

PERANCANGAN SISTEM KONTROL VIBRASI PADA ROBOT SINGLE LINK FLEXIBLE JOINT MANIPULATOR DENGAN PID TUNING GENETIC ALGORITHM

Riztan Hanif Abdillah

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : riztanabdillah16050874004@mhs.unesa.ac.id

Muhammad Syariffuddin Zuhrie, Bambang Suprianto, I Gusti Putu Asto Buditjahjanto

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : zuhrie@unesa.ac.id, bambangsuprianto@unesa.ac.id, asto@unesa.ac.id

Abstrak

Single Link Flexible Joint Manipulator merupakan salah satu robot industri yang sering digunakan untuk berbagai macam produksi. Penggunaan dari Single Link Flexible Joint Manipulator sangat diperlukan karena memudahkan barang yang hendak didistribusikan ke beberapa tempat yang telah ditentukan. Umumnya flexible link memiliki beban yang lebih ringan untuk mencapai respon yang cepat dengan kebutuhan energi yang rendah serta hanya membutuhkan aktuator yang lebih kecil. Namun, sering terjadi masalah pada vibrasi pada manipulator sehingga terjadi kurang akurat pada titik akhir. Ketidakakuratan ini disebabkan karena adanya vibrasi dan defleksi statis pada interval waktu tertentu dengan gerakan bolak balik. Pada penelitian ini menggunakan PID tuning *Genetic Algorithms* untuk mengatasi masalah vibrasi pada manipulator. Setelah dilakukan penelitian, didapatkan parameter PID menggunakan metode *Genetic Algorithm* yaitu $K_p = 4,728$; $K_i = 4,91$; $K_d = 0,857$. Setelah menentukan parameter PID tersebut dan diterapkan pada sistem, didapatkan respon yang baik dengan tidak adanya overshoot pada sistem. Respon paling baik terdapat pada setpoint 5 dengan *Time sampling* (T_s) sebesar 0.7895s, *Time delay* (T_d) sebesar 0.1858s, dan *Time rise* (T_r) sebesar 0,825s. Walaupun pada respon open loop memiliki *Time sampling* dan *Time delay* yang lebih baik, namun respon open loop masih memiliki overshoot sedangkan pada respon close loop tidak mengalami overshoot.

Kata Kunci : Genetic Algorithm, Single Link Flexible Joint Manipulator, PID, Vibrasi.

Abstract

Single Link Flexible Joint Manipulator is one of the industrial robots that are often used for various kinds of production. The use of a Single Link Flexible Joint Manipulator is needed because it makes it easy to distribute goods from one place to another. Generally, flexible links have a lighter burden to achieve fast responses with low energy requirements and only requires smaller actuators. However, there is often a problem with vibrations in the manipulator so that it occurs less accurately at the end point. This inaccuracy is caused by static vibrations and deflections that are alternating movements within a certain time interval. In this study using PID tuning Genetic Algorithms to overcome the problem of vibration in the manipulator. After doing research, PID parameters obtained using the Genetic Algorithm method, namely $K_p = 4,728$; $K_i = 4,91$; $K_d = 0.857$. After determining the PID parameters and applied to the system, a good response is obtained in the absence of overshoot on the system. The best response is at setpoint 5 with *Time sampling* (T_s) of 0.7895s, *Time delay* (T_d) of 0.1858s, and *Time rise* (T_r) of 0.825s. Even though the open loop response has better *Time sampling* and *Time delay*, the open loop response still has overshoot while the close loop response does not experience overshoot.

Keywords : Genetic Algorithm, PID, Single Link Flexible Joint Manipulator, Vibrasi

PENDAHULUAN

Di era modern ini, robot industri sering digunakan untuk berbagai macam produksi. Keakuratan dan ketelitian sangat diperlukan sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk mengembangkan robot industri ini. Dengan adanya robot industri ini diharapkan dapat menghasilkan kualitas produk yang bagus. Salah satu robot industri yang menjadi objek penelitian ini adalah robot *single link flexible joint manipulator*.

Manipulator adalah bagian pada robot *single link* yang pergerakannya ditunjukkan pada robot. Manipulator

terdiri dari *joint* (engsel) dan susunan *link* (rangka) sehingga menghasilkan gerakan yang terkontrol (Politeknik Negeri Sriwijaya). Manipulator pada *single link* yang fleksibel ini juga termasuk ringan, energi yang dikonsumsi lebih rendah, dan kebutuhan aktuator yang lebih kecil (Meng dan Chen, 1998). Kontrol dari manipulator robot fleksibel ini sangat diperlukan dalam banyak aplikasi karena memiliki respon yang cepat, kebutuhan akan daya yang rendah, dan massa yang cukup ringan. Namun fleksibilitas dari *single link* masih menjadi permasalahan sehingga perlu ada sistem kontrol yang

mengaturnya. Permasalahan fleksibilitas ini terjadi karena ketidakakuratan posisi akhir dari *single link*. Hal ini disebabkan karena ada defleksi statis dalam interval waktu tertentu oleh gerakan bolak balik. (Akyuz, dkk. 2012).

