

# PERANCANGAN SISTEM KENDALI SUHU PADA OVEN LISTRIK MENGUNAKAN METODE GREY WOLF OPTIMIZER (*Design of Temperature Control System on Electric Oven Using Grey Wolf Optimizer Method*)

Purnawan Putranto<sup>1</sup>, M Chilmi<sup>2</sup>, Rafly Rachman D<sup>3</sup>, Ellang Pandhu YAW<sup>4</sup>, Dewanda Bima H<sup>5</sup>,  
Pipit Sugianto<sup>6</sup>, Yuliyanto Agung Prabowo<sup>7</sup>, Wahyu Setyo Pambudi<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8</sup>Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Teknik Adhi Tama Surabaya, Surabaya

E-mail: [1pputranto@gmail.com](mailto:1pputranto@gmail.com), [2chilmi2603@gmail.com](mailto:2chilmi2603@gmail.com), [3rafly190@gmail.com](mailto:3rafly190@gmail.com), [4ellang.pandhu@gmail.com](mailto:4ellang.pandhu@gmail.com),  
[5dewandabima@gmail.com](mailto:5dewandabima@gmail.com), [6pipitsugianto111@gmail.com](mailto:6pipitsugianto111@gmail.com), [7agungp@itats.ac.id](mailto:7agungp@itats.ac.id), [8wahyusp@itats.ac.id](mailto:8wahyusp@itats.ac.id)

## ARTICLE INFO

### Article history:

Submitted:  
June 29, 2024

Accepted:  
July 18, 2024

Published:  
August 1, 2024

## ABSTRACT

Electric ovens typically come with an on-off control system, which is inefficient in maintaining a stable temperature as required by users. This study aims to design and implement a more effective temperature control system using the Grey Wolf Optimizer (GWO) method. GWO is an optimization algorithm inspired by the hunting behavior of grey wolves, which has advantages in convergence and exploration of optimal solutions. In this study, the performance of GWO is compared with the Genetic Algorithm (GA) and the conventional PID Controller method with Ziegler-Nichols tuning. The test results show that the GWO method provides faster and more stable responses in reaching the desired temperature, with lower overshoot and shorter recovery time compared to GA and PID Controller Ziegler-Nichols. Thus, GWO offers a superior alternative in temperature control of electric ovens, potentially enhancing heating efficiency and quality in various industrial applications.

## Keywords:

Temperature control,  
Electric oven, Grey Wolf  
Optimizer, Genetic  
Algorithm, PID Controller,  
Ziegler-Nichols.

## Kata Kunci:

Kendali suhu, Oven listrik,  
Grey Wolf Optimizer,  
Algoritma Genetika, PID  
Controller, Ziegler-Nichols.

## ABSTRAK

Oven listrik umumnya dilengkapi dengan sistem kendali on-off yang kurang efisien dalam mempertahankan suhu stabil sesuai dengan kebutuhan pengguna. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali suhu yang lebih efektif menggunakan metode Grey Wolf Optimizer (GWO). GWO adalah algoritma optimasi yang terinspirasi dari perilaku berburu grey wolf, yang memiliki keunggulan dalam konvergensi dan eksplorasi solusi optimal. Pada penelitian ini, performa GWO dibandingkan dengan Algoritma Genetika (GA) dan metode konvensional PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode GWO memberikan respons yang lebih cepat dan stabil dalam mencapai suhu yang diinginkan, dengan overshoot yang lebih rendah dan waktu pemulihan yang lebih singkat dibandingkan GA dan PID Controller Ziegler-Nichols. Dengan demikian, GWO menawarkan alternatif yang lebih unggul dalam pengendalian suhu oven listrik, yang berpotensi meningkatkan efisiensi dan kualitas pemanasan pada berbagai aplikasi industri.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



## Corresponding Author:

Author,  
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Teknik Adhi Tama  
Surabaya  
Jln. Arief Rachman Hakim No 100 Surabaya, 60117, Jawa Timur,  
Indonesia.  
Email: [itats@itats.ac.id](mailto:itats@itats.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Oven listrik merupakan salah satu peralatan rumah tangga dan industri yang sangat penting untuk berbagai keperluan, mulai dari memasak hingga pemrosesan material. Kinerja oven listrik sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem kendali suhu untuk menjaga suhu tetap stabil sesuai dengan yang diinginkan. Namun, kebanyakan oven listrik yang ada di pasaran saat ini hanya dilengkapi dengan sistem kendali on-off yang sederhana, yang seringkali tidak mampu memberikan kestabilan suhu yang optimal. Sistem kendali on-off bekerja dengan cara menghidupkan dan mematikan elemen pemanas secara bergantian untuk mencapai suhu target. Meski metode ini sederhana, namun sering kali mengakibatkan fluktuasi suhu yang signifikan dan tidak efisien dalam konsumsi energi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai metode kendali suhu yang lebih canggih telah dikembangkan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah PID (Proportional-Integral-Derivative) Controller, yang dapat memberikan kontrol yang lebih halus dan respons yang lebih cepat dibandingkan sistem on-off. Metode tuning Ziegler-Nichols adalah salah satu teknik yang sering digunakan untuk mengatur parameter PID Controller. Namun, meskipun PID Controller lebih unggul daripada sistem on-off, masih terdapat tantangan dalam hal tuning parameter yang optimal untuk berbagai kondisi operasi.

