

Optimal Control Permanent Magnet Direct Current (PMDC) Motor Menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO)

Rodhi Kelvianto, Teguh Yuwono, Imam Robandi
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: rodhi.kelvianto@yahoo.com; teguh@ee.its.ac.id; robandi@ee.its.ac.id

Abstrak— Dalam dunia industri, sistem produksi memerlukan kecepatan dan ketepatan namun konsumsi daya yang efisien sangat diperlukan. Seiring dengan kemajuan teknologi, permasalahan pada dunia industri tentang ketidakstabilan dari kecepatan motor DC ketika awal penyalan sangatlah kompleks sehingga ketika motor DC tersebut bekerja dalam suatu proses yang membutuhkan kecepatan yang konstan, maka sistem tersebut akan terganggu. Oleh karena itu penggunaan kontrol dalam dunia industri sangatlah penting, terutama pada pengaturan kecepatan motor. Pengaturan kecepatan motor dapat dilakukan dengan menambah atau mengurangi tegangan suplai ke motor DC tersebut, namun akan mengakibatkan pekerjaan yang lebih rumit dan waktu yang lebih lama, karena harus menyeleksi waktu untuk mempercepat atau memperlambat kecepatan motor. Pada tugas akhir ini, dilakukan kontrol *Permanent Magnet Direct Current* (PMDC) Motor yang ditala menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Peralatan-peralatan industri seperti motor DC sangat membutuhkan suplai tegangan yang sesuai agar kecepatan yang diperoleh sesuai dengan yang dibutuhkan. Kontroler yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah kontroler PI. Dengan menggunakan kontrol *Permanent Magnet Direct Current* (PMDC) Motor diharapkan osilasi pada sistem dapat teredam dengan baik. Untuk mendapatkan hasil yang optimal, maka digunakan metode optimisasi menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization*.

Kata kunci: PMDC Motor, kontroler PI, PSO

I. PENDAHULUAN

Perkembangan dunia mesin listrik pada saat ini cukup pesat pada dunia industri, salah satunya adalah motor arus searah (motor DC). Motor DC adalah jenis motor yang banyak digunakan di dunia elektronik, industri, dan komponen pendukung lainnya untuk beberapa peralatan atau instrumentasi elektronik. Aplikasi industri motor DC yang digunakan dalam industri pada umumnya memiliki kapasitas daya yang relatif dan disesuaikan dengan volume produksi dan beban mekanis. Motor DC termasuk dalam kategori jenis motor yang paling banyak digunakan baik dalam lingkungan industri, peralatan rumah tangga, dan mainan anak-anak maupun sebagai piranti pendukung sistem instrumenasi elektronik. [4]

Motor DC memerlukan suplai tegangan searah untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dalam dunia industri, sistem produksi memerlukan kecepatan dan ketepatan namun konsumsi daya yang efisien sangat diperlukan. Motor DC sering digunakan dalam memproduksi, mengangkat, dan menurunkan

ataupun menggerakkan perangkat mesin namun tidak setiap saat motor DC bekerja dengan beban kerja yang tetap. Hal tersebut akan mempengaruhi kecepatan putaran awal dari motor tersebut jika motor diberi gangguan beban.

Seiring dengan kemajuan teknologi, permasalahan pada dunia industri tentang ketidakstabilan dari kecepatan motor DC ketika awal penyalan sangatlah kompleks sehingga ketika motor DC tersebut bekerja dalam suatu proses yang membutuhkan kecepatan yang konstan, maka sistem tersebut akan terganggu. Oleh karena itu penggunaan kontrol dalam dunia industri sangatlah penting, terutama pada pengaturan kecepatan motor. Pengaturan kecepatan motor dapat dilakukan dengan menambah atau mengurangi tegangan suplai ke motor DC tersebut, namun akan mengakibatkan pekerjaan yang lebih rumit dan waktu yang lebih lama, karena harus menyeleksi waktu untuk mempercepat atau memperlambat kecepatan motor.