Fleksibilitas ini bisa terjadi karena dihasilkan dari kesalahan desain, perilaku dinamis nonlinier dari bahan fleksibel, dan efek eksternal. Dari vibrasi ini akan mengurangi akurasi dari titik akhir. Fleksibilitas pada manipulator juga sulit dikendalikan karena respon kontrolnya yang lambat, osilasi dan overshoot yang tinggi. (E.D Markus dkk. 2012).

Pada penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Yosin Alfa Syahroni Lutfianam (2018) dengan judul "Rancang Bangun Pengendalian Vibrasi Pada *Single Link Flexible Joint Manipulator Robot* berbasis PID Controller" memiliki sistem yang lebih baik dan menghasilkan vibrasi yang lebih kecil pada lengan robot. (Lutfianam, Yosin Alfa Syahroni. 2018). Kemudian pada penelitian berikutnya yang dilakukan oleh Wayu Raka Adzani (2019) berjudul "Perancangan Kontroller PID Tyreus-Luyben Untuk Kendali Vibrasi Pada Robot *Single Link Flexible Joint Manipulator*" menunjukkan hasil respon osilasi yang baik oleh sistem. Dapat dilihat pada setpoint 180° maksimal overshoot yang dihasilkan sebesar 182° (Adzani, Wahyu Raka. 2019).

Selain itu, beberapa penelitian sebagian besar hanya cenderung melakukan kontrol pada posisi end-effector dan memiliki keterbatasan dalam kinerja dan presisi. Wang dan Liu pada tahun 1990 yang menggunakan pengontrol yang kuat dan optimal dengan teknik H2 dan indeks kinerja kuadratik dalam domain frekuensi. Berger dan El Maraghy menggunakan metode linierisasi umpan balik yang berfungsi untuk menstabilkan mode linier sistem dan merancang pengontrol. Huang dan Chen menggunakan pengontrol geser adaptif untuk robot single link flexible joint dengan ketidakpastian yang tidak cocok. Taghirad dan Bakhshi yang menggunakan teknik pengontrol hibrida untuk bagian yang kaku dengan adanya saturasi aktuator.

Pada penelitian kali ini akan mengembangkan sistem kontrol dengan menggunakan *Genetic Algorithm*. Harapannya dengan menggunakan kontroller *Genetic Algorithm* ini dapat mengatasi permasalahan yang ada pada *single link* lebih baik dari yang penelitian sebelumnya. Sehingga peneliti melakukan penelitian yang berjudul "Perancangan Sistem Kontrol Vibrasi Pada Robot *Single Link Flexible Joint Manipulator* dengan PID Tuning *Genetic Algorithm*"

PEMBAHASAN

Single Link Flexible Joint Manipulator

Robot manipulator merupakan robot yang memiliki bentuk seperti tangan untuk memudahkan pekerjaan di dunia industri menggunakan motor penggerak. Robot ini memiliki 2 bagian saja yaitu bagian lengan dan bagian tubuh. Dua bagian ini berfungsi untuk memposisikan alat atau bagian dalam jangkauan kerjanya. (Jafar Shiddiq, Muhammad. 2018).

Robot manipulator harus memiliki fleksibilitas agar mendapatkan kinerja sistem yang lebih baik. Untuk meningkatkan fleksibilitas ini diperlukan lengan yang

jauh lebih ringan daripada badan robot agar mampu mencapai respon yang cepat dan energi yang diperlukan menjadi lebih rendah. Dengan bahan yang fleksibel ini mampu menghindari kerusakan fisik dan pengoperasian lebih aman.

Namun, fleksibilitas juga menimbulkan masalah pada kinerja manipulator sehingga membuat sistem terkadang menjadi tidak stabil (vibrasi). Vibrasi ini sering terjadi pada ujung manipulator walaupun fleksibilitas sendi yang relatif kecil. Di dunia industri, robot manipulator ini memiliki fungsi diantaranya :

1. Pada dunia industri otomotif, robot manipulator mampu membantu dalam pengecatan barang / otomotif sehingga menggantikan peranan manusia
2. Robot manipulator biasa digunakan dalam pemindahan barang berat (moving part) dalam industri.

