

Analisis Sistem Pengaturan Suhu Air Menggunakan Heater Berbasis Kontrol PID dan Kesalahan (*Offset*) pada Sistem Pemanas di Industri

Johan Prasetyo^{1*}, Seflahir Dinata², Aripin Triyanto³, Abdurahman⁴

^{1,2,3,4} Teknik Elektro, Universitas Pamulang, Indonesia

Email: johanlb54@gmail.com^{1*}

Alamat: Jl. Raya Puspitek No.46, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia, 15310

*Penulis Korespondensi

Abstract. *Stable temperature regulation is essential in various industries to maintain product quality and energy efficiency. This study analyzed the water temperature regulation system using PID control through MATLAB simulation and the actual implementation using Thermocontrol and PT100 sensors. In the simulation, the PID control parameters used were $K_p = 3.0$, $K_i = 240$, and $K_d = 60$, while the tuning results in the actual implementation were $K_p = 3.0$, $K_i = 0.5$, and $K_d = 1.2$. The simulation results showed that the system could reach the setpoint faster (± 330 seconds), but with a high overshoot ($\pm 20.8^\circ\text{C}$). In contrast, the actual implementation shows more stable performance, with a much lower overshoot ($\pm 0.8^\circ\text{C}$) and a time to the setpoint of about ± 345 seconds. These differences in performance can be influenced by environmental factors and the physical characteristics of real systems that are not fully reflected in the simulation. Although the simulation provides faster results, the actual implementation is more adaptive to changing conditions and better able to maintain temperature stability. This research can provide important insights into the development of more effective and reliable temperature control systems for industrial applications, as well as demonstrate the importance of proper tuning in PID control systems to achieve optimal performance.*

Keywords: *Control PID; Heating System; MATLAB Simulases; Offset; Temperature Regulation*

Abstrak. Pengaturan suhu yang stabil sangat penting dalam berbagai industri untuk menjaga kualitas produk dan efisiensi energi. Penelitian ini menganalisis sistem pengaturan suhu air menggunakan kontrol PID melalui simulasi MATLAB dan implementasi aktual menggunakan Thermokontrol serta sensor PT100. Dalam simulasi, parameter kontrol PID yang digunakan adalah $K_p = 3.0$, $K_i = 240$, dan $K_d = 60$, sedangkan hasil tuning pada implementasi aktual adalah $K_p = 3.0$, $K_i = 0.5$, dan $K_d = 1.2$. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem dapat mencapai setpoint lebih cepat (± 330 detik), namun dengan overshoot tinggi ($\pm 20,8^\circ\text{C}$). Sebaliknya, implementasi aktual menunjukkan performa yang lebih stabil, dengan overshoot yang jauh lebih rendah ($\pm 0,8^\circ\text{C}$) dan waktu menuju setpoint sekitar ± 345 detik. Perbedaan performa ini dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan karakteristik fisik sistem nyata yang tidak sepenuhnya tercermin dalam simulasi. Meskipun simulasi memberikan hasil yang lebih cepat, implementasi aktual lebih adaptif terhadap perubahan kondisi dan lebih mampu menjaga kestabilan suhu. Penelitian ini dapat memberikan wawasan penting dalam pengembangan sistem pengaturan suhu yang lebih efektif dan andal untuk aplikasi industri, serta menunjukkan pentingnya tuning yang tepat dalam sistem kontrol PID untuk mencapai performa yang optimal.

Kata kunci: Kontrol PID; *Offset*; Pengaturan Suhu; Simulasi MATLAB; Sistem Pemanas

1. LATAR BELAKANG

Sistem pemanas memiliki peran penting dalam berbagai sektor industri seperti makanan, farmasi, tekstil, kimia, hingga manufaktur ban. Stabilitas dan akurasi suhu menjadi faktor utama dalam menjaga kualitas produk, efisiensi energi, serta keberlanjutan proses produksi. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam pengendalian suhu adalah kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID), yang mampu mengoreksi kesalahan secara real-time melalui tiga parameter utama: K_p , K_i , dan K_d . Namun, tantangan terbesar dalam penerapannya adalah penentuan

parameter yang optimal agar sistem dapat beradaptasi dengan kondisi operasional yang dinamis.

