

Perancangan Sistem Pengukuran, Pengendalian, dan Akuisisi Data Menggunakan Arduino dengan Antarmuka WinForms. Studi Kasus: Temperatur

Faiprianda Assyari Rahmatullah¹, Rafly Yose Putra¹, Muhammad Iwan Fermi¹, dan Hari Ronaldo¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

faiprianda.assyari1319@student.unri.ac.id, rafly.yose1459@student.unri.ac.id, miwanf@unri.ac.id,

hari.rionaldo@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Penelitian dilakukan untuk mengembangkan sistem akuisisi data dan kontrol menggunakan Arduino pada sistem operasi windows berbasis *Graphical User Interface* (GUI). Sistem akuisisi data dapat menyimpan data hasil pengukuran yang dapat digunakan untuk analisis terhadap sistem kontrol. Perangkat yang digunakan berupa mikrokontroler Arduino tipe Mega 2560 dan termokopel tipe K menggunakan *driver* MAX6675. GUI dibuat dengan bahasa program C# menggunakan aplikasi WinForms. Akuisisi data dilakukan menggunakan perangkat Arduino yang terhubung dengan komputer melalui koneksi USB. Sistem pengendalian bekerja dengan cara mengatur *water heater* yang terhubung ke *relay* oleh Arduino menggunakan nilai *setpoint* pada GUI. Sistem akuisisi data dan kontrol dirancang menggunakan mode kontrol PID dengan parameter $K_p = 1,189159$, $K_i = 2,038558$, dan $K_d = 0,173419$. Berdasarkan hasil percobaan, mode kontrol PID memiliki nilai kesalahan terkecil yaitu sebesar 871,7 dengan metode IAE dan 402.457 menggunakan metode ITAE.

Kata kunci: akuisisi data, arduino, C#, PID controller, temperatur

Abstract

Research was conducted to develop a data acquisition and control system using Arduino on a Windows operating system based on a Graphical User Interface (GUI). The data acquisition system can store measurement results data which can be used for analysis of the control system. The devices used are an Arduino type Mega 2560 microcontroller and a K type thermocouple using the MAX6675 driver. The GUI was created in the C# programming language using the WinForms application. Data acquisition is carried out using an Arduino device connected to a computer via a USB connection. The control system works by regulating the water heater connected to the relay by Arduino using the setpoint value on the GUI. The data acquisition and control system is designed using PID control mode with parameters $K_p = 1.189159$, $K_i = 2.038558$, and $K_d = 0.173419$. Based on the experimental results, the PID control mode has the smallest error value, namely 871.7 using the IAE method and 402,457 using the ITAE method.

Keywords: data acquisition, arduino, C#, PID controller, temperature

1. Pendahuluan

Pada industri kimia, pengukuran dan pengendalian terhadap temperatur perlu dilakukan karena memiliki pengaruh yang besar terhadap sistem (Gasparec, 2013) dan menentukan keberhasilan suatu proses operasi (Ross-Pinnock, 2016), contohnya seperti *yield* pada reaksi kimia (Asl, 2018), reaksi pada reaktor (Affan, 2019), konversi pada proses fermentasi (Rivera, 2017), dan bioreaktor pada industri bio-proses (Kumar, 2019). Sistem pengukuran dan pengendalian yang telah umum digunakan pada industri adalah sistem berbasis PLC (*Programmable Logic Controller*), DCS (*Distributed Control Systems*), dan SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Sistem ini memiliki kerumitan pengoperasian dan biaya yang tinggi untuk industri skala kecil, sehingga diperlukan sistem yang berbiaya murah dan dapat dioperasikan dengan mudah (Mir & Swarnalatha, 2018).

Salah satu sistem pengukuran dan pengendalian berbiaya murah adalah dengan penggunaan Arduino. Arduino merupakan perangkat berbasis *open-source* yang memungkinkan untuk mereplikasi sistem kontrol pada industri dengan biaya yang lebih murah pada skala kecil (Mir & Swarnalatha, 2018). Arduino memiliki keandalan yang bagus, kekokohan, koneksi yang stabil, harga yang murah, dan dapat digunakan sebagai sistem kontrol dari berbagai level (Koestoer, 2018). Arduino dapat digunakan untuk mengontrol sensor, motor, dan berbagai tipe dari aktuator. Berdasarkan fungsi ini, beberapa studi telah menggunakan Arduino sebagai sistem akuisisi data dan kontrol (Suciyati, 2021).

Info Makalah:

Dikirim : 12-13-22;

Revisi 1 : 07-16-23;

Revisi 2 : 08-10-23;

Diterima : 08-16-23.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 812-7535-803

