

PENALAAN OPTIMAL KENDALI MOTOR DC BERBASIS ANT COLONY OPTIMIZATION

Muhammad Ruswandi Djalal^{1,*}, Rahmat²

^{1,2}Teknik Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jalan Perintis Kemerdekaan 10, Makassar 90245

*Email: wandi@poliupg.ac.id

Diterima: 07 Juni 2019

Direvisi: 04 Agustus 2019

Disetujui: 09 Desember 2019

ABSTRAK

Aplikasi motor DC sangat banyak digunakan, karena motor DC sangat cocok untuk aplikasi terutama pengontrolan, sehingga dibutuhkan desain kontroler motor DC yang tepat, dalam hal ini sangat diusulkan untuk menggunakan kontroler PID karena sangat simple untuk pengontrolan sistem dengan penalaan parameter menggunakan metode cerdas yang tepat akan didapatkan kinerja yang baik. Algoritma Ant Coloni pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok akan mengikuti jejak yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan motor dc. Dengan menggunakan metode cerdas Ant Colony Optimization sebagai metode penalaan PID Controller, didapatkan hasil penalaan parameter nilai PID yang optimal di mana, P sebesar 164.9826, I sebesar 23.4705, dan D sebesar 10.5060. Kombinasi parameter yang optimal ini didapatkan kinerja respon kecepatan motor dc yang optimal, ditandai dengan respon settling time kecepatan motor yang cepat dibanding dengan metode PID trial dan system tanpa kontrol.

Kata Kunci : PID, Ant Colony, Overshoot, Settling time, Optimization

ABSTRACT

The application of DC motors is very widely used, because DC motors are very suitable for applications, especially controls, so the right DC motor controller design is needed, in this case it is highly recommended to use a PID controller because it is very simple to control the system by tuning parameters using the right smart method got good performance. The Ant Colony algorithm in principle searches for food sources based on traces of feromone which then in groups will follow the footsteps that have the largest feromone. With this principle the algorithm will find the most optimal parameters to be filled in the PID parameters, so that optimal control is obtained at the dc motor speed. By using the Ant Colony Optimization smart method as a PID Controller tuning method, the optimal PID value parameter is obtained where, P is 164.9826, I is 23.4705, and D is 10.5060. The optimal combination of parameters shows that the optimal dc motor speed response performance is indicated by a fast response of motor speed settling time compared to the PID trial method and an uncontrolled system.

Keywords : PID, Ant Colony, Overshoot, Settling time, Optimization

PENDAHULUAN

Penggunaan kontrol berbasis Proportional Integral Derivative (PID) pada

kontrol proses sudah semakin banyak, karena keandalan dan strukturnya sederhana dan stabilitas yang baik. (Yunus & Marhatang).

PID banyak digunakan bersama dengan Motor DC dalam aplikasi industri. Namun pada penerapannya penyesuaian parameter PID menjadi kompleks dan di beberapa tahun terakhir telah banyak metode untuk penalaan parameter PID. Dalam aplikasinya secara sederhana, digunakan metode penalaan trial-error untuk menyesuaikan nilai PID, namun untuk metode ini sulit untuk mendapatkan nilai optimal sehingga sulit untuk menyesuaikan parameter, serta dibutuhkan waktu yang lama (Djalal, Ajiatmo, Imran, & Robandi, 2015), dan juga akurasi kontrol tidak baik.

Dalam beberapa tahun terakhir, para peneliti telah banyak menggunakan metode cerdas (*Artificial Intelligent*) untuk penentuan parameter PID dari motor DC. Para peneliti mulai mempelajari perilaku cerdas dari hewan, dan diterapkan untuk diaplikasikan menyelesaikan permasalahan optimasi, terkhusus pada bidang kontrol. Hewan tersebut diantaranya lebah, semut, tawon dan menemukan suatu algoritma perilaku dari kebiasaan atau perilaku dari hewan tersebut.