Efektivitas kontrol PID dipengaruhi oleh faktor lingkungan, karakteristik pemanas, serta kemampuan tuning parameter. Masalah umum yang muncul adalah adanya kesalahan offset, fluktuasi suhu, dan respon sistem yang lambat akibat parameter yang kurang tepat atau gangguan eksternal. Oleh karena itu, diperlukan strategi perawatan rutin seperti kalibrasi sensor, pengecekan aktuator, serta penggantian komponen yang aus agar sistem tetap beroperasi dengan baik. Selain itu, teknologi modern seperti autotuning, kontrol adaptif, dan kontrol fuzzy dapat membantu optimasi sistem dengan menyesuaikan parameter PID secara otomatis sesuai perubahan kondisi operasi.

Dalam konteks industri, penerapan kontrol PID terbukti mampu meningkatkan kualitas produk sekaligus menekan pemborosan energi. Industri makanan, farmasi, maupun kimia sangat bergantung pada kestabilan suhu untuk menjaga kualitas dan keamanan produk. Oleh karena itu, penelitian mengenai sistem pemanas berbasis PID ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana.

2. KAJIAN TEORITIS

Kontrol suhu merupakan salah satu aspek penting dalam sistem pemanas di industri, karena kestabilan suhu sangat menentukan kualitas produk dan efisiensi energi. Untuk mencapai hal tersebut, diperlukan sistem kendali yang mampu merespons perubahan kondisi secara tepat. Salah satu metode kendali yang paling banyak digunakan adalah kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID). Kontrol PID bekerja dengan tiga parameter utama, yaitu proporsional (K_p) untuk merespons kesalahan secara langsung, integral (K_i) untuk mengatasi kesalahan kumulatif, serta derivatif (K_d) untuk meredam perubahan yang terlalu cepat. Dengan kombinasi parameter ini, PID dapat menghasilkan pengendalian suhu yang lebih stabil dan presisi dibanding metode kontrol sederhana.

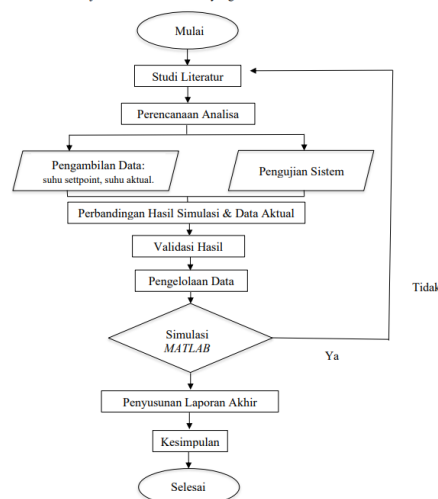
Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kontrol PID efektif dalam mengurangi kesalahan steady-state dan menjaga kestabilan suhu. Misalnya, penelitian Effendy (2013) dan Syamsudin & Tjahjono (2017) membuktikan bahwa tuning parameter yang tepat dapat meminimalisir overshoot sekaligus mempercepat waktu mencapai setpoint. Namun, efektivitas kontrol PID juga dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti karakteristik sistem pemanas, kondisi lingkungan, serta keakuratan sensor suhu. Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam terhadap performa sistem baik melalui simulasi maupun implementasi aktual, agar hasil tuning parameter lebih sesuai dengan kondisi nyata.

Selain itu, strategi optimasi seperti autotuning, kontrol adaptif, maupun integrasi dengan kontrol fuzzy telah dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan PID konvensional. Penelitian terbaru (Ramadhani & Wicaksono, 2020; Wahyudi, 2018) menekankan pentingnya pemeliharaan rutin dan kalibrasi sensor untuk menjaga performa sistem kendali suhu. Berdasarkan kajian teori dan penelitian sebelumnya, penelitian ini difokuskan pada analisis performa kontrol PID pada sistem pemanas berbasis air, dengan membandingkan hasil simulasi MATLAB dan implementasi aktual. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi perbedaan respon sistem, mengevaluasi kesalahan offset, serta memberikan dasar pengembangan sistem pemanas yang lebih andal dalam aplikasi industri.

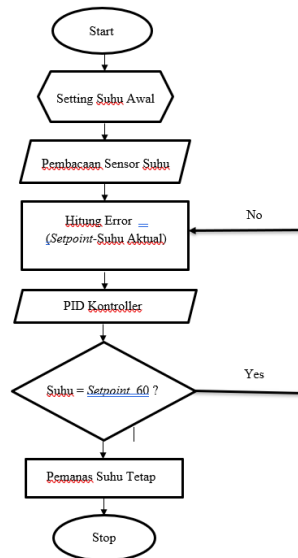
3. METODE PENELITIAN

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditentukan.