e-mail : miwanf@unri.ac.id

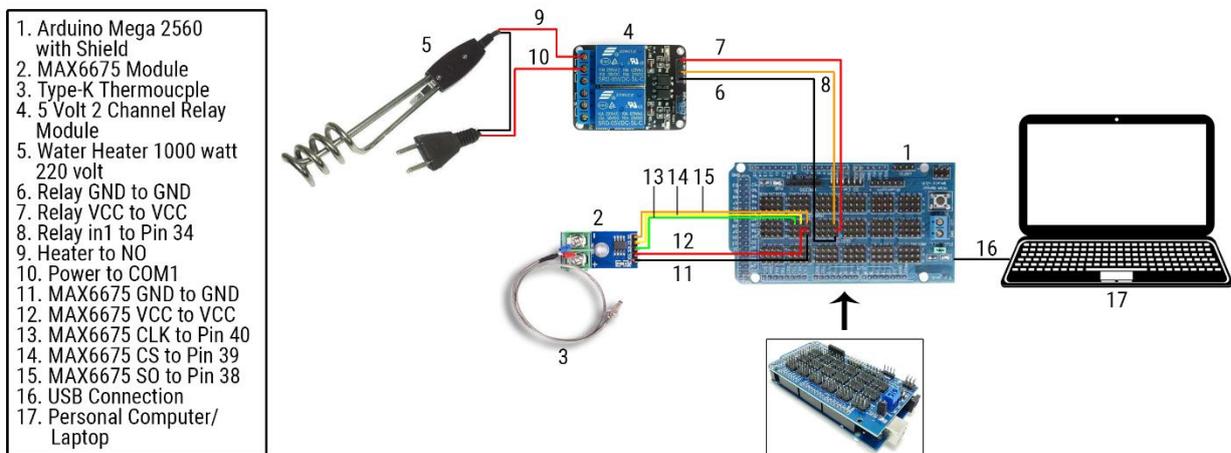
Camargo (2015) telah mengembangkan sistem pengukuran temperatur menggunakan Arduino, namun sistem ini belum berbasis GUI (*Graphical User Interface*) sehingga sulit untuk dioperasikan secara visual. Nurhalimah (2019) telah mengembangkan sistem pengukuran dan pengendalian temperatur berbasis GUI (*Graphical User Interface*), namun sistem ini hanya dapat berjalan pada sistem operasi Linux, yang mana sedikit sulit untuk dioperasikan dibandingkan dengan sistem operasi Windows.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pengukuran dan pengendalian menggunakan Arduino tipe Mega 2560 dan sensor termokopel tipe K serta berbasis GUI (*Graphical User Interface*) yang berjalan pada sistem operasi Windows sehingga dapat dioperasikan dengan mudah. GUI (*Graphical User Interface*) dibuat menggunakan WinForms yang berbasis bahasa program C#. Sistem yang dikembangkan dapat diimplementasikan dalam skala kecil dan sebagai media pembelajaran. Sistem yang dihasilkan bersifat *open source* sehingga dapat dikembangkan secara kolaborasi.

2. Metode

2.1. Penyusunan Perangkat

Perangkat utama yang digunakan adalah mikrokontroler berupa Arduino tipe Mega 2560 dan sensor temperatur berupa termokopel tipe K dengan *driver* MAX6675. Arduino Mega 2560 dipilih karena memiliki memori yang besar sehingga dapat menampung banyak data percobaan, sedangkan sensor termokopel tipe K dipilih karena mudah untuk digunakan dan berbiaya murah. Perangkat tambahan yang digunakan adalah *Mega Shield V2.0* yang berfungsi untuk menghubungkan sensor temperatur ke Arduino, *Relay 2 Channel* yang berfungsi untuk mengendalikan pemanas air, dan unit EDIDON UPC sebagai sistem tangki. *Mega Shield V2.0* dipilih untuk membuat rangkaian menjadi lebih ringkas. *Relay 2 Channel* dipilih untuk mengendalikan pemanas air. Penyusunan perangkat ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



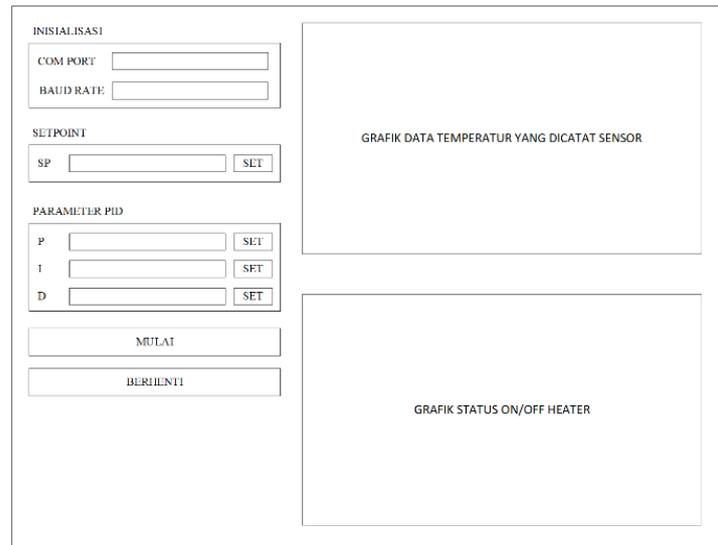
Gambar 1. Rangkaian Perangkat Akuisisi Data.

2.2. Uji Kinerja Alat

Sebelum percobaan dilakukan, dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk memastikan perangkat mikrokontroler dan sensor temperatur dapat berfungsi dan berjalan dengan baik. Pengujian dilakukan dengan cara mencelupkan sensor temperatur yaitu termokopel tipe K ke dalam air pada tangki pengamatan, kemudian mikrokontroler Arduino dihubungkan ke komputer melalui koneksi USB. Selanjutnya program Arduino untuk membaca temperatur dari sensor yang telah dibuat kemudian di-*upload* ke dalam *board* Arduino. Jika program Arduino dapat menampilkan hasil pembacaan temperatur dengan baik, maka sensor temperatur dapat dipastikan berfungsi. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memastikan keakuratan data.

2.3. Desain Perangkat Lunak

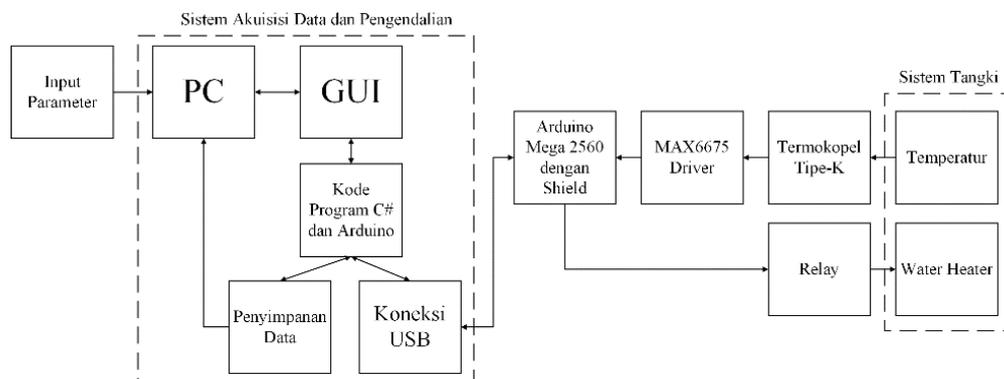
Perangkat lunak yang digunakan adalah perangkat lunak berbasis sumber terbuka yaitu bahasa program C#, WinForms, dan Arduino IDE. WinForms digunakan untuk membuat antarmuka pengguna atau GUI (*Graphical User Interface*) menggunakan bahasa program C#. GUI dibuat menggunakan modul atau *toolbox* yang telah disediakan oleh WinForms pada program Microsoft Visual Studio 2022. *Toolbox* pada WinForms memudahkan dalam pembuatan GUI sehingga tidak diperlukan untuk menulis kode program dari awal. GUI yang dibuat menggunakan WinForms akan menjalankan program akuisisi data dan menampilkannya dalam bentuk grafik secara *real-time*. Arduino IDE digunakan untuk menuliskan program yang akan diunggah pada *board* Arduino. Kode program Arduino bekerja dengan membaca data digital yang dikirimkan ke *board* Arduino dari *driver* MAX6675, di mana sebelumnya data masih berbentuk analog dari sensor temperatur. Desain perangkat lunak yang akan dibuat ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Rancangan Graphical User Interface.

