

SISTEM KENDALI KALANG TERTUTUP DENGAN METODE PID PADA ROBOT WAYANG

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



Disusun oleh:

Yanuardi Ramadhan

14524133

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

SISTEM KENDALI KALANG TERTUTUP DENGAN METODE PID PADA ROBOT

WAYANG

TUGAS AKHIR

ISLAM

**Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**

Disusun oleh:

**Yanuardi Ramadhan
14524133**

البعثة الإسلامية
Yogyakarta, 23 - 08 - 2018
الجمهورية الإسلامية

Menyetujui,

Pembimbing 1



**R M Sisdarmanto Adinandra ST, M.Sc, Ph.D
025240101**

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

SISTEM KENDALI KALANG TERTUTUP DENGAN METODE PID PADA ROBOT

WAYANG

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Yanuardi Ramadhan

14524133

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 20 - 08 - 2018

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : R M Sisdamanto Adinandra, ST, M.Sc, Ph.D, 

Anggota Penguji 1: Medilla Kusriyanto, ST, M.Eng., 

Anggota Penguji 2: Almira Budiyanto, S.Si, M.Eng., 

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 23 - 08 - 2018



Ketua Program Studi Teknik Elektro


Yusuf Aziz Amrullah, ST, M.Sc, Ph.D

045240101

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.

Yogyakarta, 23 Agustus 2018



Yanuardi Ramadhan

KATA PENGANTAR

Sungguh besar anugerah yang telah diberikan kepada saya oleh Allah SWT. Sungguh besar dan banyak sekali sehingga saya tidak bisa menghitungnya. Saya hanya dapat mengucapkan syukur untuk segala rahmat dan berkah yang diberikan oleh-Nya.

Pada kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sangat besar kepada atas dukungan beberapa pihak, antara lain:

1. Orang tua penulis, yang telah memberikan dukungan, baik berupa dorongan moral maupun material.
2. Bapak Sisdarmanto Adinandra, Pd.D, selaku Dosen Pembimbing tugas akhir, yang telah memberikan panduan dan membimbing penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Seluruh Dosen Teknik Elektro FTI UII atas segala ilmu yang telah diberikan.
4. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro 2014 dan senior yang berkenan untuk teman diskusi tentang tugas akhir ini.
5. Segala pihak yang membantu, yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Tentu masih ada kekurangan pada tugas akhir ini, baik dalam proses penyusunan maupun hasilnya. Penulis berharap akan tercipta karya-karya yang dapat menyempurnakan tugas akhir ini.

ABSTRAK

Articulated robot (robot lengan) adalah salah satu jenis robot paling populer di bidang industri. Robot jenis ini memiliki gerakan yang fleksibel di mana sangat berguna untuk menggantikan pekerjaan manusia yang dianggap repetitif.

Pada tugas akhir ini dirancang sebuah sistem kendali kalang tertutup untuk robot lengan dengan 4 DOF (*Degree Of Freedom*). MATLAB akan digunakan sebagai antarmuka pengendalian robot. Data dari MATLAB akan dikirimkan ke mikrokontroler. Selanjutnya mikrokontroler akan meneruskan datanya untuk menggerakkan servo. Data posisi dari servo akan dikirimkan kembali ke MATLAB. Sistem ini dibuat untuk mengurangi *steady-state error* (SSE) yang terjadi pada robot.

Sistem kalang tertutup mampu mengurangi SSE dari servo walaupun dengan resiko memperlambat *settling time*. Pada sistem kalang tertutup, rata-rata SSE pada servo 1, 2, 3, dan 4 dapat berkurang berturut-turut sebanyak $5,67^\circ$, $2,46^\circ$, $3,71^\circ$, dan $20,39^\circ$. Sedangkan *settling time*-nya bertambah sebanyak 1,66 detik, 2,24 detik, 1,77 detik, dan 1,69 detik di mana nilai *settling time* sistem secara keseluruhan adalah 2,24 detik.

Kata Kunci : *Articulated robot*, Arduino, MATLAB, *steady-state error*, *settling time*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Studi Literatur.....	3
2.2 Tinjauan Teori.....	4
2.2.1 Motor Servo.....	4
2.2.2 MATLAB.....	4
2.2.3 Arduino.....	5
2.2.4 Pengendali PID.....	5
BAB 3 METODOLOGI.....	6
3.1 Perancangan Sistem.....	6
3.2 Sistem Mekanik.....	7
3.3 Sistem Elektronik.....	8

3.4 Perancangan <i>Software</i>	8
3.5 Sistem Kalibrasi.....	10
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	11
4.1 Hasil Kalibrasi.....	11
4.2 Pengujian pada Sistem Kalang Terbuka.....	12
4.2.1 Pengujian pada Servo Pertama.....	13
4.2.2 Pengujian pada Servo Kedua.....	13
4.2.3 Pengujian pada Servo Ketiga.....	14
4.2.4 Pengujian pada Servo Keempat.....	14
4.3 Pengujian pada Sistem Kalang Tertutup.....	15
4.3.1 Pengujian pada Servo Pertama.....	15
4.3.2 Pengujian pada Servo Kedua.....	16
4.3.3 Pengujian pada Servo Ketiga.....	16
4.3.4 Pengujian pada Servo Keempat.....	17
4.4 Perbandingan pada Sistem Kalang Terbuka dan Kalang Tertutup.....	17
4.5 Hal Lain Terkait Penelitian.....	18
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	19
5.1 Kesimpulan.....	19
5.2 Saran.....	19
DAFTAR PUSTAKA	20
LAMPIRAN	1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem Kendali Robot Wayang.....	6
Gambar 3.2 Desain Robot Wayang.....	7
Gambar 3.3 Program Utama Robot Wayang.....	9
Gambar 3.4 Subprogram pada Sistem Kalang Terbuka.....	9
Gambar 3.5 Subprogram pada Sistem Kalang Tertutup.....	10

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Denavit-Hartenberg Robot Wayang.....	7
Tabel 4.1 Hasil Pembacaan Sudut Servo.....	11
Tabel 4.2 Persamaan Konversi untuk Setiap Servo.....	11
Tabel 4.3 Hasil posisi dari Servo Pertama pada Sistem Kalang Terbuka.....	13
Tabel 4.4 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Pertama pada Sistem Kalang Terbuka.....	13
Tabel 4.5 Hasil posisi dari Servo Kedua pada Sistem Kalang Terbuka.....	13
Tabel 4.6 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Kedua pada Sistem Kalang Terbuka.....	14
Tabel 4.7 Hasil posisi dari Servo Ketiga pada Sistem Kalang Terbuka.....	14
Tabel 4.8 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Ketiga pada Sistem Kalang Terbuka.....	14
Tabel 4.9 Hasil posisi dari Servo Keempat pada Sistem Kalang Terbuka.....	14
Tabel 4.10 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Keempat pada Sistem Kalang Terbuka.....	15
Tabel 4.11 Hasil posisi dari Servo Pertama pada Sistem Kalang Tertutup.....	15
Tabel 4.12 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Pertama pada Sistem Kalang Tertutup.....	16
Tabel 4.13 Hasil posisi dari Servo Kedua pada Sistem Kalang Tertutup.....	16
Tabel 4.14 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Kedua pada Sistem Kalang Tertutup.....	16
Tabel 4.15 Hasil posisi dari Servo Ketiga pada Sistem Kalang Tertutup.....	16
Tabel 4.16 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Ketiga pada Sistem Kalang Tertutup.....	16
Tabel 4.17 Hasil posisi dari Servo Keempat pada Sistem Kalang Tertutup.....	17
Tabel 4.18 Nilai <i>Settling Time</i> Servo Keempat pada Sistem Kalang Tertutup.....	17
Tabel 4.19 Perbandingan antara Sistem Kalang Terbuka dan Sistem Kalang Tertutup.....	18

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Robotika telah menjadi topik penelitian lebih dari lima puluh tahun. Pengaplikasiannya dimulai di sektor industri, guna membebaskan pekerja dalam pekerjaan berbahaya atau melelahkan [1]. Jika berbicara tentang robot industri, hal pertama yang terpikirkan adalah *articulated robot* (robot lengan). Tidak dapat dipungkiri bahwa penggunaan robot lengan di dunia industri sangat penting. Robot lengan dapat digunakan untuk berbagai hal, seperti pengelasan, penanganan material, pengeluaran dan pemindahan barang dengan material yang berbeda-beda. Robot jenis ini dapat meningkatkan produktivitas industri dengan meningkatkan kecepatan dan akurasinya. Selain itu kualitas produk yang dibuat akan meningkat. Karena alasan tersebut, robot lengan menjadi robot yang paling sering digunakan di pabrik-pabrik di seluruh dunia [2].

Pada laboratorium Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia terdapat berbagai robot lengan untuk keperluan pembelajaran mahasiswa. Sayangnya, pada robot tersebut belum terpasang pengendali mumpuni. Contohnya, pada *WayBot* (robot wayang) masih memakai sistem kendali *open-loop* (kalang terbuka). Hal ini membuat *steady-state error* dari sistem menjadi besar. Sistem tersebut dapat ditingkatkan menjadi sistem *closed-loop* (kalang tertutup) dengan menggunakan sensor posisi. Dengan adanya sensor tersebut, posisi dari setiap lengan dapat diketahui, sehingga nilai posisi yang terbaca dengan nilai posisi yang diinginkan dapat dibandingkan guna untuk meningkatkan akurasi dari robot.

Untuk menutupi kekurangan dari sistem tersebut maka dibuatlah sistem kendali kalang tertutup. Sistem yang dibuat menggunakan pengendali PID untuk meningkatkan performa dari servo. Tujuan utama dari sistem ini untuk meminimalisir *steady state error*. Pada tugas akhir ini digunakan komputer yang di dalamnya terdapat perangkat lunak yang disebut MATLAB. MATLAB berguna sebagai antarmuka dari pengendalian robot. Robot wayang akan dikendalikan oleh servo. Sedangkan untuk menggerakkan servo digunakan Arduino.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana cara implementasi sistem kendali kalang tertutup pada robot wayang?