Ant-Colony Optimization termasuk dalam kelompok Swarm Intelligence, yang merupakan salah satu jenis pengembangan paradigma yang digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dimana inspirasi yang digunakan untuk memecahkan masalah tersebut berasal dari perilaku kumpulan atau kawanan (swarm) serangga (Aliklas, Satyahadewi, & Perdana). Setiap semut dalam kawanan yang berjalan akan meninggalkan pheromone (semacam zat kimia) pada jalur yang dilaluinya. Pheromone ini menjadi semacam sinyal bagi sesama semut. Jalur yang pendek akan menyisakan sinyal yang lebih kuat. Semut berikutnya, pada saat memutuskan jalur mana yang harus dipilih, biasanya akan cenderung memilih untuk mengikuti jalur dengan sinyal yang paling kuat, sehingga jalur terpendek akan ditemui karena lebih banyak semut yang akan melewati jalur tersebut. Semakin banyak semut yang lewat suatu jalur, semakin kuat sinyal di jalur itu. Penggunaan metode ACO juga digunakan pada penelitian ini sebagai metode untuk menala parameter PID.

Beberapa metode optimasi berbasis metode konvensional maupun metode cerdas telah banyak digunakan untuk mengoptimasi parameter PID motor DC, diantaranya Artificial Bee Colony (Liao, Hu, & Wang,

2014), Particle Swarm Optimization (ADHIM; Han, Wang, & Yang, 2012), Evolutionary Algorithm (Amaral, Tanscheit, & Pacheco; Saad, Jamaluddin, & Darus), Bio-Inspired Algorithm (Fister, Fister Jr, Fister, & Šafarič, 2016; Juniku & Marango), Tabu Search (Ateş & Yeroglu, 2016; Karaboga & Kalinli, 1996; Mahar & Amin, 2016), Bacterial Foraging (Ali & Majhi, 2006; Goher & Fadlallah, 2017), Fuzzy Logic (Madyanto, Santoso, & Setiawan, 2011; MOTOR), Cuckoo Search (Djalal, Ajiatmo, Imran, et al., 2015; Djalal, Ajiatmo, Soedibyo, & Robandi, 2015; Djalal, Setiadi, & Imran), dan Flower Algorithm (Djalal et al.; Djalal, Yunus, Imran, & Setiadi, 2017; Lastomo, Setiadi, & Djalal, 2017).

Pada penelitian ini akan digunakan salah satu metode cerdas (*Artificial Intelligent*) untuk menala parameter PID motor DC yaitu dengan metode *Ant Colony Optimization (ACO)* dan akan dianalisa dan dibandingkan respon kecepatan motor DC dengan metode konvensional PID trial-error serta motor DC tanpa kontroler.

Pemodelan Sistem

Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai tegangan arus searah (DC) pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi gerak mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Motor arus searah, sebagaimana namanya, menggunakan arus langsung yang tidak langsung/direct-unidirectional. Motor DC memiliki 3 bagian utama untuk dapat berputar yaitu : Kutub Medan, Dinamo dan Komutator (Djalal, Ajiatmo, Imran, et al., 2015).

Untuk merancang dan mensimulasikan suatu sistem kontrol kecepatan motor DC diperlukan adanya model matematika dari plant yang akan dikontrol. Sehingga dalam memudahkan analisis sistem bisa digambarkan ke dalam model statis, model fisis (rangkaiannya listrik) dan dinamik (diagram blok dan transfer function).

Pemodelan Motor DC

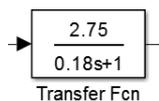
Pemodelan motor DC yang digunakan mengacu pada sebuah paper yang di mana menggunakan pemodelan transfer function. Motor DC yang digunakan di sini adalah

menggunakan motor DC magnet permanen, rating kecepatan 1400 rpm dengan kecepatan saat pengukuran 1250 rpm. Dengan memasukkan kecepatan motor DC, maka transfer function motor DC adalah (Dwi, Muhammad, Widodo, & Imam, 2016),

$$G(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (1)$$

Di mana, K_m adalah gain mekanik dan T_m adalah waktu konstan mekanik.

$$G(s) = \frac{2.75}{0.18s + 1} \quad (2)$$



Gambar 1. Pemodelan Motor DC di Simulink

Pemodelan Kontroler PID

Kontrol PID adalah salah satu kontrol yang sudah banyak digunakan pada aplikasi industri karena strukturnya yang sederhana (Djalal, Ajiatmo, Imran, et al., 2015).

