

# Perbandingan Metode *Tuning* PID pada Pengaturan Kecepatan *Parallel Hybrid Electric Vehicle*

## *Comparison of PID Tuning Methods for Parallel Hybrid Electric Vehicle Speed Controller*

Yoga Alif Kurnia Utama\*, Tamaji

Universitas Widya Kartika, Jl. Sutorejo Prima Utara II/1, Surabaya

\*Email : yoga.alif@widyakartika.ac.id

**Abstrak** – Salah satu performa yang paling penting pada sebuah kendaraan adalah pengaturan Kecepatan. Kendaraan harus mempertahankan Kecepatannya walaupun banyak gangguan sepanjang perjalanan. Pengaturan Kecepatan pada kendaraan yang memiliki 2 tenaga penggerak yang berbeda seperti kendaraan hibrida cukup sulit dibandingkan dengan kendaraan biasa. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba untuk membuat kontrol Kecepatan pada kendaraan hibrida. Pada penelitian ini, kontrol Proportional, Diferensial, dan Integral (PID) akan digunakan untuk mengatur Kecepatan Model *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV). PID ini akan di-*tuning* dengan menggunakan metode Ziegler Nichols (ZN), Cohen Coon (CC), dan algoritma kelelawar (BA). Ketiga metode ini akan dibandingkan berdasarkan indeks performansi *Integral of Squared Error* (ISE), *Integral of Absolute Error* (IAE), *Integral of Time Squared Error* (ITSE), dan *Integral of Time Absolute Error* (ITAE). Hasil menunjukkan bahwa BA merupakan metode *tuning* yang memiliki indeks performansi terbaik dibandingkan dengan metode yang lain. Hal ini dikarenakan BA merupakan salah satu algoritma metaheuristik yang mencari nilai konstanta kontrol PID dengan berbasis populasi yang akan bersama-sama mencari solusi atau kandidat konstanta PID yang cocok, sehingga BA dapat mencari solusi yang optimal dengan nilai indeks performansi yang terbaik.

**Kata kunci** : Algoritma Kelelawar, *Tuning* PID, Kontrol Kecepatan, PHEV

**Abstract** - One of the most important performance in a vehicle is speed regulation. The vehicle must maintain its speed despite many disturbances along the way. Speed regulation on vehicles that have 2 different propulsion forces such as hybrid vehicles is quite difficult compared to ordinary vehicles. Therefore, in this study, we tried to make speed control in hybrid vehicles. In this study, Proportional, Differential, and Integral (PID) controls will be used to adjust the speed of the *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) model. This PID will be tuned using Ziegler Nichols (ZN), Cohen Coon (CC), and bat (BA) algorithms. These three methods will be compared based on the performance index of *Integral of Squared Error* (ISE), *Integral of Absolute Error* (IAE), *Integral of Time Squared Error* (ITSE), and *Integral of Time Absolute Error* (ITAE). The results show that BA is a tuning method that has the best performance index compared to other methods. This is because BA is one of the metaheuristic algorithms that looks for a population-based PID control constant that will jointly look for a suitable PID constant solution or candidate, so that BA can find the optimal solution with the best performance index value.

**Keyword** : Bat Algorithm, PID Tuning, Speed Controller, PHEV

### I. PENDAHULUAN

Pada dekade ini, kendaraan transportasi darat yang paling banyak dipakai oleh manusia adalah kendaraan berbahan bakar fosil, seperti bensin, solar, dan lain sebagainya [1]. Kendaraan yang bergerak dengan menggunakan bahan bakar fosil ini memiliki sumber penggerak berupa *internal combustion engine* atau yang biasa disebut mesin pembakaran. Kelemahan terbesar dari kendaraan yang menggunakan mesin pembakaran untuk

bergerak adalah polusi udara [2]. Hasil dari mesin pembakaran akan mengeluarkan emisi polutan dimana menjadi salah satu zat yang sangat bertanggung jawab terhadap pemanasan global [3]. Bahaya emisi polutan ini membuat para peneliti berusaha untuk mencari solusi dalam permasalahan ini. Salah satunya adalah mengganti sumber polutan yaitu kendaraan berbahan bakar fosil menjadi kendaraan yang ramah lingkungan. Kendaraan ramah lingkungan ini disebut

kendaraan *hybrid electric vehicle* (HEV) [4]. Saat ini kendaraan HEV menjadi salah satu solusi dalam mengatasi kenaikan gas polutan yang terjadi. Kendaraan HEV ini merupakan kendaraan yang memiliki 2 tenaga penggerak sekaligus yaitu motor listrik dan mesin pembakaran [5]. Jadi sumber energinya berasal dari bensin dan listrik. Dari sini dapat dilihat bahwa penggunaan kendaraan HEV ini akan mengurangi tingkat polusi gas yang terjadi. Hal ini dikarenakan jumlah konsumsi bensin akan berkurang sehingga jumlah polusi akan berkurang pula.