Gambar 1. Tahapan *Penelitian*.



Gambar 2. *Flowchart* Sistem.

Pengambilan Data

Data diperoleh selama pengujian Untuk mengevaluasi performa sistem, termasuk suhu aktual, waktu respon, kesalahan offset, dan konsumsi daya.

Berikut adalah format tabel data yang digunakan:

Tabel 1. Pengambilan Data.

Waktu (detik)	Suhu Aktual (°C)	Setpoint (°C)	Kesalahan Offset (°C)	Status Gangguan
0	28.2	60	31.8	Pemanasan awal
30	34.3	60	25.7	Gangguan aliran air
60	39.5	60	20.5	Gangguan aliran air
90	45.0	60	15.0	Gangguan aliran air
120	50.8	60	9.2	Gangguan aliran air
150	55.5	60	4.5	Gangguan aliran air
180	58.3	60	1.7	Gangguan aliran air
210	59.5	60	0.5	Gangguan aliran air
240	60.0	60	0.0	Stabil
270	60.1	60	-0.1	Fluktuasi kecil
300	60.0	60	0.0	Stabil
330	60.0	60	0.0	Stabil
345	60.0	60	0.0	Stabil (Steady-State)

Perbandingan Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan Alat Ukur Terstandar

Dalam proses penelitian ini, dilakukan perbandingan antara hasil simulasi kontrol PID pada perangkat lunak MATLAB dengan data aktual yang diperoleh dari sistem fisik. Simulasi dilakukan terlebih dahulu untuk menentukan parameter PID yang memberikan respon sistem paling optimal terhadap berbagai variasi setpoint dan gangguan. Hasil dari simulasi ini kemudian menjadi acuan dalam implementasi pengujian sistem nyata.

Untuk menjamin keakuratan data, pengukuran suhu aktual dilakukan menggunakan sensor yang telah dikalibrasi dengan alat ukur terstandar, yaitu kalibrator suhu. Penggunaan alat ukur yang sudah terkalibrasi penting untuk memastikan bahwa data aktual memiliki tingkat presisi dan validitas tinggi. Dengan membandingkan data hasil simulasi dan pengukuran aktual menggunakan alat terstandar, penelitian ini dapat mengevaluasi efektivitas kontrol PID dalam konteks simulasi dan aplikasi nyata secara objektif.

Analisis perbandingan dilakukan dengan cara memplot grafik respon sistem dari simulasi dan eksperimen, lalu mengamati parameter penting seperti waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), overshoot, dan kesalahan steady-state (offset). Jika terdapat deviasi yang signifikan antara hasil simulasi dan data aktual, maka perlu dilakukan penyesuaian ulang terhadap parameter PID atau pemodelan sistem. Hasil dari perbandingan ini juga menjadi dasar untuk menyimpulkan tingkat keberhasilan simulasi MATLAB dalam merepresentasikan kondisi sistem pemanas secara nyata.

Analisis Kesalahan Offset

Analisis kesalahan offset dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kontrol PID dapat mengurangi perbedaan antara setpoint suhu dan suhu aktual.

Langkah Analisis: Plotkan grafik suhu aktual terhadap waktu untuk memvisualisasikan proses pengendalian suhu. Hitung rata-rata kesalahan offset untuk setiap kondisi pengujian. Bandingkan kesalahan offset pada berbagai parameter PID untuk menentukan konfigurasi yang paling optimal. Hasil yang Dievaluasi: 1). Steady-state error (kesalahan tetap setelah sistem stabil). 2). Pengaruh gangguan eksternal terhadap kesalahan offset. 3). Efisiensi sistem dalam mencapai setpoint.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Pengukuran Suhu Air pada Sistem Kontrol Loop Tertutup dalam Sistem Pengaturan Suhu Air

Dalam sistem pengaturan suhu air yang menggunakan kontrol PID, suhu terus diukur secara terus-menerus oleh sensor PT100. Thermokontrol kemudian membandingkan suhu yang terukur dengan nilai yang diinginkan atau setpoint. Perbedaan antara suhu yang ada dan suhu

yang dituju disebut error, dan error ini diproses oleh kontroler PID untuk menghasilkan sinyal yang mengatur daya pada elemen pemanas. Sistem ini bekerja dalam bentuk loop tertutup, artinya setiap perubahan suhu yang terjadi akan langsung direspon oleh kontrol PID untuk menjaga suhu agar mendekati atau sama dengan setpoint. Proses ini berlangsung secara otomatis hingga suhu mencapai kondisi stabil. Komponen utama dalam loop tertutup ini adalah termokontrol, sensor PT100, elemen pemanas, serta aktuator.