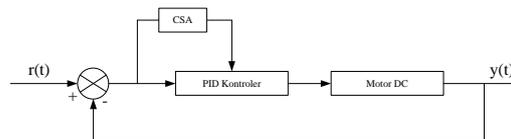
$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de_t}{dt}] \quad (3)$$

Di mana, $u(t)$ adalah nilai kontrol yang dihitung oleh kontroler PID, K_p adalah koefisien proporsional, T_i adalah integral waktu konstan dan T_d adalah diferensian time konstan. Fungsi dari ketiga elemen tersebut adalah :

- a. Proporsional: menggambarkan sinyal deviasi $e(t)$ dari sistem kontrol proporsional. ketika sinyal $e(t)$ ada, kontroler PID menghasilkan efek kontrol segera untuk mengurangi penyimpangan.
- b. Integral: digunakan untuk menghilangkan kesalahan statis dan meningkatkan stabilitas sistem.
- c. Diferensial: mencerminkan perubahan penyimpangan sinyal, memperkenalkan sinyal koreksi sebelum penyimpangan nilai sinyal menjadi lebih besar dan mempercepat respon sistem untuk mengurangi pengaturan waktu.

Oleh karena itu, merancang kontroler PID terutama berarti menentukan tiga parameter, serta bagaimana mengkonfigurasi ke tiga parameter PID (K_p , K_i , K_d). Dalam penelitian ini, *Firefly Algorithm* diusulkan untuk mencari

parameter optimal PID. Blok diagram sistem kontrol ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 2. Sistem Kontroler PID-Firefly

METODE PENELITIAN

Ant Colony Optimization

Penentuan Jarak Antar Kota

Kota yang dimaksud di sini adalah besarnya nilai pembangkitan dari masing-masing pembangkit. Sebelum dilakukan perjalanan, jarak antara nilai dari pembangkit pembangkit yang satu dengan pembangkit yang lainnya dihitung terlebih dahulu (diinisialisasi). Setelah dilakukan inisialisasi, maka semut diletakkan di kota pertama tertentu secara acak. Kemudian semut akan melanjutkan perjalanannya dari satu kota ke kota yang lainnya secara acak sampai ke tujuan akhir, yaitu kota terakhir. Setelah perjalanan selesai, lokasi kota-kota yang telah dilalui oleh semut akan digunakan untuk menghitung solusi yang dihasilkan dari perjalanan tersebut .

Perjalanan Semut

Semut memilih suatu jalur yang akan dilalui mulai dari titik r menuju ke titik s dalam suatu perjalanan dengan probabilitas :

$$p(r,s) = \frac{\gamma(r,s)}{\sum_l \gamma(r,l)} s, l \in N_r^k \quad (8)$$

dimana matrix $\gamma(r,s)$ merepresentasikan jumlah intensitas feromon antara titik r dan s . Kemudian feromon akan diperbaharui melalui persamaan berikut :

$$\gamma(r,s) = \alpha \cdot \gamma(r,s) + \Delta \gamma^k(r,s) \quad (9)$$

dimana α dengan interval $0 < \alpha < 1$ merupakan daya tahan suatu feromon, maka $(1 - \alpha)$ merepresentasikan penguapan yang terjadi pada feromon dan $\Delta \gamma^k(r,s)$ merupakan jumlah feromon yang semut k jatuhkan pada jalur (r,s) .

Perbaharui Feromon Lokal

Jejak feromon (r,s) untuk perjalanan terbaik yang telah dilakukan semut (semut yang menghasilkan parameter optimal PID)

akan diperbaharui dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\gamma(r,s) = \alpha \cdot \gamma(r,s) + \frac{Q}{f_{best}} r, s \in J_{best}^k \quad (11)$$

dengan Q merupakan sebuah konstanta positif yang sangat besar nilainya.

Perbaharui Feromon Global

Untuk menghindari terjadinya stagnan (suatu situasi dimana semut akan mengikuti jalur yang sama, yang mana akan menghasilkan solusi yang sama), maka kekuatan jejak feromon dibatasi pada interval berikut :

$$\gamma(r,s) = \begin{cases} \tau_{min} & \text{if } \gamma(r,s) \leq \tau_{min} \\ \tau_{max} & \text{if } \gamma(r,s) \geq \tau_{max} \end{cases} \quad (12)$$

Batasan atas dan batas bawahnya adalah sebagai berikut :

$$\tau_{max} = \frac{1}{\alpha \cdot f_{best}} \quad (13)$$

$$\tau_{min} = \frac{\tau_{max}}{M^2} \quad (14)$$

dengan M adalah jumlah semut yang melakukan perjalanan.