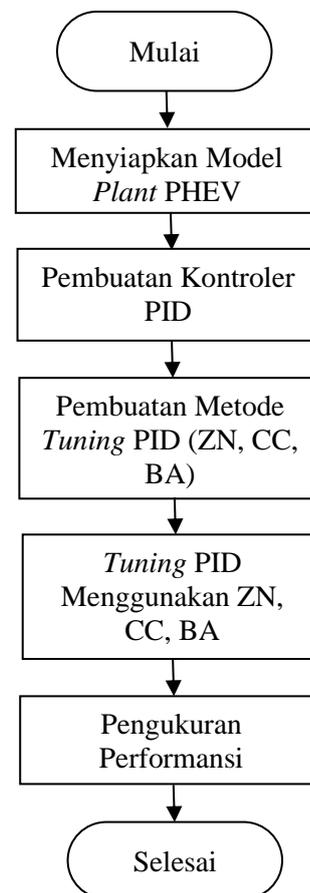
Salah satu performa yang harus dipunyai oleh HEV adalah tahan pada gangguan jalan dan dapat mempertahankan Kecepatan yang diinginkan. Gangguan ini bisa bermacam-macam hal mulai dari jalan yang berlubang, gangguan angin, dan lain-lain. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah kontrol yang baik untuk membuat HEV dalam mempertahankan Kecepatan yang diinginkan. Solusi hal tersebut adalah penggunaan kontrol PID dalam pengaturan Kecepatannya. Pada suatu penelitian, kontrol PID digunakan untuk mengatur putaran motor pada mesin alat pengepres adonan roti (*screw conveyor*) [6]. Hasil menunjukkan bahwa kontrol PID dapat mengikuti Kecepatan konveyor yang diinginkan walaupun terdapat beban di atas konveyor tersebut. Pada penelitian lain, kontrol PID ditambah dengan *tuning* PID menggunakan Ziegler Nichols untuk menjaga kestabilan putarannya [7]. Hasil menunjukkan bahwa PID dengan *tuning* Ziegler Nichols dapat menekan lonjakan respon yang terjadi saat awal motor dinyalakan. Penelitian lain mengganti *tuning* PID dengan Ziegler Nichols dengan metode metaheuristik menggunakan *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk kontrol Kecepatan motor DC [8]. Hasil menunjukkan bahwa kontrol PID dengan ACO dapat membuat motor DC menghasilkan Kecepatan yang sesuai dengan *set point* dengan *settling time* tercepat dan *overshoot* yang cukup kecil.

Dari penelitian-penelitian ini, penulis melanjutkan penelitian tersebut dengan mencoba mengimplementasikan metode berbagai *tuning* kontrol PID untuk pengaturan Kecepatan pada sistem yang kompleks yaitu *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV). Penelitian ini akan mencoba untuk membandingkan berbagai metode *tuning* PID yaitu Metode Ziegler Nichols, Cohen Coon dan Algoritma Metaheuristik yaitu algoritma kelelawar. Ketiga metode tersebut akan diuji coba

pada *Parallel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) dengan kriteria perfarmansi berupa *Integral of Squared Error* (ISE) [9], *Integral of Absolute Error* (IAE) [10], *Integral of Time Squared Error* (ITSE) [11], dan *Integral of Time Absolute Error* (ITAE) [12]. Dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam metode *tuning* PID untuk kontrol Kecepatan pada PHEV.

## II. METODOLOGI

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan. Secara lengkap tahapan ini dapat dilihat pada Gambar 1. Seperti yang dilihat pada Gambar 1, maka secara ringkas tahapan penelitian ini meliputi menyiapkan model *plant* PHEV, lalu dilanjutkan dengan pembuatan simulasi secara utuh dengan ditambah dengan kontrol PID. Kemudian melakukan *tuning* PID pada simulasi yang telah dibuat menggunakan ZN, CC, dan BA.



Gambar 1. Tahapan Penelitian.

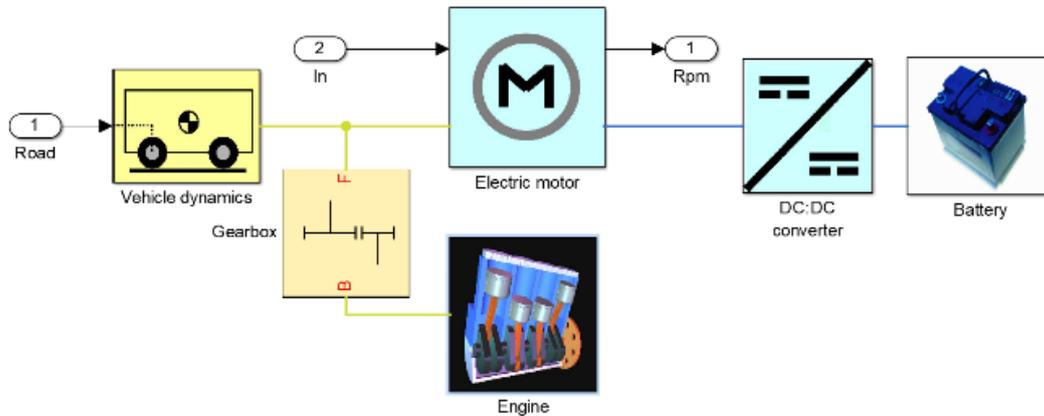
Untuk menentukan performa metode *tuning* PID yang yang terbaik, maka digunakan kriteria indeks performansi. Dengan melakukan perhitungan indeks performansi maka dapat ditentukan metode *tuning* PID mana yang terbaik dalam kontrol Kecepatan pada PHEV. Seluruh

tahapan ini secara lengkap dijabarkan sebagai berikut:

1. Menyiapkan Model PHEV

Pertama kali yang dikerjakan pada penelitian ini yakni menyiapkan model *plant* PHEV. Penelitian ini akan memakai model

