1st National Conference on Electrical, Informatics and Industrial Technology (NEIIT-2024)
July 20, 2024

SISTEM KENDALI PID PADA MOTOR DC MENGGUNAKAN OPTIMASI *SINE COSINE ALGORITHM*

Wiega Pratama[1*], Suprihatin[2], Reyhan Ahmad[3], Muhammad Farid Zamzimmi[4], Fernanda Kurniawan[5], Rohadi Widiyanto [6], Wahyu Setyo Pambudi[7]

[1234567]Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya,Surabaya
E-mail: [*1]wiegapratama@gmail.com, [2]surpri.weltes@gmail.com , [3]reyhanahmad23@yahoo.com , [4]farid.zamzimmi93@gmail.com , [5]fernandokurniawan2@gmail.com, [6]widiyantorohadi@gmail.com , [7]wahyusp@itats.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Submited:
July 10, 2024

Accepted:
July 18, 2024

Published:
August 1, 2024

ABSTRACT

DC motor is one of the actuator elements that has a fast response that is often used in the automation industry. One effort to handle the speed of DC motor response requires control of DC motor parameters. The purpose of this study is to conduct an analysis of the search for the right PID control as an effort to minimize the inaccuracy of DC motor speed control parameter settings. The optimization method of this study uses the sine cosine algorithm which in its output process is also compared with the genetic algorithm method, and the particle swarm optimizer. These three optimizations are carried out with a random population setting of 40 and a maximum iteration of 50. The approach proposed in this study is the PID output parameter obtained with the fastest settling time of 0.031 and the lowest overshoot of 5%. So it is proposed to use SCA optimization with PID control on a DC motor, namely with the constant criteria Kp = 12.2; Ki = 0.55; and Kd = 0.0012.

Keywords:

Genetic Algorithm, Speed, PID Control, DC Motor, Particle Swarm Algorithm, Sine Cosine Algorithm

Kata Kunci:

Genetic Algorithm, Kecepatan, Kontrol PID, Motor DC, Particle Swarm Algorithm, Sine Cosine Algorithm

ABSTRAK

Motor dc merupakan salah satu elemen aktuator yang memiliki respon cepat yang sering digunakan dalam industri otomatisasi. Salah satu upaya untuk menangani kecepatan respon motor DC maka diperlukan adanya kontrol pengendalian parameter motor DC. Tujuan penelitian ini yaitu melakukan analisis pencaharian kontrol PID yang tepat sebagai upaya untuk meminimalisir ketidaktepatan pengaturan parameter kecepatan kontrol motor DC. Metode optimasi penelitian ini menggunakan *sine cosine algorithm* yang mana dalam proses keluarannya dibandingkan juga dengan metode *genetic algorithm*, serta *particle swarm optimizer*. Ketiga optimasi ini dilakukan dengan pengaturan populasi random 40 dan iterasi maksimal 50. Pendekatan yang di usulukan dalam penelitian ini yaitu parameter keluaran PID yang diperoleh dengan *settling time* paling cepat yaitu 0.031 dan *overshoot* paling rendah yaitu 5%. Maka di usulkan penggunaan optimasi SCA dengan kontrol PID pada motor dc yaitu dengan kriteria konstanta Kp = 12,2; Ki = 0,55; dan Kd = 0,0012.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Corresponding Author:
Wiega Pratama,
Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya,Surabaya
Jl. Arief Rahman Hakim No.100, Klampis Ngasem, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60117.
Email: wiegapratama@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Motor dc merupakan jenis peralatan konversi *electric-mechanical* yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Kelebihan dari motor dc yaitu tingkat pengopersian mudah, sistem perawatan yang ekonomis, tingginya torsi awal, serta memiliki respon kendali cepat [1]. Seiring dengan adanya peningkatan beban yang tinggi, kecepatan motor dc akan berkurang secara perlahan dari batas kecepatan normalnya. Tujuan penelitian yaitu melakukan sistem pengendalian terhadap performansi kecepatan motor dc agar kecepatannya stabil. Salah satu solusi dalam mempertahankan parameter kecepatan motor dc yaitu dengan cara melakukan suatu estimasi parameter kendali secara tepat. Untuk meminimalisir adanya indikasi ketidakstabilan kecepatan motor dc, maka diperlukan adanya sistem kendali PID. *Proportional–Integral–Derivative (PID) controller* merupakan system kendali parameter umpan balik (feedback) pada suatu plant [2]. Pengontrol PID menyediakan cara sederhana dan efektif untuk mengatur parameter kecepatan motor. Metode sistem kendali PID dapat beroperasi dengan mengolah beberapa parameter penting berdasarkan nilai Kp, Ki, dan Kd untuk mendapatkan kondisi sesuai *setpoint* yang baik. Dalam mendapatkan performa kontrol nilai PID yang tepat dengan data secara acak, maka diperlukan tuning PID dengan suatu metode optimasi algotima. Algoritme optimasi telah banyak digunakan untuk desain dan penyetelan pengontrol PID, yang mengotomatiskan proses pencarian parameter PID optimal yang dapat mencapai kinerja yang optimum.