Dalam beberapa dekade terakhir, algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan telah menunjukkan potensi besar dalam menyelesaikan masalah optimasi yang kompleks. Algoritma Genetika (GA) adalah salah satu metode yang populer digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kendali suhu. GA bekerja dengan prinsip seleksi alam dan evolusi genetik untuk mencari solusi optimal. Namun, dalam konteks kendali suhu, GA masih memiliki beberapa kelemahan seperti konvergensi yang lambat dan kemungkinan terjebak pada solusi lokal.

Grey Wolf Optimizer (GWO) adalah algoritma optimasi yang relatif baru, yang terinspirasi dari perilaku berburu grey wolf. GWO memiliki keunggulan dalam hal konvergensi cepat dan kemampuan eksplorasi yang baik, sehingga mampu menemukan solusi optimal dengan lebih efisien. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kendali suhu pada oven listrik menggunakan metode GWO dan membandingkan kinerjanya dengan Algoritma Genetika dan PID Controller Ziegler-Nichols.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan metode kendali suhu yang lebih efisien dan efektif untuk oven listrik, yang dapat meningkatkan kualitas pemanasan dan efisiensi energi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi kendali suhu, khususnya pada aplikasi oven listrik.

## 2. METODE PENELITIAN

Artikel Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama yang dirancang untuk mencapai tujuan penelitian, yaitu merancang sistem kendali suhu pada oven listrik menggunakan metode Grey Wolf Optimizer (GWO) dan membandingkan performanya dengan Algoritma Genetika (GA) dan PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols. Berikut adalah tahapan-tahapan tersebut:

### 2.1. Start

Tahap ini merupakan titik awal penelitian dimana tujuan dan ruang lingkup penelitian ditetapkan. Pada tahap ini juga dilakukan identifikasi masalah yang akan diselesaikan.

### 2.2. Literature Review

Pada tahap ini, dilakukan tinjauan literatur untuk memahami konsep dasar dan perkembangan terkini terkait dengan sistem kendali suhu, algoritma optimasi (GWO dan GA), serta metode PID Controller. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mendapatkan wawasan yang mendalam dan mengidentifikasi celah penelitian (research gap) yang ada.

### 2.3. Research Gap Identification

Berdasarkan tinjauan literatur, tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi celah penelitian yang ada, yaitu kekurangan dari sistem kendali suhu oven listrik yang menggunakan metode on-off dan PID Controller konvensional. Identifikasi celah penelitian ini menjadi dasar untuk merancang sistem kendali yang lebih efektif dan efisien.

### 2.4. System Design

Pada tahap ini, desain sistem kendali suhu dikembangkan. Desain sistem mencakup:

- Implementasi metode Grey Wolf Optimizer (GWO) untuk mengatur suhu oven.
- Implementasi Algoritma Genetika (GA) sebagai perbandingan.
- Implementasi PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols sebagai perbandingan.

### 2.5. Grey Wolf Optimizer (GWO) Implementation

Pada tahap ini, GWO diimplementasikan dalam sistem kendali suhu oven listrik. Parameter-parameter GWO disesuaikan untuk mendapatkan kinerja optimal dalam menjaga stabilitas suhu.

### 2.6. Genetic Algorithm (GA) Implementation

Pada tahap ini, Algoritma Genetika (GA) diimplementasikan sebagai metode pembanding. Parameter-parameter GA disesuaikan untuk mendapatkan hasil yang optimal dalam kendali suhu.

### 2.7. PID Controller with Ziegler-Nichols Tuning

Pada tahap ini melibatkan implementasi PID Controller dengan metode tuning Ziegler-Nichols. Parameter PID diatur sesuai dengan aturan Ziegler-Nichols untuk mendapatkan kinerja yang optimal.

### 2.8. Performance Comparison

Pada tahap ini, dilakukan perbandingan kinerja antara GWO, GA, dan PID Controller. Perbandingan ini mencakup analisis respons sistem, overshoot, waktu pemulihan, dan efisiensi energi.

### 2.9. Simulation and Testing

Pada tahap ini melibatkan simulasi dan pengujian sistem kendali suhu yang telah dirancang. Simulasi dilakukan untuk menguji kinerja sistem dalam berbagai kondisi operasi. Hasil pengujian dicatat dan dianalisis untuk mengevaluasi performa masing-masing metode.

### 2.10. Simulation and Testing

Pada tahap ini, hasil dari simulasi dan pengujian dianalisis secara mendalam. Analisis ini mencakup perbandingan kinerja setiap metode, kelebihan dan kekurangan masing-masing metode, serta potensi peningkatan yang bisa dilakukan.

### 2.11. Conclusions and Recommendations

Pada Tahap terakhir adalah menyusun kesimpulan dari penelitian ini. Kesimpulan mencakup temuan utama, keunggulan metode GWO dibandingkan dengan GA dan PID Controller, serta rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut dan implementasi praktis di industri.