*plant* PHEV yang sudah berbentuk simulasi yang disediakan oleh *Mathworks* [13]. Model matematika PHEV ini diperlukan sebagai *plant* dalam kontroler PID yang akan dibuat. Model *plant* yang digunakan pada penelitian ini sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Plant PHEV

Pada PHEV, *electric motor* dan *engine* merupakan sumber tenaga penggerak pada PHEV. Disini *engine* menjadi penggerak primer dan *electric motor* sebagai penggerak sekunder. Pada kendaraan *hybrid* bertipe paralel maka dua penggerak tersebut harus dihubungkan secara paralel dimana membutuhkan *gearbox* untuk menghubungkannya. Hal ini dikarenakan kedua tenaga penggerak tersebut memiliki 2 poros yang berbeda.

2. Pembuatan Kontrol PID

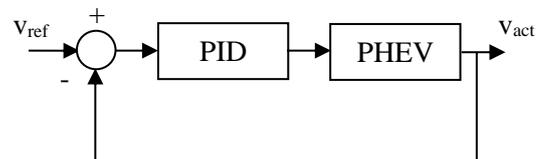
Setelah membuat model PHEV maka selanjutnya adalah membuat kontrol PID untuk *plant* PHEV yang telah dibuat. Persamaan kontrol PID dalam bentuk laplace dijabarkan pada persamaan (1) [14]. Fungsi PID disini adalah untuk mengontrol Kecepatan Model PHEV agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Pada penelitian ini, Kecepatan referensi akan dibatasi hanya satu nilai saja yaitu 50 km/jam. Jadi Kecepatan referensi tidak berubah-ubah.

$$U(s) = K_p(E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) + T_d s E(s)) \quad (1)$$

dimana:

- $K_p$  = konstanta proporsional
- $T_i$  = waktu integral
- $T_d$  = waktu diferensial
- $U(s)$  = sinyal kontrol
- $E(s)$  = sinyal eror

Pemilihan konstanta PID penting sekali dalam proses ini karena akan menentukan bentuk respon sistem [15]. Penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah, diantaranya adalah PHEV ini dianggap tidak mengalami gangguan jalan apapun, baik dalam bentuk jalan berlubang, hambatan angin, gundukan, dan lain sebagainya. Selain itu penelitian ini menganggap bahwa PHEV hanya berjalan di jalan atau jalur yang Lurus saja. Jadi dalam hal ini PHEV tidak akan sama sekali mengalami gangguan di jalan raya. Blok diagram kontrol PID yang digunakan untuk mengatur Kecepatan Model PHEV dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kontrol PID

3. Pembuatan Metode *Tuning* PID

a. Metode Ziegler Nichols (ZN)

Metode ini merupakan metode *tuning* PID yang ditemukan oleh Ziegler dan Nichols tahun 1942 [16]. Metode ini memiliki 2 cara dalam melakukan *tuning* PID yaitu metode osilasi dan kurva reaksi. Perbedaan kedua metode tersebut terletak pada blok diagram sistem apakah *loop* terbuka atau *loop* tertutup. Pada metode

kurva reaksi, sistem akan diletakkan pada *loop* terbuka. Kemudian sistem akan diberikan input fungsi tangga satuan. Dari respon ini akan dilihat berapa nilai L (dead time) dan T (waktu tunda) kemudian akan dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai konstanta P, I, D. sesuai dengan Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Metode ZN Kurva Reaksi

Type	Kp	Ti	Td
P	T/L	~	0
PI	0.9T/L	L/0.3	0
PID	1.2T/L	2L	0.5L

Berbeda dengan metode kurva reaksi, metode isolasi, sistem akan diletakkan pada *loop* tertutup. Pada metode ini, parameter integrator dibuat menjadi tak terhingga dan parameter diferensial dibuat menjadi 0. Parameter proporsional dinaikkan sedikit demi sedikit sampai respon sistem menjadi beresilasi. Nilai Kp saat ini disebut dengan Ku. Kemudian dari respon ini akan dihitung nilai periode osilasi (Pu) lalu dihitung konstanta P, I, D sesuai dengan Tabel 2.

Tabel 2. Metode CC Osilasi

Type	Kp	Ti	Td
P	0.5 Ku	~	0
PI	0.45Ku	0.5Pu	0
PID	0.6Ku	0.5Pu	0.125Pu

b. Metode Cohen Coon (CC)

Metode CC ini merupakan metode *tuning* PID yang hampir mirip dengan metode ZN. Metode ini juga terbagi menjadi 2 yaitu metode kurva reaksi dan metode osilasi. Metode kurva reaksi hampir sama dengan metode ZN, tetapi perhitungan *tuning*-nya berbeda. Perhitungan CC untuk metode kurva reaksi sesuai dengan Tabel 3.