Plot Perjalanan Semut

Solusi dari perjalanan koloni semut dalam optimasi parameter PID diplot ke dalam sebuah grafik sampai batas maksimum iterasi.

Plot Perjalanan Terbaik

Perjalanan dengan solusi terbaik dari koloni semut (parameter optimal PID) untuk setiap iterasi diplot sampai batas iterasi maksimum.

Flowchart Ant Colony Optimization

Diagram alir (*flowchart*) dari metode *Ant Colony Optimization* yang digunakan untuk mencari parameter optimal PID ditunjukkan pada gambar 4.

Parameter Ant Colony Optimization

Beberapa parameter yang digunakan pada metode *Ant Colony Optimization* pada tesis ini adalah sebagai berikut:

- Jumlah semut = 10
- Iterasi maksimum = 50
- Ketahanan feromon(alpha) = 0.9

Inisialisasi Feromon (Matriks Tau)

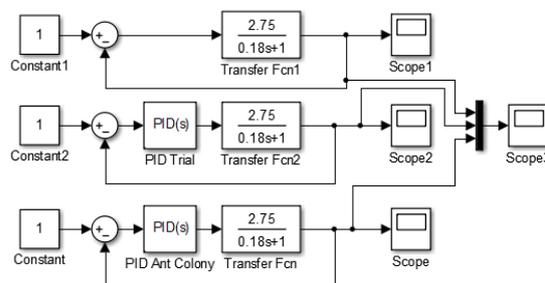
Matriks tau ini memiliki ukuran $n \times m$, dengan n adalah banyaknya kontroler pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya parameter PID dengan skala 0 sampai dengan 1 yang memiliki interval 0,01. Nilai dari matriks ini akan diperbaharui setiap dilakukan perjalanan oleh koloni semut.

Penalaan Kontrol PID dengan Ant Colony

Gambar 4 menunjukkan diagram alir algoritma metode *Ant Colony* yang digunakan pada penelitian ini untuk menala parameter PID. Fungsi objektif yang digunakan untuk menguji kestabilan sistem adalah dengan *Integral Time Absolut Error (ITAE)*.

$$ITAE = \int_0^t |\Delta\omega(t)| dt \quad (5)$$

Parameter PID yang ditala oleh Ant Colony adalah K_p , K_i dan K_d . Adapun untuk diagram alir proses penalaan parameter PID dengan menggunakan metode *Ant Colony* ditunjukkan oleh *flowchart* pada Gambar 5 dan gambar 4 menunjukkan pemodelan motor DC pada Simulink Matlab 2013, tanpa kontrol, dengan PID Trial dan PID Ant Colony.

