

Simulasi PMDC Menggunakan PID dengan *Tuning* Ziegler Nichols dan Algoritma Genetika

Dieta Wahyu Asry Ningtias, Syafrudi

Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
E-mail: dieta.w.a@mail.ugm.ac.id

Naskah Masuk: 15 Februari 2022; Diterima: 02 Maret 2022; Terbit: 25 Maret 2022

ABSTRAK

Abstrak - Kecepatan motor DC Permanen Magnet (PMDC) dapat dikontrol menggunakan *Proportional Integral Derivative* (PID) kontroler. PID merupakan sebuah pengontrol yang paling banyak digunakan dalam bidang sistem kontrol di dunia industri yang dapat meningkatkan respon dinamik, mengurangi *steady-state error*, dan meningkatkan performa motor PMDC. Parameter aksi kontrol berupa K_P , K_I , dan K_D dapat diperoleh melalui *tuning*. *Tuning* Ziegler Nichols dipilih karena *rising time* yang cepat dan *steady-state error* yang kecil. Sedangkan *tuning* Algoritma Genetika dipilih karena menciptakan K_P , K_I , dan K_D terbaik secara otomatis. Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimen dengan membandingkan performa antara *tuning* Ziegler Nichols dan Algoritma Genetika. Parameter performa motor PMDC berupa *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *steady-state error*. Kontrol terbaik dari *tuning* Ziegler Nichols adalah PID dengan nilai $K_P = 1,2$; $K_I = 6,108424536$; dan $K_D = 0,058935$ yang menghasilkan respon kecepatan dengan nilai *overshoot* 9,25%; *rise time* 0,04 detik; *settling time* 0,9 detik; dan *steady-state error* 0,008%. Sedangkan kontrol terbaik dari *tuning* Algoritma Genetika adalah PID dengan nilai $K_P = 0,426$; $K_I = 4,468$; dan $K_D = 0$ yang menghasilkan respon kecepatan dengan nilai *overshoot* 0%; *rise time* 0,4 detik; *settling time* 0,4 detik; dan *steady-state error* 0,00016%. Sehingga kontrol terbaik adalah kontrol PID dengan metode *tuning* Algoritma Genetika.

Kata kunci: Motor PMDC, PID, Ziegler Nichols, Algoritma Genetika

ABSTRACT

Abstract – Speed Permanent Magnet DC motor (PMDC) can be controlled by a Proportional Integral Derivative (PID) controller. PID is a widely used controller in industrial control systems that can increase the dynamic response, reduce errors or steady-state error, and improve the performance of the motor PMDC. Parameters control the form of the action, K_P , K_I , and K_D can be obtained by tuning Ziegler Nichols and Genetic Algorithm. The Ziegler Nichols was chosen because of the quickly rising time and low steady-state error. In comparison, the Genetic Algorithm was chosen because it creates the K_P , K_I , and K_D best automatically. The research method used was experimental research methods by comparing the performance between tuning Ziegler Nichols and Genetic Algorithms. Motor PMDC performance parameter form overshoot, rise time, settling time, and steady-state error. The best control of tuning Ziegler Nichols is PID with $K_P = 1.2$; $K_I = 6.108424536$; and $K_D = 0.058935$, which generates the response speed with value overshoot 9.25%; rise time 0.04 seconds; settling time 0.9 seconds; and steady-state error 0.008%. While the best control of tuning Genetic Algorithms is PID with $K_P = 0.426$; $K_I = 4.468$; and $K_D = 0$ which generates the response speed with value overshoot 0%; rise time 0.4 seconds; settling time 0.4 seconds; and steady-state error 0.00016%. So the best control is PID with tuning methods of Genetic Algorithms.

Keywords: Motor PMDC, PID, Ziegler Nichols, Genetic Algorithm

Copyright © 2022 Universitas Muhammadiyah Jember.

1. PENDAHULUAN

Pada proses produksi hingga distribusi di industri memerlukan pengendalian otomatis untuk meningkatkan efisiensi waktu dan tenaga. Kontrol otomatis dapat dikendalikan oleh aktuator. Aktuator adalah *driver* yang menjalankan mesin mekanik misalnya motor. Motor terbagi menjadi dua jenis yaitu motor DC (*Direct Current*) dan AC (*Alternating Current*). Motor DC banyak digunakan di industri karena pengendalian atau kontrolnya yang lebih mudah dibandingkan motor AC [1]. Motor DC jenis *Permanent Magnet DC motor* (PMDC) sering digunakan di industri karena memiliki beberapa kelebihan seperti ukuran yang kecil, biaya yang rendah, tidak memerlukan arus yang tinggi dan tidak memerlukan eksitasi pada saat

starting, serta efisiensi yang tinggi [2]. Namun kecepatan motor PMDC harus dikendalikan agar motor dapat berputar stabil sesuai dengan *set point* atau kecepatan yang diinginkan [3].

