

Sistem Kendali Suhu *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR) Menggunakan Metode Proportional Integral Adaptif

Swadexi Istiqphara^{1*}, Anisa Ulya Darajat², Heriansyah^{1,3}

¹Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Desa Way Hui, Kecamatan Jatiagung, Lampung Selatan 35365

²Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro No.1, Kota Bandar Lampung, Lampung 35141

³Institute of Telecooperation, Johannes Kepler University Linz
Altenberger Straße 69, A-4040 Linz, Austria

E-mail: swadexi.istiqphara@el.itera.ac.id

Naskah Masuk: 04 Juli 2025; Diterima: 28 Agustus 2025; Terbit: 31 Agustus 2025

ABSTRAK

Abstrak - *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR) merupakan salah satu sistem penting dalam bidang industri kimia. Perangkat ini membutuhkan pengendalian yang handal dan adaptif agar dapat bekerja sesuai dengan target yang diberikan. Umumnya pengendalian yang dilakukan pada sistem CSTR adalah pengendalian suhu reaktor. Pengendalian suhu reaktor penting untuk dilakukan dan diharapkan memiliki selisih sekecil-kecilnya dengan suhu target, hal ini karena jika berada pada suhu yang tidak sesuai, produk zat kimia yang dihasilkan dapat berbeda atau tidak sesuai target spesifikasi. Namun, dinamika suhu pada CSTR memiliki kompleksitas dan nonlinearitas yang tinggi, karena suhu pada CSTR tidak hanya dipengaruhi oleh pemanas tetapi juga dapat dipengaruhi oleh larutan yang terdapat pada CSTR tersebut. Pada penelitian ini, metode kendali Proportional Integral (PI) Adaptif diusulkan untuk mengatasi kompleksitas pengendalian suhu CSTR. mekanisme adaptif pada kontroler ini berfungsi untuk mengatur gain PI agar menyesuaikan terhadap kebutuhan sistem CSTR, sehingga dapat meminimalisir kesalahan. Hasil yang diperoleh menunjukkan, metode PI Adaptif yang diusulkan mampu menyesuaikan nilai penguat kendali PI secara cepat meskipun terjadi perubahan pada sistem. Waktu yang dibutuhkan untuk sistem agar dapat menyesuaikan nilai penguat PI yang baru adalah sekitar 1 detik.

Kata kunci: PI Adaptif, CSTR, Kendali Adaptif, Kendali Suhu, Reaktor

ABSTRACT

Abstract - *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR) is one of the important systems in the chemical industry. This device requires reliable and adaptive control in order to work according to the given target. Generally, the control carried out on the CSTR system is the control of the reactor temperature. Reactor temperature control is crucial and must be performed with minimal tracking error, because operating at an incorrect temperature can lead to undesired or off-spec chemical products. However, the temperature dynamics in a CSTR are highly complex and nonlinear, as the temperature is influenced not only by the heating system but also by the properties of the solution inside the reactor. In this study, the Adaptive Proportional Integral (PI) control method is proposed to overcome the complexity of CSTR temperature control. The adaptive mechanism in this controller functions to adjust the PI gain to adjust to the needs of the CSTR system, so as to minimize errors. The results show that the proposed Adaptive PI method is capable of rapidly adjusting the PI gains, even in the presence of system changes. The system is able to adapt the PI gain values within approximately 1 second.

Keywords: Adaptive PI, CSTR, Adaptive Control, Temperature Control, Reactor

Copyright © 2025 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Dalam bidang industri kimia, biasanya terdapat sebuah reaktor yang digunakan untuk mencampur zat kimia atau reaktan, reaktor ini dapat berfungsi untuk menghasilkan produk campuran atau juga untuk mencampurkan cairan limbah. Agar cairan limbah tidak berbahaya untuk lingkungan, biasanya cairan limbah tersebut perlu dicampur dengan zat lainnya dan diproses pada suhu dan konsentrasi tertentu

sehingga dapat dihasilkan produk baru sesuai spesifikasi target. Untuk mencampur zat kimia ini, digunakan perangkat *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR).