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah tentang pengaturan dengan kontroler PI dan juga optimisasi kontrol motor PMDC menggunakan algoritma PSO untuk mendapatkan performansi motor PMDC yang sesuai agar kecepatan yang diperoleh sesuai dengan yang dibutuhkan.

II. PEMODELAN SISTEM

Model sistem motor PMDC yang digunakan dalam Tugas Akhir ini diperoleh dari paper “*State Space Modeling and Eigenvalue Analysis of the Permanent Magnet DC Motor Drive System*” IEEE 2010. Pemodelan sistem akan dijelaskan dalam sub bab berikut.

2.1 Pemodelan Linear

Persamaan linear motor dc dapat diturunkan dengan menggunakan hukum-hukum dasar rangkaian listrik serta prinsip-prinsip hubungan elektromekanik melalui rangkaian ekuivalen motor dc sehingga persamaan linear tersebut dapat digunakan untuk analisis dan perencanaan teknik pengaturan motor. Pemodelan linear motor dc terdiri dari persamaan elektrik motor dan persamaan mekanik motor.

Persamaan elektrik motor DC berdasarkan hukum Newton yang dikombinasikan dengan hukum Kirchhoff dapat didefinisikan sebagai berikut :

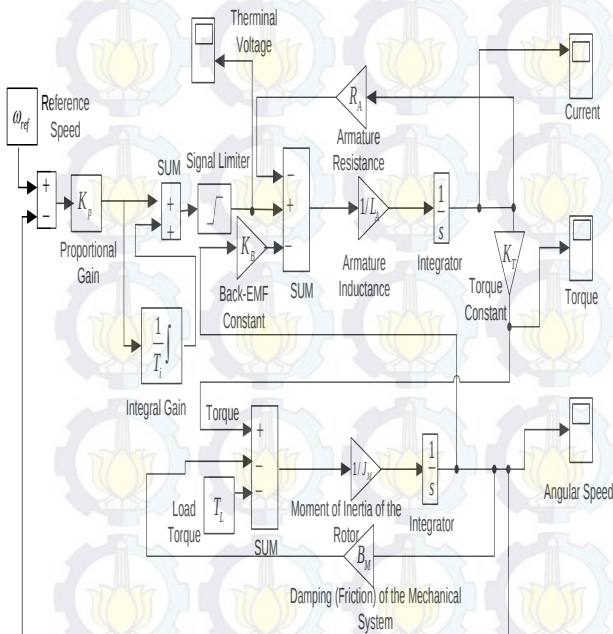
$$V_r(t) = E_b(t) + R_A I_A(t) + L_A \frac{dI_A(t)}{dt} \quad (1)$$

Persamaan mekanik motor DC berdasarkan hukum Newton yang dikombinasikan dengan hukum Kirchhoff dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$T_E(t) = J_M \frac{d\omega_M(t)}{dt} + T_L(t) + B_M \omega_M(t) \quad (2)$$

2.2 Sistem dengan Penambahan Kontroler PI

Percobaan dilakukan pada sistem dengan melakukan penambahan kontroler PI. Gangguan yang terjadi pada sistem motor PMDC adalah torsi mekanik. Jika terjadi perubahan beban pada sistem maka sistem akan mengalami gangguan karena disebabkan sistem pada motor PMDC tersebut saling terinterkoneksi menjadi satu. Gangguan-gangguan yang terjadi karena perubahan beban tersebut adalah torsi mekanik. Respon yang diamati yaitu berupa kecepatan sudut rotor (ω_M), arus jangkar motor (I_A), dan torsi elektrik motor (T_E) berdasarkan input tegangan (V_T) pada sistem motor PMDC. Kontroler PI digunakan untuk mengontrol input tegangan (V_T) sehingga kecepatan sudut rotor (ω_M) motor PMDC yang diperoleh sesuai dengan kecepatan sudut yang diharapkan dan membuat respon sistem menjadi lebih optimal.