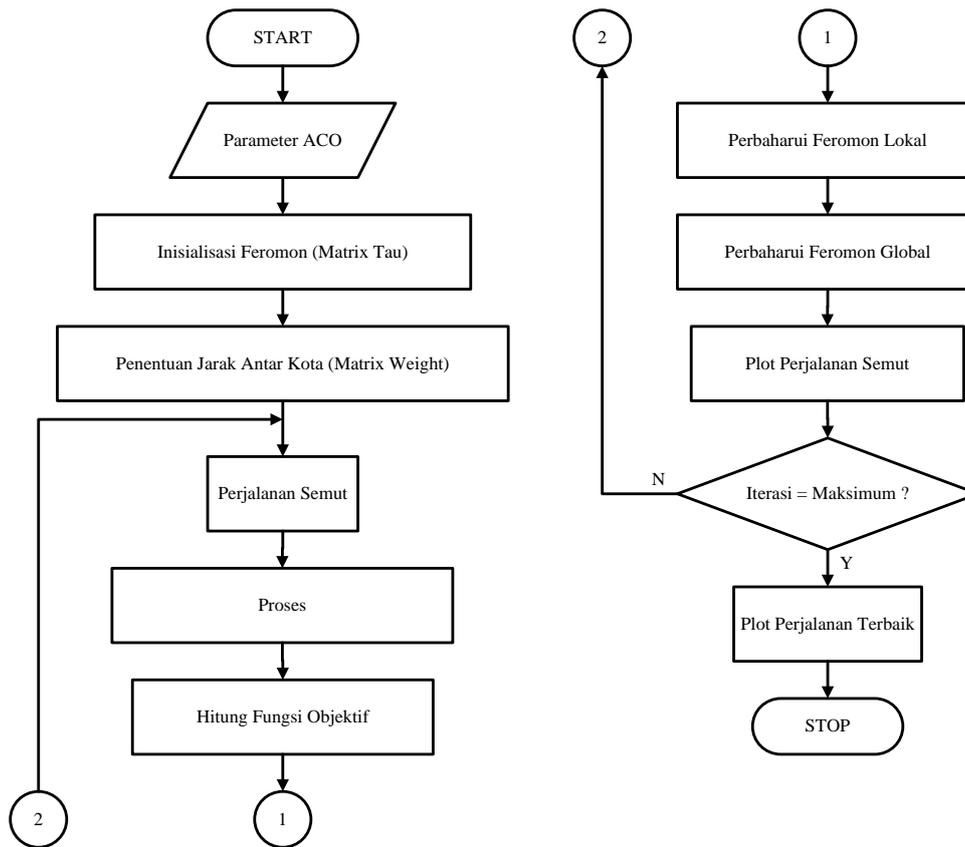


Gambar 3. Pemodelan Motor DC di Simulink

Untuk menjalankan algoritma Ant Colony dibutuhkan beberapa parameter, yang disebutkan pada table berikut ini. Algoritma ant colony dibuat menggunakan software Matlab (m.files) dan pemodelan motor menggunakan Simulink Matlab. Adapun data parameter-parameter ant colony adalah berikut,

Tabel 1. Parameter ant colony

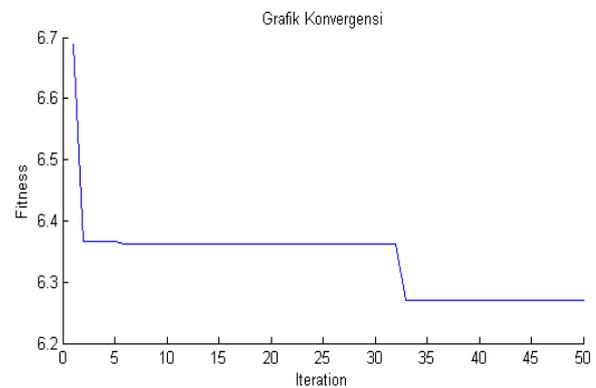
Parameters	Values
Number of Ants	6
Max Iteration	50
Feromone (Alpha)	0.9
Beta	2



Gambar 4. Flowchart Ant Colony

Setelah memasukkan beberapa parameter tersebut di table di atas, maka selanjutnya algoritma ant colony dijalankan untuk optimasi nilai PID dari controller. Nilai yang tepat akan sangat mempengaruhi kinerja respon Motor DC yang didesain pada penelitian ini. Algoritma ant colony membutuhkan proses perhitungan sampai menemukan nilai yang optimal. Gambar berikut menunjukkan grafik konvergensi optimasi nilai PID menggunakan algoritma ant colony. Konvergensi adalah suatu nilai fitness function yang menjabarkan kriteria optimal dari suatu masalah optimasi.

Gambar 5 menunjukkan grafik konvergensi optimasi nilai PID menggunakan ant colony, di mana berdasarkan grafik terlihat algoritma ant colony tidak membutuhkan waktu yang lama dalam melakukan proses optimasi, hal tersebut terlihat pada iterasi ke 33 algoritma sudah menemukan nilai PID yang optimal dengan nilai fitness sebesar 6.269. Untuk hasil selengkapnya dapat dilihat pada table berikut ini.



Gambar 5. Grafik Konvergensi Optimasi Kontrol PID Motor DC dengan *Ant Colony Optimization (ACO)*

Tabel 2. Hasil Optimasi dengan ACO

Total number of iterations=50
fmin = 6.269
kp_ant = 164.9826
ki_ant = 23.4705
kd_ant = 10.5060

Hasil optimasi ant colony didapatkan nilai *fitness function* sebesar 6.269, dengan 50 kali iterasi, nilai nbest merupakan ant colony terbaik, yang di mana diketahui sebagai hasil

optimasi parameter PID, yaitu K_p , K_i dan K_d . Tabel 4 menunjukkan nilai hasil optimasi parameter PID ditala oleh ant colony. Sebagai pembandingan digunakan kendali PID yang dituning dengan cara trial error atau coba-coba. Algoritma Ant Coloni pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok akan mengikuti jejak yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan motor dc.