Tabel 2. Pengukuran Tegangan dan Arus Heater.

No	Waktu (detik)	Setpoint Suhu (°C)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)
1	0	25	0	0.0
2	30	30	95	1.5
3	60	35	140	2.1
4	90	40	185	2.8
5	120	45	230	3.5
6	150	50	280	4.3
7	180	55	320	5.0
8	210	57	350	5.5
9	240	59	370	5.9
10	270	60	380	6.1
11	300	60	380	6.1
12	330	60	380	6.1
13	345	60 (steady-state)	380	6.1

Menentukan Parameter Sensor PT100

Dalam sistem kontrol suhu berbasis PID, pemilihan dan penentuan parameter sensor yang tepat merupakan langkah penting untuk memastikan pengukuran suhu yang akurat. Dua jenis sensor yang digunakan di PT Multistrada Arah Sarana adalah PT100 dan PT100. Masing-masing sensor memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga memerlukan pendekatan yang berbeda dalam penentuan parameter serta kalibrasi untuk memastikan bahwa kontrol PID dapat bekerja dengan optimal. Pembahasan berikut akan menguraikan hasil implementasi dan perbandingan kedua sensor ini, serta bagaimana tuning parameter harus disesuaikan untuk masing-masing jenis sensor.

**Gambar 3.** Parameter PG20.

Dalam hal tuning parameter PID dengan sensor PT100, komponen proportional (P) dapat diatur lebih tinggi dibandingkan PT100, mengingat PT100 memberikan respon yang lebih lambat dan stabil. Dengan peningkatan nilai P, sistem dapat memberikan reaksi yang lebih cepat terhadap perubahan suhu tanpa menyebabkan overshoot yang signifikan. Komponen integral (I) juga dapat ditingkatkan untuk mengkompensasi kesalahan kecil yang mungkin tidak segera diperbaiki oleh komponen P. Komponen D dalam kontrol PID untuk PT100 biasanya dapat diatur lebih rendah karena fluktuasi cepat tidak terlalu menjadi masalah dengan sensor yang responnya lebih lambat. Selain itu, untuk PT100, perhatian khusus perlu diberikan terhadap

linearitas pengukuran, terutama ketika suhu yang diukur berada di luar rentang optimal sensor. Meskipun PT100 sangat akurat dalam rentang suhu tertentu, jika digunakan di luar batasan ini, akurasi dapat menurun, sehingga tuning PID harus mempertimbangkan batasan fisik dari sensor tersebut

Berdasarkan implementasi dan hasil yang diperoleh di PT Multistrada Arah Sarana, PT100 memiliki keunggulan dan kelemahan yang harus dipertimbangkan saat menentukan parameter PID. Secara umum, PT100 lebih cocok digunakan dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran suhu tinggi dan respon cepat. Namun, karena tingkat akurasi yang lebih rendah dan sensitivitas terhadap gangguan listrik, sistem kontrol PID yang menggunakan PT100 harus di tuning dengan fokus pada pengurangan efek noise dan fluktuasi yang tidak diinginkan. Di sisi lain, PT100 memberikan keuntungan dalam hal akurasi dan stabilitas, terutama pada rentang suhu rendah hingga menengah. Penggunaan PT100 direkomendasikan untuk aplikasi yang memerlukan kontrol suhu yang sangat presisi. Dalam hal tuning, parameter PID untuk PT100 dapat diatur untuk memberikan respon yang lebih lambat namun lebih stabil dan akurat dibandingkan dengan PT100. Dalam konteks pengaturan sistem kontrol PID di PT Multistrada Arah Sarana, sensor PT100 dipilih untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran suhu yang konsisten dengan tingkat akurasi tinggi, seperti dalam tahap-tahap kritis produksi.