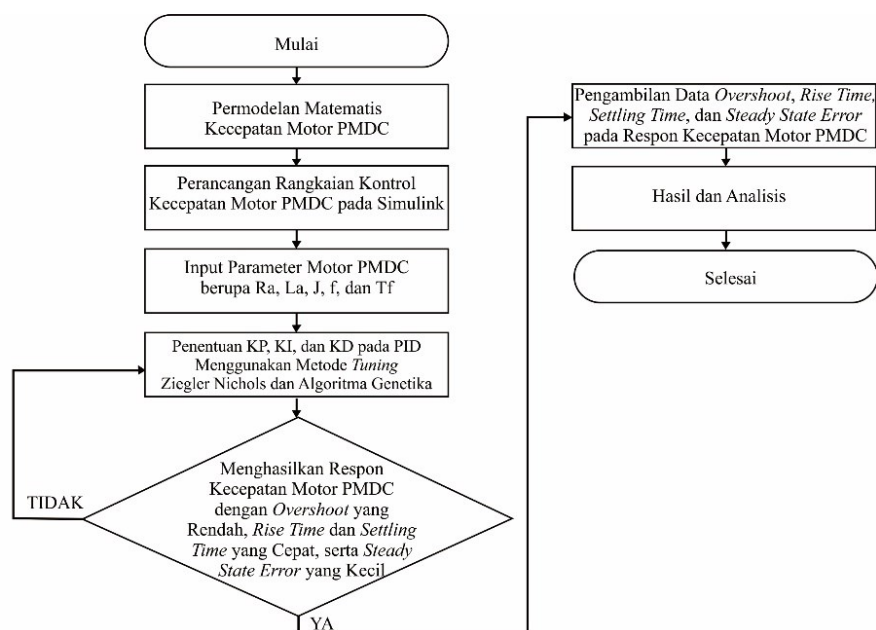
Kecepatan motor PMDC dapat dikontrol menggunakan *Proportional Integral Derivative* (PID). PID merupakan kontroler yang paling banyak digunakan dalam bidang sistem kontrol di dunia industri. Kontroler PID digunakan untuk meningkatkan respon dinamis dan mengurangi *error* [4]. PID memiliki keunggulan dibandingkan kontroler lainnya yaitu kontrol yang cepat, *settling time* yang rendah, dan biaya operasional yang murah [1]. Kontrol PID pada PMDC salah satunya adalah pengontrolan kecepatan. Hal ini untuk meningkatkan performa PMDC agar mendapatkan hasil performa yang lebih baik [5]. Parameter performa PMDC dapat dilihat dari *overshoot*, *rise time*, *settling time* dan *steady-state error* berdasarkan grafik respon kecepatan.

Pada desain kontroler PID diperlukan *tuning* kontroler untuk menentukan parameter aksi kontrol *Proportional*, *Integratif*, dan *Derifatif* [6][7]. Metode *tuning* bermacam-macam antara lain Ziegler Nichols (ZN), Algoritma Genetika atau *Genetic Algorithm* (GA), *Fuzzy Gain Scheduling* (FGS), Metode Tyreus – Luyben, Metode *Damped Oscillation*, Metode C-H-R, Metode Cohen-Coon, Metode Fertick, Metode Ciancone dan Marline, dan lain-lain [8][12]. Jika dibandingkan dengan metode *tuning* lainnya, metode ZN dan GA dapat memberikan hasil yang baik pada pencapaian *set point*. Sedangkan Algoritma Genetika dapat melakukan optimasi dalam menciptakan nilai K_P , K_I , dan K_D terbaik [13].

Tujuan penelitian ini yaitu menerapkan metode Ziegler Nichols (ZN) dan *Genetic Algorithm* (GA) untuk pendugaan atau *tuning* parameter motor DC dan kontrol kecepatan motor menggunakan kontroler P, PI, dan PID. Kemudian membandingkan metode tersebut untuk mendapatkan hasil terbaik. Parameter estimasi *tuning* ini digunakan dalam desain pengontrol dalam simulasi. *Tuning* metode kontrol PID dengan GA dan ZN dapat diimplementasikan menggunakan simulasi. Simulasi adalah suatu proses yang menyerupai keadaan sebenarnya di mana digunakan untuk mencari hasil yang terbaik dari eksperimen meliputi beberapa variabel [14]. Simulasi dapat menjadi input variabel tertentu untuk melihat bagaimana pengaruh masing-masing variabel terhadap hasil proses simulasi. Simulasi akan menampilkan hasil peningkatan performa PMDC dalam bentuk grafik dan hitungan matematis. Salah satu *software* untuk simulasi adalah MATLAB. MATLAB dipilih karena kesederhanaan dan ketahanan program yang baik. MATLAB dapat digunakan dalam pengaturan kecepatan PMDC [15]. Terdapat fitur pada MATLAB Simulink yang dapat menampilkan respon keluaran sistem yang telah dibuat.

2. METODE PENELITIAN

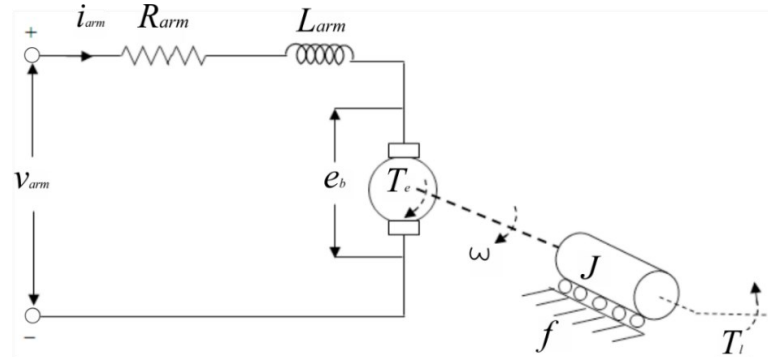
Tujuan penelitian adalah mendapatkan performa terbaik agar kecepatan PMDC sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Pada penelitian ini, kecepatan PMDC dikontrol menggunakan kontrol PID dengan *tuning* ZN dan GA. Kemudian dibandingkan performanya di antara kedua *tuning* tersebut. Performa yang diamati yaitu *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *steady-state error* berdasarkan grafik respon kecepatan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1 Model Matematis PMDC

Penelitian ini menggunakan Motor DC PMDC 1/3HP. Rangkaian motor PMDC sama dengan rangkaian motor DC pada umumnya, namun pada motor PMDC tidak memiliki kumparan eksitasi atau kumparan medan.