2.4. Metode Akuisisi Data

Akuisisi data dilakukan dengan menghubungkan mikrokontroler Arduino yang telah disusun pada unit EDIBON UPC dengan komputer melalui koneksi USB. Sistem tangki pada EDIBON UPC kemudian diisi dengan air hingga batas ketinggian yang ditentukan. Sensor termokopel tipe K kemudian dicelupkan ke dalam air pada tangki. Program yang telah dibuat pada Arduino IDE dan aplikasi WinForms kemudian dijalankan pada komputer untuk memulai akuisisi data. *Relay* yang terhubung dengan mikrokontroler kemudian menghidupkan *water heater* sampai batas pembacaan temperatur yang ditentukan pada GUI. Setelah mencapai batas nilai pembacaan, *relay* kemudian akan mematikan *water heater*. Percobaan dilakukan selama 6 menit untuk setiap *set point*. Setelah percobaan selesai dilakukan, data yang didapatkan dari hasil akuisisi kemudian disimpan ke dalam komputer. Skema dari percobaan ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Skema Proses Akuisisi Data

Sistem kontrol yang diterapkan pada percobaan menggunakan metode *PID Controller*. Sebelum menerapkan metode kontrol PID, terlebih dahulu dilakukan perhitungan nilai parameter PID. Perhitungan untuk menentukan nilai parameter PID menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan *Process Reaction Curve*. Setelah didapatkan nilai *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative* dari hasil perhitungan, nilai tersebut kemudian diinput ke dalam GUI. *Relay* kemudian akan membaca perintah dari Arduino dan mengatur waktu hidup-mati berdasarkan nilai parameter PID dan nilai batas pembacaan temperatur pada GUI.

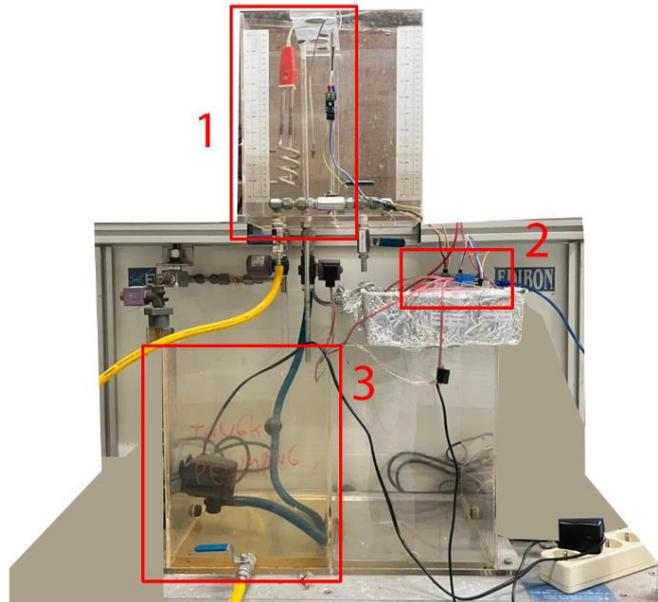
2.5. Perhitungan Error dan Evaluasi Performa

Data yang diperoleh dari program akuisisi data akan di komparasi terhadap masing-masing metode kontrol. Komparasi dilakukan dengan melakukan *plotting* dan melihat kurva respon yang dihasilkan dari metode yang digunakan. Selain komparasi menggunakan kurva respon, juga dilakukan komparasi dengan uji respon menggunakan kriteria *Integral Absolute Error (IAE)* dan *Integral Time Absolute Error (ITAE)*. Berdasarkan hasil dari komparasi ini akan didapatkan metode yang tepat untuk digunakan terhadap sistem.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Rangkaian Sistem Kontrol Temperatur

Sistem kontrol temperatur yang dibangun terdiri dari (1) tangki percobaan, (2) perangkat akuisisi data, dan (3) tangki reservoir. Tangki percobaan digunakan sebagai tempat untuk melakukan percobaan akuisisi data, tangki reservoir digunakan untuk menampung air segar sebelum dipompakan ke tangki percobaan, perangkat akuisisi data digunakan untuk melakukan pengambilan data temperatur dan mengendalikan pemanas elektrik. Sistem yang telah dibangun dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian Sistem Kontrol yang Telah Dibangun.