Gambar 3. Skema Motor PMDC dengan Kontroler PI

Tabel 1. Parameter Sistem

PMDC Parameters	Nilai
Armature Resistance (R_A)	0,6 Ω
Armature Inductance (L_A)	0,012 H
moment of inertia of the rotor (J_M)	0,0167 $\text{Kg m}^2/\text{s}^2$
damping (Friction) of the mechanical system (B_M)	0,0167 Nms
Torque Constant (K_T)	0.8 Nm/A
Back-Emf Constant (K_B)	0.8 Vs/rad

Torsi motor PMDC (T), berkaitan dengan arus jangkar (I_A) dengan faktor konstan K_T : $T = K_T I_A$. Persamaan *back emf* (E_B) berkaitan dengan kecepatan rotasi yaitu $E_B = K_B \omega_M$, dalam unit SI K_T (konstanta

torsi) sama dengan K_B (konstanta *back-emf*). Persamaan motor PMDC berdasarkan hukum Newton dikombinasikan dengan hukum Kirchoff :

$$J_M \frac{d\omega_M}{dt} + B_M \omega_M = K_T I_A - T_L \quad (3)$$

$$L_A \frac{dI_A}{dt} + R_A I_A = V_T - K_B \omega_M \quad (4)$$

J_M adalah momen inersia, B_M adalah koefisien redaman pada sistem mekanik, R_A adalah resistansi jangkar, dan L_A adalah induktansi jangkar. Persamaan diatas dapat dinyatakan dengan memilih kecepatan rotasi dan arus listrik sebagai variabel keadaan dan tegangan sebagai input. Output dipilih untuk menjadi kecepatan rotasi [11].

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_M \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_M}{J_M} & \frac{K_T}{J_M} \\ \frac{K_B}{L_A} & -\frac{R_A}{L_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ I_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_A} \end{bmatrix} V_T + \begin{bmatrix} -\frac{T_L}{J_M} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ I_A \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dalam domain waktu, kontroler PI direpresentasikan dalam persamaan berikut ini :

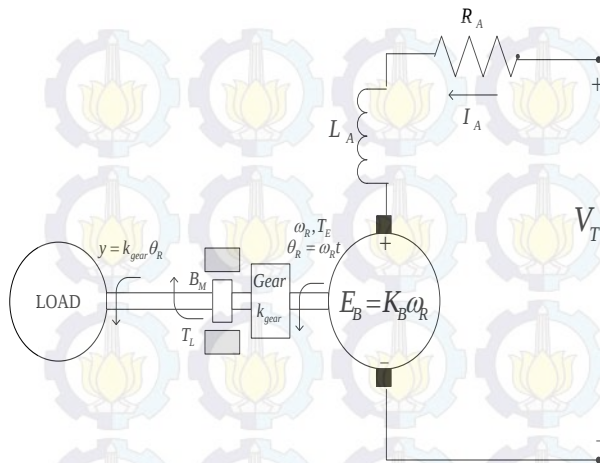
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

$e(t)$ adalah sistem *error* yang dipilih, $u(t)$ sebagai variabel control, K_p sebagai *proportional gain* dan K_i adalah *integral gain*. Terdapat beberapa penambahan karakteristik khusus pada setiap koefisien pada kontroler PI untuk respon output dari sistem. Oleh sebab itu, pemilihan *gain* adalah hal penting yang dilakukan dalam praktik kontroler ini [10].

Gambar 3 merupakan gabungan skema penggerak motor PMDC dengan kontroler PI. Sistem penggerak motor PMDC menggunakan penyetelan optimisasi sekumpulan partikel PSO. Model kontrol motor PMDC secara umum yang dikontrol oleh kontroler PI divalidasi untuk mencapai kecepatan referensi yang diharapkan pada berbagai kondisi pembebanan yang berbeda-beda yang diberikan pada sistem motor PMDC. Dengan kondisi pembebanan yang berbeda-beda pada motor PMDC maka diharapkan performansi sistem motor PMDC tetap berada pada kondisi yang optimal [3].