Dengan fungsi robot manipulator diatas, Terdapat beberapa kelebihan diantaranya adalah :

1. Memudahkan pekerjaan manusia dalam pemindahan barang-barang berat sehingga lebih mudah dikerjakan
2. Proses pengerjaan dari robot manipulator terbilang rapi dan biaya yang dibutuhkan tidak besar sehingga perawatan lebih terjangkau.
3. Peran robot dalam dunia edukasi sangat membantu untuk pembelajaran baik di sekolah maupun perkuliahan (Jafar Shiddiq, Muhammad. 2018)

Karakteristik Respon Sistem Orde Dua

Pada respon orde dua digunakan untuk mendapatkan respon dari sistem kontrol yang memiliki ciri dari orde 2 yaitu step input, ramp input, dan impulse input (Ogata, 2010).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Js^2 + Bs + K} \quad (1)$$

Dari Persamaan diatas dapat juga ditulis dengan

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K}{J}}{\left[s + \frac{B}{2J} + \sqrt{\left(\frac{B}{2J}\right)^2 - \frac{K}{J}} \right] \left[s + \frac{B}{2J} - \sqrt{\left(\frac{B}{2J}\right)^2 - \frac{K}{J}} \right]} \quad (2)$$

Pada analisis respon transien, ini dapat ditulis juga dengan

$$\frac{K}{J} = \omega_m^2 \quad (3)$$

$$\frac{B}{J} = 2\zeta\omega_n = 2\sigma \quad (4)$$

- σ = Attenuation
- ω_n = The Undamped Natural Frequency
- ζ = The Damping Ratio of System
- K = Gain
- B = Actual Damping
- J = Momen Inersia

Rasio *Damping* adalah rasio dari damping yang aktual B ke damping critical $B_c = 2\sqrt{JK}$ atau

$$\zeta = \frac{B}{B_c} = \frac{B}{2\sqrt{JK}} \quad (5)$$

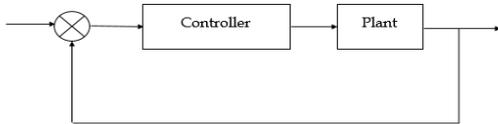
Dengan ketentuan dari ζ dan ω_n , transfer function loop tertutup $C(s) / R(s)$ dapat ditulis dengan rumus:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

PID Tuning Genetic Algorithm

1. Proportional Integral Derivative (PID)

PID merupakan salah satu pengontrol instrumenasi umpan balik yang sering digunakan dalam dunia industri untuk menentukan kepresisian dari sistem. (Eka Permana, Putra. 2013). Tujuan dari adanya PID ini adalah untuk membuat variabel proses (y) mengikuti nilai setpoint yang sudah ditentukan (x) dengan cara memanipulasi variabel (u) yang dirubah berdasarkan perintah controller. (Araki M. 2016).



Gambar 1 Diagram Blok Sistem Kontrol PID (Sumber : Ogata. 2010)

Bagian controller PID memiliki skea dari ketiga pengendalinya yang dijumlahkan menjadi variabel manipulasi untuk menghitung keluaran controller. Dari gambar 1 Dapat didefinisikan $u(t)$ sebagai output controller dengan rumus :

$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(\tau) d\tau + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Keterangan :

- Kp = Gain Proporsional
- Ki = Gain Integral
- Kd = Gain Derivatif
- e = Error
- t = Waktu
- τ = Variabel Integrasi

Dari masing-masing pengaturan PID memiliki parameter yang harus diatur dengan tepat agar mendapatkan operasi yang baik. Pengaturan parameter ini disebut sebagai konstanta. Pada tabel 1 Akan menjelaskan beberapa respon dari PID controller apabila terdapat perubahan konstanta

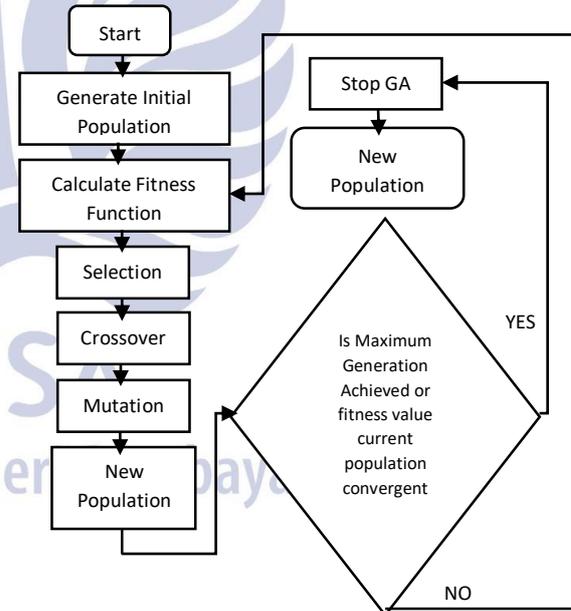
Tabel 1 Respon PID Controller

Closed Loop Response	Rise Time	Overshoot	Settling Time	SS Error
Kp	Decrease	Increase	Small Change	Decrease
Ki	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
Kd	Small Change	Decrease	Decrease	Small Change