### 2.12. End

Pada Tahap ini menandai akhir dari proses penelitian. Semua hasil, analisis, dan kesimpulan didokumentasikan dalam bentuk laporan penelitian yang siap untuk dipublikasikan.



Gambar 1. Flow chart penelitian

## 3. MODEL MATEMATIS SISTEM

### 3.1. Transfer Function PID dalam Laplace

Persamaan 1 merupakan bentuk transfer function PID dalam Laplace[1]:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

$$G_{PID}(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \dots\dots\dots(1)$$

### 3.2. Oven listrik dengan laju kenaikan suhu adalah 8°C/detik

Parameter-Parameter

- Daya (P): 700 Watt
- Laju Kenaikan Suhu (dT/dt): 8°C/detik

Estimasi Kapasitor Termal (C)

Kapasitor termal C dapat dihitung berdasarkan laju kenaikan suhu dan daya input[2]:

$$C = \frac{P}{\frac{dT}{dt}}$$

$$C = \frac{700 \text{ W}}{8^\circ \text{ C/s}} = 87.5 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

Estimasi Resistor Termal (R)

Untuk menentukan nilai R, kita memerlukan konstanta waktu  $\tau$ . Karena kita tidak memiliki data waktu spesifik untuk mencapai suhu tertentu, kita dapat mengasumsikan bahwa sistem memiliki waktu tetap (misalnya, mencapai suhu maksimum dalam periode waktu tertentu)[2]. Untuk mengetahui durasi yang diperlukan untuk mencapai keadaan tunak (*settling time*)

$$T_{\max} = 250^\circ\text{C}$$

$$t = \frac{T_{\max}}{\frac{dT}{dt}}$$

$$t = \frac{250^\circ\text{C}}{8^\circ\text{C/s}} = 31.25\text{s}$$

Karena *settling time* adalah 5 kali konstanta waktu ( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{31.25}{5} = 6.25 \text{ s}$$

$$\tau = RC$$

$$R = \frac{\tau}{C}$$

$$R = \frac{6.25 \text{ s}}{87.5 \text{ J/}^\circ\text{C}} = 0.0714^\circ\text{C/W}$$

Menggantikan nilai C dan R ke dalam fungsi alih :

$$H(s) = \frac{1}{Cs + \frac{1}{R}}$$

$$H(s) = \frac{1}{87.5s + \frac{1}{0.0714}}$$

$$H(s) = \frac{1}{87.5 \cdot 0.0714 s + 1}$$

$$H(s) = \frac{1}{6.25 s + 1}$$

### 3.3. Transport Delay

Stabilitas dan Performa Kontrol:

- Pengendalian suhu yang baik memerlukan stabilitas dan respons yang cepat terhadap perubahan setpoint.
- Tanpa penundaan waktu, PID mungkin menghasilkan respons yang terlalu cepat dan tidak stabil.
- Dengan menambahkan *transport delay*, kita dapat mengatur respons yang lebih realistis dan menghindari osilasi berlebihan.

Transport delay, Penundaan waktu yang terjadi ketika sinyal masukan memerlukan waktu untuk berpropagasi melalui sistem sebelum mempengaruhi keluaran[3]. Dalam penelitian ini besarnya 1.02 detik