Error yang dikontrol oleh kontroler PI divalidasi agar motor PMDC tetap pada kecepatan yang diinginkan saat motor tersebut berada pada kondisi dibebani. Selain itu untuk mengamati performansi sistem motor PMDC adalah dengan mengamati nilai *overshoot* dan *settling time* pada respon sistem motor

PMDC [6]. Gambar *schematic diagram* dari motor PMDC ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram Skematik Motor PMDC

III. Particle Swarm Optimization

3.1 Algoritma PSO

Particle Swarm Optimization (PSO) terinspirasi dari perilaku kawanan hewan seperti ikan (*school of fish*), hewan herbivora (*herd*), dan burung (*flock*) yang kemudian tiap objek tersebut disederhanakan menjadi sebuah partikel. Suatu partikel dalam ruang memiliki posisi yang dikodekan sebagai vektor koordinat. Vektor posisi tersebut adalah keadaan yang sedang ditempati oleh suatu partikel di ruang pencarian dan dianggap sebagai keadaan yang sedang ditempati oleh suatu partikel di dalam ruang pencarian. Setiap partikel bergerak dengan kecepatan v [8].

Particle Swarm Optimization (PSO) menerapkan sifat masing-masing individu dalam satu kelompok besar dan menggabungkan berbagai sifat tersebut untuk menyelesaikan suatu permasalahan. *Particle Swarm Optimization* pertama kali muncul pada tahun 1995 dan pada saat itulah banyak dilakukan penelitian tentang metode PSO. Ciri khas metode ini adalah pengaturan kecepatan partikel secara heuristic dan probabilistik. Apabila suatu partikel memiliki kecepatan yang konstan maka jika jejak posisi partikel divisualisasikan maka akan membentuk garis lurus. Dengan adanya faktor eksternal yang menggerakkan partikel dalam ruang pencarian maka diharapkan partikel dapat mencapai titik optimal. Faktor eksternal tersebut antara lain yaitu posisi terbaik yang pernah dikunjungi suatu partikel, posisi terbaik seluruh partikel, dan faktor kreativitas yang berfungsi untuk melakukan eksplorasi [9].

Particle Swarm Optimization (PSO) memiliki kesamaan sifat seperti *Genetic Algorithm* (GA). Sistem ini diinisiasi oleh sebuah populasi solusi secara acak dan selanjutnya mencari titik optimum. Pada konteks optimisasi multivariabel, kawanan diasumsikan memiliki ukuran tertentu dengan setiap partikel posisi awalnya yang terletak pada lokasi yang acak dalam ruang multidimensi. Setiap partikel memiliki dua karakteristik yaitu kecepatan dan posisi. Setiap partikel bergerak dalam ruang tertentu dan mengingat posisi terbaik selama pencarian makanan. Setiap partikel menyampaikan posisi terbaiknya kepada partikel lain untuk ditempati juga oleh partikel lain tersebut [12].

Model algoritma PSO ini disimulasikan pada ruang dan dimensi tertentu dengan sejumlah iterasi sehingga di setiap iterasi posisi partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju yaitu fungsi minimal atau maksimal. Hal tersebut dilakukan hingga tercapai iterasi yang maksimum atau dapat juga digunakan kriteria penghentian lain [8].

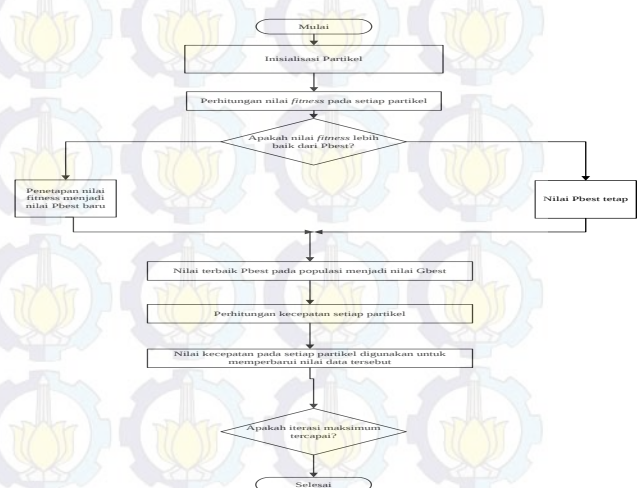
3.2. Optimisasi parameter kontroler PI menggunakan PSO