1.3 Batasan Masalah

Batasan Masalah berisi hal-hal yang membatasi lingkup penelitian.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang sistem kendali *closed-loop* pada robot wayang.
2. Menganalisis perbedaan antara sistem kalang tertutup dan sistem kalang terbuka pada servo.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah tercipta robot dengan akurasi yang lebih baik dari sebelumnya, sehingga dapat dijadikan sebagai bahan pengembangan untuk pengembangan robot untuk di Jurusan Teknik Elektro FTI UII.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Dari penelitian oleh Jokic dkk, dibahas tentang implementasi sistem kendali *closed-loop* untuk robot *single axis* dengan motor DC. MATLAB digunakan sebagai *software* untuk membuat algoritma pengendalinya. Pada MATLAB terdapat *toolbox* yang dirancang secara khusus untuk keperluan pengembangan struktur kendali secara *real time*. Sistem terdiri dari beberapa bagian, yaitu FPGA, *interface card* dan aktuator. Aktuator pada sistem ini berupa motor, *driver* yang mengoperasikannya dan encoder untuk keperluan umpan-balik, membaca posisi dari *axis* motor. FPGA digunakan untuk menghasilkan torsi yang cocok dengan memperhitungkan perbedaan nilai posisi yang diinginkan dan posisi yang sebenarnya [3].

Hugo dkk melakukan penelitian dengan fokus pada masalah koneksi antara sudut setiap *joint* robot dan posisi *end-effector*-nya. *Forward kinematics* akan diselesaikan dengan menggunakan metode DH (*Denavit-Hartenberg*). Sementara pada *inverse kinematics* akan diselesaikan dengan ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). ANFIS adalah salah satu fitur *toolbox* yang terdapat pada MATLAB. Model yang digunakan adalah robot PUMA 560. Perbedaan antara posisi *end-effector* menggunakan ANFIS dan dari perhitungan pada *forward kinematics* akan dihitung untuk menguji *error* dari posisi *end-effector* [4].

Pada penelitian lain, yaitu oleh Aggarwal dkk, dibahas tentang teknik inkonvensional untuk memecahkan masalah *invers kinematics* menggunakan *artificial neural network*. Sebuah *feed-forward multi-layer perceptron* dengan *backpropagation neural network* digunakan pada penelitian ini. Solusi dari *inverse kinematics* untuk robot PUMA 560 didapatkan dengan melakukan *training* pada *neural network* dengan koordinat *end-effector* Cartesian dan konfigurasi pada *joint* yang sesuai. Teknik ini memiliki hasil yang menjanjikan karena hanya memerlukan waktu yang kecil dibandingkan metode tradisional lainnya [5].

Selain itu terdapat penelitian oleh Marsian, dibahas tentang kendali robot wayang dengan 4-DOF. Pada penelitian tersebut dirancang suatu pengendali robot manipulator lengan berbentuk wayang dengan konfigurasi *joint* RRRR. LabVIEW digunakan sebagai antarmuka pengendalian robot dan penghitungan *forward* dan *inverse kinematic*. Data hasil penghitungan tersebut akan dikirimkan ke Arduino untuk mengendalikan servo. Pada penelitian ini digunakan sistem kendali kalang terbuka.

Dengan memperhatikan beberapa literatur diputuskan untuk dibuatnya kendali robot wayang yang telah dibahas di paragraf sebelumnya. Akan tetapi, pada penelitian ini akan dibuat

robot dengan sistem kalang tertutup untuk meningkatkan kekurangan dari penelitian oleh saudara Marsian.

2.2 Tinjauan Teori

2.2.1 Motor Servo

Motor servo adalah salah satu jenis motor DC. Output dari perangkat ini adalah posisi pada porosnya. Poros ini dapat diposisikan ke posisi sudut tertentu dengan mengirimkan sinyal kepada servo. Selama terdapat sinyal pada jalur input, servo akan mempertahankan posisi sudut poros. Saat terjadi perubahan sinyal, posisi sudut poros akan berubah.

Cara kerja motor servo cukup sederhana. Motor servo memiliki beberapa sirkuit kontrol dan potensiometer yang terhubung ke poros. Potensiometer memungkinkan sirkuit kontrol untuk memantau sudut arus motor servo. Jika poros telah di sudut yang benar, motor akan berhenti. Jika sudutnya tidak benar, maka motor akan memutar arah sampai sudutnya benar. Poros keluaran servo mampu melaju sekitar 180 derajat [6].

2.2.2 MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah perangkat lunak yang berguna untuk komputasi dan analisis numerik. *Software* ini juga merupakan bahasa pemrograman matematika yang menggunakan bentuk dan sifat matriks. Selain memiliki fungsi *built-in*, pengolahan sinyal, dan kalkulasi matematis lainnya, MATLAB juga memiliki *toolbox* untuk beberapa fungsi khusus. MATLAB adalah program yang bersifat *extensible*, hal ini berarti pengguna dapat membuat fungsi tambahan yang akan dimasukkan pada library.

Matlab digunakan untuk :

- Komputansi matematika
- Perancangan model, simulasi, dan pembuatan prototipe
- Visualisasi dan analisis data
- Analisis numerik dan statistik
- Pengembangan aplikasi teknik

2.2.3 Arduino

Arduino adalah salah satu perangkat kendali mikrokontroler. Arduino berasal dari keluarga ATmega. Arduino dibuat dengan upaya membuat perangkat yang terjangkau, bersifat *open-source*, dan sederhana. Penggunaan Arduino sangat mudah, sehingga dapat dipelajari oleh orang awam sekalipun[7].

2.2.4 Pengendali PID

PID merupakan salah satu algoritma kontrol yang paling umum digunakan dalam industri kontrol. Pengendali ini sangat populer dikarenakan kesederhanaan dalam pengoperasiannya, sehingga dapat digunakan dengan mudah. Walaupun sederhana, pengendali PID memiliki kinerja yang bagus dan cocok untuk kebanyakan kondisi operasi. Pengendali PID terdiri dari tiga koefisien, yaitu proporsional, integral dan derivatif.

Proporsional adalah komponen yang membandingkan besar antara *set point* dan variabel proses. Perbedaan kedua hal tersebut disebut *error*. Nilai dari proporsional menentukan respon output terhadap *error* yang terjadi. Secara umum, dengan menaikkan nilai proporsional maka kecepatan dari respon akan meningkat. Namun, hal tersebut akan menimbulkan osilasi yang lebih besar pula.

Pada komponen integral *error* pada setiap waktu akan terus diakumulasikan. Hal ini menyebabkan respon output akan terus meningkat seiringnya waktu berjalan. Integral juga bisa disebut sebagai penjumlahan *error*. Respon integral akan terus meningkat sampai nilai *error* mengarah ke nilai nol. Secara umum, integral berguna untuk mengurangi nilai *steady-state error* atau yang disebut dengan nilai *error* pada kondisi tetap.

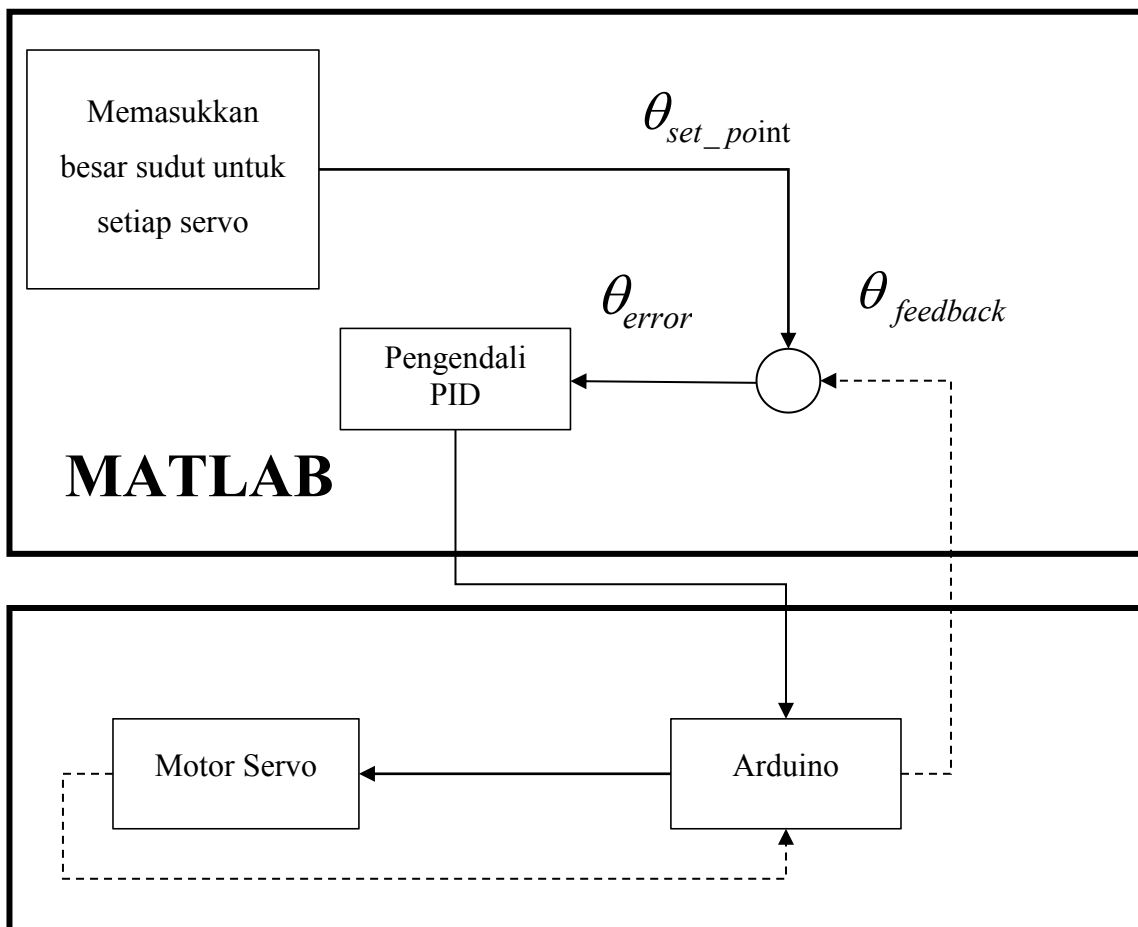
Derivatif merupakan komponen yang berguna untuk memprediksi besar *error* di masa mendatang. Respon dari derivatif bergantung pada perubahan dari *error* pada setiap waktu yang dikalikan dengan nilai konstan derivatif yang telah dipilih. Dengan menggunakan derivatif, respon output akan menjadi lebih terkontrol karena *error* dari output lebih teredam.