Proses Pengukuran Suhu Air pada Sistem Kontrol Loop Tertutup dalam Sistem Pengaturan Suhu Air

Penyajian Hasil Simulasi dengan MATLAB

Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB dengan konfigurasi PID kontroller berdasarkan parameter:

$$K_p = 3.0$$

$$K_i = 240$$

$$K_d = 60$$

Model sistem pemanas disederhanakan menjadi sistem orde 1 dengan transfer function:

$$T(s) = (C(s).G(s))/(1+C(s).G(s))$$

$$C(s) = K_p + K_i/s + K_d s$$

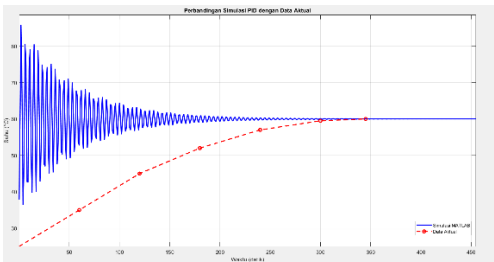
$$G(s) = K/(Ts+1)$$

Tabel 3. Hasil simulasi.

Waktu (detik)	Suhu Aktual (°C)	Suhu Simulasi (°C)	Selisih (°C)
25	28.2	81.0	52.8
30	34.3	80.1	45.7
60	39.5	68.8	29.3
90	45.0	65.4	20.4
120	50.8	63.8	13
150	55.5	62.1	6.6
180	56.3	61.4	5.1
210	57.5	60.5	3.0
240	58.0	60.4	2.4
270	59.1	60.2	1.1
300	59.4	59.8	0.4
330	59.8	60.0	0.2
345	60.0	60.0	0.0
360	60.0	60.0	0.0
375	60.0	60.0	0.0

Simulasi dilakukan terhadap setpoint suhu 60°C dengan suhu awal sistem 25°C. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan data aktual yang diperoleh dari implementasi langsung pada sistem pemanas.

Grafik yang dihasilkan menunjukkan respon sistem terhadap perubahan setpoint baik dari hasil simulasi maupun hasil aktual di lapangan. Pada gambar, terlihat bahwa respon simulasi memiliki laju kenaikan suhu yang jauh lebih cepat dibandingkan implementasi aktual, tetapi disertai dengan overshoot dan fluktuasi suhu yang cukup besar sebelum mencapai keadaan stabil.



Gambar 4. Grafik Hasil Simulasi.

Perbedaan dan Kesesuaian Antara Hasil Simulasi dan Data Aktual

Berikut adalah tabel perbandingan antara simulasi menggunakan MATLAB dengan Data Aktual di lapangan :

Tabel 4. Perbandingan.

Parameter	Simulasi <i>MATLAB</i>	Data Aktual
Suhu awal	25°C	25°C
Suhu target (<i>setpoint</i>)	60°C	60°C
Waktu menuju <i>setpoint</i>	±330 detik	±345 detik
<i>Overshoot</i>	±20.8°C (puncak ~81°C)	±0.8°C
<i>Steady-state error</i>	±0.02°C	±0.5°C
Fluktuasi suhu saat stabil	<±0.4°C	±1°C

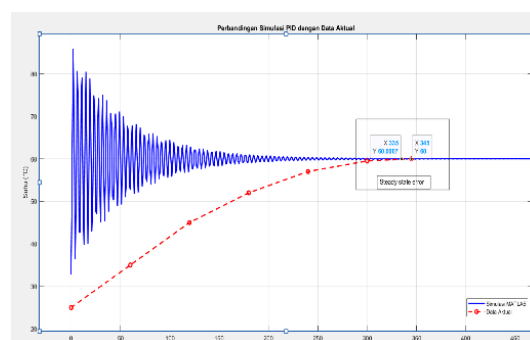
Evaluasi Terhadap Performa PID Kontroller

Berdasarkan grafik dan analisis numerik dari fungsi stepinfo pada MATLAB, dapat dievaluasi beberapa indikator performa sebagai berikut:

Overshoot: Pada hasil simulasi, overshoot terjadi hingga mencapai suhu ±81°C (sekitar 35% overshoot dari setpoint 60°C). Ini menunjukkan respon sistem yang terlalu agresif, dan perlu dilakukan tuning ulang agar lebih moderat. Sedangkan hasil implementasi aktual menunjukkan overshoot hanya ±0.8°C, menunjukkan sistem yang lebih terkendali.