Transfer functionnya menjadi

$$G(s) = e^{-1.02s} \cdot \frac{1}{6.25s+1}$$

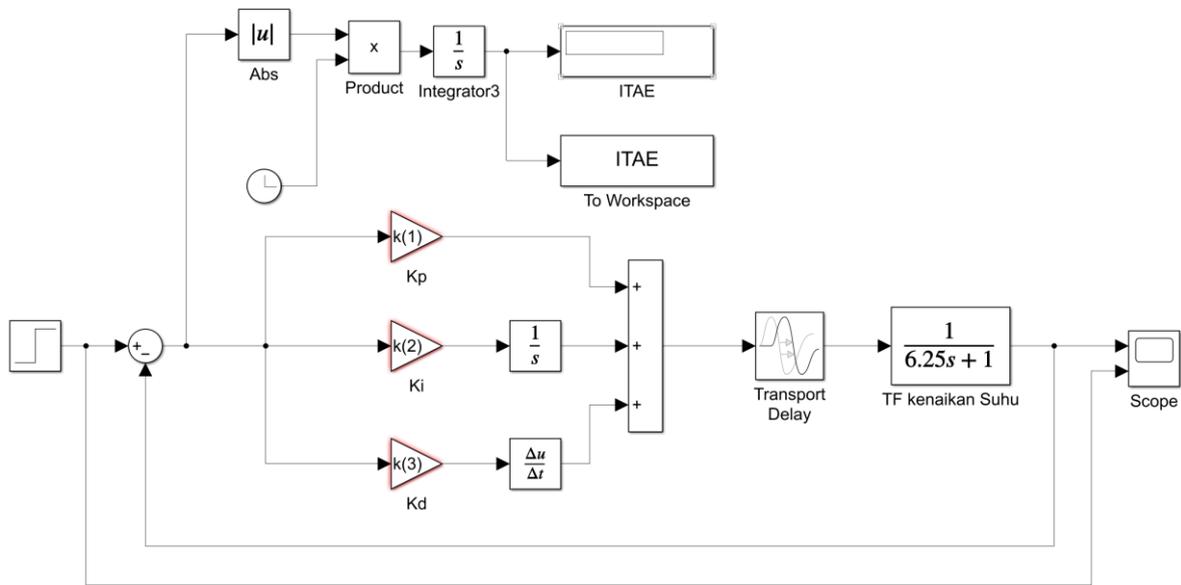
$$G(s) = \frac{e^{-1.02s}}{6.25s+1}$$

#### 4. PEMROGRAMAN SOFTWARE GWO, GA DAN TUNING PID ZIEGLER-NICHOLS

Pemrograman software merupakan tahap kritis dalam penelitian ini karena semua metode kendali suhu (GWO, GA, dan PID Controller) akan diimplementasikan dan diuji menggunakan MATLAB dan Simulink. Berikut adalah langkah-langkah detail untuk setiap bagian dari pemrograman software.

##### 4.1. Persiapan Lingkungan Pemrograman

Sebelum mulai pemrograman, pastikan perangkat lunak MATLAB dan Simulink sudah terpasang dan siap digunakan.



Gambar 2. Model pada Simulink

#### 4.2. Implementasi Grey Wolf Optimizer (GWO)

##### 4.2.1. Dasar Teori Grey Wolf Optimizer (GWO)

Grey Wolf Optimizer (GWO) adalah algoritma optimisasi metaheuristik yang dikembangkan oleh Seyedali Mirjalili, Andrew Lewis, dan Siti Zaiton Mohd Hashim pada tahun 2014. Algoritma ini terinspirasi oleh perilaku berburu dan hierarki sosial serigala abu-abu (*Canis lupus*). GWO meniru struktur sosial dan strategi berburu serigala abu-abu untuk menyelesaikan masalah optimisasi.

GWO menggunakan hierarki sosial serigala abu-abu yang terdiri dari empat kategori utama [4]:

- **Alpha (α):** Pemimpin kelompok yang bertanggung jawab untuk membuat keputusan tentang berburu, tempat tidur, waktu bangun, dll.
- **Beta (β):** Serigala beta adalah kedua dalam komando dan membantu alpha dalam pengambilan keputusan.
- **Delta (δ):** Serigala delta tunduk pada alpha dan beta, tetapi mereka lebih unggul dibandingkan dengan serigala omega.
- **Omega (ω):** Serigala omega adalah anggota terendah dalam hierarki dan berfungsi sebagai pengikut.

Proses berburu serigala abu-abu melibatkan beberapa tahap yang direplikasi dalam algoritma GWO, yaitu:

1. Melacak, mengejar, dan mendekati mangsa.
2. Mengepung dan mengganggu mangsa sampai berhenti bergerak.
3. Menyerang mangsa.

Dalam mekanisme perburuan, para serigala mengitari mangsa terlebih dahulu untuk menjaga agar mangsa tetap berada dalam area penyerangan. Permodelan matematika dalam tindakan mengitari mangsa di ekspresikan pada Persamaan 2:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p - \vec{X}|$$

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_p - \vec{A} \cdot \vec{D} \dots\dots\dots(2)$$

Di mana :

- $\vec{X}_p$  adalah posisi target (alpha, beta atau delta)
- $\vec{X}$  adalah posisi serigala saat ini
- $\vec{A}$  dan  $\vec{C}$  adalah koefisien yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 3:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \dots\dots\dots(3)$$

Di mana :

- $\vec{a}$  menurun secara linear dari 2 ke 0 selama iterasi
- $\vec{r}_1$  dan  $\vec{r}_2$  adalah vector acak dalam rentang [0,1].

Serigala abu-abu memiliki kemampuan untuk mendeteksi lokasi mangsa dan langsung mengitari mangsa tersebut. Secara umum, perburuan dipimpin oleh serigala Alpha. Serigala Beta dan Delta juga dapat berpartisipasi dalam perburuan pada waktu tertentu. Tugas serigala Alpha, Beta, dan Delta adalah memperkirakan posisi mangsa, sedangkan serigala lainnya memperbarui posisi mereka secara acak tetapi tetap mengitari mangsa. Dalam permodelan matematika, perilaku serigala saat berburu digunakan sebagai bahan simulasi.

#### 4.2.2. Pengkodean Grey Wolf Optimizer (GWO) di Matlab

- Integral Time Absolute Error (ITAE) dioptimalkan oleh GWO.
- Pertama, inisialisasi populasi serigala secara acak dengan menetapkan jumlah serigala dalam populasi, jumlah iterasi, dan batasan parameter Kp, Ki, dan Kd. Evaluasi setiap serigala dalam populasi menggunakan fungsi cost (ITAE). Setelah itu, perbarui posisi serigala alpha, beta, dan delta berdasarkan nilai fitness terbaik yang diperoleh selama iterasi dan memastikan eksplorasi ruang solusi secara efektif. iterasi dilakukan hingga jumlah iterasi maksimum tercapai atau hingga konvergensi tercapai. Dalam setiap iterasi, perbarui nilai fitness dan posisi serigala, serta pastikan posisi serigala tetap dalam batasan yang ditetapkan.
- GWO diintegrasikan dengan model di simulink untuk menjalankan optimasi dalam loop kendali.