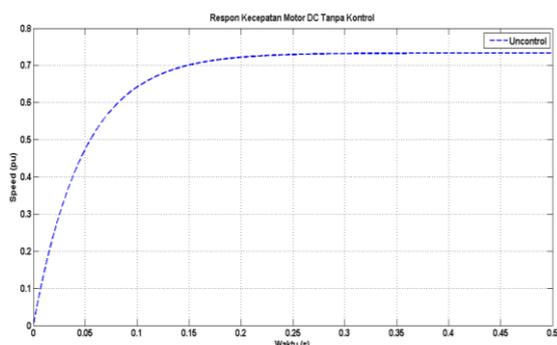
Tabel 3. Hasil Penalaan Parameter PID

Param.	Trial Error	Ant Colony
K_p	12.5171	164.9826
K_i	4.0675	23.4705
K_d	0.1253	10.5060

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respon Kecepatan Motor DC tanpa Kontrol

Analisa pertama dimulai dengan melihat kinerja motor dc tanpa kontrol. Berikut hasil simulasi dengan menggunakan Matlab.



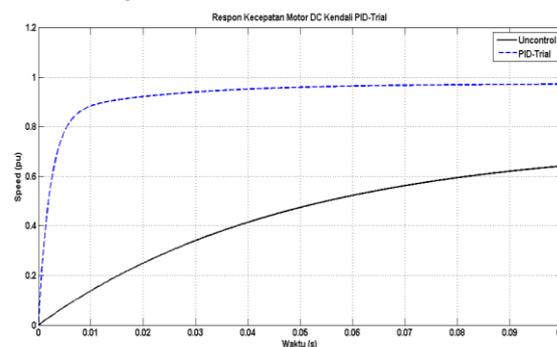
Gambar 6. Respon Kecepatan Motor DC tanpa kontrol, untuk $t=0.5s$.

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi tanpa kontroler dengan $t=0.5s$, didapatkan respon kecepatan motor DC yang sangat lama untuk mencapai ke set point awal yaitu 1pu, hal ini dikarenakan sistem tidak ada umpan balik (close loop), sehingga motor bekerja tanpa adanya set point / reference. Hasil simulasi system tanpa kontrol ini dijadikan acuan untuk mendesain kendali motor berbasis PID yang dituning dengan algoritma cerdas

menggunakan Ant Colony Optimization, dan sebagai pembandingan digunakan metode PID yang ditune secara trial/coba-coba.

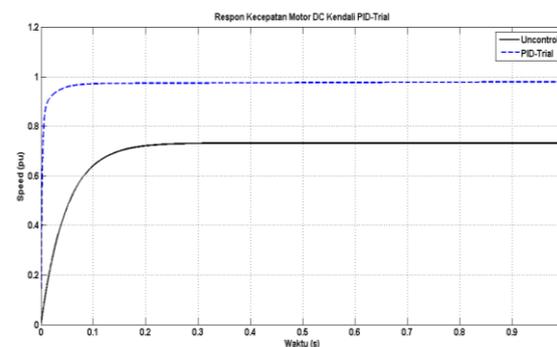
Respon Kecepatan Motor DC dengan Kendali PID Trial

Analisa berikutnya, melihat kinerja respon kecepatan motor dc dengan pemasangan kontrol PID, di mana parameter PID di tuning menggunakan cara trial, berikut hasil simulasinya.



Gambar 7. Respon Kecepatan Motor DC dengan PID Trial, $t=0.1s$

Untuk lebih jelasnya berikut untuk $t=1s$.