Algoritma Sine Cosine (SCA) yaitu suatu algoritma yang memanfaatkan fungsi aritmatika sinus dan kosinus untuk eksplorasi ruang pencarian dan eksploitasi antara rute alternatif untuk penyelesaian masalah optimasi pada data yang bersifat secara acak [3]. Dua algoritma lain yaitu PSO dan GA yang akan dibandingkan dengan metode SCA pada penelitian ini. Algoritma genetika yaitu metode algoritma yang merepresentasikan seleksi alam sebagai solusi pemecahan masalah pada data acak [4]. Berbeda dengan PSO yang merupakan metode pengoptimalan yang terinspirasi dengan populasi burung atau ikan dalam mencapai makanan (nilai) terbaik [5]. Banyak penelitian telah dilakukan mengenai perancangan dan penyetelan pengontrol PID untuk pengendalian kecepatan motor DC menggunakan berbagai algoritma optimasi. Misalnya seperti menyajikan pendekatan metode algoritma optimalisasi sinus cosinus yang dikombinasikan metode efek balon sebagai peningkatan suatu respon sistem PID [6]. Pengaruh metode BE (*ballon effect*) dalam algoritma SCA menghasilkan perbaikan dalam karakteristik umum sistem seperti *rise time, settling time,* dan *over shoot.* Metode optimasi lain yaitu TSOA (*transit search optimization algorithm*) mengungguli metode *cohen-coon* dan *ziegler-nichols* dalam hal presentase *overshoot* sehingga lebih tepat untuk pengendalian kecepatan motor dc [7]. Metode perbandingan optimasi lain juga diterapkan pada penelitian yang menggunakan algoritma evolusioner ABC dengan PSO untuk mengetahui tingkat kecepatan konvergensi pada kontrol PID motor dc [8]. Hasil simulasi membuktikan bahwa algoritma ABC lebih efisien daripada PSO. Metode perbandingan optimasi lain antara FFA (*firefly algorithm*) dan *Fminsearch* yang telah menunjukkan bahwa algoritma *Fminsearch* mengungguli FFA dalam hal laju konvergensi, *computation time* dan *settling time* pada sistem kendali kecepatan motor dc [9]. Metode optimasi lain seperti algoritma GSO (*Gazelle Simplex Optimizer*) merupakan algortima *hybrid* baru yang menggabungkan algoritma optimasi *gazelle* (GOA) dengan metode pencarian efektif yang dikenal sebagai teknik *Nelder-Mead* (NM) [10]. Perpaduan algoritma menghasilkan versi hibridisasi yang inovatif, yang memberikan keseimbangan eksploitasi parameter kontrol PID untuk kecepatan motor dc.