Gambar 2. Rangkaian motor PMDC

v_{arm} dan i_{arm} merupakan sumber tegangan dan arus, R_{arm} dan L_{arm} adalah resistansi dan induktansi jangkar, e_b merupakan tegangan terinduksi pada jangkar, T_e dan T_l adalah torsi elektrik dan torsi load, ω adalah kecepatan sudut, J adalah momen inersia, sedangkan f adalah *viscous friction coefficient*.

Rangkaian motor PMDC ditunjukkan pada Gambar 2 tersebut memiliki magnet permanen yang menghasilkan fluks magnetik konstan. Fluks magnetik konstan tersebut juga menghasilkan arus medan yang konstan. Masukan tegangan dan arus motor PMDC menentukan keluaran daya yang diberikan. Pada industri, motor PMDC biasanya digunakan untuk motor listrik, mobil listrik, kursi roda listrik, dan lain-lain. Berdasarkan rangkaian motor PMDC tersebut, maka persamaan differensial sebagai berikut:

$$v_{arm}(t) = L_{arm} \frac{di_{arm}(t)}{dt} + R_{arm}i_{arm}(t) + e_b(t) \quad (1)$$

$$T_e(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + f\omega(t) + T_l(t) \quad (2)$$

$$T_e(t) = K_t i_{arm}(t) \quad (3)$$

$$e_b = \omega(t)K_b \quad (4)$$

Persamaan 1 dan 2 dapat dihitung dengan persamaan 3 dan 4, sehingga menghasilkan:

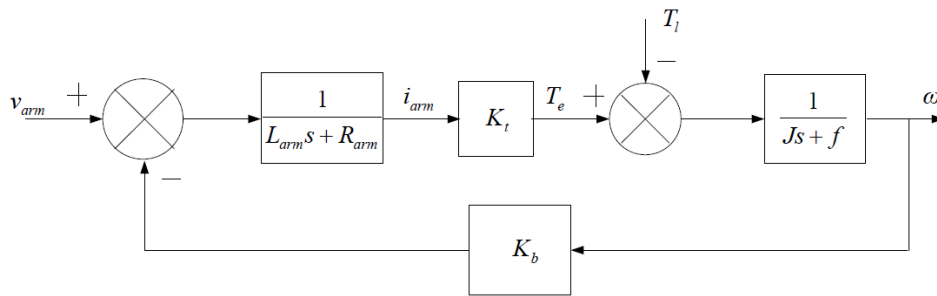
$$\frac{di_{arm}(t)}{dt} = -\frac{R_{arm}}{L_{arm}}i_{arm}(t) - \frac{K_b}{L_{arm}}\omega(t) + \frac{1}{L_{arm}}v_{arm}(t) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K_t}{J}i_{arm}(t) - \frac{f}{J}\omega(t) - \frac{T_l(t)}{J} \quad (6)$$

Blok diagram dari motor PMDC menggunakan transformasi Laplace dengan persamaan 5 dan 6 ditunjukkan pada Gambar 3. Berdasarkan blok diagram tersebut, *transfer function* dari kontrol kecepatan motor PMDC ditunjukkan pada persamaan 7.

$$\frac{\omega(s)}{v_{arm}(s)} = \frac{K_t}{(L_{arm}s + R_{arm})(Js + f) + (K_tK_b)} \quad (7)$$

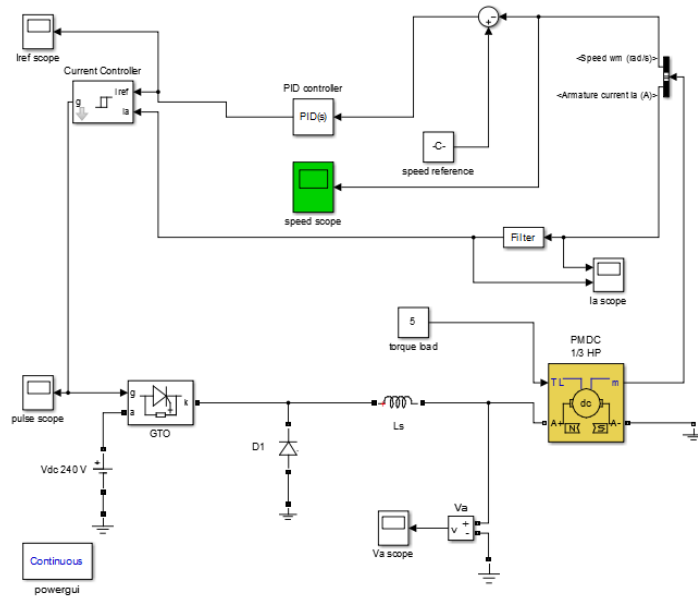
di mana K_t adalah *torque constant* (Nm/Amps) dan K_b adalah *back-electromotive force constant* (volt/rad/sec).