2. Genetic Algorithm

GA (Genetic Algorithm) terinspirasi dari teori Charles Darwins terkait *Evolutionary Algorithm*. GA merupakan cerminan dari proses seleksi alam dengan memilih individu-individu terbaik untuk direproduksi sehingga menghasilkan keturunan berikutnya dan individu yang lemah akan punah (Mallawaarachchi, Vijini. 2017). GA didasarkan pada strategi survival-of-the-fittest Darwin yang meniru proses evolusi. Algoritma ini mendasarkan pada populasi kandidat solusi yang dihasilkan, dievaluasi, dan berevolusi ke solusi yang memiliki kualitas lebih tinggi. Dari beberapa operator seperti crossover dan mutasi digunakan untuk menghasilkan populasi baru yang dihasilkan dari populasi sebelumnya dan terus diulang sampai kriteria yang ditentukan algoritma berhenti. (Majmoodabadi dkk. 2014).

GA merupakan pencarian global dengan sensitivitas kurang ke titik awal pencarian daripada pendekatan berbasis kalkulus. Untuk memecahkan masalah optimasi dalam kontrol proses, GA sering digunakan karena mampu mengatasi masalah sulit dengan cepat, handal, dan akurat. Dengan kemampuan tersebut, GA memiliki potensi untuk menemukan solusi efektif yang berada diluar jangkauan metode konvensional (Rahul Malhotra. 2011). Untuk mendapatkan keturunan yang baik maka diuji dengan fungsi yang dikenal sebagai fitness function.



Gambar 2 Skema Genetic Algorithm Sumber : (Binus University. 2018)

Proses dari GA sendiri terdiri dari beberapa tahapan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2 Diantaranya adalah :

- a) Generate Initial Population

Pertama, tahapan ini menentukan beberapa individu dari populasi yang merupakan representasi sebagai solusi dari sebuah permasalahan. Setiap individu dikenal sebagai gen karena memiliki parameter (variabel) yang digabungkan menjadi string sehingga terbentuklah kromosom (solusi). Nilai

parameter dari gen ini bisa disebut sebagai biner, float, dan kombinatorial.

b) Calculate Fitness Value

Pada fitness function ini akan dihitung skor fitness dari setiap individu. Dalam perhitungan ini akan menentukan apakah individu di setiap kromosom memiliki kemampuan yang baik daripada yang lain atau tidak.

c) Selection

Pada tahapan ini adalah memilih individu yang memiliki kualitas yang baik dan meneruskan gen individu ke generasi berikutnya. Setiap dua pasang individu (parents) akan dipilih berdasarkan nilai fitness functionnya. Apabila individu memiliki nilai yang tinggi maka akan memiliki lebih banyak kesempatan untuk dipilih reproduksi

d) Crossover

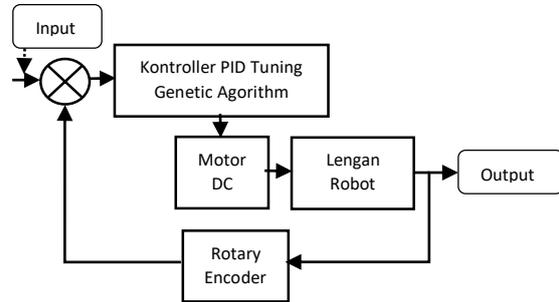
Pada fase ini masing-masing individu akan diacak untuk dikawinkan dari dalam gen pada titik crossover. Titik crossover akan tercapai karena keturunan yang diciptakan menukar gen individu yang dikawinkan dari mereka sendiri.

e) Mutation

Tahapan ini akan memutasikan beberapa gen dengan kemungkinan acak yang rendah dari keturunan baru yang sudah terbentuk. Dengan adanya mutasi ini berfungsi untuk mempertahankan keragaman dalam populasi serta mencegah konvergensi prematur

Desain Sistem

Pada sistem ini terdiri dari input, controller, aktuator, plant, sensor, dan output yang termasuk dari sistem loop tertutup. Pada gambar 3, dapat dilihat blok diagram sistem tersebut.