3.2. Pemodelan Sistem Kontrol Temperatur

Model matematika dari sistem kontrol temperatur didapatkan dengan menurunkan persamaan neraca massa dan energi dari sistem secara keseluruhan. Dalam menyusun model matematika dari sistem, menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Densitas (ρ) dan kapasitas panas (C_p) dari fluida yang digunakan, dalam penelitian ini menggunakan air mineral, dianggap konstan
2. Ketinggian fluida (h) di dalam tangki dianggap konstan
3. Volume (V) dari tangki dianggap konstan
4. Temperatur dai aliran inlet (T_i) dianggap konstan
5. Panas yang hilang ke lingkungan diabaikan

Penurunan persamaan neraca massa dan energi dari sistem menghasilkan (Coughanowr & Leblanc, 2009):

$$q + F \cdot C_p \cdot \rho(T_i) - F \cdot C_p \cdot \rho(T) = \rho \cdot C_p \cdot V \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Pada keadaan *steady state*, $\frac{dT}{dt}$ bernilai nol, sehingga persamaan (1) dapat ditulis menjadi

$$q_s + F \cdot C_p \cdot \rho(T_{i_s}) - F \cdot C_p \cdot \rho(T_s) = 0 \quad (2)$$

di mana huruf s digunakan untuk menyatakan keadaan *steady state*.

Pengurangan persamaan (2) dengan persamaan (1) menghasilkan

$$q - q_s + F \cdot C_p \cdot \rho[(T_i - T_{i_s}) - (T - T_s)] = \rho \cdot C_p \cdot V \frac{d(T - T_s)}{dt} \quad (3)$$

Dengan memperkenalkan variabel deviasi

$$T'_i = T_i - T_{i_s} \quad (4)$$

$$Q = q - q_s \quad (5)$$

$$T' = T - T_s \quad (6)$$

Persamaan (3) menjadi

$$Q + F \cdot Cp \cdot \rho (T'_i - T') = \rho \cdot Cp \cdot V \frac{dT'}{dt} \quad (7)$$

Dengan melakukan transformasi Laplace pada persamaan (7) didapatkan

$$Q(s) + F \cdot Cp \cdot \rho [T'_i(s) - T'(s)] = \rho \cdot Cp \cdot Vs \cdot T'(s) \quad (8)$$

atau

$$T'(s) \left(\frac{\rho \cdot V}{F} s + 1 \right) = \frac{Q(s)}{F \cdot Cp \cdot \rho} + T'_i(s) \quad (9)$$

Persamaan (9) dapat ditulis menjadi

$$T'(s) = \frac{1}{\frac{F \cdot Cp \cdot \rho}{\tau s} + 1} Q(s) + \frac{1}{\tau s + 1} T'_i(s) \quad (10)$$

Dengan asumsi T_i konstan, sehingga nilai $T'_i(t) = 0$ dan perubahan hanya terjadi pada $Q(t)$, fungsi transfer dengan hubungan T' dan Q adalah

$$\frac{T'(s)}{Q(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (11)$$

Di mana

$$\tau = \frac{\rho \cdot V}{F} = \frac{kg}{kg/minmin}$$

dan *gain* untuk $Q(t)$ adalah

$$\frac{1}{F \cdot Cp \cdot \rho} = \frac{1}{\left(\frac{L}{min} \right) \left(\frac{kg}{L} \right) \left(\frac{kJ}{kg^\circ C} \right) \left(\frac{1min}{60s} \right)} = \frac{^\circ C}{kJ/s} = \frac{^\circ C}{kW}$$

Persamaan (11) memberikan fungsi transfer dari sistem kontrol temperatur yang menunjukkan hubungan antara daya dari pemanas elektrik dan temperatur keluaran dari tangki, yaitu $T'(s)$ sebagai *output* temperatur dari tangki dan $Q(s)$ sebagai input dari pemanas elektrik. Dimana input dari pemanas elektrik dapat menyebabkan perubahan pada *output* temperatur dari tangki.

Setelah didapatkan bentuk dari fungsi transfer pada persamaan (11), selanjutnya dilakukan input variabel ke dalam fungsi transfer untuk mendapatkan model persamaan fungsi transfer teoritis. Variabel yang akan diinput tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel untuk Persamaan Teoritis.

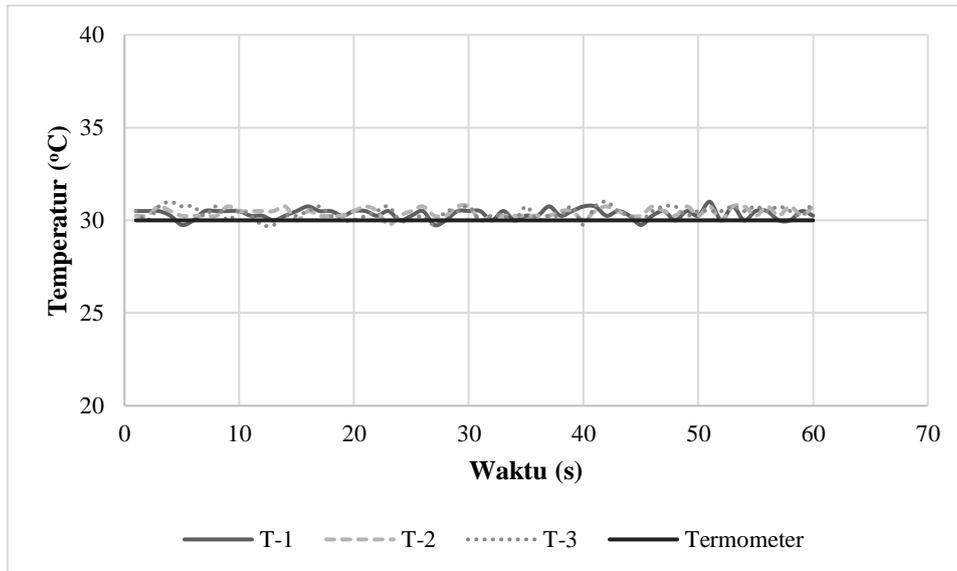
| Variabel | Nilai | Satuan |
|------------------------------|-------|------------------|
| Laju Alir Air (F) | 1,332 | L/min |
| Kapasitas Panas Air (Cp) | 4,184 | kJ/kg $^\circ$ C |
| Densitas Air (ρ) | 0,997 | kg/L |
| Volume Tangki (V) | 8,96 | L |

Berdasarkan variabel pada Tabel 1, didapatkan bentuk fungsi transfer proses dengan gain proses sebesar 10,753 $^\circ$ C/kW dan waktu konstan sebesar 6,735 menit. Bentuk persamaan fungsi transfer ditunjukkan pada persamaan (12).

$$\frac{T'(s)}{Q(s)} = \frac{10,753}{6,735s + 1} \quad (12)$$

3.3. Uji Kerja Sensor Termokopel

Uji kerja dilakukan untuk memastikan perangkat Arduino dan sensor termokopel dapat bekerja dengan baik. Uji dilakukan dengan melakukan pengukuran temperatur selama 1 menit sebanyak 3 kali. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran pada termometer raksa. Hasil pengukuran pada sensor termokopel tertera pada Gambar 5.