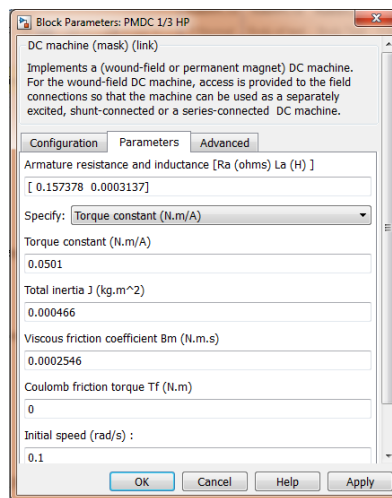
Gambar 3. Blok diagram motor DC

2.2 Rangkaian Kontrol Kecepatan Motor PMDC

Rangkaian kontrol kecepatan motor PMDC ditunjukkan pada Gambar 4. Pada rangkaian tersebut PID controller yaitu kontrol PID menggunakan *tuning* metode ZN dan GA, *scope* digunakan untuk menampilkan hasil atau respon suatu kondisi, GTO sebagai sumber tegangan utama, dan *filter* sebagai penyangkai *noise*. Jenis motor yang digunakan adalah Motor DC PMDC 1/3HP dengan parameter yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Rangkaian kontrol kecepatan motor PMDC



Gambar 5. Parameter motor PMDC

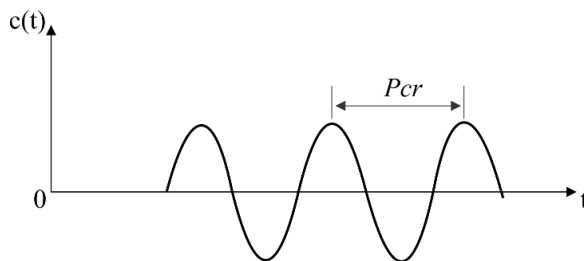
2.3 Kontroler PID

Kontroler Proporsional Integral Derivative (PID) adalah pengontrol yang paling umum di industri. Kontroler PID dapat mengontrol motor PMDC. Kontrol PID pada motor PMDC adalah kontrol kecepatan. Hal ini untuk meningkatkan hasil kinerja yang lebih baik. Performa diukur melalui performa motor PMDC dengan parameter *settling time*, *rise time*, *overshoot*, dan *steady-state error*. Keluaran PID diperoleh dari *error of reference* yang dibandingkan dengan keluaran sistem seperti yang dinyatakan dalam persamaan 8.

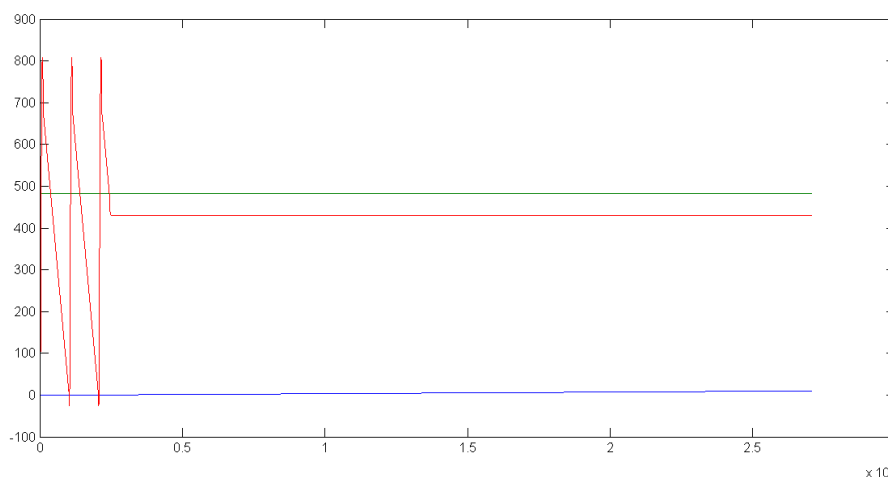
$$vt(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{8}$$

2.4 Ziegler Nichols

Metode *tuning* Ziegler Nichols (ZN) digunakan untuk mendapatkan nilai K_p , K_i , dan K_D . Metode ZN diawali dengan melihat kurva respon keluaran sistem seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan beberapa percobaan, K_p sementara atau K_{cr} yang menghasilkan kurva respon keluaran sistem yang baik yaitu K_{cr} yang bernilai 2 di mana sebelumnya telah dilakukan percobaan menggunakan nilai K_p sementara atau K_{cr} dari 0,5 sampai 3 dengan interval 0,5. Rentang penentuan nilai K_{cr} tersebut didasarkan pada percobaan *trial and error* dikarenakan pada setiap sistem memiliki respon keluaran masing-masing [16]. Berdasarkan percobaan yang telah kami lakukan, K_p sementara atau K_{cr} senilai 2 dapat menghasilkan grafik kecepatan respon dengan periode Gambar 7.