### 4.3. Implementasi Algoritma Genetika (GA)

#### 4.3.1. Dasar Teori Algoritma Genetika (GA)

Algoritma Genetik (AG) adalah salah satu teknik optimasi yang terinspirasi dari proses evolusi alam, khususnya proses seleksi alam yang menyebabkan evolusi biologis. AG digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dengan cara meniru proses evolusi alam tersebut. Berikut adalah dasar teori Algoritma Genetika[5]:

1. **Konsep Dasar AG:** AG menggunakan konsep genetika dan evolusi alam untuk mencari solusi optimal. Proses evolusi alam seperti seleksi alam, rekombinasi gen, dan mutasi diadaptasi ke dalam AG untuk menciptakan populasi solusi yang berkembang dari generasi ke generasi.
2. **Representasi Solusi:** Dalam AG, solusi dari masalah diwakili sebagai kromosom yang terdiri dari gen-gen. Setiap gen mewakili bagian dari solusi yang dicari. Misalnya, dalam tuning parameter PID, kromosom dapat mewakili nilai-nilai KP, KI, dan KD.
3. **Populasi dan Generasi:** AG bekerja dengan populasi individu yang mewakili solusi-solusi potensial. Setiap individu dalam populasi memiliki kromosomnya sendiri. Proses evolusi dilakukan melalui generasi, di mana individu-individu bereproduksi, mengalami rekombinasi gen, dan mutasi.
4. **Seleksi:** Proses seleksi dalam AG mirip dengan seleksi alam di mana individu-individu yang memiliki kinerja terbaik memiliki peluang lebih besar untuk berkembang biak dan mewariskan sifat-sifat unggulnya ke generasi berikutnya.
5. **Rekombinasi dan Mutasi:** Rekombinasi gen terjadi saat dua individu dipilih untuk menghasilkan keturunan dengan gabungan gen dari kedua orang tua. Mutasi terjadi dengan mengubah secara acak gen-gen dalam kromosom untuk menciptakan variasi baru.
6. **Evaluasi dan Penyeleksian:** Setiap individu dievaluasi berdasarkan pada seberapa baik mereka memecahkan masalah yang diberikan. Individu-individu yang memiliki kinerja terbaik dipilih untuk membentuk generasi berikutnya.

#### 4.3.2. Pengkodean Algoritma Genetika (GA) di Matlab

- Integral Time Absolute Error (ITAE) dioptimalkan oleh GA.
- Pertama, inisialisasi populasi secara acak dengan menetapkan jumlah individu dalam populasi, jumlah generasi, dan batasan parameter Kp, Ki, dan Kd. Untuk perhitungan fitness, evaluasi setiap individu dalam populasi menggunakan fungsi Cost (ITAE). Berdasarkan nilai fitness yang diperoleh, individu dengan performa terbaik dipilih untuk reproduksi.
- Selama iterasi, lakukan operasi genetika berikut:
  1. Seleksi: Pilih individu terbaik berdasarkan nilai fitness untuk menjadi orang tua.
  2. Crossover: Gabungkan pasangan individu orang tua untuk menghasilkan keturunan baru.
  3. Mutasi: Lakukan perubahan kecil pada keturunan baru untuk mempertahankan keanekaragaman genetik.

4. Lakukan iterasi hingga jumlah generasi maksimum tercapai atau hingga konvergensi tercapai. Dalam setiap generasi, perbarui populasi dengan individu-individu baru yang dihasilkan dari operasi genetika. Evaluasi populasi baru dan pilih individu terbaik sebagai solusi optimal.
- GA diintegrasikan dengan model di simulink untuk menjalankan optimasi dalam loop kendali.

#### 4.4. Implementasi PID Controller dengan Ziegler-Nichols Tuning

##### 4.4.1. Dasar Teori PID Controller dengan Ziegler-Nichols Tuning

Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter penyetelan Ziegler-Nichols untuk berbagai tipe pengendali. Metode Ziegler-Nichols merupakan salah satu teknik penyetelan pengendali yang paling umum digunakan dalam sistem kontrol industri. Tabel ini mencantumkan nilai-nilai parameter seperti  $K_p$  (gain proporsional),  $T_i$  (waktu integral), dan  $T_d$  (waktu derivatif), serta konstanta  $K_i$  dan  $K_d$ , yang digunakan untuk menyetel pengendali jenis P, PI, PD, dan PID klasik, serta varian lainnya seperti Pessen Integral, Some Overshoot, dan No Overshoot. Metode ini bertujuan untuk mencapai kinerja optimal sistem kontrol dengan menetapkan parameter-parameter tersebut berdasarkan konstanta gain ultimate ( $K_u$ ) dan perioda ultimate ( $T_u$ )[6].