CSTR memiliki mekanisme proses yang kompleks, didalamnya terdapat proses kimia yang didukung dengan proses mekanik, yaitu zat kimia perlu diaduk secara teratur, selain itu pada CSTR dibutuhkan pengendalian suhu reaktor. Suhu reaktor pada CSTR memiliki mekanisme nonlinear, hal ini karena terdapat pengaruh dari suhu reaktan yang terus dialirkan kedalam CSTR dan juga adanya pengaruh pelepasan energi pada campuran zat kimia yang menghasilkan atau menyerap panas.

Oleh karena itu pengendalian suhu CSTR menjadi tantangan tersendiri untuk diselesaikan oleh para peneliti. Seperti pada [1], [2] melakukan optimasi suhu reaktor CSTR dengan menggunakan Fuzzy PID. Metode ini cukup efektif, namun masih membutuhkan proses yang lama. Hal ini karena pada Fuzzy membutuhkan sumber daya yang tinggi untuk memproses setiap masukan pada proses fuzzifikasi, dan mengolahnya dengan basis aturan yang memiliki jumlah yang banyak. Deep Reinforcement Learning juga pernah digunakan untuk mengendalikan level ketinggian cairan dan juga komposisi larutan CSTR [3]. Metode ini efektif untuk mengendalikan CSTR, namun jika diterapkan pada pengendalian suhu, metode ini menjadi kurang efisien, karena pada Deep RL, dibutuhkan sumber daya yang besar untuk memproses data.

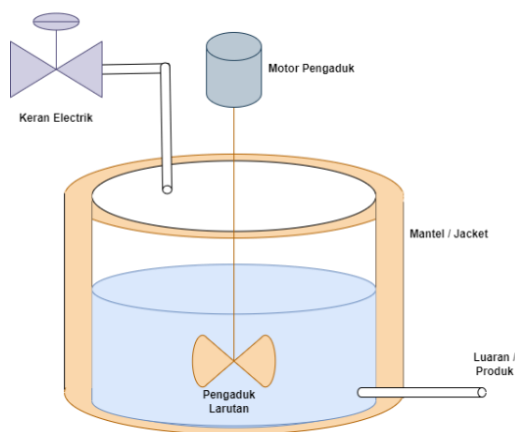
Pada [4], [5] juga melakukan penelitian terkait pemodelan CSTR dan juga pengendalian CSTR dengan model yang diperoleh untuk merancang metode kendali *Model Predictive Control* (MPC). Namun dalam implementasinya, untuk memperoleh model sistem yang akurat sangat rumit sehingga sulit untuk diterapkan pada industri. Metode nonlinear control juga diusulkan seperti metode Sliding Mode Control (SMC), *Single Feedback Configuration* (SFC), dan *Parallel Control Configuration* (PCC) [6] Seperti halnya MPC metode-metode ini membutuhkan model dinamika sistem yang juga menjadi tantangan tersendiri untuk para insinyur perancang sistem kendali di industri. Metode kendali nonlinear yang diimprovisasi seperti backstepping juga digunakan pada kendali CSTR, seperti pada [7] yang meningkatkan kemampuan backstepping control menjadi adaptif terhadap lingkungan dengan menggunakan metode Neural Network. Metode ini efektif namun penggunaan metode neural network dan penggunaan model-based controller seperti backstepping masih menjadi tantangan untuk diterapkan dalam bidang industri. Metode PID yang tidak membutuhkan model juga banyak digunakan untuk sistem kendali reaktor [8], [9], namun pemilihan nilai gain yang kurang tepat juga dapat mempengaruhi kinerja sistem, hal ini karena nilai gain yang berbeda dapat menghasilkan performa yang berbeda pada kondisi lingkungan sistem yang berbeda.

Berdasarkan beberapa permasalahan yang telah disebutkan, pada penelitian ini, pengendalian suhu CSTR akan dilakukan dengan menggunakan metode PI Adaptif. Metode PI Adaptif yang digunakan pada penelitian ini tidak berbasis pada model sistem, melainkan pada karakteristik sistem ketika sistem sedang beroperasi. Sehingga penerapan metode ini menjadi lebih fleksibel untuk digunakan pada berbagai sistem di industri dan lebih mudah untuk diterapkan karena memiliki mekanisme yang lebih sederhana. Kontribusi baru atau keunikan pada penelitian ini adalah:

1. Pada penelitian ini mengusulkan metode Proporsional Integral (PI) adaptif yang mampu menyesuaikan parameternya dengan selisih (error) sebagai acuan utama.
2. Metode adaptif yang digunakan pada penelitian ini tidak berbasis model sistem seperti pada metode adaptif umumnya, karena memodelkan sistem yang akurat juga masih menjadi taantangan tersendiri pada saat ini.
3. Metode PI adaptif yang diusulkan untuk mengendalikan CSTR ini memiliki kesederhanaan, karena hanya dengan berbasis error dan integral error dapat menyesuaikan nilai parameter PI agar dapat mengendalikan sistem menjadi lebih stabil.
4. Kecepatan Adaptabilitas pada metode ini dapat disesuaikan dengan mengatur nilai pembelajaran β untuk kendali proporsional dan δ untuk kendali Integral. Dengan memperbesar β dan δ dapat meningkatkan nilai gain PI dengan cepat, namun jika terlalu besar dapat mengurangi stabilitas sistem kendalinya.

2. PEMODELAN SISTEM

CSTR terdiri dari reaktor yang sekelilingnya dilengkapi oleh mantel atau jaket dibagian luarnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Mantel ini dapat terdiri dari element pemanas yang digunakan untuk memanaskan reaktor dan juga menjaga suhu reaktor sesuai target suhu yang ditentukan. Menjaga suhu reaktor sesuai target suhu, sangat penting agar laju reaksi produk dapat agar tetap sesuai spesifikasi.



Gambar 1. *Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR)*

Dari Gambar 1 dapat dilihat, terdapat beberapa komponen lainnya pada CSTR, seperti pengaduk larutan yang terdapat didalam reaktor yang digunakan untuk mencampur zat kimia atau reaktan secara merata di seluruh volume reaktor, sehingga dapat diperoleh campuran homogen. Sistem ini juga memiliki sensor suhu dan sensor konsentrasi yang digunakan sebagai umpan balik dalam sistem kendali, serta keran untuk mengatur laju aliran masuk dan keluar zat kimia.

Model matematika dari CSTR yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada persamaan (1) dan (2) berikut ini [10]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{V} (T_f - T) + \frac{-\Delta H}{\rho C_p} \cdot k_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} C_A + \frac{UA}{V\rho C_p} (T_c - T) \quad (1)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{q}{V} (C_{Af} - C_A) - k_0 e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} C_A \quad (2)$$

Dimana keterangan masing-masing parameter yang digunakan pada Persamaan (1) dan (2) seperti yang dinyatakan pada Tabel 1. Model matematika pada (1) dan (2) akan digunakan untuk model simulasi pada komputer.

Tabel 1. Nilai parameter CSTR

Simbol	Keterangan	Nilai	Satuan
T	Temperatur dalam reaktor	304 saat t=0	°K (Kelvin)
T _c	Temperatur jaket pendingin (kontrol)	200 saat t=0	°K
T _f	Temperatur aliran masuk	350	°K
C _A	Konsentrasi reaktan A dalam reaktor	1	mol/m ³
C _{Af}	Konsentrasi reaktan A dalam umpan	1	mol/m ³
q	Laju aliran volumetrik	100 saat t=1-5s 200 saat t>5s	m ³ /s
V	Volume reaktor	100	m ³
ρ	Massa jenis campuran	1000	kg/m ³
C _p	Kapasitas panas spesifik	0.239	J/(kg·K)
ΔH	Kalor reaksi (negatif untuk eksotermis)	5x10 ⁴	J/mol
k ₀	Faktor pre-eksponensial	7.2x10 ¹⁰	1/s
E	Energi aktivasi	8750	J/mol
R	Tetapan gas universal	8.31451	J/(mol·K)
U _A	Koefisien perpindahan panas total (U × A)	5x10 ⁴	W/K

3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan metode kendali PID Adaptif untuk mengendalikan CSTR. PID merupakan salah satu metode yang sangat populer di industri, hampir 80% lebih industri menggunakan PID sebagai basis kontrol sistem nya. Hal ini karena PID memiliki kemudahan dalam penggunaannya, yaitu tidak diperlukannya model sistem yang rumit untuk diperoleh. Namun salah satu hal yang perlu ditingkatkan dari PID adalah mekanisme penentuan nilai gain PID-nya. Pada makalah ini, nilai PID ditentukan secara otomatis dengan menggunakan PID Adaptif dengan mempertimbangkan adanya kesalahan pada sistem.

