



TUGAS AKHIR - TE 1399

**SISTEM PENGATURAN POSISI *SPINDLE* PADA MESIN
CNC MILLING MENGGUNAKAN KONTROLER *FUZZY-
PD***

Ahdiyat Darda'
NRP 2210100124

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Mochammad Rameli
Imam Arifin, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 1399

***CONTROL SYSTEM OF SPINDLE POSITION ON CNC
MILLING MACHINE USING FUZZY-PD CONTROLLER***

Ahdiyat Darda'
NRP 2210100124

Advisor
Dr. Ir. Mochammad Rameli
Imam Arifin, ST., MT.

***ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014***

**SISTEM PENGATURAN POSISI SPINDLE PADA MESIN
CNC MILLING MENGGUNAKAN KONTROLER FUZZY-PD**

TUGAS AKHIR

Dibuatkan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

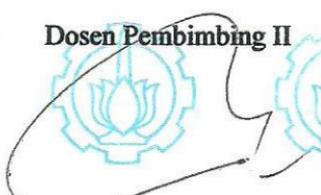
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I


M. H. Mochammad Rameli
NIP. 19541227 198103 1 002

Dosen Pembimbing II


Imam Arifin, ST., MT.
NIP. 197302222002121001

**SURABAYA
JANUARI, 2014**

SISTEM PENGATURAN POSISI *SPINDLE* PADA MESIN *CNC MILLING* MENGGUNAKAN KONTROLER *FUZZY-PD*

Nama : Ahdiyat Darda'
Pembimbing I : Dr., Ir., Mochammad Rameli
Pembimbing II : Imam Arifin, ST., MT.

ABSTRAK

Penentuan posisi *spindle* merupakan hal yang penting dalam penggunaan mesin *Computerized Numerical Control (CNC)*. Hal ini disebabkan karena pada *spindle* terdapat mata bor yang merupakan komponen utama dalam pembentukan benda kerja. Penentuan posisi *spindle* memerlukan kecepatan, kestabilan dan keakuratan yang tinggi. Namun, kemampuan CNC untuk memenuhi kebutuhan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat mengurangi kualitas dari hasil mesin CNC. Faktor-faktor tersebut antara lain pembebanan akibat benda kerja, keausan mata bor, dan rancangan mekanik dari mesin CNC. Tugas akhir ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas mesin CNC. Hal tersebut dilakukan dengan meningkatkan keakuratan dan kecepatan respon servo motor pada CNC, karena servo motor memiliki peran untuk mengatur posisi dari mata bor yang sangat vital terhadap hasil dari mesin CNC. Metode yang digunakan adalah *Fuzzy-PD*. Kontroler *Fuzzy-PD* memiliki fleksibilitas dalam menghadapi kondisi mesin CNC yang dinamis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan kesalahan yang terjadi dan tahan terhadap gangguan. Kontroler *Fuzzy-PD* terbukti dapat mengurangi *overshoot* hingga nol serta meningkatkan kecepatan respon hingga 8,27 detik.

Kata Kunci: posisi, *spindle*, *CNC milling*, servo motor, *Fuzzy-PD*

CONTROL SYSTEM OF SPINDLE POSITION ON CNC MILLING MACHINE USING FUZZY-PD CONTROLLER

Name : Ahdiyath Darda'
Advisor I : Dr., Ir., Mochammad Rameli
Advisor II : Imam Arifin, ST., MT.

ABSTRACT

Spindle positioning is substantial in machine Computerized Numerical Control (CNC). This is because of the drill on spindle is a major component in the shaping of the workpiece. Spindle positioning requires speed, stability and high accuracy. However, the ability to fulfill the needs of CNC is influenced by several factors that can reduce the quality of the results of the CNC machine. These factors are due to the imposition of the workpiece, the worn-out drill, and mechanical design of the CNC machine. This final project aims to improve the quality of the CNC machine. This is done by increasing the accuracy and speed of response in the CNC servo motors, because it has a role to adjust the position of the drill that is vital to the product of CNC machine. Fuzzy-PD controller is chosen as method to meet the objective. This controller has the flexibility in facing dynamic changing of CNC machining conditions. Based on simulation result, Fuzzy-PD controller has the ability to adapt and also resistant to interference. Fuzzy-PD controller is able to reduce the overshoot into zero and increase the response speed up to 8.27 seconds.

Keywords: *positions, spindle, CNC milling, servo motors, Fuzzy-*

PD

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil 'alamin, segala puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat dan karunia-Nya sehingga buku Tugas Akhir dengan judul “**Sistem Pengaturan Posisi Spindle pada Mesin CNC Milling Menggunakan Kontroler Fuzzy-PD**” ini dapat terselesaikan. Sholawat dan salam tak lupa turunkan kepada nabi Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat, dan pengikutnya.