Kemudian untuk metode osilasi, metode CC memiliki kelebihan dibandingkan metode ZN, yakni dapat digunakan untuk *plant* atau sistem yang tidak diperbolehkan untuk osilasi [17]. Metode CC ini juga dinamakan sebagai metode *quarter amplitude decay*. Sistem tetap akan diletakkan pada *loop* tertutup dengan blok diagram seperti pada Gambar 5. Nilai parameter proporsional akan

dinaikkan sampai respon sistem berbentuk *quarter ampiltude decay*. Respon ini merupakan respon transien dimana amplitudo pertamanya memiliki perbandingan 0.25 dimana waktu yang dibutuhkan antara amplitudo pertama dan kedua adalah sebesar Tp. Setelah nilai-nilai yang dibutukan diketahui maka nilai konstanta P, I, D dapat dihitung berdasarkan Tabel 2 sebelumnya, dimana Tp sama dengan Pu di Tabel 2.

c. Metode Bat Algorithm (BA)

Metode BA ini merupakan salah satu algoritma metaheuristik terbaru yang ditemukan oleh Xin She pada tahun 2012 [18]. Algoritma ini ditemukan dengan melihat kelelawar dalam mencari mangsa. Dalam mencari mangsa, kelelawar harus dapat membedakan makanan dan rintangan. Selain itu kelewar juga harus dapat memperkirakan jarak terhadap mangsa. Kemampuan kelewar yang kompleks ini disebut *echolocation*. Kemampuan inilah yang diterjemahkan menjadi sebuah algoritma. BA ini memiliki beberapa persamaan dasar yakni pada persamaan (2)-(7)

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta_i \tag{2}$$

$$v_i(t) = v_i(t - 1) + (x_i(t - 1) - x^*)f_i \tag{3}$$

$$x_i(t) = x_i(t - 1) + v_i(t) \tag{4}$$

$$x_i(t) = p_i(t - 1) + \varepsilon A_i(t - 1) \tag{5}$$

$$A_i(t) = \alpha A_i(t - 1) \tag{6}$$

$$r_i(t) = r_i(0)[1 - \exp(-\gamma(t - 1))] \tag{7}$$

Dimana:

- $f_i$  = frekuensi yang dicari
- $f_{min}$  = frekuensi yang dicari
- $f_{max}$  = frekuensi yang dicari
- $\beta$  = vektor acak
- $v_i$  = Kecepatan yang dicari
- $x_i$  = posisi yang dicari
- $r_i$  = *pulse rate*
- $p_i$  = solusi optimal global
- $A_i$  = *loudness*
- $\alpha$  = konstanta
- $\varepsilon$  = konstanta
- $\gamma$  = konstanta

Tabel 3. Tuning PID Metode Kurva Reaksi

Tipe	Kp	Ti	Td
P	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{L}{T} \right) \right]$	-	-
PI	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ 0.9 + \frac{1}{12} \left( \frac{L}{T} \right) \right]$	$L \left[ \frac{30 + 3 \left( \frac{L}{T} \right)}{9 + 20 \left( \frac{L}{T} \right)} \right]$	-
PID	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ \frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left( \frac{L}{T} \right) \right]$	$L \left[ \frac{32 + 6 \left( \frac{L}{T} \right)}{13 + 8 \left( \frac{L}{T} \right)} \right]$	$\frac{4}{11 + 2 \left( \frac{L}{T} \right)}$

Berikut ini menjelaskan langkah-langkah eksekusi dari algoritma kelelawar standar.

**Langkah 1:**

inisialisasi Kecepatan, posisi, serta parameter acak untuk semua kelelawar untuk menghasilkan frekuensi dengan Persamaan (2).

**Langkah 2:**

Update Kecepatan dan posisi semua kelelawar dengan Persamaan (3) dan (4).

**Langkah 3:**

Untuk setiap kelelawar, buat angka acak ( $0 < \text{rand1} < 1$ ). Perbarui posisi dan hitung nilai fitness untuk kelelawar yang sesuai dengan Persamaan (5) jika  $\text{rand1} < \text{ri}(t)$ .

**Langkah 4:**

Untuk setiap kelelawar, buat angka acak ( $0 < \text{rand2} < 1$ ). Perbarui  $A_i(t)$  dan  $\text{ri}(t)$  masing-masing dengan Persamaan (6) dan (7), jika  $\text{rand2} < A_i(t)$  dan  $f(\text{xi}(t)) < f(p(t))$ .

**Langkah 5:**

Urutkan setiap individu berdasarkan nilai fitness dan simpan posisi terbaik.

**Langkah 6:**

Kalau kondisi terpenuhi maka algoritma telah selesai, kalau tidak, lanjutkan ke Langkah 2.

4. Pengukuran Performansi

Setelah melakukan pemilihan konstanta PID secara tepat maka diperlukan suatu ukuran yang menentukan bahwa mana metode *tuning* PID yang terbaik. Ada 4 ukuran performansi yang digunakan pada penelitian ini. Keempat ukuran performansi tersebut adalah *Integral of Squared Error* (ISE), *Integral of Absolute Error* (IAE), *Integral of Time Squared Error* (ITSE), *Integral of Time Absolute Error* (ITAE) yang dihitung dengan persamaan (8)-(11).

$$ISE = \int_0^{\infty} \{e(t)\}^2 dt \quad (8)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (9)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t \{e(t)\}^2 dt \quad (10)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (11)$$

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang telah dijabarkan sebelumnya, penelitian ini akan membandingkan 3 metode *tuning* PID untuk pengaturan Kecepatan pada PHEV. Pemilihan metode PID yang terbaik akan dilakukan dengan menghitung nilai performansi pada respon sistem yang terbentuk. Kriteria itu meliputi ISE, IAE, ITSE, dan ITAE. Semua metode ini akan dilakukan secara simulasi menggunakan simulink MATLAB R2015A. Hasil dari masing-masing metode yang telah diciptakan adalah sebagai berikut:

a. Metode Ziegler Nichols (ZN)