Formulasi PID adaptif yang diusulkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

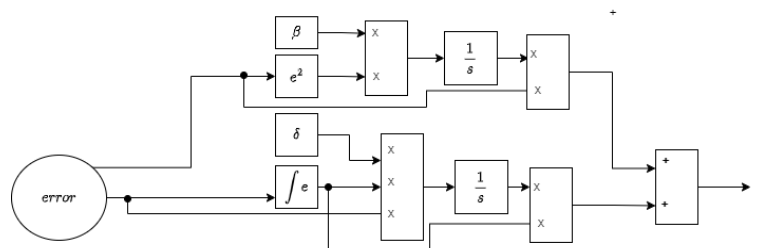
$$u = K_p e + K_i \int e \quad (3)$$

dimana nilai K_p , dan K_i terus menerus diperbaharui dengan formulasi berikut ini:

$$\dot{K}_p = -\beta e^2 \quad (4)$$

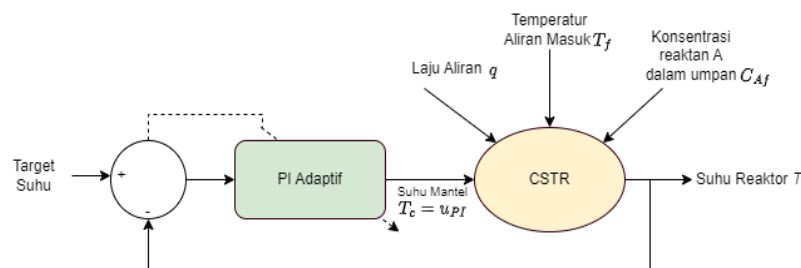
$$\dot{K}_i = -\delta e \int e \quad (5)$$

Struktur sistem kendali PID Adaptif ditunjukkan pada Gambar 2, dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa persamaan (4) dan (5) yang merupakan perubahan dinamika perlu di integralkan terlebih dahulu agar dapat digunakan sebagai penguat K_p dan K_i .



Gambar 2. Struktur kendali PI Adaptif

Secara keseluruhan, sistem kendali Suhu CSTR dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini:



Gambar 3. Sistem kendali CSTR

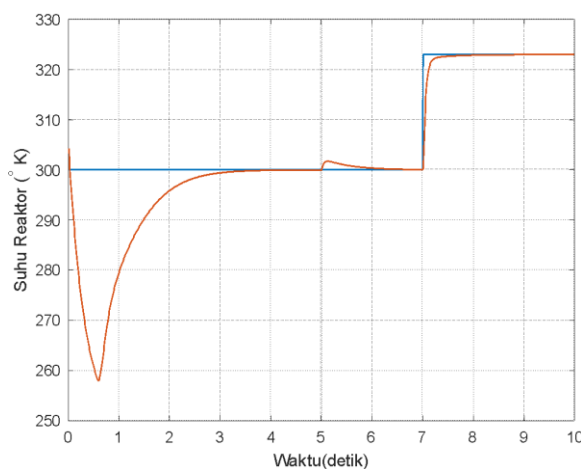
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menunjukkan efektifitas metode yang digunakan, pada penelitian ini pengujian dilakukan dengan menggunakan simulasi pada komputer. Simulasi dilakukan dengan merancang keseluruhan sistem seperti pada Gambar 3 dengan nilai parameter seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai parameter sistem kendali PI Adaptif

Simbol	Keterangan	Nilai
$K_p(0)$	Nilai awal Gain Proporsional	0
$K_i(0)$	Temperatur jaket pendingin (kontrol)	0
β	Kecepatan Pembelajaran K_p	0.01
δ	Kecepatan Pembelajaran K_i	0.01