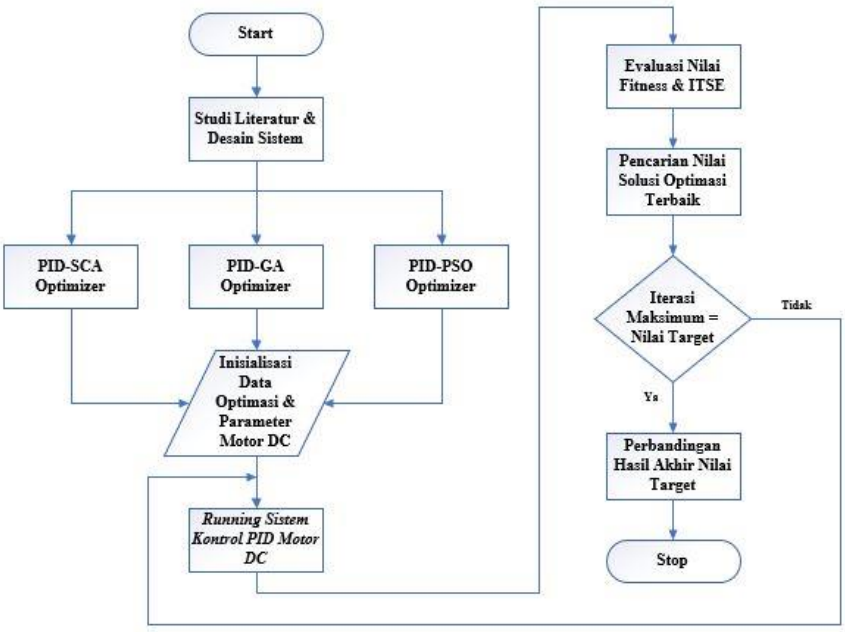
Adapun penelitian lain yang membahas tentang tuning parameter kontrol motor dc menggunakan PSO. Meskipun parameter PID dengan jumlah n partikel sama, peningkatan nilai N (*filter coefficient*) telah mengakibatkan penurunan pada max overshoot, *rise time,* dan *settling time* [11]. PSO menjadi teknik yang lebih efisien dan memakan waktu lebih sedikit sedangkan GA digunakan untuk mendesain pengontrol [12]. Peneltian tentang penggunaan metode GA juga mengungkapkan bahwa metode GA mampu menghasilkan hasil optimum di setiap iterasi, *overshoot* lebih kecil, dan *settling time* lebih baik daripada metode *trial and error* [13]. Dari berbagai studi literatur tersebut, penelitian ini mencoba untuk membuktikan perbandingan optimasi SCA, GA, dan PSO dengan parameter optimasi yang sama. Dari ke-tiga metode tersebut parameter kontrol PID seperti Kp, Ki, dan Kd yang di optimalkan kembali menggunakan fungsi ITAE. Perbandingan dilakukan berdasarkan kinerja motor dc berdasarkan *rise time, settling time*, presentase *overshoot*, *steady state*, dan ukuran tingkat *absolut error*. Ukuran keberhasilan penelitian ini yaitu menganalisis pemilihan parameter *settling time* tercepat dan tingkat *overshoot* yang minim.

2. METODE PENELITIAN

Metode peneltian ini menggunakan algortima optimasi SCA, GA, dan PSO untuk menenukan parameter PID. Parameter PID yang dihasilkan yaitu nilai Kp, Ki, dan Kd yang optimal untuk mendapatkan ketepatan estimasi kontrol kecepatan motor dc.

2.1. *Flowchart* Penelitian

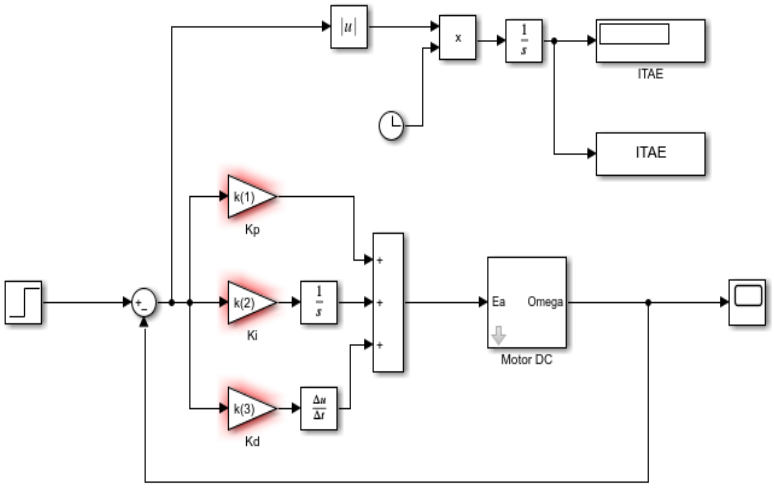
Metode penelitian yang diterapkan pada penelitian ini terdiri dari tahapan berikut sesuai dengan diagram alir pada gambar 1. Pada tahapan metode ini diperinci kembali dari berbagai tahapan meliputi desain sistem, jenis algoritma optimasi, pengujian sistem, dan perbandingan hasil dari pengujian sistem optimasi kontrol PID pada pengaturan kecepatan motor dc.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

2.1.1. Pemodelan Sistem Kontrol PID Motor DC

Program ketiga algortima sebagai tuning kontrol PID motor dc ini di running pada aplikasi matlab dengan *coding* dari masing-masing optmasi seperti diagram alir gambar 1. Kecepatan motor DC dipengaruhi oleh besarnya tegangan jangkar motor DC sebagai pengendalian arus medan dan *fluks konstan*. Pengendalian kecepatan motor DC menggunakan skema pengendalian tegangan jangkar. Tegangan jangkar mengontrol turunan proses sebagai arus medan konstan serta fluks konstan. Gambar 2 menunjukkan diagram blok kendali jangkar untuk motor DC.