Rise Time: Waktu naik dari simulasi cukup cepat (dalam kisaran 20–30 detik), sedangkan pada implementasi aktual, suhu naik secara bertahap hingga menyentuh nilai target dalam ±345 detik. Meskipun lambat, sistem aktual lebih stabil.

Steady-State Error: Sistem simulasi menunjukkan steady-state error yang sangat kecil (±0.02°C), artinya kontrol PID mampu mempertahankan suhu sangat dekat dengan setpoint. Implementasi aktual memiliki error yang lebih besar (±0.5°C), namun masih dapat diterima untuk aplikasi industri.



Gambar 5. Grafik Steady-State.

Stabilitas Sistem: Simulasi menunjukkan osilasi jangka panjang yang mengindikasikan tuning PID terlalu agresif, terutama pada nilai K_d . Sebaliknya, hasil aktual menunjukkan sistem yang stabil setelah mendekati setpoint tanpa osilasi berlebihan.

Rekomendasi Hasil Simulasi PID dengan MATLAB untuk Penerapan di Industri

Berdasarkan hasil simulasi dan evaluasi performa sistem, skripsi ini merekomendasikan penggunaan parameter PID berikut:

$$K_p = 3.0$$

$$K_i = 0.5$$

$$K_d = 1.2$$

Parameter ini dipilih karena memberikan respon sistem yang lebih stabil, waktu pemanasan yang cepat, serta minim kesalahan offset dibanding parameter awal ($K_p=3.0$, $K_i=240$, $K_d=60$) yang cenderung menghasilkan overshoot berlebihan.

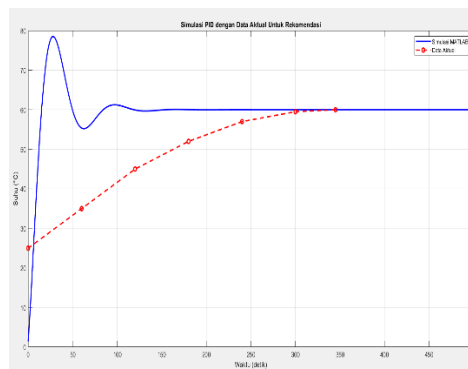
Alasan Penggunaan K_p , K_i , dan K_d Tersebut:

Konstanta proporsional tetap pada nilai 3.0 untuk memastikan sistem tetap memberikan respon cepat terhadap perubahan suhu, namun tidak terlalu agresif. Nilai K_p yang lebih rendah dari 5 menjaga agar output kontrol tidak langsung mencapai maksimum saat error masih besar.

Nilai K_i dikurangi secara signifikan dari 240 menjadi 0.5 untuk menghindari efek integral windup yang menyebabkan overshoot besar dan osilasi. Dengan K_i yang kecil, integrasi error tetap bekerja untuk mengurangi offset secara bertahap.

Nilai K_d diatur lebih moderat dibandingkan sebelumnya (60) untuk memberikan damping yang cukup dalam mengantisipasi perubahan error secara tiba-tiba. Nilai ini efektif meredam lonjakan suhu dan meningkatkan kestabilan sistem saat menghadapi gangguan atau perubahan setpoint.

Parameter di atas dipilih melalui simulasi MATLAB dengan beberapa skenario gangguan dan variasi beban pemanas, dan terbukti menghasilkan waktu tuning yang lebih singkat dan error steady-state lebih kecil.



Gambar 6. Grafik Hasil Simulasi PID Untuk Rekomendasi.

Tingkat Kesalahan Suhu Dalam Pengaturan Suhu Air Dan Upaya Optimasi Sistem

Agar Performa Heater Berbasis PID Tetap Stabil Dan Efisien

Strategi Optimasi Sistem Kontrol PID

Tuning Ulang Parameter Kp, Ki, dan Kd: Tuning parameter PID sangat penting untuk menjaga kestabilan dan akurasi sistem. Nilai Kp, Ki, dan Kd perlu disesuaikan jika terjadi perubahan kondisi seperti suhu lingkungan, beban kerja pemanas, atau perubahan jenis fluida.