Tabel 1. Ziegler-Nichols Tuning

Control type	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$	$K_d$
P	0.5 $K_u$	-	-	-	-
PI	0.45 $K_u$	0.83 $T_u$	-	$\frac{0.54 K_u}{T_u}$	-
PD	0.8 $K_u$	-	0.125 $T_u$	-	-
Classic PID	0.6 $K_u$	0.5 $T_u$	0.125 $T_u$	$\frac{1.2 K_u}{T_u}$	0.075 $K_u T_u$
Pessen Integral	0.7 $K_u$	0.4 $T_u$	0.15 $T_u$	$\frac{1.75 K_u}{T_u}$	0.105 $K_u T_u$
Some Overshoot	0.33 $K_u$	0.5 $T_u$	0.33 $T_u$	$\frac{0.66 K_u}{T_u}$	0.11 $K_u T_u$
No Overshoot	0.2 $K_u$	0.5 $T_u$	0.33 $T_u$	$\frac{0.4 K_u}{T_u}$	0.066 $K_u T_u$

##### 4.4.2. Kalkulasi PID Controller dengan Ziegler-Nichols Tuning untuk sistem oven listrik

Setelah percobaan trial and error untuk mendapatkan  $K_u$  dan  $T_u$ , didapatkan nilai:

- $K_u = 11.14$
- $T_u = 3.825$  s

Dari perhitungan sesuai dengan Tabel 1 dengan tipe controller No Overshoot maka :

$$K_p = 0.2 \cdot K_u = 2.228$$

$$K_i = \frac{0.4 K_u}{T_u} = 1.165$$

$$K_d = 0.066 K_u \cdot T_u = 2.8123$$

## 5. SIMULASI DAN PENGUJIAN

Pertama-tama adalah tahap pengaturan simulasi. Pada tahap ini, parameter simulasi di Simulink ditetapkan, termasuk batas atas dan batas bawah serta jumlah iterasi. Penting untuk memastikan bahwa semua metode pengendalian, yaitu GWO, GA, dan kontroler PID, disimulasikan menggunakan parameter yang sama untuk menjaga konsistensi dan validitas hasil penelitian.

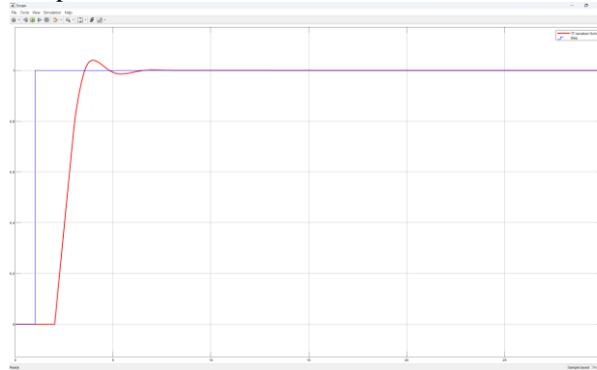
Setelah pengaturan parameter, simulasi dijalankan untuk masing-masing metode kendali. Data keluaran seperti waktu kenaikan (rise time), overshoot, dan waktu tunak dicatat untuk setiap metode. Hasil simulasi kemudian dianalisis dengan membandingkan kinerja ketiga metode tersebut, guna menentukan metode yang paling efektif dalam mengendalikan suhu oven listrik.

## 6. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, kita akan membahas hasil simulasi dari tiga metode kendali suhu yang diimplementasikan: Grey Wolf Optimizer (GWO), Algoritma Genetika (GA), dan PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols. Setiap metode dievaluasi berdasarkan parameter yang dihasilkan, waktu kenaikan (rise time), dan waktu keadaan tunak (settling time).

### 6.1. Hasil Simulasi Grey Wolf Optimizer (GWO)

Hasil simulasi GWO yang telah dilakukan menggunakan Matlab/Simulink dapat dilihat pada Gambar 3. Simulasi ini dirancang untuk memahami dan menganalisis kinerja sistem. Gambar 3 memberikan visualisasi yang jelas tentang bagaimana sistem berperilaku selama simulasi.



Gambar 3. Respon GWO

#### 6.1.1. Parameter Optimal

Setelah menjalankan simulasi menggunakan GWO, parameter PID optimal yang diperoleh adalah:

- $K_p = 5.0275$
- $K_i = 0.6054$
- $K_d = 1.7723$

#### 6.1.2. Kinerja Sistem

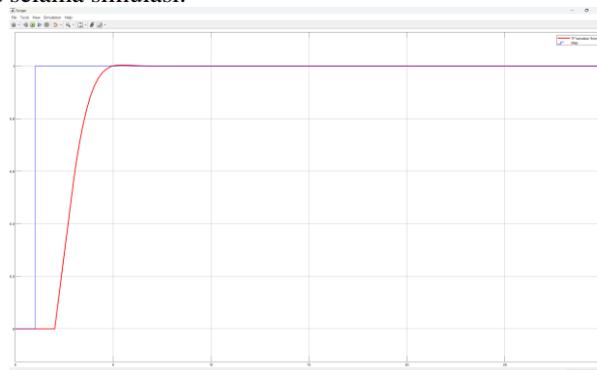
- Waktu Kenaikan (Rise Time): 1.53 detik
- Waktu Keadaan Tunak (Settling time): 4.41 detik

#### 6.1.3. Pembahasan

Metode GWO berhasil menemukan parameter PID yang menghasilkan waktu kenaikan dan waktu keadaan tunak yang relatif cepat. Hal ini menunjukkan kemampuan GWO dalam mengeksplorasi ruang solusi dan menemukan nilai optimal yang efektif untuk pengendalian suhu.