Gambar 2. Blok Diagram Kontrol PID Motor DC

Parameter yang dibutuhkan untuk memperoleh hasil dari persamaan 2 yaitu dengan cara menyesuaikan data parameter pada tabel 1. Metode simulasi ini menitikberatkan dalam pencarian 3 parameter *gain tuning* optimum yaitu Kp, Ki, dan Kd yang mana hasil akhirnya terlihat melalui *scope*.

Dari persamaan ekuivalen 2 dan menggunakan nilai parameter standar dari tabel 1, maka model motor DC dapat direalisasikan sebagai syarat untuk optimasi parameter kecepatan motor dc. Parameter motor DC yang digunakan dalam makalah penelitian ini didefinisikan dalam persamaan 1 berikut [14]:

$$G(s) = \frac{\omega(S)}{E_a(S)} = \frac{K_t}{(L_a(s)+Ra)(J+C)+K_bK_t} \quad (1)$$

Tabel 1. Parameter Motor DC [15]

Parameters	Values
B	0.0022 N m s rad^{-1}
J	0.0004kg m^2
K_b	0.05V s rad^{-1}
K_t	0.015 N m A^{-1}
L_a	2.7 H
R_a	0.4Ω

Tabel 2. Parameter Optimasi SCA-GA-PSO [15]

Parameters	*Value*
Dirnention of the problem	3
Population size	40
Independent runs	20
Number of iterations	50
Lowes bound [K_p;K_I;K_D]	[0.001;0.001;0.001]
Upper bound [K_p;K_I;K_D]	[20;20;20]

Optimasi parameter PID secara acak yang dibatasi oleh nilai batas bawah dan batas atas untuk melakukan pencarian nilai terbaik. Proses tuning PID dilakukan secara *trial & error* sesuai dengan tiga metode optimasi berbeda. Proses simulasi optimasi ini menggunakan 3 nilai dimensi variabel untuk mencapai pembentukan populasi sebanyak 40 hingga iterasi ke-50. Tiap iterasi diolah atau seleksi dengan nilai *fitness*. Nilai akhir dari *fitness* ini sebagai ukuran ketepatan suatu *step respons* kontrol PID motor dc menggunakan persamaan 2 yaitu *integral of time multiplied of absolute error* sebagai berikut [15]*:*

$$\text{ITAE} = \int_0^\infty t\,|e\,(t)|d\,t \quad (2)$$

2.1.2. Sine Cosine Algorithm

SCA mengembangkan teknik optimasi berdasarkan fungsi matematika sinus dan kosinus. Optimal global diperoleh setelah beberapa langkah iterasi dengan sejumlah besar solusi acak dengan dua tahap (Mirjalili, 2016):

- Pada fase eksplorasi, wilayah yang menjanjikan dibentuk dengan algoritma optimasi dengan solusi acak dalam kumpulan solusi dengan kecepatan tinggi.
- Selama tahap eksploitasi, perubahan solusi acak dan variasi acak berlangsung lambat dan diperoleh hasil optimal.

Pemodelan matematis algoritma sinus dan cosinus ditunjukkan dengan memperbarui posisi solusi untuk kedua fase yang diwakili oleh persamaan 3 dan 4 [16]:

$$X_j^{t+1} = X_j^t + r_1\, x \sin(r_1)\; x\, \left|r_3\, P_j^t - X_j^t\right| \; r_4 < 0.5 \quad (3)$$

$$X_j^{t+1} = X_j^t + r_1\, x\, cos\; x\, \left|r_3\, P_j^t - X_{jj}^t\right| \; r_4 \geq 0.5 \quad (4)$$