Gambar 6. Respon keluaran sistem



Gambar 7. Respon kecepatan terhadap waktu

Berdasarkan Gambar 7 dapat diamati nilai P_{cr} yaitu jarak antara 2 gelombang. $P_{cr} = 0,596 - 0,203 = 0,329$. Kemudian nilai K_p , T_I , dan T_D dapat dihitung menggunakan rumus pada Tabel 1, dimana hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Nilai K_p , T_I dan T_D [17]

Type Kontroler	K_p	T_I	T_D
P	$0,5 K_{cr}$	\sim	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1P_{cr}}{1,2}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

Tabel 2. Nilai K_p , T_i , dan T_D

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_D
P	1	~	0
PI	0,9	2,120980741	0
PID	1,2	0,19645	0,0491125

Nilai T_i dan T_D yang diperoleh selanjutnya dihitung menggunakan untuk mendapatkan nilai K_I dan K_D menggunakan persamaan 9 dan 10. Hasil perhitungan nilai K_p , K_I , dan K_D ditunjukkan pada Tabel 3.

$$K_I = \frac{K_p}{T_i} \quad (9)$$

$$K_D = \frac{K_p}{T_D} \quad (10)$$

Tabel 3. Nilai K_p , K_I , dan K_D

Tipe Kontroler	K_p	K_I	K_D
P	1	-	-
PI	0,9	0,4243320001	-
PID	1,2	6,1084245336	0,058935

2.5 Algoritma Genetika

Tuning Algoritma Genetika memiliki tujuan yang sama dengan *tuning* Ziegler Nichols yaitu untuk mendapatkan nilai K_p , K_I , dan K_D terbaik sebagai parameter kontrol P, PI, PID, dan pada pengaturan kecepatan motor PMDC. Pada *tuning* Ziegler Nichols menggunakan perhitungan *trial and error* dengan rumus pada Tabel 1 dan 2 untuk mendapatkan nilai K_p , K_I , dan K_D . Sedangkan pada Algoritma Genetika untuk mendapatkan nilai K_p , K_I , dan K_D terbaik sebagai parameter kontrol P, PI, PID didapatkan melalui proses optimisasi dengan parameter Algoritma Genetika yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Proses *tuning* Algoritma Genetika dimulai dari inialisasi populasi yang terdiri dari beberapa individu. Individu tersebut adalah parameter motor PMDC. Dalam masalah estimasi parameter *torque constant*, induktansi jangkar motor, resistansi jangkar motor, momen inersia, *viscous friction coefficient*, *back-electromotive force constant* adalah kromosom. Setelah inialisasi populasi kemudian *fitness value* dievaluasi pada masing-masing individu. Kemudian dilanjutkan proses seleksi, reproduksi, dan mutasi diterapkan untuk membentuk generasi selanjutnya. Proses tersebut diulangi hingga sampai kesalahan minimal atau iterasi maksimum tercapai.

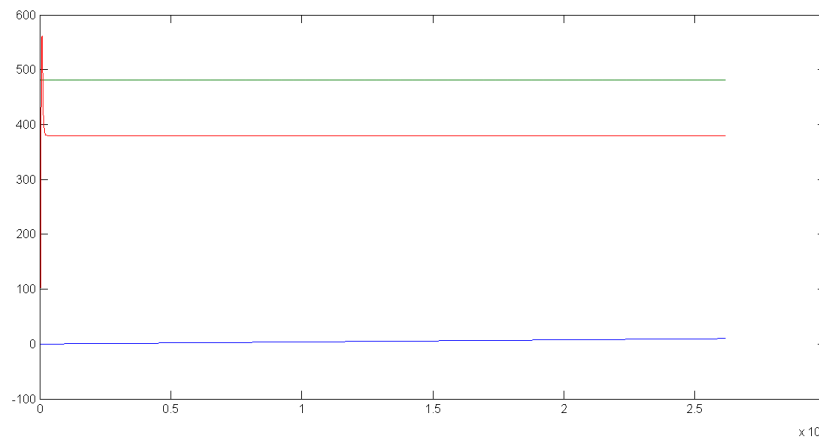
Ukuran atau jumlah dari populasi dan iterasi memengaruhi proses pencarian solusi. Tidak ada ukuran yang ditetapkan sebagai ukuran populasi dan iterasi terbaik untuk segala studi kasus. Apabila ukuran populasi dan iterasi terlalu kecil, maka GA berkemungkinan gagal mendapatkan solusi dengan kualitas tinggi. Sebaliknya, jika ukuran populasi dan iterasi terlalu besar maka dapat menyebabkan komputasi GA menjadi kompleks [18]. Beberapa penelitian melakukan eksperimen *trial error* untuk mengetahui pengaruh ukuran populasi dan iterasi terhadap solusi yang dihasilkan. Eksperimen dengan ukuran populasi dan iterasi pada rentang tertentu mendapatkan solusi yang baik, namun diluar rentang tersebut terjadi penurunan kualitas hasil optimisasi [19] [20]. Sehingga, dalam penelitian ini ukuran populasi dan iterasi dipilih dengan cara eksperimen *trial error*. Kemudian nilai probabilitas *crossover* menggunakan nilai *default* Matlab yaitu 0,8. Telah dilakukan percobaan memilih nilai probabilitas mutasi antara 0,1; 0,2; dan 0,3 [21]. Kemudian pada penelitian ini nilai probabilitas mutasi sebesar 0,3 merupakan yang terbaik. Pada penelitian ini, Algoritma Genetika menggunakan parameter yang terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter Algoritma Genetika