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Perancangan Sistem

Robot wayang ini memiliki 4-DOF (*Degree of Freedom*) dengan semua sendi merupakan sendi rotasi. Motor servo akan digunakan untuk menggerakkan setiap sendi dari robot. Pengguna menggunakan MATLAB untuk memberikan perintah pergerakan pada robot. Data tersebut akan dikirimkan ke Arduino menggunakan *port* serial.



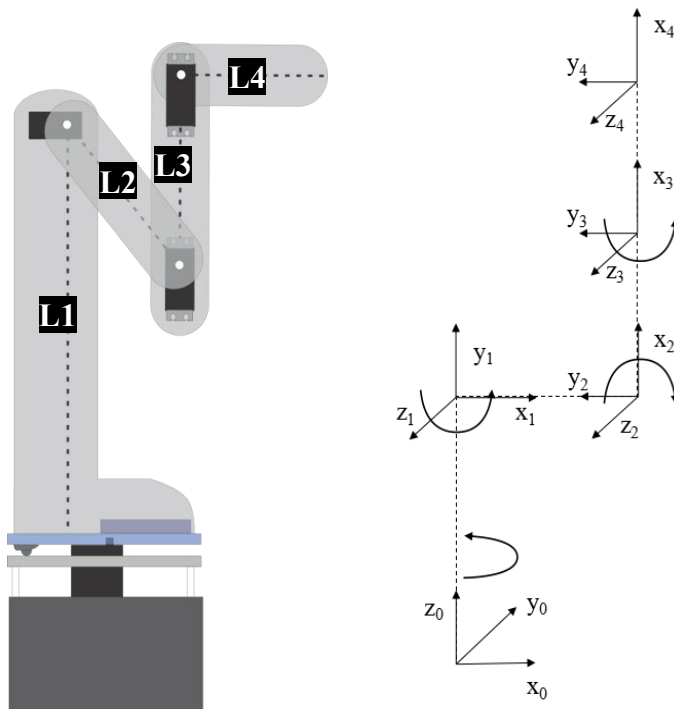
Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem Kendali Robot Wayang

Proses sistem kendali berawal dengan menggunakan komputer. Pada kasus ini digunakan *software* MATLAB. Pada MATLAB dipilih sudut-sudut tiap *joint*. Data tersebut akan dikirimkan ke Arduino. Setelah data sampai ke perangkat arduino, data tersebut akan diproses dan dikirimkan ke motor servo untuk menggerakkan servo.

Setelah servo telah bergerak, maka posisi setiap lengan akan dibaca dengan menggunakan potensiometer. Data tersebut akan dikirimkan ke MATLAB melalui perantara Arduino. Data dari sudut lengan yang diinginkan dan sudut yang terbaca oleh potensiometer akan dibandingkan.

Data perbandingan (*error*) tersebut akan dikirimkan ke pengendali PID untuk diproses. Pada pengendali PID terjadi proses untuk mengoreksi posisi dari robot berdasarkan nilai *error* yang dihasilkan. Data tersebut akan dikirimkan kembali kepada motor servo melalui Arduino. Proses ini akan diulang sampai posisi lengan robot dianggap benar.

3.2 Sistem Mekanik



Gambar 3.2 Desain Robot Wayang

Lengan robot ini merupakan robot 4R dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Pada setiap *joint* terdapat 3 jenis servo, yaitu servo Tower Pro MG 995 sebagai penggerak *base*, servo Tower Pro MG946R sebagai penggerak lengan 1 dan 2, dan servo Tower Pro MG90 sebagai penggerak lengan 3.

Tabel 3.1 Parameter Denavit-Hartenberg Robot Wayang

Servo	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90°	-	30 cm	θ_1^*
2	-	12 cm	-	θ_2^*
3	-	12 cm	-	$-\theta_3^*$
4	-	10 cm	-	θ_4^*

Keterangan :

a_i = jarak dari z_i ke z_{i+1} diukur pada sumbu x_i

α_i = sudut dari z_i ke z_{i+1} diukur pada sumbu x_i

d_i = jarak dari x_{i-1} ke x_i diukur pada sumbu z_i

θ_i = sudut dari x_{i-1} ke x_i diukur pada sumbu z_i

* = nilai dapat berubah sesuai nilai masukan yang diberikan

3.3 Sistem Elektronik

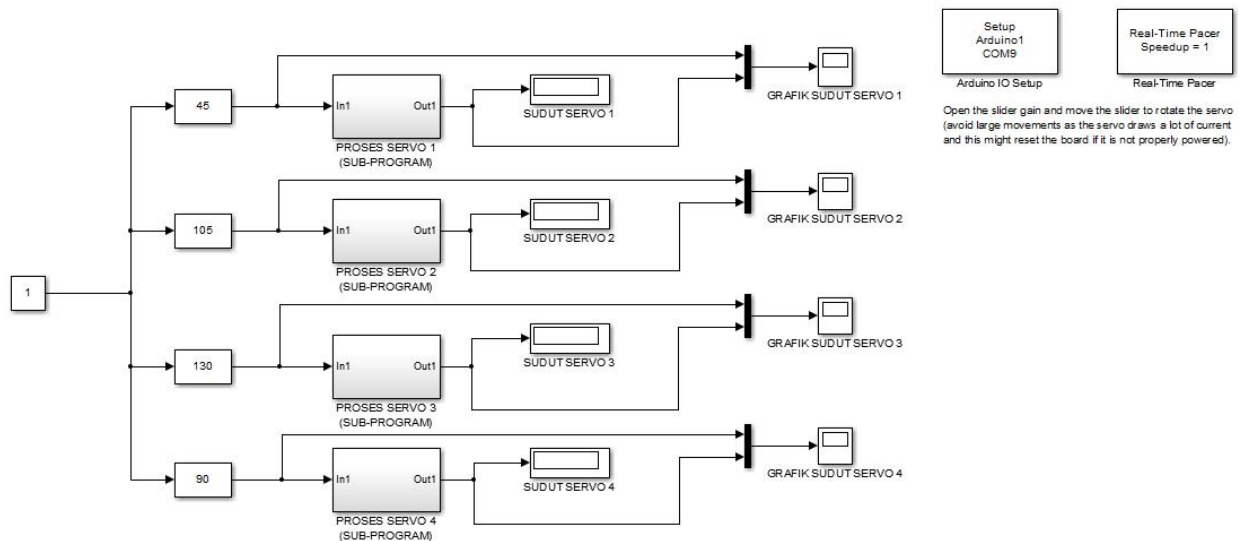
Berikut adalah port yang digunakan pada mikrokontroler pada sistem skematik robot :

- Pin* 9, 8, 7, dan 6 digunakan sebagai pemberi sinyal kepada servo
- Pin* analog A1, A2, A3, dan A4 digunakan untuk membaca nilai posisi dari servo. Sensor yang digunakan untuk membaca posisi dari servo adalah potensiometer yang telah tertanam pada servo.
- Port serial* sebagai *port* komunikasi antara komputer dan Arduino Uno.

Robot ini menggunakan *power supply* komputer sebagai suplai daya tambahan. Jika hal ini tidak digunakan maka servo akan kekurangan arus untuk bekerja.

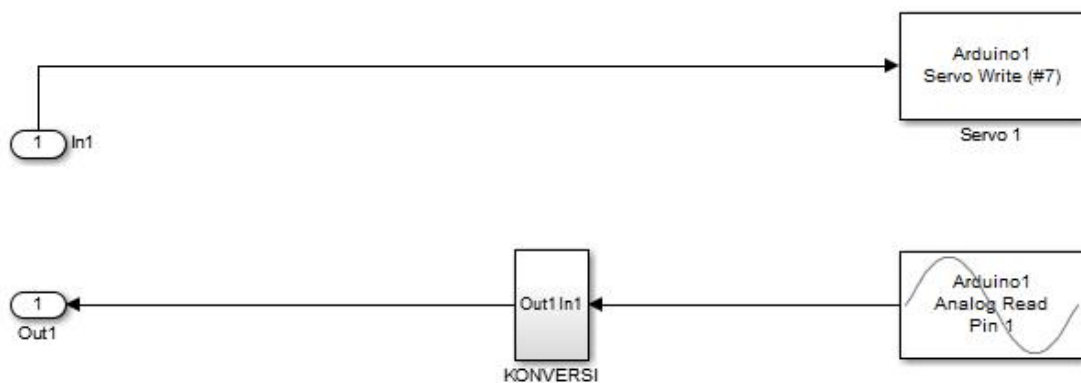
3.4 Perancangan *Software*

Robot ini menggunakan SIMULINK yang terdapat pada MATLAB. Terdapat dua perancangan pada robot, yaitu sistem robot kalang terbuka dan sistem robot kalang tertutup. Rancangan program utama pada kedua sistem cenderung sama. Perbedaan dari kedua sistem tersebut terdapat pada subprogramnya. Pada sistem utama ini diberikan nilai dari sudut yang diinginkan. Nilai tersebut akan diproses ke setiap subprogram untuk diproses lebih lanjut. subprogram 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut bertanggung jawab untuk menggerakkan servo 1, 2, 3, dan 4. Setelah melewati subprogram, maka nilai sudut dari servo akan ditampilkan.