### 6.2. Hasil Simulasi Algoritma Genetik (GA)

Hasil simulasi GA yang telah dilakukan menggunakan Matlab/Simulink dapat dilihat pada Gambar 4. Simulasi ini dirancang untuk memahami dan menganalisis kinerja sistem. Gambar 4 memberikan visualisasi yang jelas tentang bagaimana sistem berperilaku selama simulasi.



Gambar 4. Respon GA

### 6.2.1. Parameter Optimal

Setelah menjalankan simulasi menggunakan Algoritma Genetika, parameter PID optimal yang diperoleh adalah:

- $K_p = 3.7035$
- $K_i = 0.5079$
- $K_d = 0.8461$

### 6.2.2. Kinerja Sistem

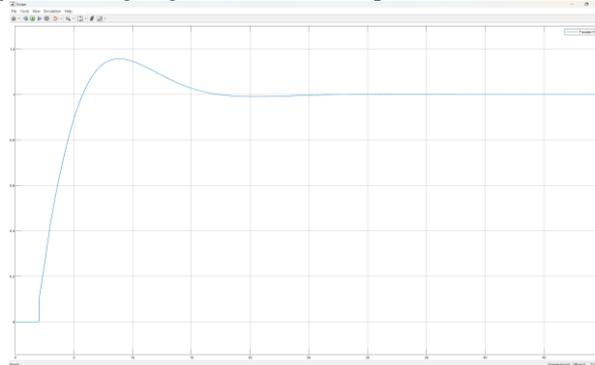
- Waktu Kenaikan (Rise Time): 2.96 detik
- Waktu Keadaan Tunak (Settling time): 4.52 detik

### 6.2.3. Pembahasan

Algoritma Genetika juga mampu menemukan parameter PID yang optimal, namun waktu kenaikan yang diperoleh lebih lama dibandingkan dengan GWO. Ini menunjukkan bahwa meskipun GA merupakan metode optimasi yang kuat, dalam kasus ini GWO memberikan hasil yang lebih baik dalam hal waktu respon sistem.

### 6.3. Hasil Simulasi PID Controller dengan Ziegler-Nichols Tuning

Hasil simulasi tuning PID dengan metode Ziegler-Nichols yang telah dilakukan menggunakan Matlab/Simulink dapat dilihat pada Gambar 5. Simulasi ini dirancang untuk memahami dan menganalisis kinerja sistem. Gambar 5 memberikan visualisasi yang jelas tentang bagaimana sistem berperilaku selama simulasi.



Gambar 5. Respon PID Ziegler Nichols

### 6.3.1. Parameter Optimal

Menggunakan metode Ziegler-Nichols, parameter PID yang diperoleh adalah:

- $K_p = 2.228$
- $K_i = 1.165$
- $K_d = 2.8123$

### 6.3.2. Kinerja Sistem

- Waktu Kenaikan (Rise Time): 3.72 detik
- Waktu Keadaan Tunak (Settling time): 23.88 detik

### 6.3.3. Pembahasan

PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols memberikan waktu kenaikan yang paling lambat dan waktu keadaan tunak yang sangat lama dibandingkan dengan GWO dan GA. Ini menunjukkan bahwa tuning manual menggunakan metode Ziegler-Nichols mungkin tidak seefektif metode optimasi modern seperti GWO dan GA untuk pengendalian suhu pada oven listrik.

### 6.4. Perbandingan GWO, GA, dan Ziegler-Nichols PID

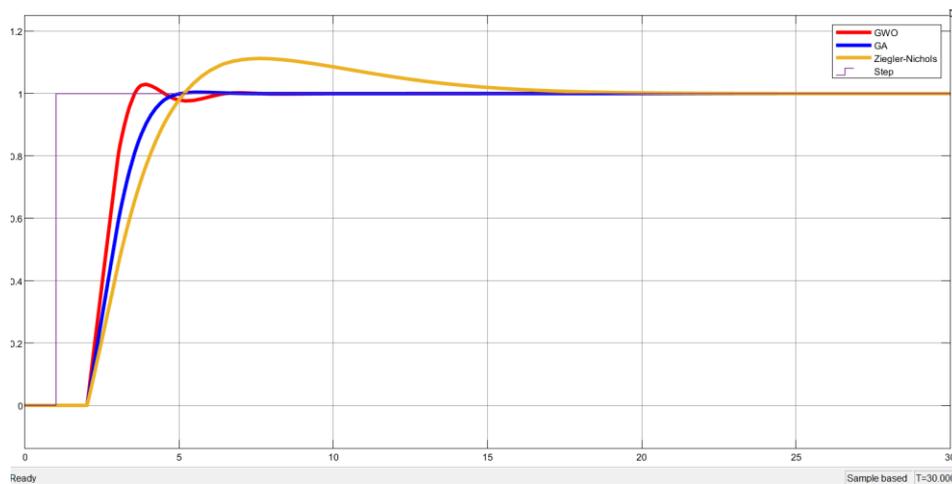
Tabel 2 memberikan gambaran tentang kinerja masing-masing optimizer yang telah dibahas dalam penelitian ini, yaitu GA (Genetic Algorithm), GWO (Grey Wolf Optimizer), dan Ziegler-Nichols. Dalam tabel tersebut, kita dapat melihat dan membandingkan efisiensi dan efektivitas dari ketiga optimizer ini dalam berbagai kondisi dan parameter.