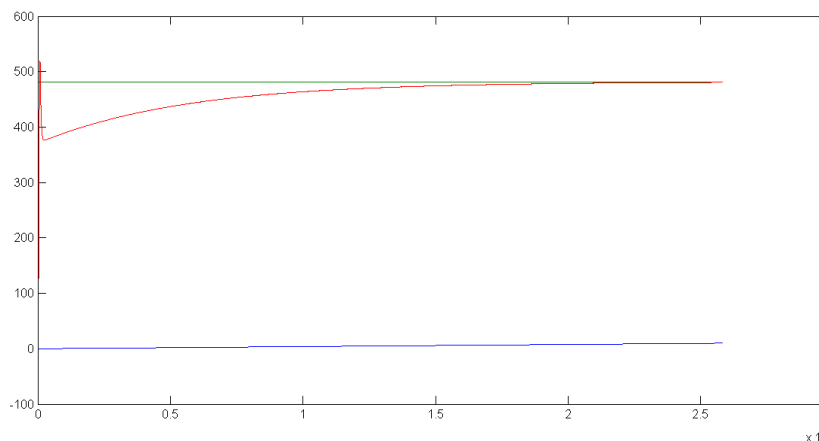
Parameter	Nilai
Populasi	25
Iterasi	25
Probabilitas <i>Crossover</i>	0,8
Probabilitas Mutasi	0,3

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

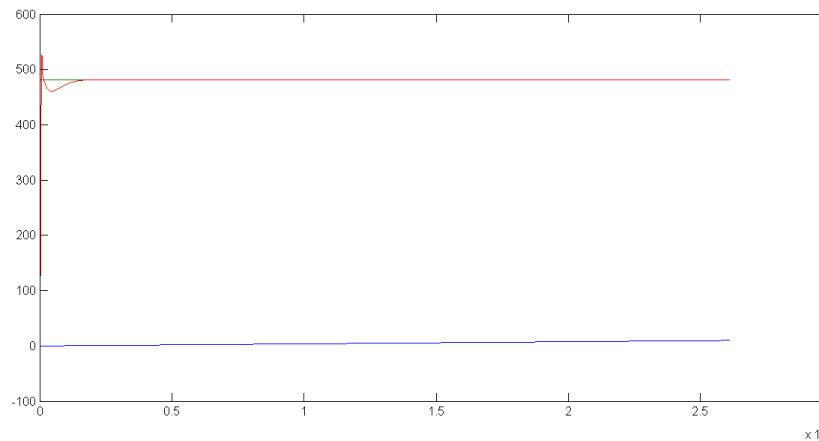
Penelitian melakukan kontrol kecepatan motor PMDC menggunakan dua metode dalam *tuning* PID yaitu Ziegler Nichols dan Algoritma Genetika. Performa motor PMDC dengan menggunakan Ziegler Nichols dapat diamati pada Gambar 8 hingga Gambar 10 melalui hasil pengamatan dari *overshoot* terkecil, *rise time* dan *settling time* tercepat, serta *steady-state error* terkecil. Berdasarkan Tabel 5 dapat diketahui bahwa nilai *overshoot* terkecil yaitu 9,25%, *rise time* tercepat 0,03 detik, *settling time* tercepat 0,17 detik, dan *steady-state error* terkecil 0,008%. ZN pada penelitian memperoleh hasil performa terbaik seperti ditunjukkan pada Gambar 10 yaitu menggunakan kontrol PID.



Gambar 8. Respon kecepatan Ziegler Nichols – P Controller



Gambar 9. Respon kecepatan Ziegler Nichols – PI Controller



Gambar 10. Respon kecepatan Ziegler Nichols – PID Controller

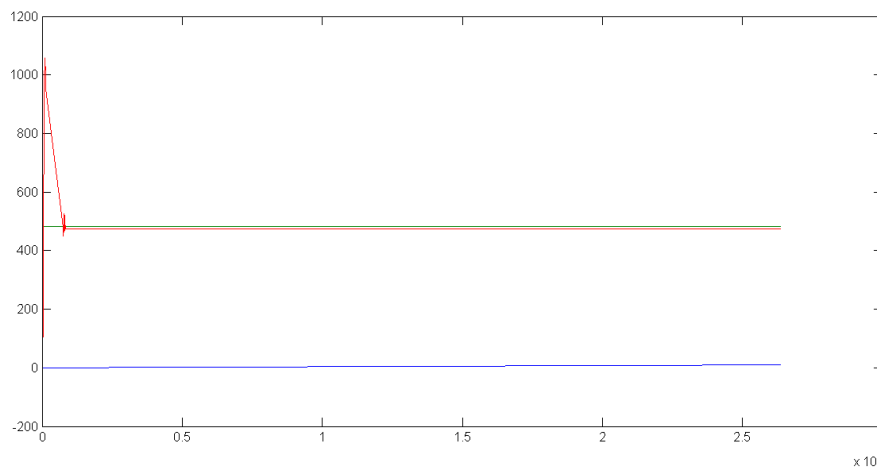
Tabel 5. Performa Motor PMDC Menggunakan *Tuning* Ziegler Nichols

Kontroler	K _P	K _I	K _D	Overshoot (%)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Steady-State Error (%)
P	1	-	-	47,62	0,03	0,17	21,09
PI	0,9	0,43	-	21,03	0,04	9,6	0,21
PID	1,2	6,11	0,06	9,25	0,04	0,9	0,008