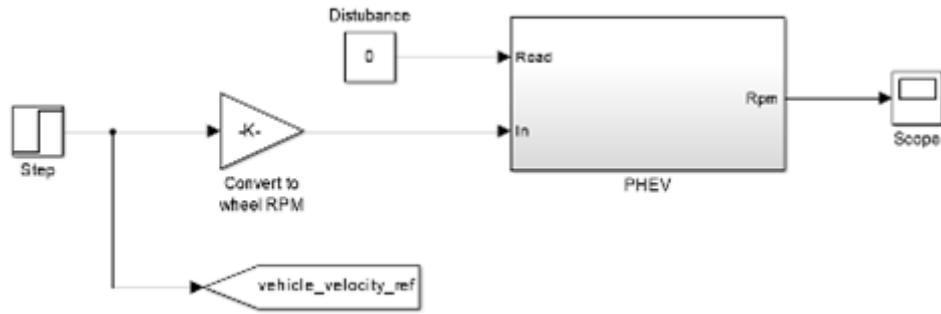
Metode Ziegler Nichols yang dipakai pada penelitian ini menggunakan metode ZN dengan metode kurva reaksi. Pada metode ini, PHEV akan dimasukkan ke dalam blok diagram loop terbuka dengan input berupa input step dengan nilai akhir 10 m/s dengan step time 20 s. Simulasi yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 7.

Hasil respon sistem ketika diberi input step dengan parameter seperti diatas dapat dilihat pada Gambar 8. Dari Gambar 8 maka dapat ditentukan *dead time* L sebesar 0.46 s dan waktu tunda T sebesar 41.47s. Jika kontrol yang digunakan adalah kontrol PID, maka nilai konstanta P, I, dan D sesuai dengan persamaan (12)-(13). Konstanta ini akan dimasukkan pada simulasi pada Gambar 9 dengan respon yang dihasilkan seperti pada Gambar 10.