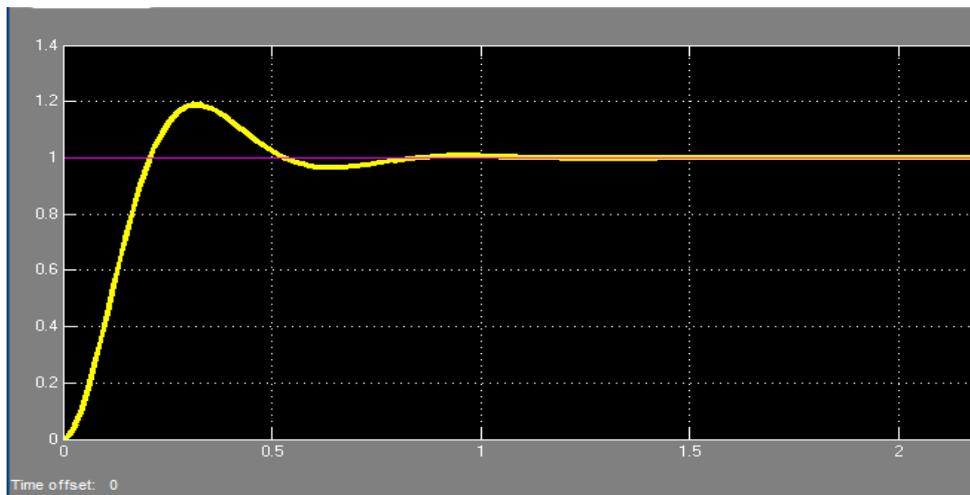
Gambar 3 Blok Diagram Sistem (Sumber : Data Pribadi, 2019)

Kontroller utama dari sistem adalah board Arduino UNO dengan PID tuning *Genetic Algorithm* kemudian motor DC dan motor *driver L298N* sebagai aktuator yang menggerakkan lengan robot. Sensor *rotary encoder* berfungsi untuk menggerakkan lengan robot dalam sistem (*plant*).

Untuk membaca putaran motor DC, maka diperlukan cara untuk mengkonversi putaran menjadi besaran sudut dari $0^\circ - 360^\circ$ ketika sistem sudah dijalankan. Arduino MEGA akan menerima sinyal PWM dari *rotary encoder* kemudian dijumlahkan dengan nilai setpoint untuk mendapat nilai error. Nilai error ini akan dimasukkan sebagai input controller. Kemudian controller PID akan mengirimkan sinyal ke aktuator yang akan menggerakkan lengan robot berdasarkan setpoint yang sudah ditentukan dengan tuning *Genetic Algorithm*

Hasil Simulasi

Untuk mengambil data dilakukan dengan menggunakan software MATLAB R2014. Pada perhitungan matematis sebelumnya didapatkan transfer function yang kemudian dimasukkan ke dalam program. Dari program tersebut didapatkan respon loop terbuka



Gambar 4 Respon Loop Terbuka

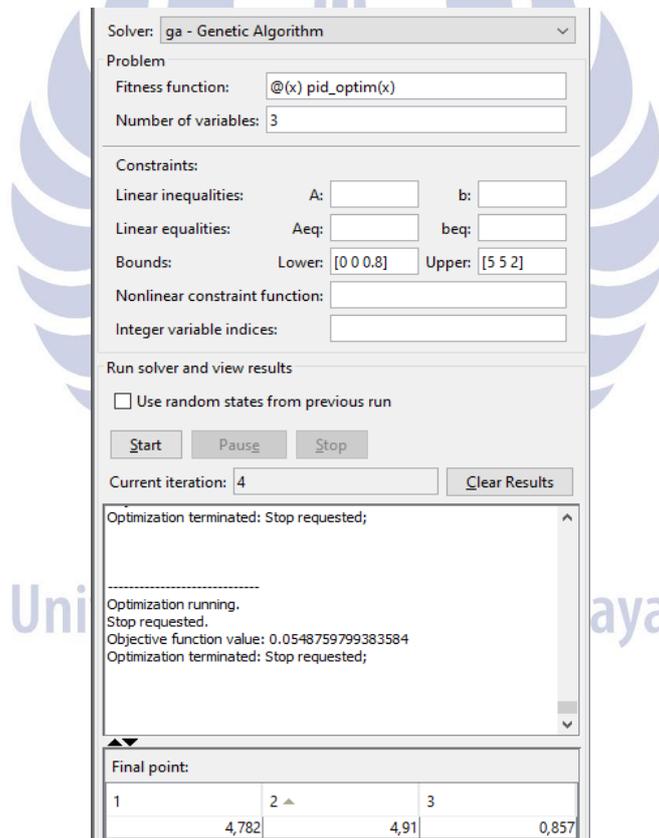
Setelah mendapatkan hasil dari respon loop terbuka kemudian menentukan nilai K_p , K_i , dan K_d dengan memasukkan program Genetic Algorithm seperti pada gambar dibawah ini

```

1 function [J] = pid_optim(x)
2
3 s = tf('s');
4
5 plant = 124.32 / (s + 10.48) * 124.32;
6
7 Kp = x(1);
8 Ki = x(2);
9 Kd = x(3);
10
11 cont = Kp + Ki/s + Kd * s;
12
13 step(feedback(plant*cont,1));
14
15 dt = 5;
16 t = 0:dt:1;
17
18 e = 1 - step(feedback(plant*cont,1),t);
19
20 J = sum(t',abs(e)*dt);
21
    
```