Dalam tugas akhir ini, dilakukan penalaan terhadap kontroler PI menggunakan PSO. Algoritma PSO digunakan untuk mencari kombinasi dari parameter-parameter yang paling optimal. PSO terdiri dari sejumlah partikel yang akan dioptimisasi atau berapa kali partikel tersebut dioptimisasi. Dalam tugas akhir ini permasalahan yang akan dioptimisasi ada 2, yaitu K_p dan K_i . Nilai-nilai pada K_p dan K_i diasumsikan sebagai dimensi pada PSO yang akan menjadi koordinat lokasi vektor pada populasi PSO. PSO akan mengoptimisasi K_p dan K_i hingga iterasi yang telah ditentukan. Kombinasi terbaik diperoleh melalui evaluasi setiap kombinasi dari nilai K_p dan K_i . Kombinasi terbaik dari proses optimisasi tersebut akan menghasilkan respon yang lebih cepat. Evaluasi pada sistem dilakukan dengan menghitung nilai fungsi objektif dari respon sistem. Fungsi objektif dari tugas akhir ini adalah mencari nilai kecepatan sudut rotor (ω_r) agar sesuai dengan yang direferensikan (ω_{ref}) [12].

Parameter PSO yang digunakan pada tugas akhir ini ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter PSO

Jumlah swarm	50
Jumlah variable	2
Iterasi maksimal	20
$C1$	2
$C2$	2
Inertia (w)	0.4-0.9



Gambar 5. Flowchart koordinasi PSO

Iterasi maksimal adalah banyaknya proses pengulangan yang dilakukan. *Social* dan *Cognitive constant* merupakan konstanta yang ditetapkan pada

metode optimisasi dengan menggunakan algoritma PSO.

Simulasi dilakukan dengan 20 kali iterasi. Tabel 3 menunjukkan parameter PI yang telah dioptimisasi dengan PSO.

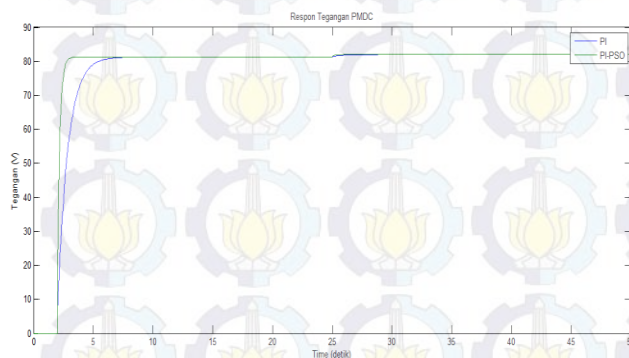
Tabel 3. Hasil optimisasi parameter PI menggunakan PSO

K_p	τ_i
0,1247	0,0281

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Simulasi dalam Tugas Akhir ini digunakan untuk mencari koordinasi parameter kontroler PI dengan menggunakan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Selain itu, Tugas Akhir ini juga digunakan untuk mengetahui karakteristik plant motor PMDC sehingga dapat digunakan untuk menganalisis peningkatan performa motor PMDC.

Dalam simulasi sistem motor dc magnet permanen diberi kasus gangguan yaitu berupa torsi mekanik. Simulasi dilakukan untuk menganalisis respon sistem motor PMDC. Respon sistem yang dianalisis adalah kecepatan sudut rotor (ω_m), arus jangkar motor (I_a), torsi elektrik motor (T_e), dan tegangan (V_T). Batas tegangan maksimal yang dibatasi oleh *signal limiter* adalah 103,35 V (6% dari tegangan 97,5 V saat $\omega_{ref} = 120$ rad/sec). Sistem dibagi menjadi 2 perbandingan yaitu respon sistem dengan PI *conventional* dan respon sistem dengan PI yang dioptimisasi dengan PSO. Pemilihan sistem PI dilakukan dengan data dari literatur, sedangkan parameter PSO juga diperoleh dari literatur.