Untuk mendapatkan wilayah yang menjanjikan dan optimum global dalam pencarian ruang, eksplorasi dan eksploitasi harus diimbangi dengan algoritma sinus dan kosinus yang dilakukan dengan mengubah 1 r pada persamaan (3) - (4) menghasilkan persamaan (5) sebagai berikut [16]:

$$r_1 = a - t\,\left(\frac{a}{T}\right) \quad (5)$$

2.1.3. Genetic Algorithm

Algoritma Genetika (GA) merupakan teknik optimasi pencaharian data melalui proses evolusi yang secara alami. Teknik optimasi ini ditemukan oleh John Holland sejak tahun 1970 di Universitas Michigan, Amerika Serikat [17]. Penerapan suatu optimasi dalam menyelesiakan masalah harus dikembangkan secera berkelanjutan sebagai upaya dalam meraih nilai solusi terbaik. Algoritma ini bergantung pada beberapa aspek lain seperti evaluasi, reproduksi, *crossover*, dan hingga mencapai solusi terbaik. Metode pencarian pada *genetic algorithm* secara pararel memiliki kelebihan diantaranya dapat menghindari local minimal, dan konvergen ke solusi optimal.

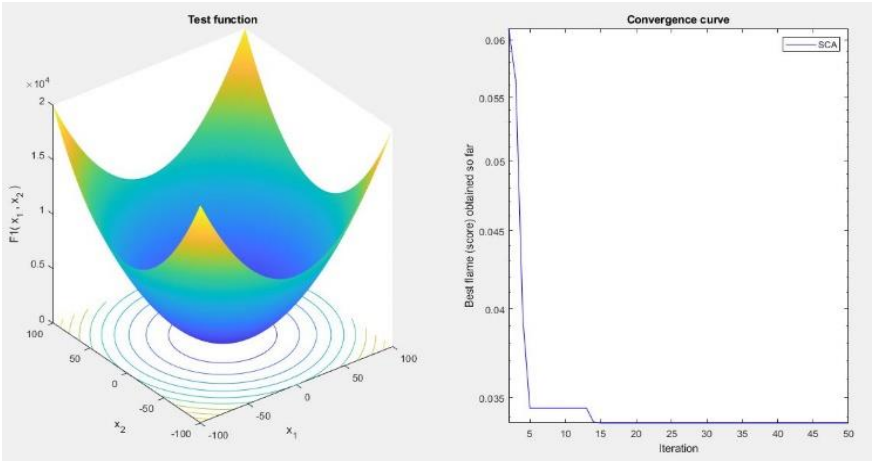
2.1.4. Particle Swarm Optimization

Algoritma PSO diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995. Metode PSO dikembangkan dengan memanfaatkan perilaku mencari makan burung [18]. PSO merupakan metode perhitungan yang mengembangkan solusi secara rekursif, dimulai dari kandidat solusi hingga mencapai solusi terbaik sekaligus mengoptimalkan masalah. Dalam PSO, partikel mewakili solusi yang mungkin terjadi, dan komunitas partikel mengacu pada kelompok. Posisi awal partikel dihasilkan secara acak dalam ruang pencarian yang relevan. Umumnya, kecepatan awal partikel dianggap nol. Nilai *fitness* dari posisi yang dihasilkan secara acak dihitung menggunakan fungsi tujuan permasalahan. Berdasarkan nilai *fitness* tersebut, ditentukan posisi terbaik setiap partikel sejauh ini (*xbest,i*) dan posisi populasi terbaik (*gbest*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

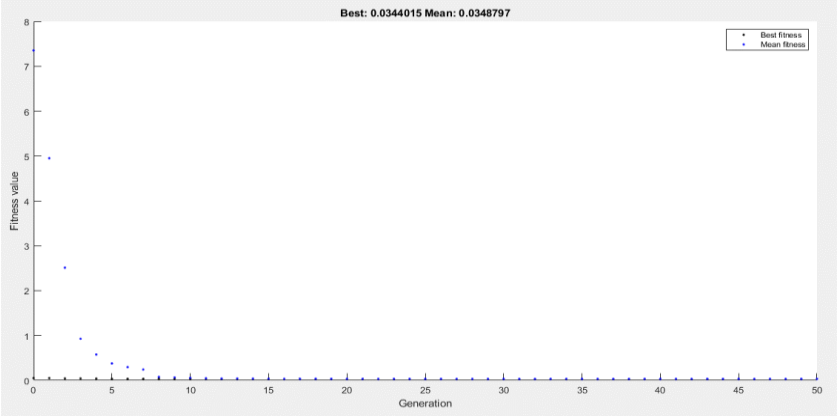
Pada penelitian ini motor DC yang diperoleh parameter sesuai pada tabel 1 yang di inputkan ke dalam *plant system motor dc*. Motor dc ini akan di kontrol oleh PID dengan tujuan untuk mendapatkan keluaran yang paling optimum. Parameter keluaran PID seperti maksimum *overshoot, rise time, settling time*, dan tingkatan *error* dapat memberikan pengaruh besar dalam pemilihan parameter yang tepat. Tentunya perlu mengetathui dahulu parameter kontrol PID seperti konstanta Kp, Ki, dan Kd yang tepat dalam kondisi acak sampai batas akhir dari maksimum suatu iterasi. Parameter optimasi yang dijalankan di ketiga proses optimasi ini sesuai pada tabel 2.