Gambar 3.3 Program Utama Robot Wayang

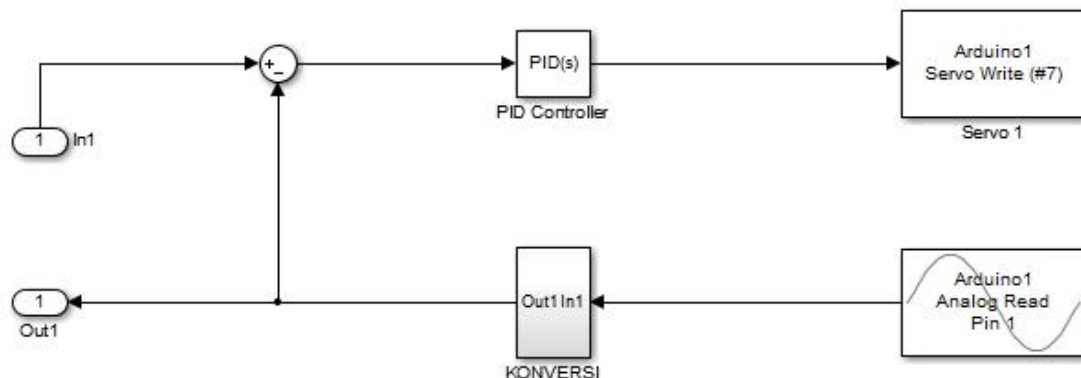
Untuk melihat perbedaan dari subprogram pada sistem kalang terbuka dan kalang tertutup, dapat diperhatikan Gambar 3.4 dan 3.5. Pada subprogram di kalang terbuka, nilai sudut yang telah diberikan akan diteruskan ke fungsi *servo write*. *Servo write* berfungsi untuk meneruskan data dari nilai sudut yang diinginkan ke Arduino untuk menggerakkan servo. Selain itu, terdapat pula fungsi *Analog Read* di mana berfungsi untuk membaca nilai sudut dari servo. Nilai yang terbaca dari *Analog Read* adalah hasil konversi ADC yang mengkonversikan nilai tegangan dari Arduino menjadi nilai digital dengan resolusi 10 bit. Nilai tersebut akan diubah menjadi nilai sudut dengan menggunakan fungsi konversi. Setelah melewati konversi, maka nilai dari servo akan dikeluarkan dari subprogram dan diteruskan ke sistem utama untuk ditampilkan hasilnya.



Gambar 3.4 Subprogram pada Sistem Kalang Terbuka

Pada subprogram di kalang tertutup, selain memiliki fungsi seperti sistem kalang terbuka, terdapat pula fungsi *PID Controller*. Hal itu berfungsi untuk mengendalikan performa dari servo. Cara kerjanya cukup sederhana, nilai sudut dari servo yang telah dikonversi akan diteruskan kembali. Nilai dari sudut yang diinginkan akan dikurang dengan nilai sudut yang dibaca. Hasil pengurangan tersebut adalah selisih dari target yang diinginkan sudut yang telah terbaca, atau disebut juga *error*. Nilai *error* tersebut akan diproses pada bagian *PID Controller* untuk

menghitung berapa besar sinyal yang harus dikirimkan ke *servo write* untuk mengurangi *error* dari servo. Pada *PID Controller* akan dipilih nilai komponen P, I, dan D yang paling efektif untuk meningkatkan performa dari servo.



Gambar 3.5 Subprogram pada Sistem Kalang Tertutup

3.5 Sistem Kalibrasi

Kalibrasi diperlukan untuk mendapatkan nilai sudut dari sensor yang sesuai dengan nilai aslinya. Pada setiap servo terdapat sebuah potensiometer yang dapat berguna untuk mengetahui sudut dari servo tersebut. Dengan menyambungkan potensiometer ke Arduino menggunakan kabel maka sudut dari tiap servo dapat diketahui. Nilai yang terbaca pada potensiometer adalah berupa tegangan listrik. Nilai tegangan listrik tersebut akan diteruskan oleh Arduino ke PC di mana akan diproses oleh MATLAB. Pada MATLAB nilai dari tegangan listrik akan dikonversikan dengan menggunakan ADC 10 bit. Karena nilai yang dibutuhkan adalah nilai dalam bentuk derajat maka diperlukan konversi untuk mengubah nilai ADC tersebut menjadi nilai dengan besaran derajat. Kalibrasi perlu dilakukann untuk tiap sensor karena terdapat perbedaan karakteristik pada tiap servo walaupun untuk tipe yang sama. Cara kerja dari kalibrasi adalah dengan memberikan input sudut minimal dan sudut maksimal dari tiap servo. Dengan menggunakan persamaan regresi linier

$$y = mx + c, \tag{3.1}$$

maka akan didapatkan persamaan untuk tiap servo yang dapat digunakan untuk proses konversi dari nilai biner ke besaran derajat.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Kalibrasi

Kalibrasi dilakukan dengan mengambil nilai minimum dan maksimum dari servo. Servo akan digerakkan ke sudut minimum dan maksimum, lalu diukur nilai sudut tersebut dengan menggunakan busur. Sensor pun akan membaca nilai dari sudut servo dengan bentuk nilai biner. Setelah nilai tersebut telah didapat, maka akan dihitung persamaan dari konversi servo dengan menggunakan persamaan garis lurus. Pada pengukuran pertama (nilai minimum), semua servo akan digerakkan hingga mencapai sudut 0°. Setelah itu nilai biner yang terbaca oleh sistem akan dicatat. Pada pengukuran kedua (nilai maksimum), servo 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut akan digerakkan hingga mencapai sudut 17°, 160°, 160°, dan 150°. Nilai yang didapat pada pengukuran dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pembacaan Sudut Servo

	Nilai minimum		Nilai maksimum	
	Sudut yang diukur (°)	Nilai biner yang dibaca sensor	Sudut yang diukur (°)	Nilai biner yang dibaca sensor
Servo 1	0	118	170	424
Servo 2	0	105	160	411
Servo 3	0	113	160	415
Servo 4	0	111	150	426

Hasil persamaan pada tiap-tiap servo akan dapat dilihat pada Tabel 4.2. Untuk memperjelas cara perhitungan untuk mendapatkan persamaan tersebut, terdapat contoh perhitungan untuk servo pertama.

Tabel 4.2 Persamaan Konversi untuk Setiap Servo

Servo	Persamaan yang didapat
1	$y = \frac{306}{170}x + 118$
2	$y = \frac{306}{160}x + 105$
3	$y = \frac{302}{160}x + 113$
4	$y = \frac{315}{150}x + 111$

Contoh perhitungan pada servo 1:

$$\begin{aligned}y &= \text{nilai_biner} \\x &= \text{sudut_yang_diukur} \\y &= mx + c \\y &= 118 \\x &= 0 \\&\text{maka} \\118 &= 0 \times x + c \\c &= 118 \\&\text{didapat} \\y &= mx + 118 \\y &= 424 \\x &= 170 \\&\text{maka} \\424 &= m \times 170 + 118 \\m &= \frac{424 - 118}{170} \\m &= \frac{306}{170} \\&\text{jadi} \\y &= \frac{306}{170} x + 118\end{aligned}$$

4.2 Pengujian pada Sistem Kalang Terbuka

Pada percobaan ini dilakukan pengujian robot tanpa menggunakan pengendali PID yang telah didesain. Percobaan dilakukan dengan memilih nilai sudut yang berbeda-beda pada setiap servo. Contohnya pada percobaan 1 nilai sudut yang dipilih untuk servo 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut yaitu 90° , 30° , 120° , dan 20° . Nilai dari hasil percobaan akan dibandingkan dengan nilai input yang telah diberikan. Dengan begitu akan dihasilkan nilai dari *error* pada setiap percobaan. *Error* pada hal ini didefinisikan sebagai besarnya ketidakakurasian pada nilai sudut servo dilihat dari input yang diberikan.

Untuk memastikan kepresisian dari servo dilakukan beberapa percobaan untuk setiap nilai input yang sama. Hasil percobaan yang ditampilkan adalah sebanyak 9 kali. Setelah itu dicari nilai tengah dari beberapa percobaan tersebut. Untuk melakukannya digunakan metode *Root-Mean-Square Error* (RMSE), yaitu dengan persamaan

$$SSE_{rmse} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{1,i} - \theta_{2,i})^2}{n}} \quad (4.1)$$

Keterangan:

SSE_{rmse} = nilai RMSE *steady-state error*

$\theta_{1,i}$ = nilai input sudut pada percobaan ke-i

$\theta_{1,i}$ = nilai pengujian sudut pada percobaan ke-i

n = banyaknya percobaan

Selain itu diperhatikan pula nilai dari *settling time* pada setiap servo. *Settling time* merupakan waktu yang dibutuhkan oleh servo untuk mencapai *steady-state* (kondisi tetap).

4.2.1 Pengujian pada Servo Pertama

Tabel 4.3 Hasil posisi dari Servo Pertama pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE_{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	32,78	33,41	35,2	32,58	32,22	34,86	33,1	33,43	33,87	3,43
2	50	55	56,4	57,32	60,12	54,2	57,4	54,87	55,2	55,65	5,78
3	90	97,22	96,67	96,67	97,78	98,22	96,67	97,12	97,78	97	6,77
4	130	138,3	137,8	138,3	135,6	137,8	137,8	136,2	136,7	138,1	7,11
5	160	169,4	169,4	168,3	68,3	167,2	168,3	167,7	169	169,4	8,04
Rata-rata											6,226

Tabel 4.4 Nilai *Settling Time* Servo Pertama pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	1,1	1,1	1,1	1	1,2	1,3	1,3	0,9	1	1,11
2	50	1	1,1	1,3	0,9	0,8	1	1	0,8	0,8	0,96
3	90	1,2	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,744
4	130	0,64	0,6	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,57
5	160	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,711
Rata-rata											0,819

4.2.2 Pengujian pada Servo Kedua

Tabel 4.5 Hasil posisi dari Servo Kedua pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE_{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	29,28	32,94	32,42	24,05	32,94	32,94	33,11	32,12	33,12	3,11
2	40	43,4	44,56	46,1	42,81	43,1	43,43	44,3	45,24	43,72	3,81
3	70	69,02	69,02	63,79	69,02	65,88	68,23	67,88	69,02	68,48	2,755
4	100	101,4	101,1	103,7	103,4	101,7	101,1	104,5	104,8	101,3	2,45
5	140	136,5	137	137	136,5	137	136,3	136,1	136,8	137	3,15
Rata-rata											3,052