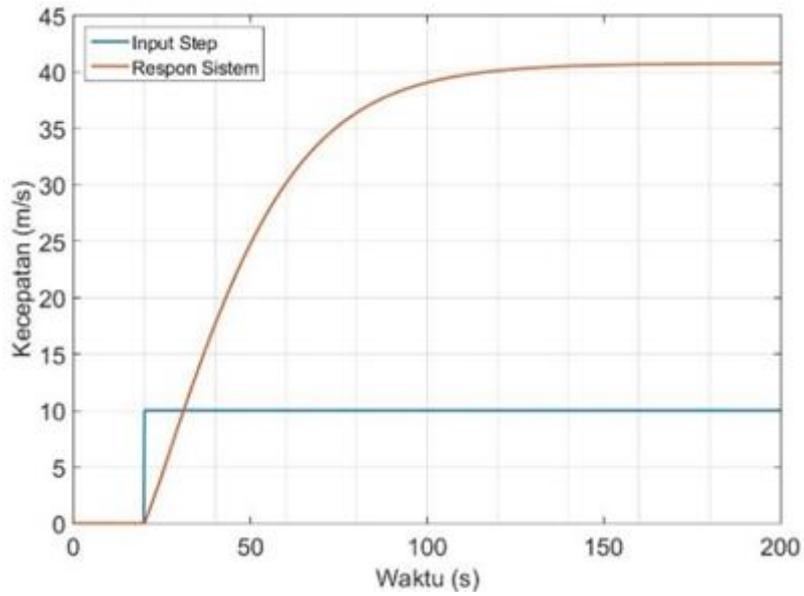
$$K_p = 1.2xT/L = 108.2 \quad (12)$$

$$K_i = K_p/2xL = 117.6 \quad (13)$$

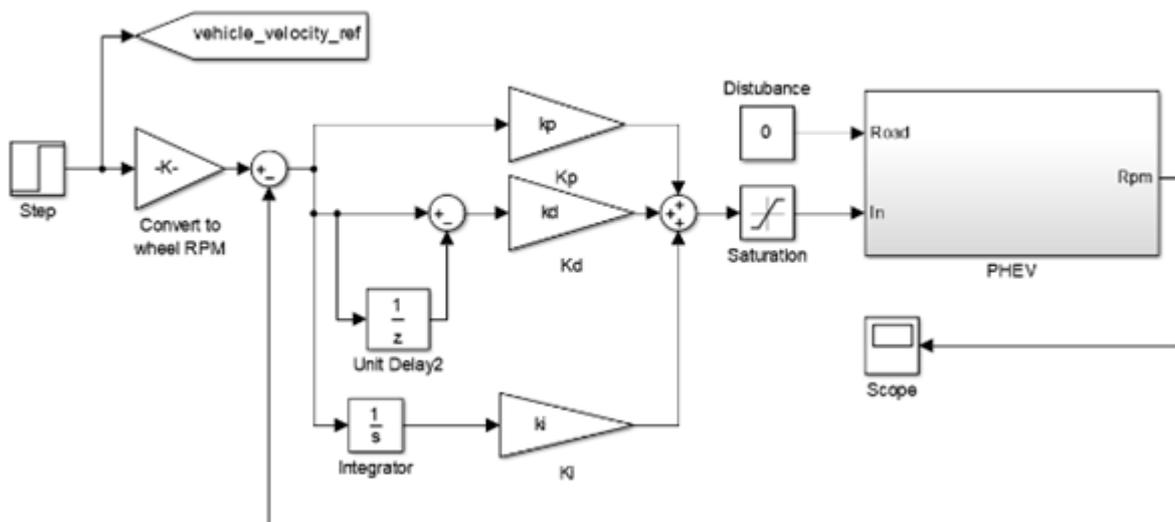
$$K_d = K_p x 0.5xL = 24.9 \quad (14)$$



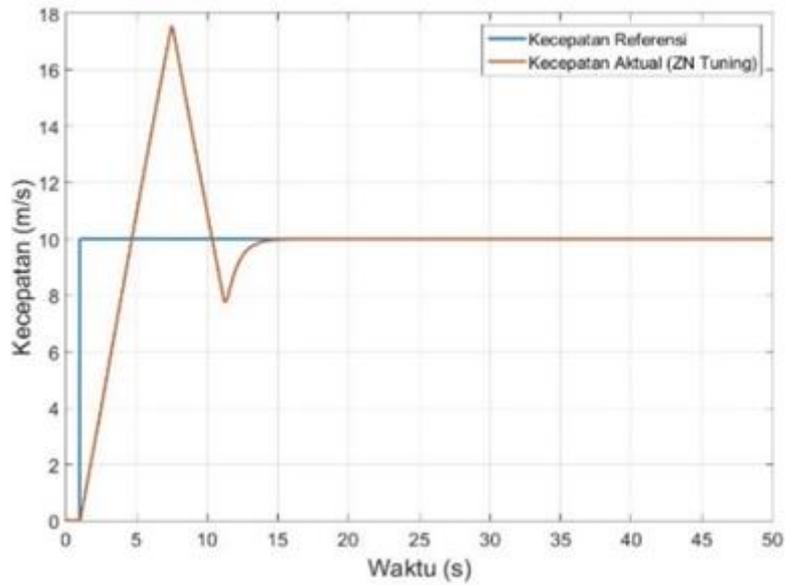
Gambar 7. Simulasi Metode Kurva Reaksi



Gambar 8. Respon Sistem Metode Kurva Reaksi



Gambar 9. Simulasi Kontrol PID



Gambar 10. Respon Sistem Kontrol PID Metode ZN

b. Metode Cohen Coon (CC)

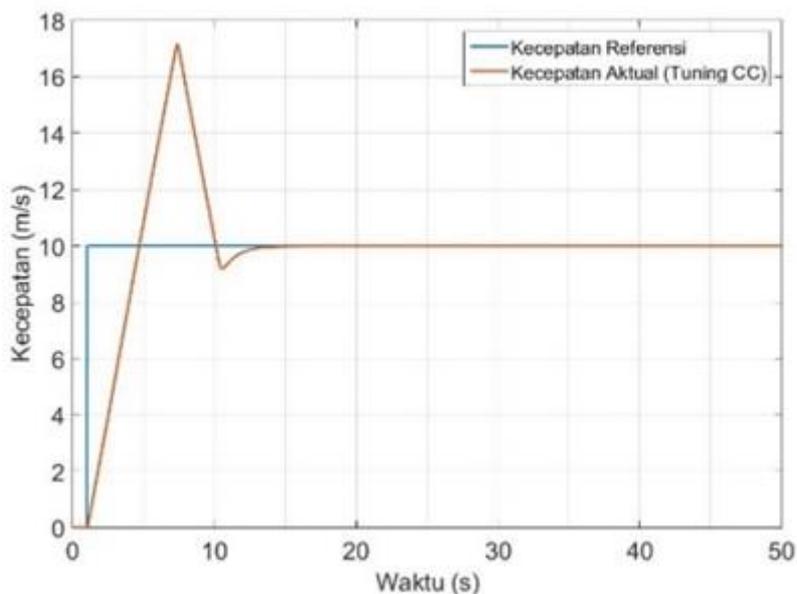
Pada penelitian ini, *tuning* CC yang dipakai adalah metode kurva reaksi. Metode ini sama persis dengan metode kurva reaksi pada metode ZN, tetapi rumus yang dipakai berbeda. Rumus yang dipakai pada metode CC ini sesuai dengan Tabel 3 dengan parameter L dan T sama seperti Metode ZN serta K=1 karena tidak memakai penguatan. Jika pada penelitian ini kita memakai kontrol PID maka perhitungan konstanta PID-nya sesuai dengan persamaan (15)-(17). Dengan memasukkan nilai P, I, dan D yang telah dihitung pada

simulasi kontrol PID seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 maka sistem akan menghasilkan respon seperti pada Gambar 11.

$$K_p = \frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ \frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left( \frac{L}{T} \right) \right] = 120.15 \quad (15)$$

$$K_i = K_p / L \left[ \frac{32 + 6 \left( \frac{L}{T} \right)}{13 + 8 \left( \frac{L}{T} \right)} \right] = 106.61 \quad (16)$$

$$K_d = K_p x \frac{4}{11 + 2 \left( \frac{L}{T} \right)} = 43.6 \quad (17)$$



Gambar 11. Respon Sistem Kontrol PID Metode CC

c. Metode Bat Algorithm (BA)

Metode BA ini akan mencari nilai konstanta P, I dan D dengan fungsi objektif berupa nilai ITAE. Nilai eror dihasilkan oleh kontrol PID diharapkan terjadi seminimal mungkin. Jadi BA akan mencari nilai konstanta P, I, dan D yang akan menghasilkan nilai ITAE yang minimum.