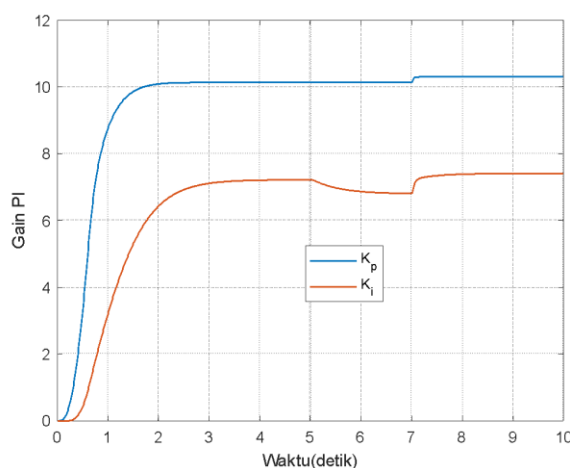
CSTR yang terdiri dari beberapa parameter dikendalikan dengan menggunakan PI adaptif dengan luaran CSTR yang berupa suhu akan di umpan balikkan ke metode PI adaptif untuk diolah lebih lanjut dan hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Suhu reaktor CSTR

Dari Gambar 4 dapat dilihat performa PI Adaptif dalam mengendalikan suhu reaktor dengan nilai suhu awal adalah 304 °K. Pada saat sistem kendali pertama kali beroperasi, terlihat suhu turun, hal ini karena nilai awal gain K_p dan K_i masih belum tepat sehingga sistem adaptif berusaha untuk mengatur nilai gain agar menjadi lebih sesuai dengan sistem. Kemudian pada detik ke 0.5, dimana kendali PI sudah mulai mampu mengendalikan sistem sehingga suhu reaktor menuju target suhu yang ditentukan. Perubahan gain ini dapat dilihat pada Gambar 5.

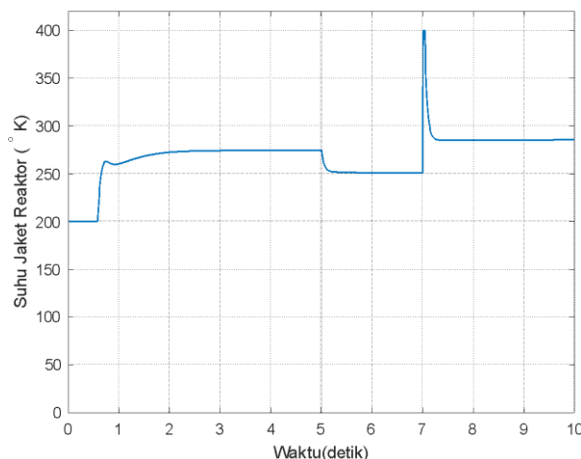
Dinamika sistem CSTR yang berubah nilai laju aliran masuknya (q) saat detik ke 5 dan juga target suhu reaktor yang diubah saat detik ke 7, memiliki pengaruh pada perubahan dinamika konstanta kendali PI ini. Dapat dilihat pada Gambar 5, saat detik ke 5 yaitu saat diperbesarnya nilai laju aliran masuk menjadi 1.5x lebih cepat, nilai konstanta K_p cenderung tetap, sedangkan nilai K_i berubah menjadi lebih kecil. Hal ini terjadi karena akumulasi *error* saat detik yang terdapat pada integral error untuk mengatur gain K_i menyebabkan nilai yang cukup besar untuk mengubah nilai K_i , sedangkan pada K_p , dengan nilai error yang kecil ini yang dikuadratkan dan dikalikan dengan nilai pembelajaran β sebesar 0.01 seperti yang terdapat pada Tabel 2 menyebabkan konstanta proporsional K_p menjadi sangat kecil perubahannya, sedangkan nilai K_i , karena akumulasi error setiap waktunya, menyebabkan perubahan K_i menjadi signifikan dibandingkan dengan K_p .



Gambar 5. Perubahan gain K_p dan K_i

Sedangkan pada detik ke 7, saat target suhu diubah, nilai K_p dan K_i keduanya mengalami perubahan nilai konstanta. Hal ini karena terdapat selisih penjejakan (*tracking error*) yang harus disesuaikan oleh pengendali PI agar performa sistem tetap terjaga. Suhu jaket reaktor yang juga merupakan luaran dari pengendali PI, dapat dilihat pada Gambar 6. Pada gambar tersebut suhu jaket pada saat awal dimulainya simulasi berada pada suhu 200°K. yang kemudian ditingkatkan hingga 260 °K agar suhu reaktor tetap

berada pada target yaitu 300°K. Nilai suhu reaktor dapat mencapai 300 °K dikarenakan oleh suhu reaktan T_f yang bersuhu 350°K. Sehingga, sistem kendali PI disini berperan sebagai penjaga suhu reaktor agar tetap berada pada nilai dibawah suhu reaktannya.