Tabel 4.6 Nilai *Settling Time* Servo Kedua pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	1,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,81
2	40	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7
3	70	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,31
4	100	1,3	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,9	0,7	0,8	0,83
5	140	0,7	0,7	0,4	0,7	0,5	0,7	0,7	0,4	0,7	0,611
Rata-rata											0,652

4.2.3 Pengujian pada Servo Ketiga

Tabel 4.7 Hasil posisi dari Servo Ketiga pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE _{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	35	35,88	32,19	34,84	32,19	34,83	32,61	32,44	34,67	33,38	1,871
2	50	50,13	51,64	52	53,48	52,4	52,69	52,38	50,71	54,03	2,44
3	80	77,57	77,16	75,78	78,4	75,26	75,9	75,77	78,04	75,2	3,56
4	120	116,1	116,6	117,1	116,1	116,6	116,3	117,1	116,1	116,5	3,27
5	150	141,4	141,4	141,4	141,9	141,9	141,4	141,1	140,9	141,9	7,97
Rata-rata											3,822

Tabel 4.8 Nilai *Settling Time* Servo Ketiga pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	35	0,8	0,7	0,5	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,712
2	50	1	0,6	0,9	0,9	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,68
3	80	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,9	0,6	0,7
4	120	0,86	0,76	0,66	0,87	0,89	0,74	0,707	0,82	0,85	0,7952
5	150	0,5	0,9	1,2	0,5	0,7	0,9	0,5	0,5	0,6	0,711
Rata-rata											0,719

4.2.4 Pengujian pada Servo Keempat

Tabel 4.9 Hasil posisi dari Servo Keempat pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE _{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	20	30,41	30,41	30,41	27,31	29,79	30,15	30,41	29,84	30,21	9,666
2	45	61,7	60,5	61,3	63,8	60,43	61,52	65,21	60,83	60,92	16,024
3	70	91,24	90,4	94,2	93,02	93,66	91,73	92,11	91,69	89,77	20,802
4	90	118,6	118,6	117,9	118,6	117,1	117,3	118,1	118,4	118	26,42
5	140	175,7	175,7	175,7	175,7	176,3	176,1	175,7	175,2	175,7	33,77
Rata-rata											21,33

Tabel 4.10 Nilai *Settling Time* Servo Keempat pada Sistem Kalang Terbuka

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	20	0,5	0,7	0,9	1,2	0,8	0,4	0,7	0,8	0,7	0,74
2	45	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,8	0,9	1,6	0,88
3	70	2,2	1,2	1,6	1,8	2,4	1,9	1,1	1,1	1,4	1,63
4	90	1,5	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,58
5	140	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5
Rata-rata											1,066

Dengan menggunakan sistem kalang terbuka rata-rata *steady state error* untuk tiap servo melebihi 3°. Bahkan untuk servo keempat *steady state error* yang didapat melebihi 20°. Dapat disimpulkan bahwa sistem kalang terbuka cukup buruk dalam hal akurasi dari sudut servo. Walaupun demikian, rata-rata *settling time* untuk setiap servo dapat dikatakan cukup cepat. Servo 1, 2, dan 3 dapat mencapai *steady state* dalam waktu kurang dari satu detik, sedangkan servo 4 hanya membutuhkan ± 1 detik.

4.3 Pengujian pada Sistem Kalang Tertutup

Pada sistem kalang tertutup, nilai komponen PID yang dipakai adalah:

- Servo 1 : P = 0,1 I = 3 D = 0
- Servo 2 : P = 0,1 I = 2,5 D = 0
- Servo 3 : P = 0,1 I = 2,55 D = 0
- Servo 4 : P = 0,1 I = 2,1 D = 0

Komponen I memiliki nilai lebih dari 2 untuk setiap servo karena diperlukan dorongan yang cukup kuat agar respon dari servo dapat mendekati target yang diinginkan. Komponen D tidak dipakai karena penambahan komponen D tidak memberikan efek yang cukup signifikan untuk meredam *overshoot* pada servo. Nilai komponen dari P sangat kecil agar osilasi yang terjadi dapat diminimalisir sekecil mungkin.

4.3.1 Pengujian pada Servo Pertama

Tabel 4.11 Hasil posisi dari Servo Pertama pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE _{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	29,44	30,2	29,7	29,67	30,8	29,71	29,94	31,4	31,6	0,653
2	50	50	50,2	50,2	50,1	50,8	49,5	50,3	49,7	49,5	0,3829
3	90	90	90,56	90,56	91,11	91,11	90	91,11	90,56	90	0,693
4	130	130,6	130,6	131,1	130,1	129,5	130,6	130,6	131,3	130,1	0,569
5	160	160	160	160,6	160,6	160,6	160,6	160,6	159,7	160,2	0,452
Rata-rata											0,54

Tabel 4.12 Nilai *Settling Time* Servo Pertama pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	2	2,4	2,1	2	2	1,9	1,8	2	2,1	2,03
2	50	2,3	2,4	2,6	2,4	2,4	2,5	2,2	2,5	2,4	2,41
3	90	2,3	2,4	2,3	2,6	2,6	2,4	3,1	2,1	2,8	2,53
4	130	2,4	2,5	2,7	2,9	2,3	2,2	2,6	2,1	2,5	2,505
5	160	3,1	2,6	3,5	3,7	2,4	2,1	2,4	3,7	31	2,95
Rata-rata											2,484

4.3.2 Pengujian pada Servo Kedua

Tabel 4.13 Hasil posisi dari Servo Kedua pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE _{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	28,24	27,19	30,33	30,85	30,33	30,33	29,12	29,86	30	1,19
2	40	39,74	40,5	40,9	40,2	39,81	40,7	38,91	39,88	40,98	0,38
3	70	70,59	70,07	70,07	66,93	70,07	70,07	71,1	70,4	71,1	0,164
4	100	98,82	101,1	100,8	100,04	100,5	99,67	99,12	99,68	100,6	0,725
5	140	140,1	139,6	140,1	138,7	140,1	140,1	140,1	138,2	139,5	0,48
Rata-rata											0,586

Tabel 4.14 Nilai *Settling Time* Servo Kedua pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	30	4,5	4,4	4,1	3,8	3,97	4,3	4,8	4,3	4,3	4,274
2	40	2,1	4,3	3,8	3,9	2,1	2,1	2,1	2,5	2,6	2,83
3	70	2,3	2,5	2,1	2,8	2,4	2,4	2,3	2,6	3,1	2,5
4	100	1,6	2,4	2,7	2,2	2,5	2,4	2,5	2,1	2,4	2,31
5	140	2,6	2,5	2,3	2,5	2,7	2,5	3,4	2,5	2,1	2,56
Rata-rata											2,894

4.3.3 Pengujian pada Servo Ketiga

Tabel 4.15 Hasil posisi dari Servo Ketiga pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE _{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	35	35,36	36	35,23	34,71	35,36	34,84	34,97	35,3	35,3	0,409
2	50	49,6	49,91	49,94	50,4	50,72	50,43	50,83	50,32	49,74	0,446
3	80	80,21	80,54	80,05	81,4	79,83	80,5	79,2	79,67	80,1	0,59
4	120	120,8	119,8	119,8	119,8	119,8	119,8	120,2	119,8	120,5	0,354
5	150	149,9	150,4	149,9	150,4	149,9	150,2	150,4	150,4	149,8	0,456
Rata-rata											0,451

Tabel 4.16 Nilai *Settling Time* Servo Ketiga pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	35	2,5	2,7	2,7	2,3	2,6	2,4	2,4	3,2	3,1	2,65
2	50	3,5	3,6	3,6	3,5	3,6	3,1	3,4	3,4	3,5	3,466
3	80	1,2	1,2	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1	1,5	1,1	1,2
4	120	2,6	2,4	2,8	2,4	2,7	2,9	2,4	2,4	2,1	2,52

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
5	150	2,7	2,8	2,6	2,7	2,6	2,4	2,5	2,6	2,9	2,64
Rata-rata											2,494

4.3.4 Pengujian pada Servo Keempat

Tabel 4.17 Hasil posisi dari Servo Keempat pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (derajat)									SSE _{rmse} (derajat)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	20	20,48	19,86	19,86	19,84	19,24	19,86	19,86	20,64	20,41	0,346
2	45	46,45	45,43	44,91	45,57	44,34	44,2	47,05	49,12	45,35	0,94
3	70	68,9	70,65	71,1	71,42	71,43	70,2	70,47	70,04	70,53	0,909
4	90	90,62	91,1	90,62	91,8	90,3	90	90	90,77	91,4	0,898
5	140	139,7	139,7	139	136,6	142,8	139	139,5	139,4	140,6	1,57
Rata-rata											0,9326

Tabel 4.18 Nilai *Settling Time* Servo Keempat pada Sistem Kalang Tertutup

No	Input (derajat)	Hasil Percobaan (detik)									Rata-rata (detik)
		Ke-1	Ke-2	Ke-3	Ke-4	Ke-5	Ke-6	Ke-7	Ke-8	Ke-9	
1	20	3,5	3,1	4,4	4,1	4	4,7	3,6	4	4,1	3,94
2	45	3,2	2,3	2,4	2,3	2,1	2,2	2,3	2,4	2,3	2,38
3	70	4,5	2,5	2,3	2,2	2,4	2,5	2,4	2,5	2,1	2,6
4	90	2,5	2,1	2,8	2,4	2,3	2,5	2,6	2,8	2,1	2,45
5	140	2,6	2,1	2,7	2,5	2,7	2	2,4	2,3	2,6	2,43
Rata-rata											2,76

4.4 Perbandingan pada Sistem Kalang Terbuka dan Kalang Tertutup

Pada bagian ini terdapat dua komponen yang akan dibandingkan, yaitu *steady-state error* dan *settling time*. Pada servo pertama terlihat bahwa nilai rata-rata *steady-state error* (SSE) berkurang dari 6,226° menjadi 0,549°. Dapat dikatakan bahwa dengan menggunakan sistem kalang tertutup, nilai SSE berkurang dari sebanyak 5,67°. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dari kalang tertutup mampu untuk meningkatkan akurasi dari sudut servo. Akan tetapi nilai dari *settling time* pada sistem kalang tertutup lebih lama 1,66 detik dibandingkan sistem kalang terbuka.