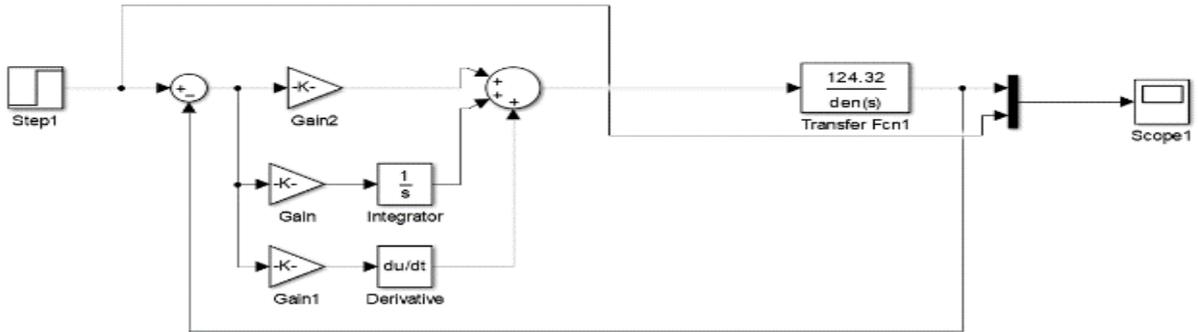
Gambar 5 Program Editor MATLAB

Pada program editor ini dimasukkan juga Transfer Function untuk mengaktifkan optimasi Genetic Algorithm

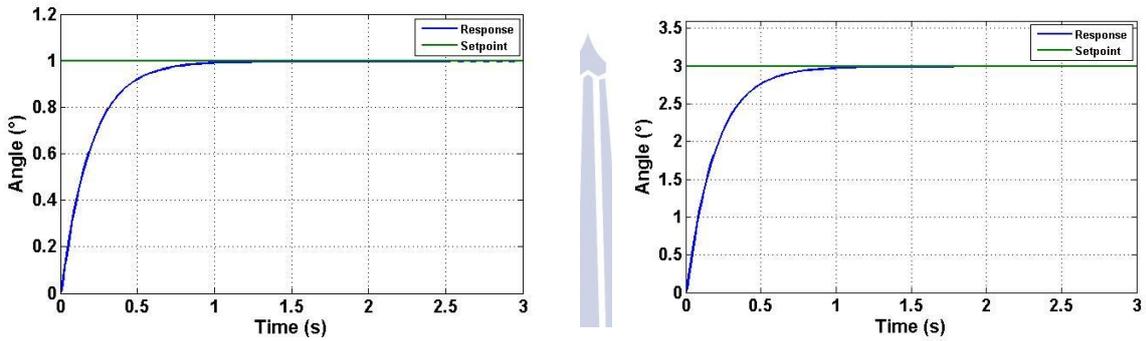


Gambar 6 Menu Optimization

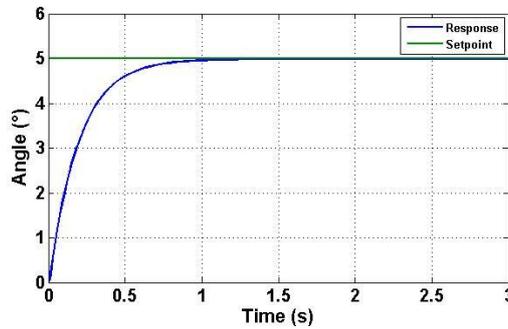
Pada menu optimization ini dimasukkan fitness function dan variable yang dimasukkan ada 3 yaitu K_p , K_i , dan K_d . Kemudian memasukkan nilai batas bawah sampai batas atas untuk mendapatkan hasil yang bagus. Setelah memasukkan variabel-variabel yang diperlukan diatas, maka akan dimulai / start dan akan looping secara otomatis. Pada penelitian ini peneliti menggunakan 4 iterasi dan didapatkan $K_p = 4,782$; $K_i = 4,91$; $K_d = 0,857$ dan disimulasikan pada blok diagram. Simulasi akan diambil menggunakan 3 kali setpoint yaitu pada setpoint 1, setpoint 3, dan setpoint 5