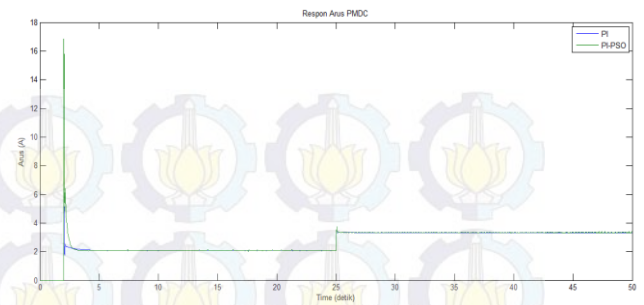
Gambar 6. Respon Tegangan Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Tabel 4. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon tegangan motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (V)	0	0
<i>Settling time</i> (det)	9,874	3,847

Tabel 5. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon tegangan motor PMDC saat 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (V)	0	0
<i>Settling time</i> (det)	28,87	25,94



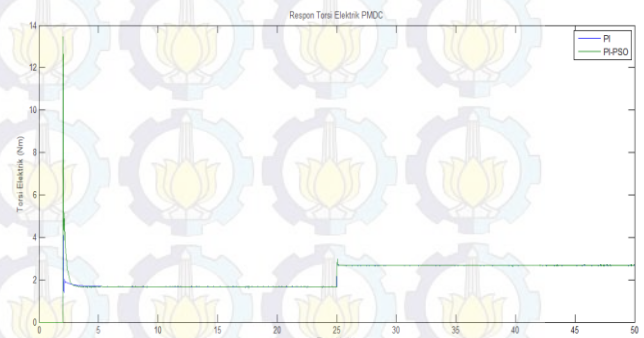
Gambar 7. Respon Arus Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Tabel 6. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon arus motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (A)	5,667	16,82
<i>Settling time</i> (det)	6,468	6,299

Tabel 7. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon arus motor PMDC saat 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (A)	3,616	3,738
<i>Settling time</i> (det)	25,96	25,43



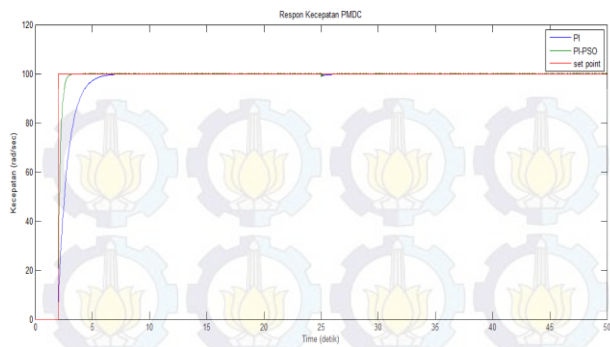
Gambar 8. Respon Torsi Elektrik Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Tabel 8. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon torsi elektrik motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (Nm)	4,534	13,46
<i>Settling time</i> (det)	6,468	6,299

Tabel 9. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon torsi elektrik motor PMDC pada 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (Nm)	2,893	2,99
<i>Settling time</i> (det)	26,44	25,96



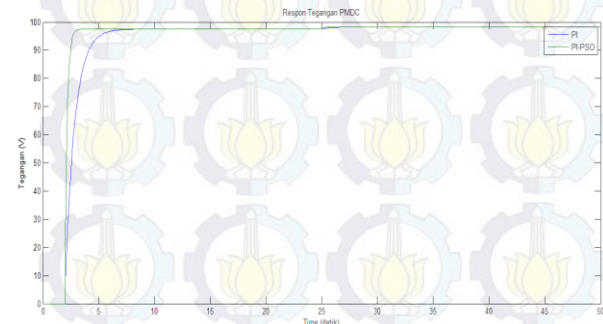
Gambar 9. Respon Kecepatan Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Tabel 10. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon kecepatan motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (rad/s)	0	0
Settling time (det)	10,41	3,847