Pada servo kedua dan ketiga, rata-rata SSE-nya lebih kecil dibandingkan servo. Ini menunjukkan bahwa servo 2 dan 3 lebih akurat dibandingkan servo 1. Pada servo 2 dan 3 berturut-turut, sistem kalang tertutup mampu mengurangi SSE sebanyak 2,46° dan 3,37° dibandingkan sistem kalang terbuka. Sedangkan *settling time* mengalami penurunan sebanyak 2,24 detik dan 1,77 detik.

Servo keempat dapat dibilang sebagai servo yang paling tidak akurat karena mempunyai SSE yang lebih dari 1 derajat. Dengan sistem kalang tertutup yang dirancang, nilai SSE dapat berkurang sebanyak 20,39° dan mengalami peningkatan *settling time* sebanyak 1,6 detik.

Walaupun sistem kalang tertutup dapat mengurangi nilai SSE pada servo, waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state* menjadi lebih lama. Tentu saja hal tersebut dapat menjadi

kelemahan dalam sistem ini karena kecepatan sistem berkurang lebih dari dua kali lipat. Selain itu terkadang pembacaan posisi servo dapat terganggu jika goyangan yang disebabkan oleh gerakan servo terlalu kuat, sehingga dapat mengurangi akurasi dari pembacaan posisi servo itu sendiri dan servo lainnya.

Tabel 4.19 Perbandingan antara Sistem Kalang Terbuka dan Sistem Kalang Tertutup

Servo	Steady-state error (derajat)		Settling time (detik)	
	Sistem Kalang Terbuka	Sistem Kalang Tertutup	Sistem Kalang Terbuka	Sistem Kalang Tertutup
1	6,226	0,549	0,819	2,484
2	3,054	0,586	0,652	2,894
3	3,822	0,451	0,719	2,494
4	21,33	0,9326	1,066	2,76

4.5 Hal Lain Terkait Penelitian

Selain merancang sistem kendali kalang tertutup pada robot wayang, penulis juga mencoba untuk mengaplikasikan persamaan *invers kinematics* untuk mengatasi masalah pada *joint limit*. Akan tetapi hal tersebut tidak berhasil dilakukan karena waktu yang terbatas untuk mengimplemantasikan persamaan tersebut. *Joint limit* adalah limitasi dari jangkauan sudut yang dapat diraih oleh servo. Dengan kata lain servo yang memiliki joint limit tidak bisa melakukan 360°, servo tersebut hanya bisa menjangkau sudut tertentu saja. Pada kasus ini *joint limit* servo 1, yaitu 0° - 170°. *Joint limit* servo 2 dan 3 yaitu 0° - 160°. Sedangkan *joint limit* servo 4 yaitu 0° - 150°. Dengan menggunakan persamaan tersebut, jika terdapat servo yang memerlukan gerakan melebihi *joint limit*-nya (contohnya servo 1 diperlukan untuk bergerak menuju 200°), maka dengan otomatis sistem akan mencari kombinasi gerakan lain hingga tercipta kombinasi gerakan servo yang berada pada area *joint limit*-nya. Selain itu, jika tidak ada kombinasi yang berada pada area *joint limit* servo, maka sistem akan berusaha untuk mencari kombinasi yang paling mendekati posisi yang diinginkan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Rata-rata *steady state error* pada servo 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut dapat berkurang sebanyak $5,67^\circ$, $2,46^\circ$, $3,71^\circ$, dan $20,39^\circ$.
2. Rata-rata *settling time* pada servo 1, 2, 3, dan 4 berturut-turut dapat bertambah sebanyak 1,66 detik, 2,24 detik, 1,77 detik, dan 1,69 detik.
3. Peningkatan akurasi dari posisi servo dapat dicapai walaupun dengan mengorbankan kecepatan dari servo untuk mencapai *steady state*.

5.2 Saran

1. Servo dengan spesifikasi yang lebih tinggi dapat digunakan untuk meningkatkan performa dari robot.
2. Penggunaan jenis pengendali selain PID mungkin dapat menghasilkan performa yang lebih baik, di mana nilai *settling time* dapat diminimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Keller, S. Muller, dan N. Parspour, "Design of a transverse flux machine as joint drive for an articulated six-axis robot arm," *2016 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2016*, hal. 849–854, 2016.
- [2] "Articulated Robots - More Axes Equal More Possibilities." [Online]. Tersedia: <https://www.robots.com/articles/viewing/articulated-robots-more-axes-equal-more-possibilities>. [Diakses: 11-Okt-2017].
- [3] D. Z. Jokic, S. D. Lubura, dan M. M. Soja, "Closed control loop implementation for single robot axis on FPGA platform," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 11, no. PART 1, hal. 174–179, 2012.
- [4] H. A. Hendarto, Munadi, dan J. D. Setiawan, "ANFIS application for calculating inverse kinematics of programmable universal machine for assembly (PUMA) robot," *2014 1st Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. Green Technol. Its Appl. a Better Futur. ICITACEE 2014 - Proc.*, hal. 35–40, 2015.
- [5] L. Aggarwal, K. Aggarwal, dan R. J. Urbanic, "Use of artificial neural networks for the development of an inverse kinematic solution and visual identification of singularity zone(s)," *Procedia CIRP*, vol. 17, hal. 812–817, 2014.
- [6] "Whats a Servo?" [Online]. Tersedia: <http://www.seattlerobotics.org/guide/servos.html>. [Diakses: 08-Okt-2017].
- [7] H. S. Juang dan K. Y. Lurr, "Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board," *IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA*, no. April 2017, hal. 634–639, 2013.
- [8] M. Spong, S. Hutchinson, dan M. Vidyasagar, "Robot modeling and control (Vol. 3)," hal. 299–327, 2006.
- [9] D. Tolani, A. Goswami, dan N. I. Badler, "Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs," *Graph. Models*, vol. 62, no. 5, hal. 353–388, 2000.

LAMPIRAN

1. Grafik pada Salah Satu Hasil Eksperimen

Sudut yang dipakai adalah sebagai berikut:

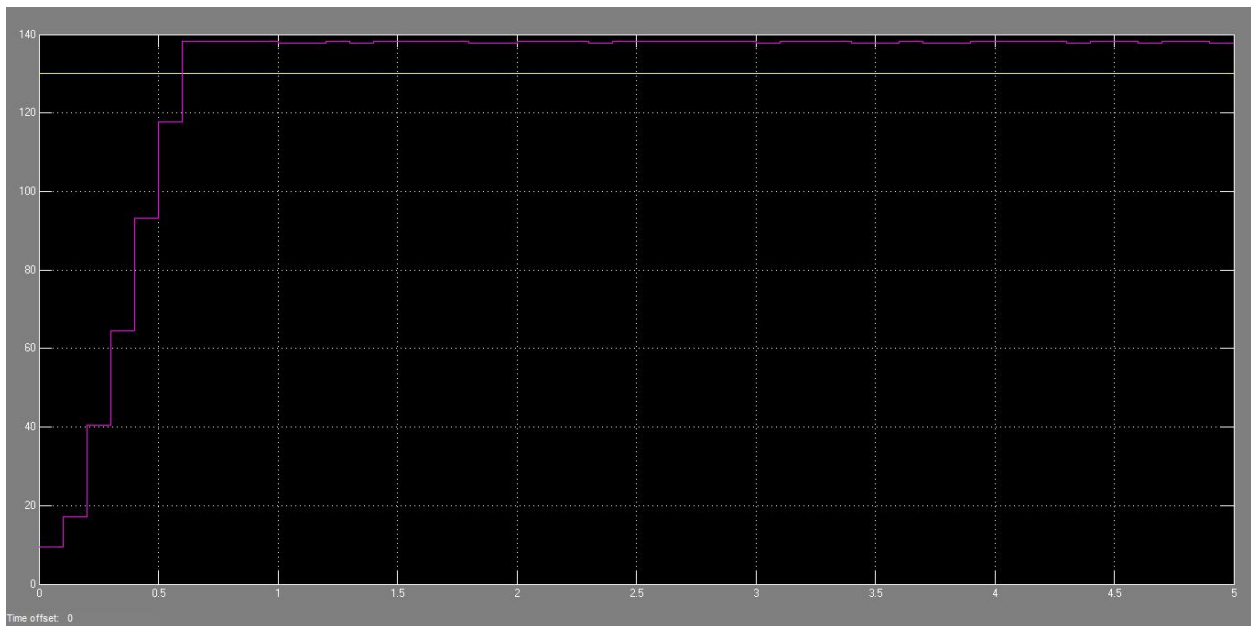
Servo 1 : 130°

Servo 2 : 150°

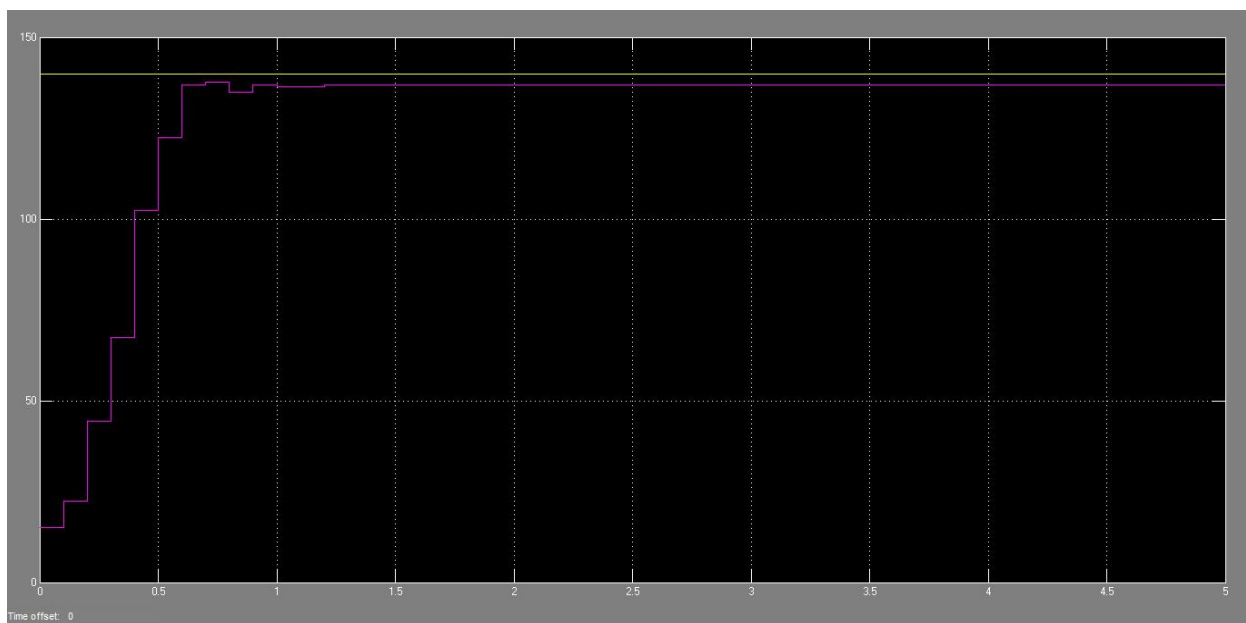
Servo 3 : 90°

Servo 4 : 140°

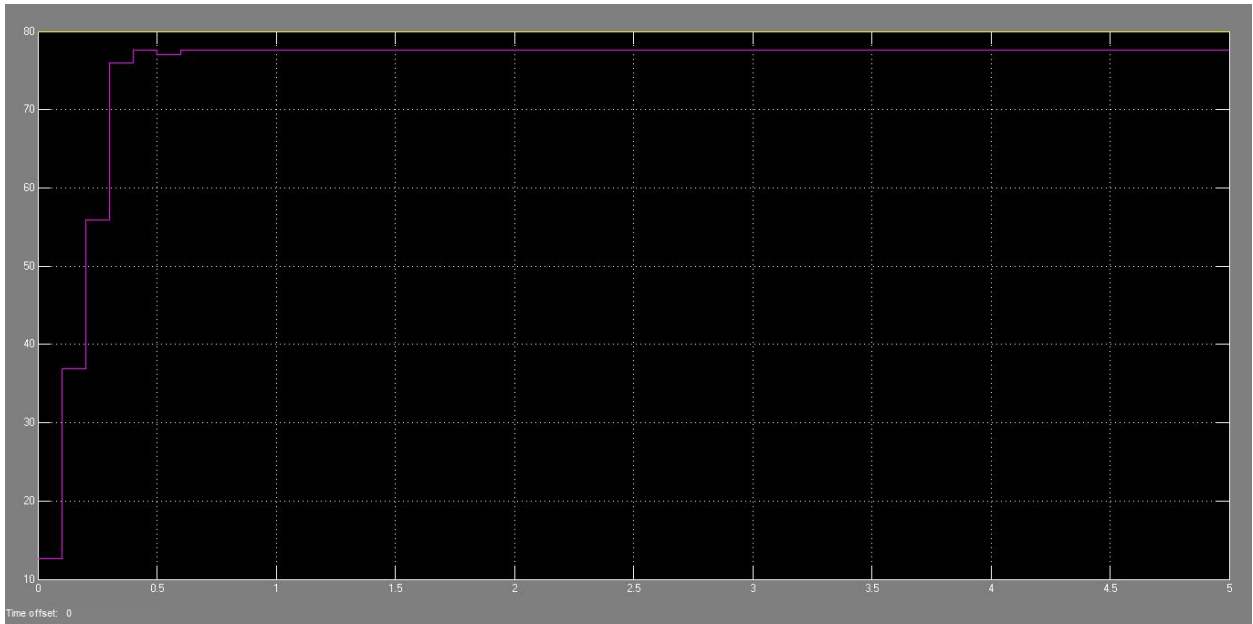
a. Hasil Percobaan pada Sistem Kalang Terbuka



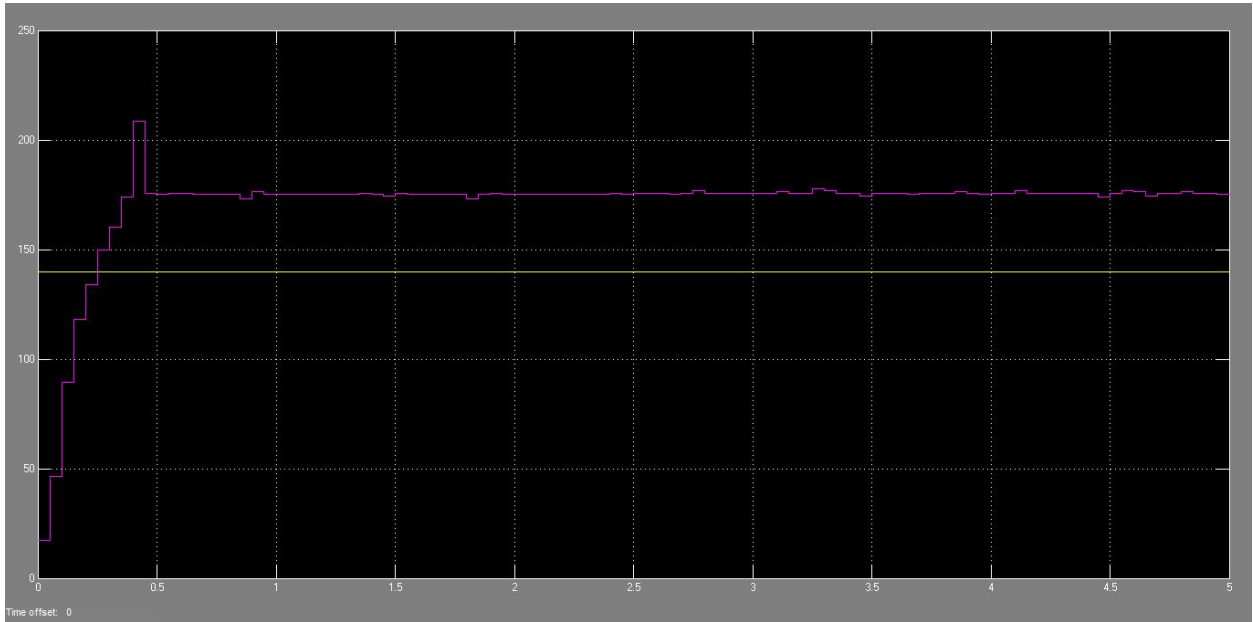
Gambar 1 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Terbuka pada Servo Pertama



Gambar 2 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Terbuka pada Servo Kedua

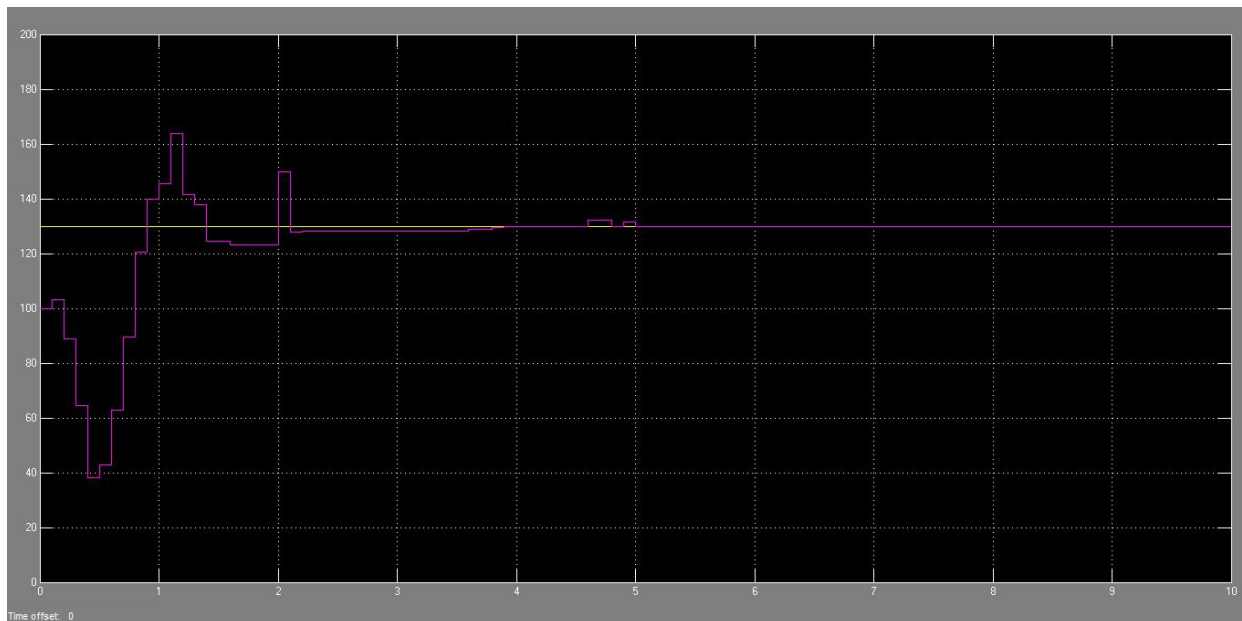


Gambar 3 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Terbuka pada Servo Ketiga