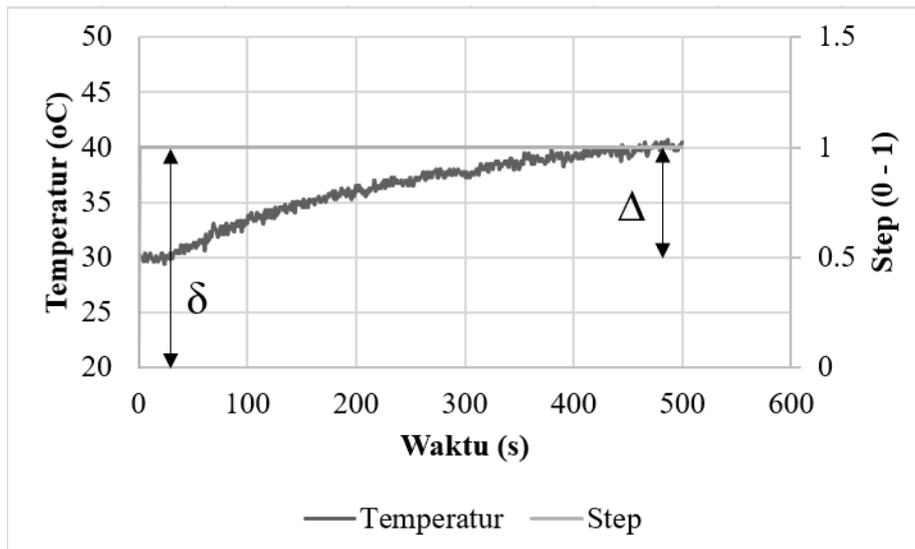


Gambar 5. Uji Kerja Sensor Termokopel dengan Tiga Kali Pengukuran.

Berdasarkan hasil *plotting* dari Gambar 5 menggunakan Microsoft Excel, didapatkan besaran *error* rata-rata sebesar 1,35°C. *Error* yang diperoleh masih berada di bawah batas *error* dari sensor termokopel tipe K, yaitu 1,5°C. Sehingga sensor termokopel tipe K dapat digunakan.

3.4. Menentukan Fungsi Transfer dari Kurva Reaksi

Fungsi transfer dari sistem keseluruhan didapatkan dari kurva respon hasil percobaan setelah mencapai keadaan *steady-state*. Temperatur mula-mula air pada tangki sebesar 30°C. Sistem kemudian diatur hingga mencapai keadaan *steady-state* dengan menjaga ketinggian air di dalam tangki dan memanaskan air hingga suhu pengukuran menjadi konstan. Hasil pengukuran untuk kurva reaksi tertera pada Gambar 6.



Gambar 6. *Plotting* Hasil Pengukuran untuk Kurva Reaksi.

Dari Gambar 6, kemudian ditentukan persamaan fungsi transfer proses menggunakan metode *Process Reaction Curve*. Perhitungan fungsi transfer proses dengan metode *Process Reaction Curve* menggunakan parameter sebagai berikut (Kholis, 2017):

$$\Delta = \text{Nilai Akhir} - \text{Nilai Awal} \tag{13}$$

$$\delta = \text{Step} \tag{14}$$

$$\text{Nilai 63\%} = \text{Nilai Awal} + (\Delta \cdot 63\%) \tag{15}$$

$$\text{Nilai } 28\% = \text{Nilai Awal} + (\Delta \cdot 28\%) \quad (16)$$

$$\tau = 1.5(t \text{ pada } 63\% - t \text{ pada } 28\%) \quad (17)$$

$$\theta = t \text{ pada } 63\% - \tau \quad (18)$$

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} \quad (19)$$

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (20)$$

Dengan menggunakan persamaan (13) sampai persamaan (20), didapatkan data untuk menentukan fungsi transfer proses yang tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Perhitungan *Process Reaction Curve* dari Gambar 2.

| Variabel | Nilai |
|------------|-------|
| Δ | 10,12 |
| Nilai 63% | 36,24 |
| Nilai 28% | 32,7 |
| t pada 63% | 3,22 |
| t pada 28% | 1,27 |
| τ | 2,925 |
| θ | 0,292 |
| K_p | 10,12 |

Berdasarkan data pada Tabel 2, didapatkan bentuk fungsi transfer proses dengan gain proses sebesar 10,12°C/kW dan waktu konstan sebesar 2,925 menit. Bentuk persamaan fungsi transfer proses ditunjukkan pada persamaan (21).

$$\frac{T'(s)}{Q(s)} = \frac{10,12}{2,925s + 1} e^{-0,292s} \quad (21)$$

Hasil perhitungan fungsi transfer teoritis dan eksperimental ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Model Fungsi Transfer Temperatur.

| Parameter | Teoritis | Eksperimental |
|----------------|----------|---------------|
| K_p (°C/KW) | 10,753 | 10,12 |
| τ_d (min) | - | 0,292 |
| τ (min) | 6,753 | 2,925 |

3.5. Menghitung Parameter PID

Perhitungan parameter K_p , T_i , T_d yang digunakan pada sistem dihitung menggunakan metode Ziegler-Nichols yaitu metode *Process Reaction Curve*. Pada metode ini, parameter PID dihitung menggunakan rumus yang tertera pada Tabel 4 (Xue et al., 2007).