Tabel 11. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon kecepatan motor PMDC pada 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 100$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (rad/s)	98,76	98,85
Settling time (det)	29,47	26,11



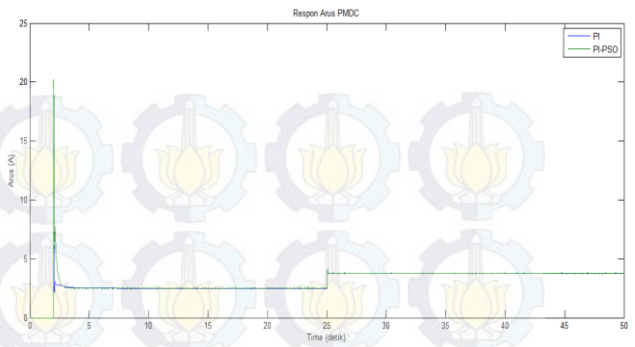
Gambar 10. Respon Tegangan Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Tabel 12. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon tegangan motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (V)	0	0
Settling time (det)	9,967	3,847

Tabel 13. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon tegangan motor PMDC pada 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (V)	0	0
Settling time (det)	28,81	25,9



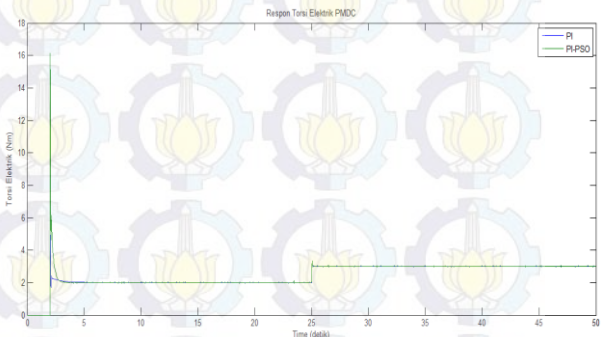
Gambar 11. Respon Arus Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Tabel 14. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon arus motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (V)	6,8	20,18
Settling time (det)	6,405	6,351

Tabel 15. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon arus motor PMDC pada 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (V)	4,039	4,152
Settling time (det)	26,15	25,8



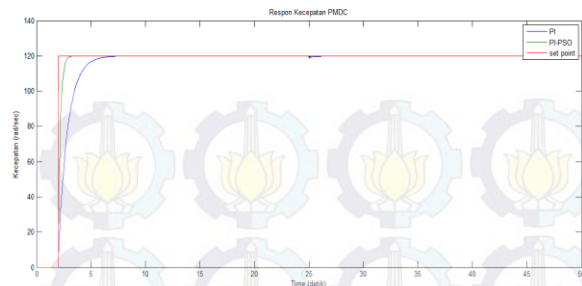
Gambar 13. Respon Torsi Elektrik Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Tabel 16. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon torsi elektrik motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0$ Nm, $\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (Nm)	5,44	16,15
Settling time (det)	6,469	6,299

Tabel 17. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon torsi elektrik motor PMDC pada 25-50 detik ($T_L = 1$ Nm, $\omega_{ref} = 120$ rad/sec)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
Overshoot (Nm)	3,231	3,322
Settling time (det)	26,3	25,42



Gambar 13. Respon Kecepatan Motor PMDC dengan Gangguan Torsi Mekanik 1 Nm ($\omega_{ref} = 120 \text{ rad/sec}$)

Tabel 18. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon kecepatan motor PMDC pada 0-25 detik ($T_L = 0 \text{ Nm}$, $\omega_{ref} = 120 \text{ rad/sec}$)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (rad/s)	0	0
<i>Settling time</i> (det)	8,581	3,534

Tabel 19. Perbandingan *overshoot* dan *settling time* respon kecepatan motor PMDC pada 25-50 detik ($T_L = 1 \text{ Nm}$, $\omega_{ref} = 120 \text{ rad/sec}$)