Gambar 7 Blok Diagram



Gambar 8 Respon Loop Tertutup Setpoint 1 dan 3



Gambar 9 Respon Loop Tertutup Setpoint 5

Dari ketiga setpoint yang digunakan dalam simulasi menunjukkan hasil respon yang baik dari sistem sehingga tidak memiliki overshoot dan mampu mencapai kondisi *steady state* dengan cepat.

Dari 3 setpoint tersebut dapat diketahui bahwa sistem dapat melakukan kontrol dengan baik. Berikut ini hasil analisa data dari ketiga respon sistem dengan setpoint yang berbeda.

Tabel 2. Hasil Analisis Respon Sistem

Pengujian	t_d	t_r	t_s	Error
Open Loop	0,1212S	0,2028S	0,19S	
Setpoint 1	0,1534S	0,46S	0,7901S	0,10%
Setpoint 3	2,77S	0,697S	0,7901S	0,23%
Setpoint 5	0,1858S	0,825S	0,7895S	0,26%

Tabel 3. Nilai X dan Y Pada Respon Sistem

Pengujian	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Percobaan 4	Percobaan 5
Setpoint 1	X = 0,8626 Y = 0,9853	X = 0,9785 Y = 0,9907	X = 1,065 Y = 0,9932	X = 1,216 Y = 0,9958	X = 1,394 Y = 0,9973
Setpoint 3	X = 0,8627 Y = 2,956	X = 0,9384 Y = 2,968	X = 0,9788 Y = 2,972	X = 1,066 Y = 2,98	X = 1,163 Y = 2,985
Setpoint 5	X = 1,019 Y = 4,96	X = 1,063 Y = 4,966	X = 1,11 Y = 4,971	X = 1,213 Y = 4,979	X = 1,33 Y = 4,984

Dalam pengujian simulasi ini, peneliti menggunakan 3 setpoint untuk melihat respon sistem dengan menggunakan PID tuning *Genetic Algorithm*. Nilai PID yang didapatkan adalah $K_p = 4,782$; $K_i = 4,91$; $K_d = 0,857$. Hasil analisis yang didapatkan pada tabel 2 dan 3, Error dalam simulasi memiliki nilai yang kecil dan error paling kecil terdapat pada setpoint 1 yaitu 0,1% dan

T_s paling cepat terdapat pada setpoint 5 dengan nilai 0,7895 s. Open loop memiliki *rise time* yang lebih cepat daripada close loop namun pada close loop tidak mengalami overshoot sehingga menunjukkan bahwa PID dengan tuning *Genetic Algorithm* dapat melakukan pengontrolan yang cukup baik.

PENUTUP

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dengan data-data yang digunakan dan diujikan dalam sebuah simulasi, kesimpulan yang didapatkan dari hasil simulasi Perancangan Sistem Kontrol Vibrasi Pada Robot Single Link Flexible Joint Manipulator Dengan PID Tuning *Genetic Algorithm*, sistem dapat bekerja dengan baik karena mampu mengikuti setpoint yang sudah ditentukan. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa kontroller PID dengan tuning *Genetic Algorithm* didapatkan nilai $K_p = 4,782$; $K_i = 4,91$; $K_d = 0,857$ dengan tidak adanya overshoot. Hasil dengan $t_s = 0,7895$ s pada setpoint 5 adalah hasil yang terbaik dengan $t_d = 0,1858$ s dan $t_r = 0,2028$ s. Error yang dihasilkan respon close loop pada setpoint 1 merupakan error paling kecil dengan nilai 0,1%

SARAN

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah mencari model matematika yang baru dengan parameter-parameter yang ditentukan agar menghasilkan respon sistem yang bagus sebagai hasil implementasi dari ilmu yang sudah dipelajari selama masa perkuliahan.