Jika dibandingkan dari dari ketiga system optimasi yaitu GA, PSO, dan SCA menunjukkan bahwa setiap metode memiliki kelebihan dan kelemahan dalam mengatasi masalah optimisasi. Ada beberapa aspek pemilihan metode yang tepat tergantung pada sifat masalah, kompleksitas ruang pencarian, serta kebutuhan waktu dan sumber daya komputasi yang tersedia. Seperti halnya proses optimasi SCA ini dilakukan sebanyak 50 kali iterasi dan dengan parameter optimasi sesuai pada tabel 2. Pada gambar 3 telah diketahui bahwa terjadi penurunan ke titik konvergensi ketika mendekati fungsi iterasi ke-15. Dari iterasi ke-15 hingga ke-50 nilai tetap konstan dengan nilai terbaik di angka 0,0321. Hasil percobaan SCA ini didapatkan nilai konstanta PID ketika optimum dengan nilai Kp = 12,2; Ki = 0,55; dan Kd = 0,0012.



Gambar 3. Grafik Konvergensi Metode SCA

Sedangkan pada percobaan lain menggunakan optimasi GA diperoleh grafik fitness sesuai pada gambar 4 dengan besar nilai iterasi (*generation*) sebanyak 50 kali. Nilai fitness terbaik dengan nilai fitness rata-rata mencapai tingkat konvergensi ketika mendekati iterasi ke-15. Dalam proses GA ini mampu mencapai nilai optimum ketika sudah mencapai iterasi ke-15 dengan nilai tingkat kesalahan 0,0344. Hasil percobaan GA ini memperoleh nilai konstanta PID kontrol dengan nilai Kp = 16,38; Ki = 3,96; dan Kd = 0,052. Pada percobaan kontrol PID parameter motor dc pada tabel 1 dan dengan kriteria optimasi sesuai tabel 2. Metode PSO yang diterapkan pada penelitian ini mampu menghasilkan kontrol PID motor dc yang optimal sesuai pada tabel 3 dengan konstanta nilai Kp = 19,98; Ki = 5,46; dan Kd = 0,094.