Tabel 4. Formula Metode Ziegler-Nichols.

| Controller Type | From step response | | |
|-----------------|--------------------|-------|-------|
| | K_p | T_i | T_d |
| P | 1/a | | |
| PI | 0.9/a | 3L | |
| PID | 1.2/a | 2L | L/2 |

Perhitungan parameter nilai K_p , T_i , dan T_d dihitung menggunakan perangkat lunak Scilab. Hasil perhitungan pada program Scilab tertera pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai K_p , T_i , dan T_d Hasil Perhitungan.

| Metode Kontrol | K_p | T_i | T_d |
|----------------|----------|----------|----------|
| P | 0,990966 | - | - |
| PI | 0,891869 | 0,875 | - |
| PID | 1,189159 | 0,583333 | 0,145833 |

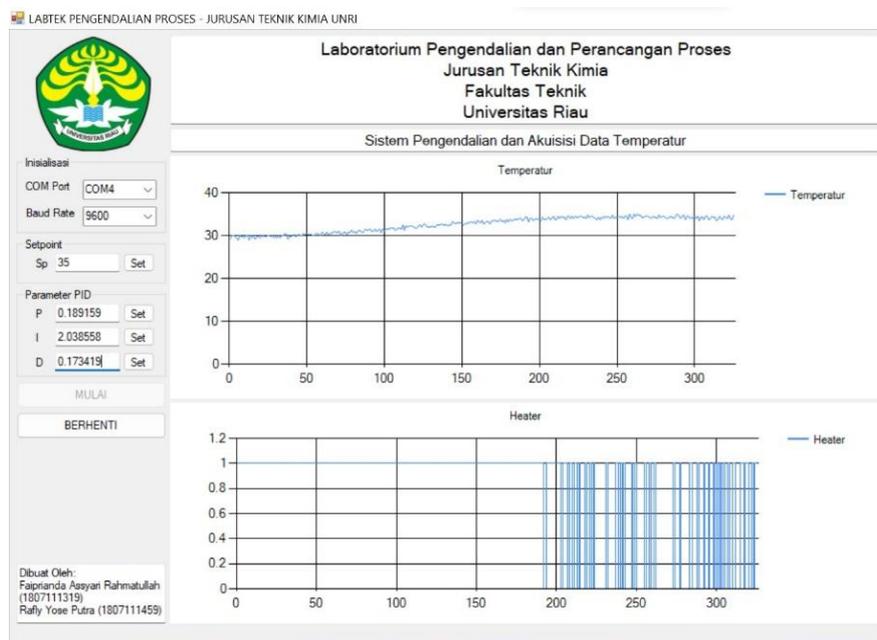
Berdasarkan nilai K_p , T_i , dan T_d yang telah didapatkan, kemudian dapat diperoleh nilai *Proportional Gain*, *Integral Gain*, dan *Derivative Gain*. Ketiga nilai tersebut tertera pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai *Proportional Gain*, *Integral Gain*, dan *Derivative Gain*

| Metode Kontrol | Proportional Gain (Kp) | Integral Gain (Ki) | Derivative Gain (Kd) |
|----------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| P | 0,990966 | - | - |
| PI | 0,891869 | 1,019279 | - |
| PID | 1,189159 | 2,038558 | 0,173419 |

3.6. Antarmuka Aplikasi (GUI)

Antarmuka aplikasi yang telah dibuat menggunakan WinForms terdiri dari inisialisasi, pengaturan kendali, dan daerah *plotting*. Bagian inisialisasi terdiri dari COM Port dan Baud Rate untuk mengatur koneksi Arduino ke Laptop. Nilai COM merupakan angka yang menunjukkan *port* USB pada Laptop yang terkoneksi dengan Arduino, sedangkan nilai *Baud Rate* merupakan nilai standar untuk melakukan pengiriman data dari Arduino ke Laptop dan sebaliknya. Bagian pengaturan kendali terdiri dari input *setpoint* dan input parameter PID. Input *setpoint* berfungsi untuk mengatur *setpoint* yang akan diterapkan pada sistem, dalam hal ini diisi dengan nilai temperatur dalam satuan °C. Input parameter PID berfungsi untuk menginput konstanta P, I, dan D untuk diterapkan ke dalam sistem. Daerah *plotting* berfungsi untuk menampilkan hasil pengukuran temperatur terhadap waktu dan respon step dari *relay* yang ditandai dengan nilai 0 dan 1. Tampilan dari Antarmuka aplikasi tertera pada Gambar 7.



Gambar 7. Tampilan Antarmuka Aplikasi Sistem Pengendalian Temperatur.

3.7. Uji Respon Sistem terhadap Perubahan *Setpoint*

Uji respon dilakukan dengan memberikan gangguan pada sistem. Gangguan dimaksudkan untuk melihat respon sistem apabila terjadi perubahan pada *setpoint* yang ditentukan. Perubahan *setpoint* dilakukan setelah sistem pengendalian telah mencapai kestabilan terhadap *setpoint* (Suprpto et al., 2013). Pada uji respon ini, perubahan nilai *setpoint* dibuat pada rentang nilai [37°C-42°C-37°C]. Setelah melakukan uji respon, data kemudian disimpan dalam format file CSV. File CSV kemudian diimpor ke dalam program Scilab untuk membandingkan respon dari sistem kontrol.