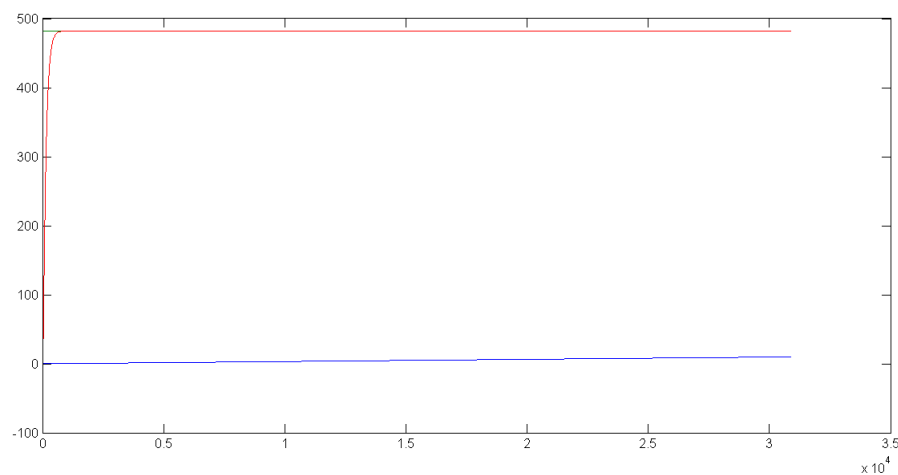
Sedangkan performa motor PMDC tuning Algoritma Genetika yang ditunjukkan pada Gambar 11 hingga Gambar 13 juga dapat diamati *overshoot* terkecil, *rise time* dan *settling time* tercepat, serta *steady-state error* terkecil. Berdasarkan Tabel 6 dapat diketahui bahwa nilai *overshoot* terkecil adalah 0%, *rise time* tercepat 0,03 detik, *settling time* tercepat 0,35 detik, dan *steady-state error* yaitu 0,00016%.

Tabel 6. Performa motor PMDC menggunakan *tuning* Algoritma Genetika

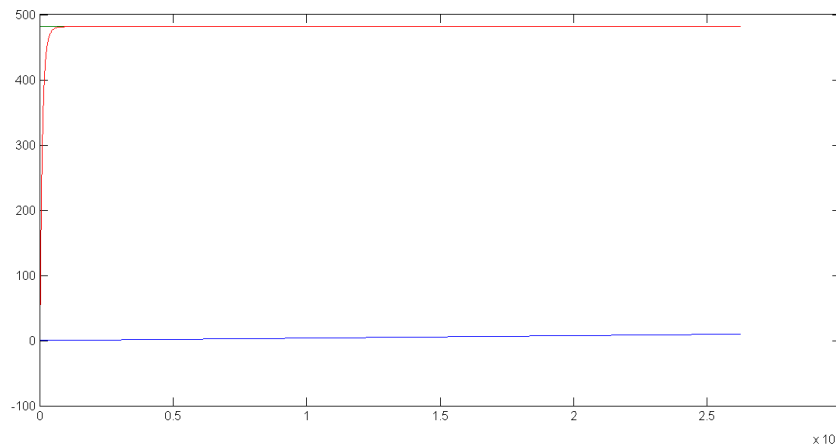
Kontroler	K _P	K _I	K _D	Overshoot (%)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Steady-State Error (%)
P	14,99	-	-	122,88	0,03	0,35	1,41
PI	0,364	3,82	-	≈ 0	0,37	0,51	0,0016
PID	0,426	4,47	0	≈ 0	0,4	0,4	0,00016



Gambar 11. Respon kecepatan Algoritma Genetika – P Controller



Gambar 12. Respon kecepatan Algoritma Genetika – PI Controller



Gambar 13. Respon kecepatan Algoritma Genetika – PID Controller

Pada suatu kasus apabila terdapat keunggulan antara kecepatan dan waktu terbaik, maka kontrol yang dipilih adalah kontrol dengan hasil kecepatan terbaik. *Tuning* Algoritma Genetika memiliki kecepatan yang lebih baik jika dibandingkan dengan *tuning* Ziegler Nichols karena *overshoot* dan *steady-state error* yang lebih kecil. Sehingga hasil terbaik diperoleh dengan nilai parameter PID berupa $K_P = 0,426$; $K_I = 4,468$; dan $K_D = 0$.

4. KESIMPULAN

Penelitian melakukan simulasi kontrol kecepatan motor PMDC menggunakan PID di mana parameter aksi K_P , K_I , dan K_D didapatkan dengan *tuning* metode Ziegler Nichols dan Algoritma Genetika. Pada *tuning* metode Ziegler Nichols memiliki kontrol terbaik pada kontrol PID dengan nilai $K_P = 1,2$; $K_I = 6.108424536$; dan $K_D = 0,058935$ yang menghasilkan kecepatan respon dengan nilai *overshoot* 9,245914545%; *rise time* 0,0408 detik; *settling time* 0,9 detik; dan *steady-state error* 0,00828259723%. Kemudian pada *tuning* metode Algoritma Genetika dengan parameter GA yang telah kami sebutkan sebelumnya, memiliki kontrol terbaik pada kontrol PID dengan nilai $K_P = 0,426$; $K_I = 4,468$; dan $K_D = 0$ yang menghasilkan kecepatan respon dengan nilai *overshoot* 0%; *rise time* 0,4 detik; *settling time* 0,4 detik; dan *steady-state error* 0,00016%. Berdasarkan hal tersebut, *tuning* ZN memiliki keunggulan pada *rise time* yang lebih cepat. Namun secara keseluruhan GA lebih unggul dibandingkan dengan ZN karena *overshoot* dan *steady-state error* yang lebih kecil serta *setting time* yang lebih cepat. Sehingga diperoleh kesimpulan bahwa kontrol motor PMDC yang menghasilkan performa terbaik adalah kontrol PID dengan metode *tuning* Algoritma Genetika.