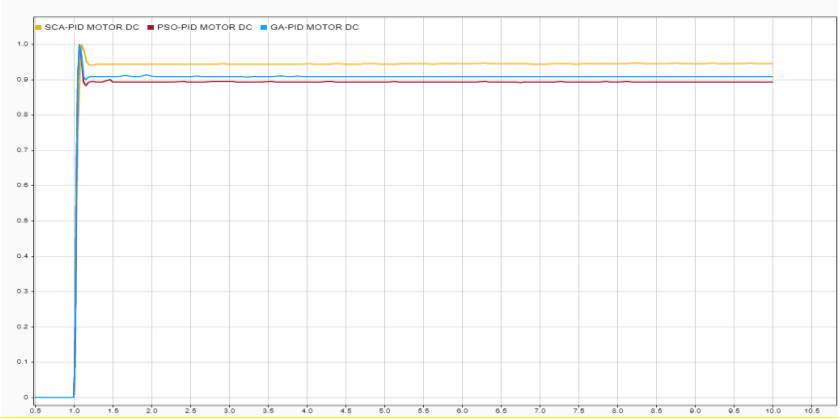
Gambar 4. Grafik *Fitness* Metode GA

Data pada tabel 3 merupakan suatu keluaran respon sistem dari tiga optimasi bahwa untuk mencapai tingkat nilai overshoot rendah, tingkat *error* paling kecil, dan *settling time* yang cepat yaitu menggunakan metode algoritma SCA pada kontrol parameter motor DC. Namun ketika *tuning* PID motor dc, nilai *rise time* dengan menggunakan metode SCA sedikit lebih lambat daripada metode PSO maupun GA. Nilai *rise time* paling cepat sekitar 0,031 s dan nilai *settling time* dengan kategori menengah sekitar 0,148 s yaitu ketika tuning menggunakan algoritma PSO. Namun pada metode PSO ini menghasilkan tingkat *overshoot* yang tinggi sekitar 14% tetapi masih berada di bawah 15%. Nilai *overshoot* di bawah 15% masih dikategorikan baik maka percobaan ketiga algoritma tersebut masih dalam standart Batasan minimum tingkat *overshoot*. Nilai *overshoot* PSO melebihi nilai *overshoot* GA yang berada pada nilai 10%. Namun nilai *rise time* dan *settling time* melebihi nilai yang didapatkan ketika menggunakan PSO. Secara keseluruhan proses optimasi ini mencapai nilai *steady state* 1 sehingga dapat diartikan bahwa dari ketiga uji optimasi PID motor dc ini bekerja memberikan respon optimal dalam keadaan yang sama.

Tabel 3. Hasil Keluaran Parameter PID Motor DC

Metode	Kp	Ki	Kd	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Oveshoot (%)	Steady State	ITAE
SCA	12.2	0.55	0.0012	0.049	0.138	5	1	0.0321
GA	16.38	3.96	0.052	0.037	0.23	10	1	0.0344
PSO	19.98	5.46	0.094	0.031	0.148	14	1	0.0328

Pada gambar 5 merupakan suatu grafik gabungan diantara ketiga metode yaitu SCA-GA-PSO sebagai perbandingan parameter keluaran PID motor dc. Ketiga parameter keluaran ini diperinci kembali sesuai dengan hasil pada tabel 3 dengan besaran *amplitude* maksimum di angka 1. Keseluruhan pengujian diatur dengan waktu *stop time* (N=10s) selama percobaan *tuning* kontrol PID motor dc. Nilai overshoot yang rendah menandakan kinerja sistem pada motor dc lebih baik, maka dari itu penggunaan optimasi SCA lebih unggul daripada GA dan PSO. Baik *rise time* maupun *settling time* penting untuk evaluasi sistem parameter motor dc.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Metode SCA-GA-PSO

Nilai *rise time* yang lebih lama dapat menyebabkan keterlambatan respon motor dc. Demikian pula, waktu penyelesaian yang lebih lama dapat mengakibatkan pelacakan kecepatan yang diinginkan menjadi lebih lambat, sehingga menyebabkan respon sistem kendali motor menjadi lebih lambat. Namun, nilai *settling time* biasanya dianggap lebih penting dalam konteks pengendalian kecepatan motor DC. Hal ini karena kinerja motor dalam keadaan stabil, yaitu seberapa baik motor mempertahankan kecepatan konstan, sangat penting untuk sebagian besar aplikasi kontrol motor dc. Nilai parameter *settling time* menentukan seberapa cepat motor mencapai kecepatan stabilnya setelah terjadi perubahan sinyal kontrol, yang dapat mempengaruhi kinerja sistem kontrol secara keseluruhan. Mempercepat waktu *settling time* dengan menjaga tingkat *overshoot* merupakan parameter yang baik dalam kontrol kecepatan motor dc, maka dari itu dapat disimpulkan bahwa optimasi SCA menjadi pilihan utama dibandingkan GA dan PSO dengan kriteria nilai *settling time* tercepat dan tingkatan *overshoot* paling rendah.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan tiga optimasi yaitu SCA, GA, dan PSO dalam penyetelan PID pada sistem kendali kecepatan motor dc. Ketiga optimasi ini dilakukan dengan pengaturan populasi random 40 dan iterasi maksimal 50. Pendekatan yang di usulkan dalam penelitian ini yaitu parameter keluaran PID yang diperoleh dengan *settling time* paling cepat yaitu 0.031 s dan *overshoot* paling rendah yaitu 5% . Maka di usulkan penggunaan optimasi SCA dengan kontrol PID pada motor dc yaitu dengan kriteria konstanta Kp = 12,2; Ki = 0,55; dan Kd = 0,0012.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Z. ORTATEPE, "Genetic Algorithm based PID Tuning Software Design and Implementation for a DC Motor Control System," *Gazi Univ. J. Sci. Part A Eng. Innov.*, vol. 10, no. 3, pp. 286–300, 2023, doi: 10.54287/gujsa.1342905.