Tabel 2. Perbandingan kinerja optimizer

Metode	$K_p$	$K_i$	$K_d$	Tr (s)	Ts (s)	OverShot (%)
--------	-------	-------	-------	--------	--------	--------------

GWO	5.0282	0.60389	1.781	1.53	4.41	4
GA	3.7035	0.5079	0.8461	2.96	4.52	0.4
Ziegler-Nichols	2.228	1.165	2.8123	3.72	23.88	15.7

Gambar 6 memberikan visualisasi tentang kinerja masing-masing optimizer yang telah dibahas dalam penelitian ini, yaitu GA (Genetic Algorithm), GWO (Grey Wolf Optimizer), dan Ziegler-Nichols. Dalam gambar tersebut, kita dapat melihat dan membandingkan efisiensi dan efektivitas dari ketiga optimizer ini dalam berbagai kondisi dan parameter.



Gambar 6. Respon GWO vs GA vs PID Ziegler Nichols

## 7. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa metode Grey Wolf Optimizer (GWO), Algoritma Genetika (GA), dan PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols masing-masing memiliki keunggulan mereka sendiri dalam mengendalikan suhu oven listrik.

GWO menunjukkan kinerja yang paling optimal dalam hal waktu kenaikan ( $T_r$ ) yaitu 1.53 detik dibandingkan dengan GA ( $T_r = 2.96$ ) detik dan tuning PID Ziegler-Nichols ( $T_r = 3.72$  detik), serta waktu keadaan tunak ( $T_s$ ) yaitu 4.41 detik dibandingkan dengan GA ( $T_s = 4.52$  detik) dan tuning PID Ziegler-Nichols ( $T_s = 23.88$  detik), menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi ini. Namun, penting untuk dicatat bahwa GA juga memiliki kelebihan tersendiri, yaitu kemampuannya untuk menghasilkan overshoot yang kecil (0.4%) dibandingkan menggunakan GWO (overshoot = 4%) dan tuning PID Ziegler-Nichols (overshoot = 15.7%). Ini berarti bahwa GA dapat memberikan kontrol yang lebih halus dan presisi, yang bisa menjadi faktor penting dalam beberapa aplikasi.

Sementara itu, PID Controller dengan tuning Ziegler-Nichols, meskipun performa optimasinya tidak sebaik GWO dan GA, metode tuning Ziegler-Nichols tetap menunjukkan keandalan yang cukup tinggi, terutama dalam situasi di mana tidak ada software khusus untuk membantu optimisasi. Dengan kata lain, metode ini dapat diandalkan dalam berbagai kondisi dan lingkungan.

Dengan demikian, pilihan metode terbaik akan sangat bergantung pada kebutuhan dan batasan spesifik dari aplikasi yang dihadapi.

**8. DAFTAR PUSTAKA**

- [1] N. Hamid and A. Mansur, "Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols untuk Optimasi Kontrol Kecepatan Motor pada Alat Spin Coater," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 1, no. 1, pp. 315–319, 2021.
- [2] W. Gazali, "Asal Usul Rumus Dasar Transformasi Laplace," *Eng. Math. Comput. Sci. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 51–54, 2022, doi: 10.21512/emacsjournal.v4i2.8185.
- [3] H. H. Tsai, C. C. Fuh, J. R. Ho, C. K. Lin, and P. C. Tung, "Controller Design for Unstable Time-Delay Systems with Unknown Transfer Functions," *Mathematics*, vol. 10, no. 3, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3390/math10030431.
- [4] M. O. Okwu and L. K. Tartibu, "Grey Wolf Optimizer," *Stud. Comput. Intell.*, vol. 927, pp. 43–52, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-61111-8\_5.
- [5] E. W. Suseno, A. Ma'arif, and R. D. Puriyanto, "Tuning Parameter Pengendali PID dengan Metode Algoritma Genetik pada Motor DC," *TELKA - Telekomun. Elektron. Komputasi dan Kontrol*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2022, doi: 10.15575/telka.v8n1.1-13.
- [6] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*, vol. 115, no. 2B, pp. 220–222, 1993, doi: 10.1115/1.2899060.