Penelitian ini akan menggunakan BA dengan beberapa parameter sebagai berikut:

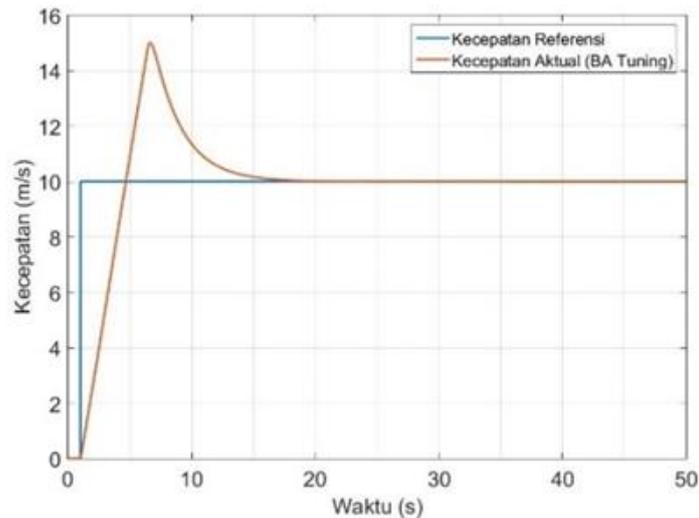
1. Jumlah Kelelawar = 25
2.  $f_{\min} = 0$
3.  $f_{\max} = 100$
4. Iterasi = 5
5.  $\alpha = 0.9$
6.  $\gamma = 0.9$
7.  $\varepsilon = 0.5$
8.  $r_i(0) = 0.6$

Simulasi yang digunakan pada metode BA ini sama seperti Gambar 9. Ketika dijalankan, maka BA akan melakukan iterasi atau pengulangan sesuai dengan parameter tersebut. Nilai PID yang telah ditemukan setelah melakukan iterasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan (16)-(18). Setelah nilai P, I, dan D ketemu, kemudian nilai ini akan dimasukkan ke dalam simulasi kontrol PID seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 maka respon sistem yang dihasilkan seperti pada Gambar 12. Jika dari semua metode tersebut, respon sistem dijadikan 1 maka akan menampilkan gambar seperti pada Gambar 13.

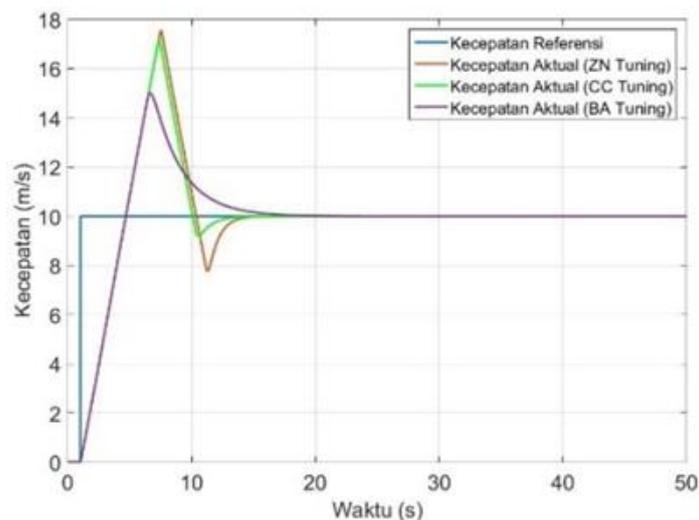
$$K_p = 75.13 \tag{16}$$

$$K_i = 29.3 \tag{17}$$

$$K_d = 52.4 \tag{18}$$



Gambar 12. Respon Sistem Kontrol PID Metode BA



Gambar 13. Respon Sistem Kontrol PID Metode ZN,CC, & BA

Tabel 4. Hasil Pengujian

Tipe	IAE	ISE	ITSE	ITAE	Total
ZN	43.7	241.2	1125.7	246.9	1657.5
CC	39.6	221.8	950.7	204.1	1416.2
BA	37.1	180	636.4	193.8	1047.3

Dari 3 metode tersebut, nilai performansi akan dihitung untuk masing-masing metode. Nilai performansi masing-masing metode dapat dilihat pada Tabel 4. Dari Tabel 4 dapat kita lihat bahwa BA memiliki total indeks performansi paling kecil sehingga BA dapat dikatakan merupakan metode *tuning* PID yang terbaik dalam pengaturan Kecepatan Model PHEV. Hal ini selaras dengan penelitian lain dimana metode BA ini digabungkan dengan Kontrol PID dalam menstabilkan frekuensi dari pembangkit mikrohidro [19]. Metode ini menjadi metode yang lebih baik daripada metode lainnya karena BA merupakan salah satu algoritma metaheuristik yang mencari nilai konstanta kontrol PID dengan berbasis populasi yang akan bersama sama mencari solusi atau kandidat konstanta PID yang cocok, sehingga BA dapat mencari solusi yang optimal dengan nilai indeks performansi yang terbaik.

#### IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, kontrol PID digunakan untuk mengatur Kecepatan Model PHEV. Konstanta PID ini akan di-*tuning* dengan menggunakan metode Ziegler Nichols (ZN), Cohen Coon (CC), dan algoritma kelelawar (BA). Hasil menunjukkan bahwa BA merupakan metode *tuning* yang terbaik dimana memiliki indeks performansi yang lebih kecil dibandingkan dengan metode lainnya. Dari sini dapat disimpulkan bahwa algoritma kelelawar merupakan metode *tuning* PID terbaik diantara metode lainnya dalam pengaturan Kecepatan pada Model PHEV.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.A. Rahman, "Pembuatan Mobil Listrik Untuk Solusi Transportasi Ramah Lingkungan (Mobil Baskara)" *Jurnal Riset Daerah*, vol. 12, no. 2, pp. 1819–1837, 2013.
- [2] Ria Bagas, dan Syaiful, "Efek Pemakaian *Low Purity Methanol* Terhadap Kepekatan Asap (*Smoke Opacity*) Pada Mesin Diesel Dengan Sistem EGR" in *Proceedings Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, pp. 7–12, 2013.
- [3] Riza Pratama, dan Luthfi Parinduri, "Penanggulangan Pemanasan Global" *Buletin Utama Teknik*, vol. 15, no. 1, pp. 91–95, 2019.
- [4] Dessy Gusnita, "Green Transport: Transportasi Ramah Lingkungan Dan Kontribusinya Dalam Mengurangi Polusi Udara" *Berita Dirgantara*, vol. 11, no. 2, pp. 66–71, 2010.
- [5] Anisa Endarwati, Rusdhianto Effendie, dan Ali Fatoni, "Perancangan Pengaturan Kecepatan pada Simulator *Paralel Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) Menggunakan Metode State Dependent–Linear Quadratic Regulator" *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 3, no. 1, pp. 7–12, 2014.
- [6] V.N. Febrianto, "Aplikasi Kontrol PID untuk Pengaturan Putaran Motor DC pada Alat Pengepres Adonan Roti (*Screw Conveyor*)", *Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya*, pp. 1–6., 2014.
- [7] Triyanto Didit, Turahyo, dan Zaini, "Pengaturan Kestabilan Putaran Motor DC Dengan Kontrol PID Ziegler Nichols Menggunakan Mikrokontroler Arduino" *Jurnal Teknologi Terbaru*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2019.
- [8] M.N. Masrukhan, et al, "Optimasi Kecepatan Motor Dc Menggunakan PID Dengan *Tuning Ant Colony Optimization* (ACO) Controller" in *Proceedings SINTIA*, pp. B49–B52, 2016.
- [9] Khairy Sayed, Hossam Hassan Ali, and Emad H. El-Zohri, "An Integral Square Error-Based Model Predictive Controller For Two Area Load Frequency Control" *Advances in Energy Research*, vol. 5, no. 1, pp. 79–90, 2017.
- [10] Mesrika Purba, Susatyo Handoko, dan Mochammad Facta, "Aplikasi Optimisasi Koloni Semut Pada Domain Kontinu Untuk Penentuan Parameter PID dalam Kontrol Kecepatan Motor Arus Searah" *Transient*, vol. 5, no. 3, pp. 373–380, 2016.
- [11] Itmi Hidayat Kurniawan, dan Latiful Hayat, "Perbandingan Metode Tuning PID pada Pengaturan Kecepatan Motor DC Berbasis Programable Logic Controller" *Techno*, vol. 17, no. 1, pp. 33–42, 2016.
- [12] M. M. Gulfar, et al, "Adaptive Fuzzy Based Optimized Proportional-Integral Controller to Mitigate The Frequency Oscillation of Multi-Area Photovoltaic Thermal System" *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 1–20, 2020.
- [13] Mathworks Corporate Headquarters, "Parallel Hybrid Transmission" [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/examples/parallel-hybrid-transmission.html>. [Accessed: 19-Mar-2022].
- [14] Danu Wisnu, Arif Wahjudi, dan Hendro Nurhadi, "Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-gun Kaliber 20mm" *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 512–516, 2016.
- [15] Muhammad Nasir Athoillah, et al, "Rancang Bangun Pid Controller Dengan Tuning Ziegler Nichols untuk Pengendalian Posisi Sudut Motor DC" *Jurnal Teknik Elektro*, vol.10, no. 2, pp. 537–545, 2021.
- [16] Panji Saka Gilapasa, Sigit Priyambodo, dan Subandi, "Sistem Pembelajaran Kontrol PID (Proporsional Integral Derivatif) Pada Pengatur Kecepatan Motor DC" *Jurnal Elektrikal*, vol. 3, no. 1, pp. 72–77, 2016.
- [17] P. H. Suharti, et al, "Aplikasi Tuning Metode Cohen-Coon pada Pengendali pH di Tangki Netralisasi, Unit Pengolahan Limbah" *Eksergi*, vol.16, no. 2, pp. 35–41, 2019.
- [18] Veri Julianto, "Penerapan Hybrid *Bat Algorithm* (BA) dengan Differential Evolution (DE) untuk Mengoptimasi Model Multiobjektif" *Jurnal Sains & Informatika*, vol. 2, no. 2, pp. 130–135, 2016.
- [19] Ima Tri Yuniahastuti, dan Churnia Sari, "Pengaturan Pada Pembangkit Mikrohidro Menggunakan PID-NBA (*Novel Bat Algorithm*)" in *Proceedings Seminar Nasional Teknologi Informasi & Ilmu Komputer*, pp. 75–82, 2020.