[2] A. N. Aliansyah, N. Nurhayati, S. N. Jaya`, L. Pagiling, W. O. S. N. Alam, and M. N. A. Nur, "Analisis Tuning Parameter PID Menggunakan Algoritma Genetika pada Pengontrolan Kecepatan Motor DC," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 2, p. 287, 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i02.p17.

[3] D. S. Naser, I. A. Abed, and D. Al-Thammer, "Sine Cosine Algorithm for Tuning Cascaded PI Controllers for PMSM Drive System Speed Control," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2312, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2312/1/012001.

[4] K. B. Prasetyo, E. Endryansyah, I. G. P. Asto, and L. Anifah, "Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor DC Dengan Metode Optimization Genetic Algorithm Pada Lift Konvensional," *Indones. J. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 66–75, 2021, doi: 10.26740/inajet.v3n2.p66-75.

[5] M. Ali, A. A. Syaifudin, and H. Nurohmah, "Desain Hibrid Menggunakan PID-ANFIS Controller Pada Motor DC Berbasis PSO (Particle Swarm Optimization)," *JE-Unisla*, vol. 6, no. 2, p. 60, 2021, doi: 10.30736/je-unisla.v6i2.707.

[6] M. T. Mohamed, S. Alkhalaf, T. Senjyu, T. H. Mohamed, A. M. Elnoby, and A. Hemeida, "Sine cosine optimization algorithm combined with balloon effect for adaptive position control of a cart forced by an armature-controlled DC motor," *PLoS One*, vol. 19, no. 5, p. e0300645, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0300645.

[7] S. Pandey, "Transit Search Optimization Algorithm for Proportional-Integral-Derivative Controller Tuning for the Optimal DC Motor Speed Control: Classical Methods as Benchmark," *SSRN Electron. J.*, pp. 1–8, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4385203.

[8] O. O. Martins, A. A. Adekunle, M. O. Arowolo, D. C. Uguru-Okorie, and B. O. Bolaji, "The effect of an evolutionary algorithm's rapid convergence on improving DC motor response using a PID controller," *Sci. African*, vol. 17, p. e01327, 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01327.

[9] S. Pandey, "Optimization of PID Controller Parameters for Speed Control of DC Motor Using Firefly and Fminsearch Algorithms," *SSRN Electron. J.*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4378784.

[10] S. Ekinci, D. Izci, and M. Yilmaz, "Efficient Speed Control for DC Motors Using Novel Gazelle Simplex Optimizer," *IEEE Access*, vol. 11, no. September, pp. 105830–105842, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3319596.

[11] S. Ylldlrlm, M. S. Bingol, and S. Savas, "Tuning PID controller parameters of the DC motor with PSO algorithm," *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, no. January, 2024, doi: 10.1556/1848.2023.00698.

[12] D. K. Somwanshi, "Pso-Tuned Pid Controller Optimization for Dc Motor Speed Control," no. September, 2023, doi: 10.5281/zenodo.7778371.

[13] 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.

[14] R. S. Widagdo, B. Hariadi, and K. Setyadjit, "Modelling and Analysis of Ziegler-Nichols and Chien-Hrones-Reswick Tuning PID on DC Motor Speed Control," *J. Teknol. Elektro*, vol. 14, no. 1, p. 23, 2023, doi:

10.22441/jte.2023.v14i1.005.
[15] N. L. Manuel, N. İnanç, and M. Lüy, "Control and performance analyses of a DC motor using optimized PIDs and fuzzy logic controller," *Results Control Optim.*, vol. 13, no. May, 2023, doi: 10.1016/j.rico.2023.100306.
[16] N. F. Nanyan, M. A. Ahmad, and B. Hekimoğlu, "Optimal PID controller for the DC-DC buck converter using the improved sine cosine algorithm," *Results Control Optim.*, vol. 14, no. November 2023, 2024, doi: 10.1016/j.rico.2023.100352.
[17] M. Montes Rivera, M. Aguilar-Justo, and M. Perez Hernández, "Identifying DC Motor Transfer Function with Few-Shots Learning and a Genetic Algorithm Using Proposed Signal-Signature," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 14502 LNAI, no. 2, pp. 170–190, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-51940-6_14.
[18] M. O. Mustafa, "Optimal Parameter Values of Pid Controller for DC Motor Based on Modified Particle Swarm Optimization With Adaptive Inertia Weight," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 1, pp. 35–45, 2021, doi: 10.15587/1729-4061.2021.225383.