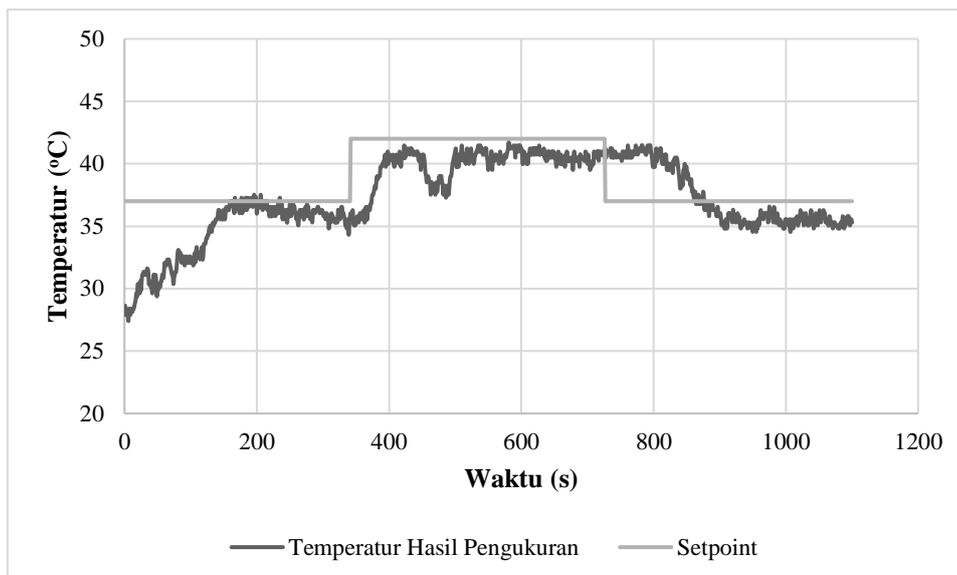
Kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi sistem pada penelitian ini adalah *Integral Absolute Error* (IAE) dan *Integral Time Absolute Error* (ITAE) yang dirumuskan sebagai berikut (Coughanowr & Leblanc, 2009):

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (22)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e| t dt \quad (23)$$

Menurut Mahmood et al. (2018), semakin kecil nilai *error* yang diperoleh, maka semakin baik performa metode kontrol tersebut.

Berdasarkan hasil percobaan menggunakan metode kendali PI, didapatkan respon sistem dalam bentuk grafik yang tertera pada Gambar 8.



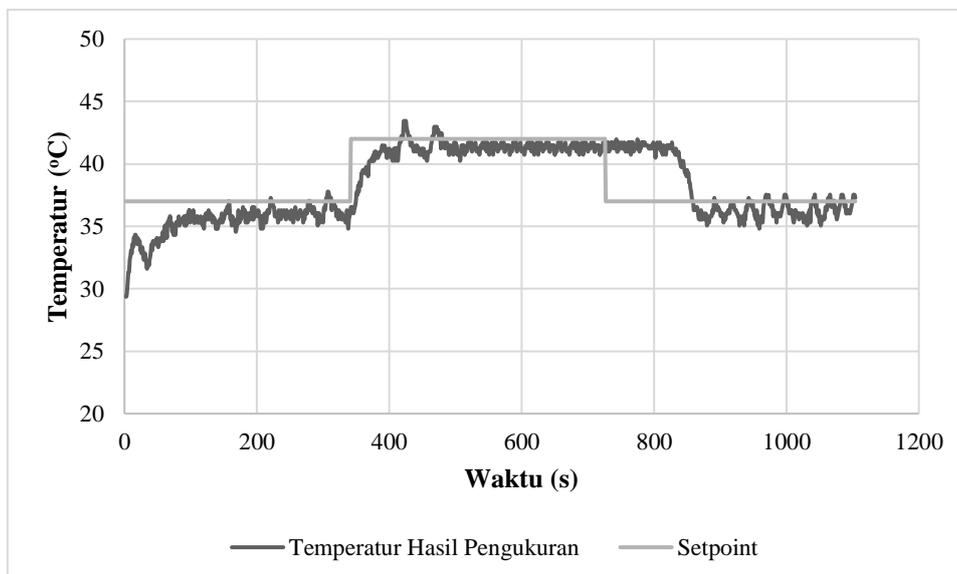
Gambar 8. Respon Sistem pada Metode Kendali PI.

Berdasarkan Gambar 7, terdapat tiga periode pada respon sistem, yaitu periode *startup*, perubahan *setpoint I*, dan perubahan *setpoint II*. Pada periode *startup*, *setpoint* diatur pada 37°C kemudian dipertahankan kestabilannya. Pada periode perubahan *setpoint I*, ditambahkan gangguan pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 37°C menjadi 42°C. Pada periode perubahan *setpoint II*, ditambahkan gangguan kembali pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 42°C menjadi 37°C. *Error* dihitung menggunakan perangkat lunak Scilab. *Error* pada metode kendali PI pada periode *startup*, perubahan *setpoint I*, perubahan *setpoint II* yang telah dihitung tertera pada Tabel 7.

Tabel 7. Nilai *error* pada Metode Kendali PI

| Periode | IAE | ITAE |
|------------------------------|------------|------------|
| <i>Startup</i> | 967,53 | 2,5514e+05 |
| Perubahan <i>Setpoint I</i> | 4,9828e+03 | 2,4841e+06 |
| Perubahan <i>Setpoint II</i> | 385,71 | 3,8655e+05 |

Berdasarkan hasil percobaan menggunakan metode kendali PID, didapatkan respon sistem dalam bentuk grafik yang tertera pada Gambar 9.



Gambar 9. Respon Sistem pada Metode Kendali PID.

Berdasarkan Gambar 8, terdapat tiga periode pada respon sistem, yaitu periode *startup*, perubahan *setpoint I*, dan perubahan *setpoint II*. Pada periode *startup*, *setpoint* diatur pada 37°C kemudian dipertahankan kestabilannya. Pada periode perubahan *setpoint I*, ditambahkan gangguan pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 37°C menjadi 42°C. Pada periode perubahan *setpoint II*, ditambahkan gangguan kembali pada sistem berupa perubahan *setpoint* dari 42°C

menjadi 37°C. *Error* dihitung menggunakan perangkat lunak Scilab. *Error* pada metode kendali PI pada periode *startup*, perubahan *setpoint I*, perubahan *setpoint II* yang telah dihitung tertera pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai *Error* pada Metode Kendali PID.

| Periode | IAE | ITAE |
|------------------------------|------------|------------|
| <i>Startup</i> | 929 | 2,317e+05 |
| Perubahan <i>Setpoint I</i> | 1,2801e+03 | 5,9517e+05 |
| Perubahan <i>Setpoint II</i> | 406 | 3,8501e+05 |