REFERENSI

- [1] S. W. Khubalkar, A. S. Chopade, A. S. Junghare, and M. V. Aware, "Design and tuning of fractional order PID controller for speed control of permanent magnet brushless DC motor," *2016 IEEE 1st Int. Conf. Control. Meas. Instrumentation, C. 2016*, no. CMI, pp. 326–330, 2016, doi: 10.1109/CMI.2016.7413764.
- [2] S. Syukriyadin, S. Syahrizal, G. Mansur, and H. P. Ramadhan, "Permanent magnet DC motor control by using arduino and motor drive module BTS7960," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 352, no. 1, pp. 0–6, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/352/1/012023.
- [3] R. Muhandian and K. Krismadinata, "Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 1, pp. 328–339, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>.
- [4] T. Wati, Subiyanto, and Sutarno, "Simulation model of speed control DC motor using fractional order PID controller Simulation model of speed control DC motor using fractional order PID controller," *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1444/1/012022.
- [5] S. Waluyo, Aditya Fitriansyah, "Analisa Penalaan Kontrol PID pada Simulasi Kendali Kecepatan Putaran Motor DC Berbeban menggunakan Metode Heuristik," *Elkomika*, vol. 1, no. 2, pp. 79–92, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

- [6] F. M. Wildan, E. A. Hakim, and D. Suhardi, "Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Berbasis Genetic Algorithm," *Kinetik*, vol. 1, no. 1, pp. 23–32, 2016, doi: 10.22219/kinetik.v1i1.14.
- [7] Z. Jamal, J. Informatika, Z. Jamal, and F. I. Komputer, "Implementasi Kendali Pid Penalaan Ziegler-Nichols," vol. 15, no. 1, pp. 81–88, 2015.
- [8] V. V. Patel, "Ziegler – Nichols Tuning Method," *Resonance*, vol. 25, no. 10, pp. 1385–1397, 2020.
- [9] M. Abduljaleel Ibrahim, A. Kh. Mahmood, and N. Saleh Sultan, "Optimal PID Controller of a Brushless DC Motor Using Genetic Algorithm," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 822–830, 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i2.pp822-830.
- [10] W. Tang and S. Cao, "A Fast Realization Method of Fuzzy PID Control for DC Motor," *Proc. 37th Chinese Control Conf.*, pp. 5131–5135, 2018, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8483184.
- [11] A. A. Hasan, N. K. Al-Shamaa, and K. K. Abdalla, "Comparative Study for DC Motor Speed Control Using PID Controller," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 6, 2018, doi: 10.21817/ijet/2017/v9i6/170906069.
- [12] A. Egemen, H. Örenba, and Ş. Sava, "Analyze and Comparison of Different PID Tuning Methods on a Brushless DC Motor Using Atmega328 Based Microcontroller Unit," *Int. Conf. Control Eng. Inf. Technol.*, vol. 6, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/CEIT.2018.8751768.
- [13] M. Shahrokhi and A. Zomorodi, "Comparison of Tuning Methods of PID Controller," *Dep. Chem. Pet. Eng. Sharif Univ. Technol.*, vol. 2, pp. 15–17, 2013.
- [14] H. Septanto, R. T. Bambang, A. Syaichu-Rohman, R. Eko Poetro, and A. Ravi Ibrahim, "Quaternion-based attitude control system design of single and cooperative spacecrafts: Boundedness of solution approach," *Model. Simul. Eng.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/652571.
- [15] M. Kushwah and A. Patra, "PID Controller Tuning using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor," vol. 03, no. 13, pp. 2924–2929, 2014.
- [16] B. Ilyas Setiawan, "Perancangan Robot Auto Line Follower yang Menerapkan Metode Osilasi Ziegler-Nichols Untuk Tuning Parameter PID pada Kontes Robot Indonesia," *J. Tek. Elektro Univ. Brawijaya*, vol. 1, pp. 1–6, 2013.
- [17] N. Hamid, A. Mansur, P. Mesin, and A. T. Soroako, "Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols untuk Optimasi Kontrol Kecepatan Motor pada Alat Spin Coater," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, no. September, pp. 315–319, 2021.
- [18] F. G. Lobo and C. F. Lima, "Adaptive Population Sizing Schemes in Genetic Algorithms," *Stud. Comput. Intell.*, vol. 54, no. 2007, pp. 185–204, 2007, doi: 10.1007/978-3-540-69432-8_9.
- [19] J. Koljonen and J. T. Alander, "Effects of Population Size and Relative Elitism on Optimization Speed and Reliability of Genetic Algorithms," *Proc. Ninth Scand. Conf. Artif. Intell.*, pp. 54–60, 2006.
- [20] F. G. Lobo and C. F. Lima, "A Review of Adaptive Population Sizing Schemes in Genetic Algorithms," *Proc. 7th Annu. Work. Genet. Evol. Comput.*, pp. 228–234, 2005, doi: 10.1145/1102256.1102310.
- [21] A. Mohammadzadeh and M. Janalipour, "A Fuzzy-GA Based Decision Making System for Detecting Damaged Buildings from High-Spatial Resolution Optical Images," *Learn. to Understand Remote Sens. Images*, vol. 1, p. 391, 2017, doi: 10.3390/rs9040349.