendali dinamis pada *heat exchanger* mampu meningkatkan performa hingga 61,83% serta menurunkan biaya operasi sebesar 14,95%. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian ini, bahwa *Direct Synthesis* dapat memberikan keuntungan teknis sekaligus efisiensi operasional.

Dari sisi desain jangka panjang, [1] menyoroti pentingnya fleksibilitas kendali untuk menghadapi variasi beban proses. Hasil penelitian ini mendukung pandangan tersebut karena sistem yang dikendalikan dengan *Direct Synthesis* tetap stabil meski terjadi variasi pada kondisi operasional. Di sisi lain, penelitian lain menekankan bahwa integrasi strategi kontrol dengan desain jaringan *heat exchanger* dapat memberikan efisiensi energi hingga 39,2% [13]. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan performa kendali, seperti yang dicapai dalam penelitian ini, juga dapat dikaitkan dengan peluang penghematan energi dan biaya.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan metode *Direct Synthesis* pada sistem pengendalian temperatur *heat exchanger* mampu meningkatkan performa secara signifikan dibandingkan metode konvensional. Perbaikan terlihat dari berkurangnya waktu tunak dari hampir 400 detik menjadi sekitar 165 detik serta hilangnya *overshoot* yang sebelumnya mencapai 28%. Hasil ini menegaskan bahwa metode *Direct Synthesis* tidak hanya efektif dalam mempercepat respon dan menjaga kestabilan sistem, tetapi juga relevan untuk diaplikasikan pada skala laboratorium maupun skala industri yang membutuhkan kendali sederhana, efisien, dan andal. Dengan demikian, *Direct Synthesis* dapat dipandang sebagai strategi pengendalian yang mampu menghubungkan teori kontrol matematis dengan implementasi praktis secara nyata.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Lakner, Á. Orosz, B. S. How, and F. Friedler, "Synthesis of multiperiod heat exchanger networks: n-best networks with variable approach temperature," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 42, no. January, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101912.
- [2] J. Możaryn, J. Petryszyn, and S. Ozana, "PLC based fractional-order PID temperature control in pipeline: design procedure and experimental evaluation," *Meccanica*, vol. 56, no. 4, pp. 855–871, 2021, doi: 10.1007/s11012-020-01215-0.
- [3] M. R. Pradana, D. Aristoni, R. H. Triyanto, U. Yuliatin, and S. H. Budi, "Cascade flow rate-temperature control system design based on PID controller using direct synthesis tuning method," *J. Polimesin*, vol. 22, no. 6, p. 654, 2024, doi: 10.30811/jpl.v22i6.5960.
- [4] W. Zhang, Y. Cui, and X. Ding, "An improved analytical tuning rule of a robust pid controller for integrating systems with time delay based on the multiple dominant pole-placement method," *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 9, 2020, doi: 10.3390/sym12091449.
- [5] S. Gu, L. Zhang, Y. Zhuang, J. Du, and C. Shao, "Integrated synthesis and control of heat exchanger networks with dynamic flexibility consideration," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 218, no. 2, p. 119304, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119304.
- [6] H. U. Udeani, H. C. Inyima, K. A. Akpado, and C. E. Agbaraji, "Heat Exchanger Performance

- and Stability Improvement Using H 2 Synthesis Control Design Technique,” vol. 26, no. 10, pp. 70–80, 2020, doi: 10.9734/JSRR/2020/v26i1030323.
- [7] J. Siza, J. Llanos, P. Velasco, and A. P. Moya, “Model Predictive Control (MPC) of a Countercurrent Flow Plate Heat Exchanger in a Virtual Environment,” 2024.
 - [8] V. S. Reddy, H. Subhadra, S. Prananvanand, and A. V. Juliet, “Controller Design for Temperature Regulation in a Nonlinear Industrial Heat Exchanger System,” vol. 03012, pp. 1–10, 2025.
 - [9] C. Muñiz-montero, J. M. Munoz-pacheco, L. A. Sánchez-gaspariano, C. Sánchez-lópez, J. E. Molinar-solís, and M. Chavez-portillo, “Direct Synthesis of Fractional-Order Controllers Using Only Two Design Equations with Robustness to Parametric Uncertainties,” pp. 1–26, 2025.
 - [10] M. S. Can and T. Doğruer, “Direct Synthesis Method-based PID Controller Design for High Order Systems,” *NATURENGS MTU J. Eng. Nat. Sci. Mal. Turgut Ozal Univ.*, vol. 5, no. 2, pp. 16–22, 2024, doi: 10.46572/naturengs.1563008.
 - [11] B. Li, P. Yang, Z. Li, J. Xu, and H. Wang, “A Multi-Objective Comprehensive Evaluation of Heat Transfer Performance of a Direct-Contact Heat Exchanger,” *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1115/1.4055743.
 - [12] Y. İçmez and M. S. Can, “Smith Predictor Controller Design Using the Direct Synthesis Method for Unstable Second-Order and Time-Delay Systems,” *Processes*, vol. 11, no. 3, 2023, doi: 10.3390/pr11030941.
 - [13] Y. Zhuang, L. Zhang, L. Liu, J. Du, and S. Shen, “An upgraded superstructure-based model for simultaneous synthesis of direct work and heat exchanger networks,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 159, pp. 377–394, 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.03.008.