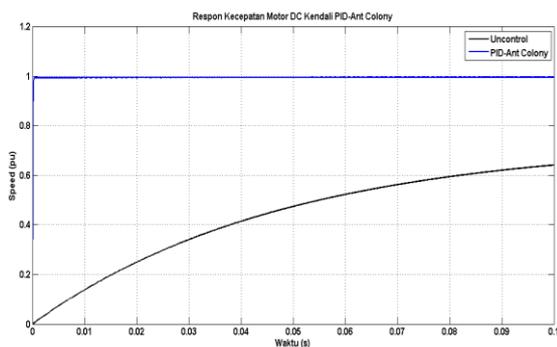
Gambar 8. Respon Kecepatan Motor DC dengan PID Trial, $t=1s$

Gambar 7 dan 8 menunjukkan grafik respon kecepatan motor DC yang lebih baik dibanding dengan system tanpa kontrol. Dari grafik di atas didapatkan *settling time* yang semakin baik dibanding dengan tanpa control, namun kinerja PID pada system ini masih bisa dioptimalkan dengan penalaan yang tepat. Dari grafik dapat dilihat, respon system belum mencapai set point awal sebelum $t=1s$. Pada metode ini parameter P (Proportional) sebesar 12.5171, I (Integral) sebesar 4.0675, dan D (Derivative) sebesar 0.1253. Parameter ini

pada prinsipnya belum optimal dikarenakan kinerja system masih terdapat error dari set point yang sudah ditentukan

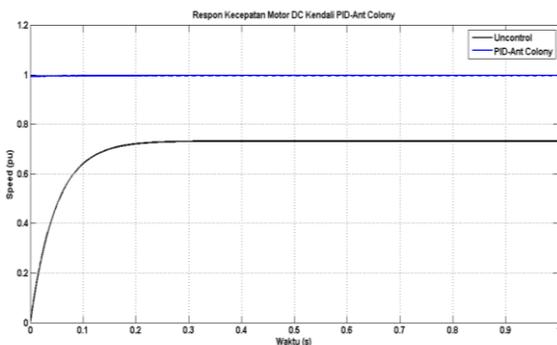
Respon Kecepatan Motor DC dengan PID Ant Colony Optimization

Simulasi berikutnya adalah kontrol motor DC dengan menggunakan PID yang dituning menggunakan algoritma ACO, berikut hasil simulasinya.



Gambar 9. Respon Kecepatan Motor DC dengan PID Ant-Colony, $t=0.1s$

Untuk lebih jelasnya berikut untuk $t=1s$.



Gambar 10. Respon Kecepatan Motor DC dengan PID Ant-Colony, $t=1s$

Gambar 9 dan 10 menunjukkan grafik respon kecepatan motor DC dengan kendali PID yang dituning dengan Ant-Colony. Dari grafik di atas didapatkan *settling time* yang sangat cepat dibanding dengan metode kendali PID Trial, di mana sistem sudah mencapai setpoint awal sebesar 1pu sebelum $t=1s$. Sistem dengan kinerja ini diusulkan untuk dijadikan referensi kendali kecepatan pada motor dc.

Algoritma Ant Coloni pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok

akan mengikuti jejak yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan motor dc. Pada hasil penalaan metode cerdas, didapatkan parameter PID yang optimal, untuk P sebesar 164.9826, I sebesar 23.4705, dan D sebesar 10.5060. Dengan kombinasi parameter yang optimal ini didapatkan kinerja respon kecepatan motor dc yang optimal, ditandai dengan respon *settling time* kecepatan motor yang cepat dibanding dengan metode PID trial dan system tanpa kontrol.

Aplikasi motor DC sangat banyak digunakan, karena motor DC sangat cocok untuk aplikasi terutama pengontrolan, sehingga dibutuhkan desain kontroler motor DC yang tepat, dalam hal ini sangat diusulkan untuk menggunakan kontroler PID karena sangat simple untuk pengontrolan sistem dengan penalaan parameter menggunakan metode cerdas yang tepat akan didapatkan kinerja yang baik.

KESIMPULAN

Algoritma Ant Coloni pada prinsipnya mencari sumber makanan berdasarkan jejak feromone yang kemudian secara berkelompok akan mengikuti jejak yang memiliki feromone yang terbesar. Dengan prinsip ini algoritma akan mencari parameter yang paling optimal untuk diisikan pada parameter PID, sehingga didapatkan kendali optimal pada kecepatan motor dc.

Dengan menggunakan metode cerdas *Ant Colony Optimization* sebagai metode penalaan *PID Controller*, didapatkan hasil penalaan parameter nilai *PID* yang optimal di mana, P sebesar 164.9826, I sebesar 23.4705, dan D sebesar 10.5060.