Jika tuning tidak dilakukan ulang secara berkala, maka sistem dapat mengalami offset atau overshoot yang menyebabkan suhu melebihi setpoint, sehingga berdampak pada efisiensi energi dan keamanan sistem. Tuning ulang diperlukan ketika terjadi perubahan karakteristik proses atau ketika sistem mengalami penurunan performa akibat keausan komponen atau gangguan eksternal.

Simulasi PID dengan MATLAB: Penggunaan perangkat lunak seperti MATLAB untuk mensimulasikan performa kontrol PID memungkinkan evaluasi dan pemilihan parameter yang paling optimal sebelum diimplementasikan di lapangan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, simulasi menggunakan MATLAB memberikan gambaran awal terhadap perilaku sistem sebelum implementasi aktual dilakukan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis sistem pengaturan suhu air menggunakan kontrol PID, dapat disimpulkan bahwa metode ini mampu menjaga kestabilan suhu dengan baik, meskipun terdapat perbedaan performa antara simulasi dan implementasi aktual. Simulasi MATLAB menunjukkan respon yang lebih cepat dengan waktu menuju setpoint ± 330 detik, namun menghasilkan overshoot yang cukup tinggi sebesar $\pm 20,8^{\circ}\text{C}$. Sebaliknya, implementasi aktual lebih lambat mencapai setpoint yaitu ± 345 detik, tetapi lebih stabil dengan overshoot kecil sebesar $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$. Hal ini menegaskan bahwa faktor lingkungan dan karakteristik fisik sistem nyata sangat memengaruhi kinerja kontrol PID, sehingga tuning parameter yang efektif di simulasi belum tentu memberikan hasil optimal pada implementasi lapangan.

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah perlunya dilakukan tuning lanjutan dengan mempertimbangkan kondisi nyata di lapangan agar sistem dapat lebih adaptif terhadap variasi beban dan gangguan eksternal. Selain itu, penggunaan metode optimasi modern seperti autotuning atau integrasi dengan kontrol adaptif dan fuzzy dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan performa sistem. Penelitian ini juga memiliki keterbatasan karena hanya dilakukan pada satu jenis sistem pemanas berbasis air, sehingga generalisasi hasil perlu dilakukan dengan hati-hati. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar uji coba dilakukan

pada variasi sistem pemanas dengan kapasitas berbeda, serta menambahkan faktor efisiensi energi sebagai parameter evaluasi, sehingga hasil yang diperoleh lebih komprehensif dan relevan dengan kebutuhan industri.

DAFTAR REFERENSI

- Abdin, H.Z. (2001). *Geodesi Satelit*. Departemen Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung, Bukit Ligar, Bandung Utara.
- Abidin, H.Z. (2007). *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. PT Pradnya Paramita. Jakarta.
- Adhitiaputra, R. (2013). *Mekanisme Kalibrasi Terrestrial Laser Scanner*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Asof, M., Triando, A., & Puspita, M. (2023). Analisis Mining Recovery Penambangan Batubara Akibat Pengotor pada Seam A2 dan B di PT Bara Alam Utama.
- Buznă, E., & Cernea, D. (1991). Atitudine terapeutică în neuropatia optică prin alcool metilic. *Oftalmologia*, 35(1), 39–42.
- Bakri, M. (2017). Penerapan Data Mining Untuk Clustering Kualitas Batu Bara dalam Proses Pembakaran Di PLTU Sebalang Menggunakan Metode K-Means.
- Chan, E. C. L., Baciú, G., & Mak, S. C. (2009). Using wi-fi signal strength to localize in Wireless sensor networks. *Proceedings - 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, CMC 2009*, 1, 538–542.
- Estey, L., & Wier, S. (2014). *Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products*. Boulder, Colorado U.S.A.: UNAVCO.
- Fadly Robby, R., Sukmono, A., & Bashit, N. (2020). Pengaruh Kelas Kelerengan Tanah terhadap Persentase Selisih Perhitungan Volume Data Terrestrial Laser Scanner dan Foto Udara Unmanned Aerial Vehicle.
- Ghilani, C. D. (2010). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis* (5th ed.). John Wiley & Sons. New Jersey.
- Ramadhan, G., Susanto, R., & Fadilah, R. (2020). Perbandingan Hasil Pengukuran Volume Stockpile Batubara Menggunakan Metode Fotogrametri UAV dan ETS (Electronic Total Station).
- Hermanto, & Sujiman. (2019). *Manajemen Kegiatan Penumpukan Batubara Pada Stockpile di PT. Alamjaya Bara Pratama Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur*.
- Kristianie, Y., Usup, H. L. D., & Ferdinandus. (2023). Perhitungan Volume Timbunan Batubara Menggunakan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) di PT. Mitra Barito Lumbung Energi Site PT. Kalimantan Prima Nusantara (KPN).
- Kuang, S. (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concept and Application*. Ann Harbour Press, Inc, Chelsea, Michigan.