Metode Kontrol	PI	PI PSO
<i>Overshoot</i> (rad/s)	118,8	118,9
<i>Settling time</i> (det)	27,46	25,61

Tabel 20. Respon Motor PMDC

$\omega_{ref} = 100 \text{ rad/s}$	$T_L = 0 \text{ Nm}$	$T_L = 1 \text{ Nm}$	$T_L = 2 \text{ Nm}$
V_T	81,25 V	82 V	82,75 V
I_A	2,087 A	3,338 A	4,588 A
T_E	1,67 Nm	2,67 Nm	3,67 Nm

$\omega_{ref} = 120 \text{ rad/s}$	$T_L = 0 \text{ Nm}$	$T_L = 1 \text{ Nm}$	$T_L = 2 \text{ Nm}$
V_T	97,5 V	98,25 V	99 V
I_A	2,506 A	3,757 A	5,005 A
T_E	2,004 Nm	3,004 Nm	4,004 Nm

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi diperoleh beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut :

1. Metode PSO dapat digunakan untuk menentukan koordinasi parameter PI yang optimal.
2. Kontroler PI yang optimal dapat diterapkan pada sistem motor PMDC untuk meredam osilasi respon sistem motor PMDC.
3. Penerapan PSO terhadap PI pada sistem motor PMDC dapat memperkecil *overshoot* respon sistem dan mempercepat *settling time* sistem.
4. Perubahan respon sistem akan terjadi ketika motor diberi gangguan beban.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian berikutnya adalah :

1. Untuk mendapatkan koordinasi parameter PI yang optimal pada sistem motor PMDC dapat dilakukan dengan menggunakan komputasi cerdas yang lain untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.
2. Kontroler PI dapat diterapkan pada sistem yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Imam Robandi, "Modern Power System Control", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2009.
- [2] Imam Robandi, "Desain Sistem Tenaga Modern", Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2006.
- [3] Soebagio, "Teori Umum Mesin Elektrik", Penerbit Srikandi, Surabaya, 2008.
- [4] Zuhail, "Dasar Tenaga Listrik", Penerbit ITB, Bandung, 1991.
- [5] Jimmie J. Cathey, "Electricmachines Analysis and Design Applying Matlab", University of Kentucky USA, 2001
- [6] Katsuhiko Ogata, "Teknik Kontrol Automatik", Penerbit Erlangga, Jakarta, 1989.
- [7] Iwan Setiawan, "Kontrol PID Untuk Proses Industri", Penerbit PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [8] Sulasno, "Teknik Konversi Energi Listrik dan Sistem Pengaturan", Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2009.
- [9] Uma maheswararao.Ch, Y.S.Kishore Babu, K.Amaresh "Sliding Mode Speed Control of a DC Motor", International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2011.
- [10] Ghazanfar Shahgolian, Pegah Shafaghi, "State Space Modeling and Eigenvalue Analysis of the Permanent Magnet DC Motor Drive System", IEEE press, Department of Electrical Engineering Islamic Azad University Iran , 2010.
- [11] Wendy Kurniawan Kautsar, "Koordinasi Kontroler PID dan Thyristor Controlled Phase Shifter (TCPS) Pada Load Frequency Control (LFC) Menggunakan Differential Evolution (DE)", Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, Surabaya, 2012.

RIWAYA HIDUP

Rodhi Kelvianto lahir pada tanggal 14 Maret 1993 di Jakarta. Penulis merupakan putra dari Bapak Sukartono dan Ibu Priyati Utami. Penulis adalah anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis memulai pendidikan di SDI Al Azhar 6 Bekasi sebelum menempuh pendidikan di SMPN 92 Jakarta. Setelah menyelesaikan tahap menengah pertama, penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 31 Jakarta. Jenjang selanjutnya penulis melanjutkan kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember di jurusan Teknik Elektro pada tahun 2011. Penulis bergabung dengan Lab. Power System Operation and Control hingga saat ini.