Error pada metode kendali PI dan PID pada periode *startup*, perubahan *setpoint I*, perubahan *setpoint II* yang telah dihitung diperlihatkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai *Error* pada Metode Kontrol PI dan PID.

| Metode Kontrol | Periode | IAE | ITAE |
|---|------------------------------|------------|-------------|
| PI (<i>Proportional-Integral</i>) | <i>Startup</i> | 967,53 | 2,5514e+05 |
| | Perubahan <i>Setpoint I</i> | 4,9828e+03 | 2,4841e+06 |
| | Perubahan <i>Setpoint II</i> | 385,71 | 3,8655e+05 |
| | Rata-rata | 2112,013 | 1.041.930 |
| PID (<i>Proportional-Integral-Derivative</i>) | <i>Startup</i> | 929 | 2,317e+05 |
| | Perubahan <i>Setpoint I</i> | 1,2801e+03 | 5,9517e+05 |
| | Perubahan <i>Setpoint II</i> | 406 | 3,80501e+05 |
| | Rata-rata | 871,7 | 402.457 |

Berdasarkan nilai IAE dan ITAE yang telah didapatkan dari kedua metode kontrol, diketahui bahwa nilai IAE dan ITAE metode kontrol PID lebih kecil daripada metode kontrol PI, yang menunjukkan bahwa metode kontrol PID memiliki performa yang lebih baik daripada metode kontrol PI untuk sistem kontrol temperatur.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan disimpulkan bahwa sistem pengukuran dan pengendalian temperatur berbasis Arduino dapat berjalan dan memiliki performa cukup baik pada metode kontrol PID dengan parameter $K_p = 1,189159$; $K_i = 2,038558$; $K_d = 0,173419$ dengan nilai *error* sebesar 929; 1,2801e+03; 406 menggunakan IAE dan 2,317e+05; 5,9517e+05; 3,80501e+05 menggunakan ITAE. Antarmuka yang dibuat memiliki fitur untuk memasukkan nilai *set point* dan parameter PID sehingga memudahkan dalam pengoperasian. Antarmuka juga memiliki fitur *live plotting* sehingga pengguna dapat langsung mengamati respon dari sistem kendali. Data hasil pengukuran dapat disimpan dalam format CSV untuk pengolahan lebih lanjut.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode *tuning* Cohen-Coon agar didapatkan parameter sistem pengendalian yang lebih optimal dibandingkan dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols.

Daftar Notasi

- q = Laju Panas [kJ/h]
- F = Laju Alir Air [L/min]
- C_p = Kapasitas Panas Air [kJ/kg°C]
- ρ = Densitas Air [kg/L]
- T = Temperatur
- V = Volume Tangki [L]
- T = Waktu Konstan [min]

Daftar Pustaka

- Affan, F. B. (2019). Temperature Sensors Development in the Chemical Industries. *Journal of Alternative and Renewable Energy Sources*, 5(3), 39-43.
- Asl, S. M. H., Ghadi, A., Baei, M. S., Javadian, H., Maghsudi, M., & Kazemian, H. (2018). Porous Catalysts Fabricated from Coal Fly Ash as Cost-effective Alternatives for Industrial Applications: A Review. *Fuel*, 217, 320-342.
- Camargo, T. F., Prado, C. T., Coutinho, M. R., Higa, M., Conceição, W. A. dos S., & Andrade, C. M. G. (2015). Use of Scilab and Arduino for Data Acquisition Environmental. *IEEE 12th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 417-421.
- Coughanowr, D. R., & Leblanc, S. E. (2009). *Process Systems Analysis and Control* (Third Edit). McGraw-Hill.
- Gasparesc, G. (2013). Development of a Low-cost System for Temperature Monitoring. *2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2013*, 340-343.

- Karami, M., McMorrow, G. V., & Wang, L. (2018). Continuous Monitoring of Indoor Environmental Quality using and Arduino-based Data Acquisition System. *Journal of Building Engineering*, 19, 412-419.
- Koestoer, R. A., Saleh, Y. A., & Harinaldi, I. R. (2019). A Simple Method for Calibration of Temperature Sensor DS18B20 Waterproof in Oil Bath Based on Arduino Data Acquisition System. *The 10th International Meeting of Advances in Thermofluids*, 1-8.
- Kumar, M., Prasad, D., Giri, B. S., & Singh, R. S. (2019). Temperature Control of Fermentation Bioreactor for Ethanol Production using IMC-PID Controller. *Biotechnology Reports*, 22, e00319.
- Mahmood, Q. A., Nawaf, A. T., Esmael, M. N., & Abdulateef, L. T. (2018). PID Temperature Control of Demineralized Water Tank. *International Conference on Materials Engineering and Science 454 01231*.
- Mir, A., & Swarnalatha, R. (2018). Implementation of an Industrial Automation System Model using an Arduino. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(12), 4131-4144.
- Nurhalimah, D., & Fermi, M. I. (2019). Pembuatan Sistem Akuisisi Data Sederhana Menggunakan Arduino-Python (Studi Kasus : Suhu Fluida pada Tangki Pemanas). *JOM FTEKNIK*, 6(2), 1-8.
- Rivera, E. C., Yamakawa, C. K., Saad, M. B. W., Atala, D. I. P., Ambrosio, W. B., Bonomi, A., Junior, J., & Rossell, C. E. V. (2017). Effect of Temperature on Sugarcane Ethanol Fermentation: Kinetic Modeling and Validation under Very-high-gravity Fermentation Conditions. *Biochemical Engineering Journal*, 119, 42-51.
- Ross-Pinnock, D., & Maropoulos, P. G. (2016). Review of Industrial Temperature Measurement Technologies and Research Priorities for the Thermal Characterisation of the Factories of the Future. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(5), 793-806.
- Suciyati, S. W., Hidayatullah, M. S., & Pauzi, G. A. (2021). An Analysis of Data Acquisition System of Temperature, Oxygen, and Carbon Dioxide in Refrigerator with Arduino Mega 2560. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-BiRuNi*, 10(1), 119-127.