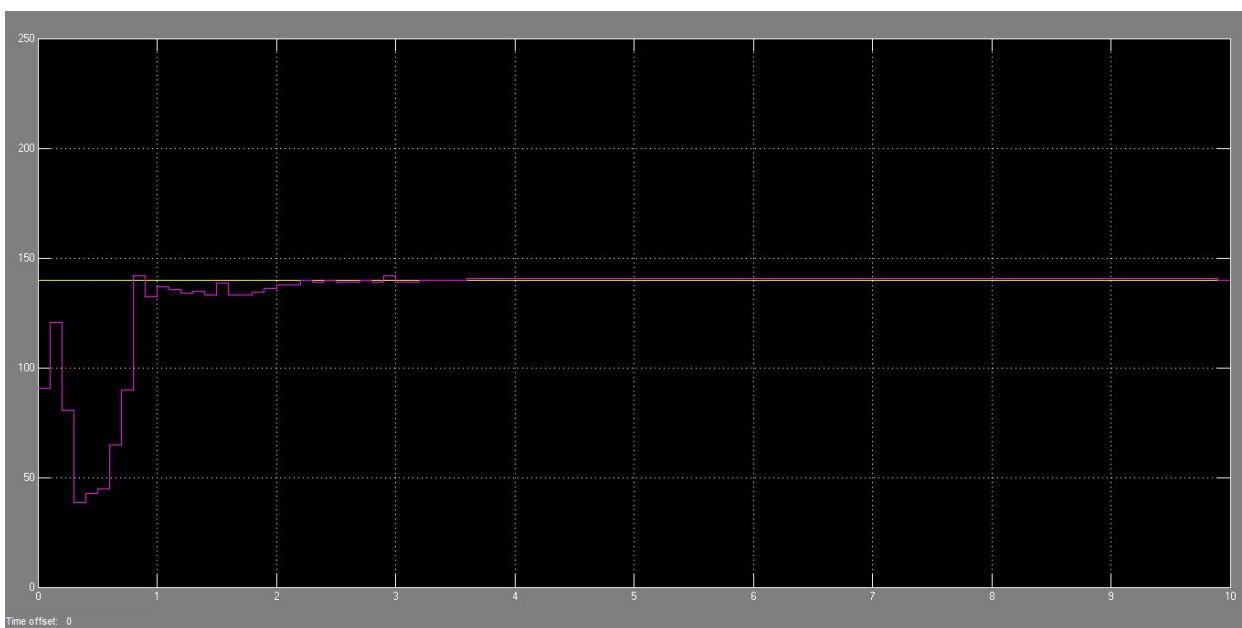


Gambar 4 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Terbuka pada Servo Keempat

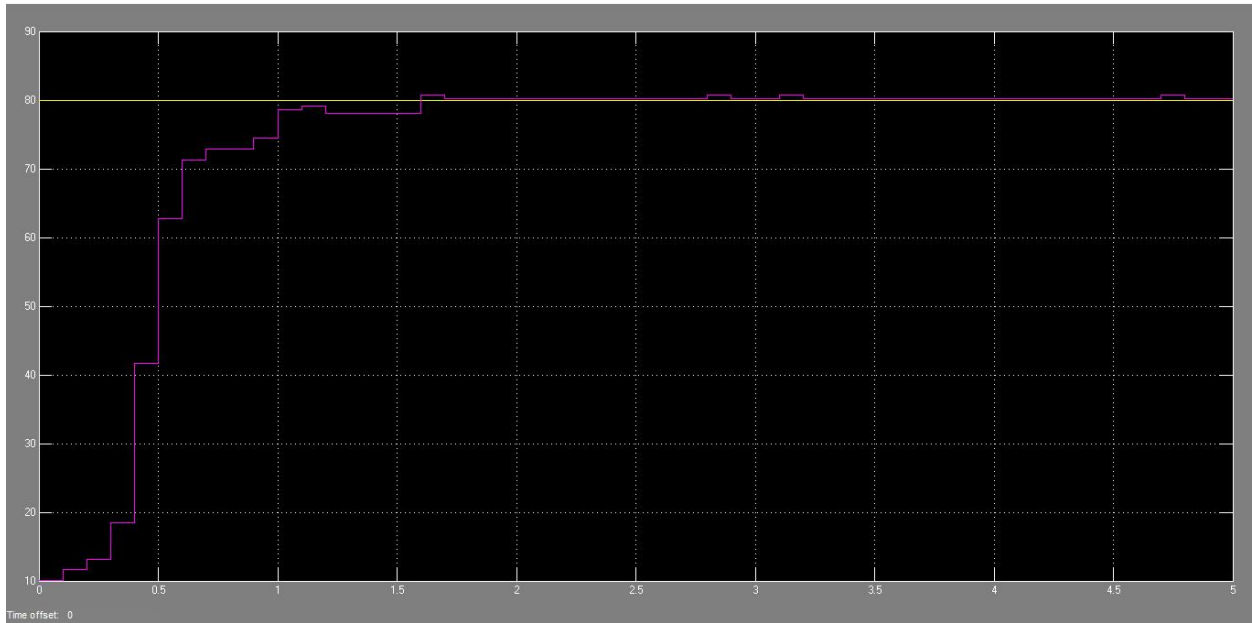
b. Hasil Percobaan pada Sistem Kalang Tertutup



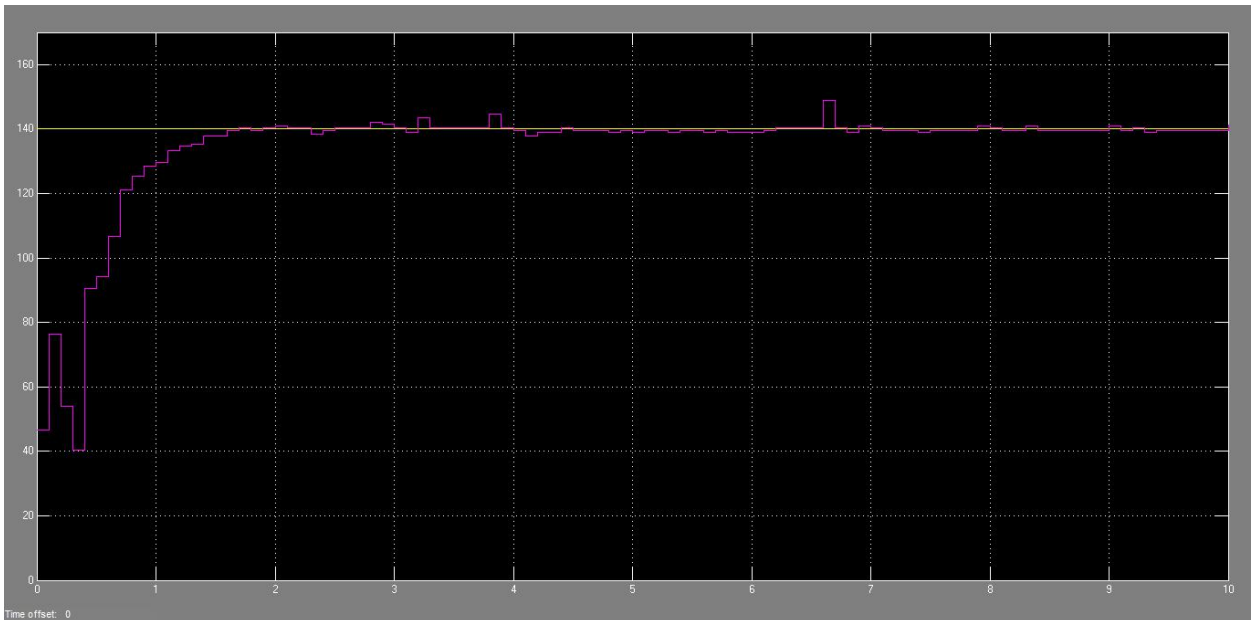
Gambar 5 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Tertutup pada Servo Pertama



Gambar 6 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Tertutup pada Servo Kedua



Gambar 7 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Tertutup pada Servo Ketiga



Gambar 8 Grafik Hasil Percobaan Sistem Kalang Tertutup pada Servo Keempat

2. Program perhitungan inverse kinematics yang pernah dicoba untuk dirancang

a. Program 1

$$L = \sqrt{x^2 + y^2};$$

$$\theta_{1a} = \text{atan2}(x, y);$$

$$\theta_{1b} = \text{acos}(L_{\text{off}}/L);$$

$$r = \sqrt{L^2 - L_{\text{off}}^2};$$

$$r_{wr} = r - L_3 \cdot \cos(\psi);$$

$$z_{wr} = z - L_0 - L_3 \cdot \sin(\psi);$$

$$\theta_{3i} = (r_{wr}^2 + z_{wr}^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2 \cdot L_1 \cdot L_2);$$

```

alpha = (rwr^2+zwr^2+L1^2-L2^2)/(2*L1*(sqrt(rwr^2+zwr^2)));
if ((cth3i>1) || (calpha>1))
    unreachable = 1;
    theta2 = oldtheta2; theta3 = oldtheta3; theta4 = oldtheta4;
else
    unreachable = 0;
end
theta1 = pi - theta1a - theta1b;
theta3i = acos((rwr^2+zwr^2-L1^2-L2^2)/(2*L1*L2));
beta = atan2 (zwr,rwr);
alpha = acos((rwr^2+zwr^2+L1^2-L2^2)/(2*L1*(sqrt(rwr^2+zwr^2))));
if (theta3i>=0)

    theta2i = beta-alpha;
    theta2 = theta2i+(2/18*pi);
    theta3 = theta3i - (pi*11/18)

else
    theta2i = beta+alpha;
    theta2 = theta2i-(2/18*pi);
    theta3 = (pi*11/18) - theta3i;
end
theta4 = psi - (theta3i+theta2i);
oldtheta1 = theta1; oldtheta2 = theta2; oldtheta3 = theta3; oldtheta4 = theta4;

```

b. Program 2

```

xx = x - L4*cos(theta);
yy = y - L4*sin(theta);
sigma = -1; pp = -yy/sqrt(xx^2+yy^2);
qq = -xx/sqrt(xx^2+yy^2);
gamma = atan2(pp,qq);
alpha = -(xx^2+yy^2+L2^2-L3^2)/(2*L2*sqrt(xx^2+yy^2));

th2 = gamma + sigma*acos(alpha);
px = (yy - L2*sin(th2))/L3;
py = (xx - L2*cos(th2))/L3;

th3 = atan2(px,py)-th2;

```

$$th4 = theta - (th2+th3);$$

$$th1 = -atan2(z,x);$$

$$t1 = th1 * 57.2958$$

$$t2 = th2 * 57.2958$$

$$t3 = th3 * 57.2958$$