Kombinasi parameter yang optimal ini didapatkan kinerja respon kecepatan motor dc yang optimal, ditandai dengan respon *settling time* kecepatan motor yang cepat dibanding dengan metode PID trial dan system tanpa kontrol.

DAFTAR PUSTAKA

adhim, A. Pid Auto Tuning Menggunakan Pso Pada Sistem Fotovoltaik Penjejak Matahari Dua-Sumbu.

- Ali, A., & Majhi, S. (2006). *Design of optimum PID controller by bacterial foraging strategy*. Paper presented at the 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology.
- Aliklas, Q., Satyahadewi, N., & Perdana, H. Penerapan Algoritma Max-Min Ant System Dalam Penyusunan Jadwal Mata Kuliah Di Jurusan Matematika Fmipa Untan. *BIMASTER*, 8(2).
- Amaral, J., Tanscheit, R., & Pacheco, M. Tuning PID controllers through genetic algorithms. *complex systems*, 2, 3.
- Ateş, A., & Yeroglu, C. (2016). Optimal fractional order PID design via Tabu Search based algorithm. *ISA transactions*, 60, 109-118.
- Djalal, M. R., Ajiatmo, D., Imran, A., & Robandi, I. (2015). Desain Optimal Kontroler PID Motor DC Menggunakan Cuckoo Search Algorithm. *SENTIA 2015*, 7(1).
- Djalal, M. R., Ajiatmo, D., Soedibyo, S., & Robandi, I. (2015). FREQUENCY CONTROL PLTMH DENGAN CAPACITIVE ENERGY STORAGE MENGGUNAKAN CUCKOO SEARCH ALGORITHM. *SENTIA 2015*, 7(1).
- Djalal, M. R., Setiadi, H., & Imran, A. Frequency stability improvement of micro hydro power system using hybrid SMES and CES based on Cuckoo search algorithm. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 8(2), 76-84.
- Djalal, M. R., Yunus, M. Y., Imran, A., & Setiadi, H. (2017). FLOWER POLLINATION ALGORITHM UNTUK OPTIMASI PENGENDALI PID PADA PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI. *JETri Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 81-100.
- Dwi, L., Muhammad, R. D., Widodo, W., & Imam, R. (2016). Optimization of PID Controller Design for DC Motor Based on Flower Pollination Algorithm.
- Fister, D., Fister Jr, I., Fister, I., & Šafarič, R. (2016). Parameter tuning of PID controller with reactive nature-inspired algorithms. *Robotics and Autonomous Systems*, 84, 64-75.
- Goher, K., & Fadlallah, S. (2017). Bacterial foraging-optimized PID control of a two-wheeled machine with a two-directional handling mechanism. *Robotics and biomimetics*, 4(1), 1.
- Han, J., Wang, P., & Yang, X. (2012). *Tuning of PID controller based on fruit fly optimization algorithm*. Paper presented at the 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- Juniku, I., & Marango, P. PID design with bio-inspired intelligent algorithms for high order systems.
- Karaboga, D., & Kalinli, A. (1996). *Tuning PID controller parameters using Tabu search algorithm*. Paper presented at the 1996 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Information Intelligence and Systems (Cat. No. 96CH35929).
- Lastomo, D., Setiadi, H., & Djalal, M. R. (2017). *Enabling PID and SSSC for load frequency control using Particle Swarm Optimization*. Paper presented at the Science in Information Technology (ICSITech), 2017 3rd International Conference on.
- Liao, W., Hu, Y., & Wang, H. (2014). *Optimization of PID control for DC motor based on artificial bee colony algorithm*. Paper presented at the Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2014 International Conference on.
- Madyanto, T. D., Santoso, I., & Setiawan, I. (2011). *Pengontrolan Suhu Menggunakan Metode FUZZY-PID pada Model Sistem Hipertermia*. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Undip.
- Mahar, F., & Amin, M. (2016). Design, Implementation and Performance Analysis of Tabu Search Based PID Controller.
- MOTOR, P. P. K. SISTEM KENDALI HYBRID PID-LOGIKA FUZZY.
- Saad, M. S., Jamaluddin, H., & Darus, I. Z. PID controller tuning using evolutionary algorithms.
- Yunus, M. Y., & Marhatang, M. R. D. Application Ant Colony Optimization for Load Frequency Control in Wind Diesel Hybrid Power System.