Gambar 6. Suhu mantel reaktor T_c (sinyal kontrol PI Adaptif)

Ketika aliran masuk q diperbesar pada detik ke 5, yang menyebabkan jumlah reaktan yang terdapat didalam reaktor menjadi lebih banyak, maka untuk menjaga suhu tetap berada pada 300°K diperlukan suhu yang lebih rendah. Sehingga PI adaptif secara otomatis menurunkan suhu jacket reaktor hingga 250°K. Dan ketika target suhu reaktor ditingkatkan menjadi 323°K, terlihat suhu jacket reaktor diperbesar dengan cepat, hal ini bertujuan agar suhu reaktor mampu menuju target suhu menjadi lebih cepat. Yang kemudian suhu jacket diturunkan untuk menjaga suhu reaktor tetap berada pada target suhu yang baru.

5. KESIMPULAN

Pada artikel ini, diusulkan metode sistem kendali untuk mengendalikan suhu reaktor *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR). CSTR yang memiliki dinamika nonlinear dan kompleks ini dipengaruhi oleh berbagai variable lingkungan sehingga pengendalian suhu reaktor ini menjadi sangat penting agar dapat dihasilkannya produk zat kimia sesuai dengan spesifikasi. Karena jika suhu tidak sesuai ketentuan akan menghasilkan suhu yang berbeda. Metode kendali PID memiliki keuntungan yaitu dapat dirancang tanpa adanya model dinamika sistem, namun penentuan nilai PID juga dapat menjadi tantangan agar sesuai dengan sistem yang dikendalikan.

REFERENSI

- [1] Z. Wang, Y. Zhang, and D. Li, "Temperature optimization control of CSTR," *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence, ICIBA 2020*, pp. 1040–1043, Nov. 2020, doi: 10.1109/ICIBA50161.2020.9276793.
- [2] O. Alshammari, M. N. Mahyuddin, and H. M. Jerbi, "An Advanced PID Based Control Technique with Adaptive Parameter Scheduling for A Nonlinear CSTR Plant," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 158085–158094, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2948019.
- [3] B. Martínez, M. Rodríguez, and I. Díaz, "CSTR control with deep reinforcement learning," *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 49, pp. 1693–1698, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-85159-6.50282-7.
- [4] D. Pazoki, R. Roozbahani, and A. Nikoofard, "Comparison of MPC Algorithms for Continuous Stirred Tank Reactor," *2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology, ICCECT 2023*, pp. 340–345, 2023, doi: 10.1109/ICCECT57938.2023.10140690.
- [5] V. Thamminaidu and K. V. Shihabudheen, "Model Predictive Control (MPC) of System Identified Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) with Constraints," *2021 IEEE 6th International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2021*, pp. 195–201, 2021, doi: 10.1109/ICCCA52192.2021.9666313.
- [6] M. A. Siddiqui, M. N. Anwar, and S. H. Laskar, "Control of nonlinear jacketed continuous stirred tank reactor using different control structures," *J Process Control*, vol. 108, pp. 112–124, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.PROCONT.2021.11.005.
- [7] O. Alshammari, M. N. Mahyuddin, and H. Jerbi, "A Neural Network-Based Adaptive Backstepping Control Law with Covariance Resetting for Asymptotic Output Tracking of a CSTR Plant," *IEEE*

- Access, vol. 8, pp. 29755–29766, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972621.
- [8] K. R. Sragarta, “Efektivitas Kendali PID Suhu Furnace Menggunakan Sensor Termokopel Tipe-S Untuk Pemanasan Baja,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 6, no. 2, pp. 225–233, Aug. 2024, doi: 10.32528/ELKOM.V6I2.22757.
- [9] S. Baruah and L. Dewan, “A comparative study of PID based temperature control of CSTR using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization,” *2017 International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies, ICETCCT 2017*, vol. 2018-January, pp. 1–6, Jul. 2017, doi: 10.1109/ICETCCT.2017.8280312.
- [10] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle III, *Process Dynamics and Control Fourth Edition*, 4th ed. WILEY, 2017.