DAFTAR PUSTAKA

- Admin. 2018. Control Motor DC with Module L298N Arduino. (online)(<https://toleinnovator.blogspot.com/2018/06/kontrol-motor-dc-with-arduino-dan-modul.html>), diakses pada 27 Januari 2020).
- Anonymous. 2016. Pengertian Rotary Encoder. (online)(<https://karyainovasiku.blogspot.com/2016/02/pengertian-rotary-encoder.html>), diakses pada 26 Januari 2020).
- Araki M. 2015. PID Control. Control Systems Robotics and Automation Vol II. Kyoto University, Japan.
- Arifin, Fatchul. 2015. PID Controller. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Binus University. 2018. *Genetic Algorithm*. (online)(<https://socs.binus.ac.id/2018/12/08/g>
- [etic-algorithm/](https://www.nyebartilmu.com/tutoria-l-arduino-mengakses-driver-motor-l298n/), diakses pada 1 Februari 2020).
- Faudin, Agus. 2017. Tutorial Arduino Mengakses Driver Motor L298N. (online)(<https://www.nyebartilmu.com/tutoria-l-arduino-mengakses-driver-motor-l298n/>), diakses pada 27 Januari 2020).
- Febriani. 2016. Pengertian MATLAB dan Fungsi Bagian-Bagiannya. (online)(febriani1998.blogspot.com/2016/12/pengertian-matlab-dan-fungsi-bagian.html), diakses pada 29 Januari 2020).
- Fellu, Vincente, Kuldi S, Rattan, H. Benjemis Browns. 1989. *Adaptive Control of A Single-Link Flexible Manipulator In The Presence Of Joint Friction and Load Changes*. Electronics Control. UNED.
- Humaidi, Amjad dkk. 2018. Design of Active Disturbance Rejection Control for Single-Link Flexible Joint Manipulator. 22nd Internaional Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)
- Initial Board. 2015. Panduan Dasar Menggunakan Arduino. (online)(<https://www.initialboard.com/panduan-dasar-menggunakan-arduino>), diakses pada 25 Januari 2020).
- Jafar Shiddiq, Muhammad. 2018. Pengertian, Fungsi, Kelebihan, dan Kekurangan Robot Manipulator (Arm Robot). (online)(<https://siddix.blogspot.com/2018/05/pengertianfungsikelebihan-dan.html>), diakses pada 30 Januari 2020).
- Kho, Dickson. 2014. Pengertian Motor DC dan Prinsip Kerjanya. (online)(<https://teknikelektronika.com/pengertian-motor-dc-prinsip-kerja-dc-motor/>), diakses pada 24 Januari 2020).
- Munandar, Aris. 2012. Ligid Crystal Display. (online)(<http://www.leselektronika.com/2012>

- [/06/liquid-crystal-display-lcd-16-x-2.html](#), diakses pada 27 Januari 2020).
- Petroka, R.P. dkk. 1989. Experimental Validation of a Dynamic Model (Equivalent Rigid Link System) on a Single-Link Flexible Manipulator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*.
- Raden. 2011. Pengertian Kendali P.I.D (Proportional-Integral-Derivative). (online)(<http://catatan-elektro.blogspot.com/2011/11/pengertian-kendali-pid.html>, diakses pada 31 Januari 2020)
- Rizqiawan, Arwindra. 2009. Sekilas Rotary Encoder. (online)(<https://konversi.wordpress.com/2009/06/12/skilas-rotary-encoder/>, diakses pada 26 Januari 2020).
- Sitepu, Jimmi. 2018. Fungsi dan Pengertian Arduino Dalam Sistem Kontrol. (online)(<https://mikroavr.com/fungsi-dan-cara-kerja-arduino/>, diakses pada 25 Januari 2020).
- Suprianto. 2015. Pengertian Push Button Switch (Saklar Tombol Tekan). (online)(<http://blog.unnes.ac.id/antosupri/pengertian-push-button-switch-saklar-tombol-tekan/>, diakses pada 28 Januari 2020).
- Unknown. 2017. Teori Umum dan Cara Kerja Rotary Encoder. (online)(<https://carakerjapro.blogspot.com/2017/02/teori-umum-dan-cara-kerja-rotary-encoder.html>, diakses pada 26 Januari 2020).
- Wikikomponen. 2017. Pengertian, Fungsi, Cara Kerja, dan Hal Berkaitan Dengan Arduino. (online)(<https://www.wikikomponen.com/pengertian-fungsi-cara-kerja-dan-hal-berkaitan-dengan-arduino/>, diakses pada 25 Januari 2020)
- Yulias, Zerfani. 2013. Arduino Mega 2560.(online)(<http://blog.famosastudio.com/2013/09/produk/arduino-mega-2560/531>, diakses pada 25 Januari 2020).
- Zulhilmi Bin Zakaria, Muhammad. 2013. *Vibration Control of Single Link Flexible Manipulator By Using Neural Network*. Faculty of Mechanical Engineering, University Malaysia Pahang.