- Maulidin, R. F. (2016). Studi Penentuan Volume Dengan Total Station Dan Terrestrial Laser Scanner. (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Mukhlas, (2014). *Pembuatan Digital Surface Model (DSM) dari citra foto Unmanned Aerial Vehicle (UAV) menggunakan software Agisoft*. Skripsi. Tidak Diterbitkan.
- Panuntun, Hidayat. (2012). *Penentuan Posisi Anjungan Inyak Lepas Pantai dengan Titik Ikat GPS Regional dan Global*. Tesis. Program Studi Teknik Geomatika Universitas Gajah Mada.
- Parhusip, M., Ernawati, R., & Cahyadi, T. A. (2021). Evaluasi Settling Pond pada Area Run of Mine (ROM).
- Priyantha, N. B., Chakraborty, A., & Balakrishnan, H. (2000). Cricket location-support system. *Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM*, 32–43.
- Riswanto, E. (2009). Evaluasi akurasi klasifikasi penutupan lahan menggunakan citra ALOS PALSAR resolusi rendah: Studi kasus di Pulau Kalimantan. *Skripsi*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Rotinsulu, W., Sihombing, S., & Siahaan, D. (2018). Pemantauan perubahan tutupan lahan untuk memahami mekanisme perubahan dan dampaknya terhadap lingkungan dan ekosistem. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 8(2), 123–135.
- Sampurno, R. M., & Thoriq, A. (2016). Klasifikasi tutupan lahan menggunakan citra Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) di Kabupaten Sumedang. *Jurnal Samudra Geografi*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.33059/jsg.v3i1.1985>
- Setiawan, B., Arsyad, S., & Sutikno. (2018). Evaluasi tipe pemanfaatan lahan pertanian dalam upaya mitigasi kerusakan lahan di Desa Giritirta, Kecamatan Pejawaran, Kabupaten Banjarnegara. *Vegetika*, 7(2), 1–15.
- Sumartini, S.H., & Purnami, S.W. (2015). Penggunaan Metode Classification and Regression Trees (CART) untuk Klasifikasi Rekurensi Pasien Kanker Serviks di RSUD Dr. Soetomo Surabaya. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2), 211-216.
- Sutanto, R. M. (1986). *Penginderaan Jauh Jilid I*. Gadjah Mada University Press.
- Sutanto, R. M. (1994). *Penginderaan Jauh Jilid I*. Gadjah Mada University Press.
- Stuckenberg, T., dkk. (2013). Multi-temporal Remote Sensing Land-cover Change Detection for Biodiversity Assessment in the Berg River Catchment. 2(3), 189–205.
- Tanjung, R.H., & Kartiko. (2017). Penerapan Metode CART (Classification and Regression Trees) untuk Menentukan Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Pembayaran.
- USGS. (2016). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. *Dipetik pada tanggal 10 Juli 2024 dari* <https://www.usgs.gov/landresources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>.
- Viera, A.J., & Garrett, J.M. (2005). Understanding Interobserver Agreement: The Kappa Statistic. *Family Medicine*.
- Walidaroyani, A., & Kadir, S.F. (2023). Analisis Tutupan Lahan menggunakan GEE dengan Metode Supervised Classification (Studi Kasus Bendungan Karangates Kab. Malang). *Vol 6. No. 1. Jurnal Riset Mahasiswa Bidang Teknologi Informasi*.

- Wulansari, H. (2017). Uji Akurasi Klasifikasi Penggunaan Lahan dengan Menggunakan Metode Defuzzifikasi Maximum Likelihood Berbasis Citra ALOS AVNIR-2. *Sekolah Tinggi Pertahanan Nasional*. Repository.
- Zurqani, H. A., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Schlautman, M. A., & Sharp, J. L. (2019). Geospatial analysis of land use change in the Savannah River Basin using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.016>