Buku Tugas Akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua yang selalu mendoakan serta memberikan motivasi kepada penulis dan juga kepada kakak saya yang selalu memberikan dukungan dan membimbing penulis. Tak lupa penulis mengucapkan terimakasih kepada teman-teman kelompok Tim Tugas Akhir CNC yang telah rela berjuang bersama-sama dengan keiklasan saling membantu demi terselesaikannya buku Tugas Akhir ini. Serta teman-teman E-50 yang telah memberikan dukungan kepada penulis untuk dapat tetap mengerjakan Tugas Akhir ini hingga selesai. Semoga segala kebaikan yang telah dilakukan akan dibalas dengan sebaik-baiknya pembalasan oleh Allah SWT.

Dengan selesainya buku Tugas Akhir ini penulis mengharapkan banyak manfaat yang dapat diambil oleh pembaca. Penulis menyadari dalam laporan ini masih terdapat kekurangan, oleh karena itu saran dan nasehat yang membangun akan sangat membantu bagi penulis untuk memperbaiki kekurangan tersebut di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2014

Ahdiyat Darda'

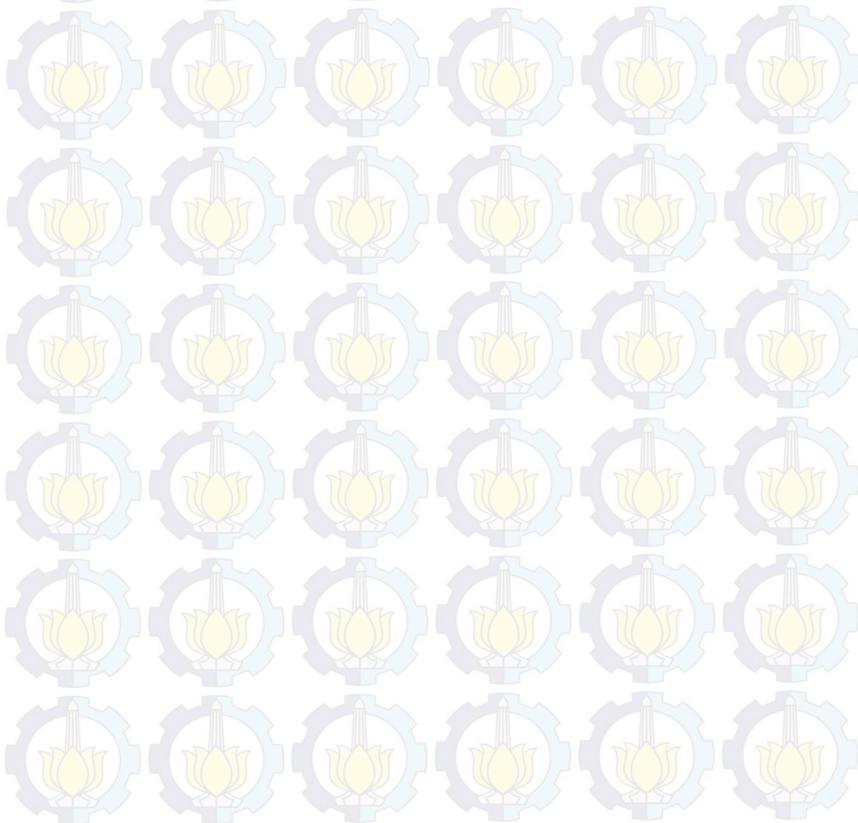


(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	HALAMAN
HALAMAN PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Metodologi	3
1.5 Sistematika	4
1.6 Relevansi	5
BAB II TEORI DASAR	7
2.1 Mesin CNC	7
2.1.1 Prinsip Kerja CNC Milling.....	8
2.1.2 Sistem Servo Pada Mesin CNC	9
2.2 Motor Servo AC	10
2.3 Teori Fuzzy	12
2.3.1 Sistem Fuzzy	12
2.4 Kontroler PD[7]	15
2.4.1 Perancangan Kontroler PD untuk sistem orde ke-2.....	16
2.5 Variabel Acak Normal (Gaussian)[8].....	17
2.6 Root Mean Square Error	17
BAB III. PERANCANGAN KONTROL FUZZY-PD PADA MOTOR SERVO AC	19
3.1 Pemodelan Matematis Motor Servo AC	19
3.2 Perancangan Kontrol	20
3.2.1 Perancangan kontroler PD	20
3.2.2 Perancangan kontroler Fuzzy	20
BAB IV PENGUJIAN PENGATURAN POSISI SPINDLE MENGUNAKAN KONTROLER FUZZY-PD	25

4.1 Pengujian untuk mencapai Sinyal referensi.....	25
4.2 Pengujian dengan Perubahan Sinyal referensi.....	30
4.3 Pengujian dengan Pemberian Gangguan	33
4.4 Pengujian dengan Pemberian Beban	36
BAB V PENUTUP	39
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran.....	39
Daftar Pustaka.....	41
Lampiran.....	43



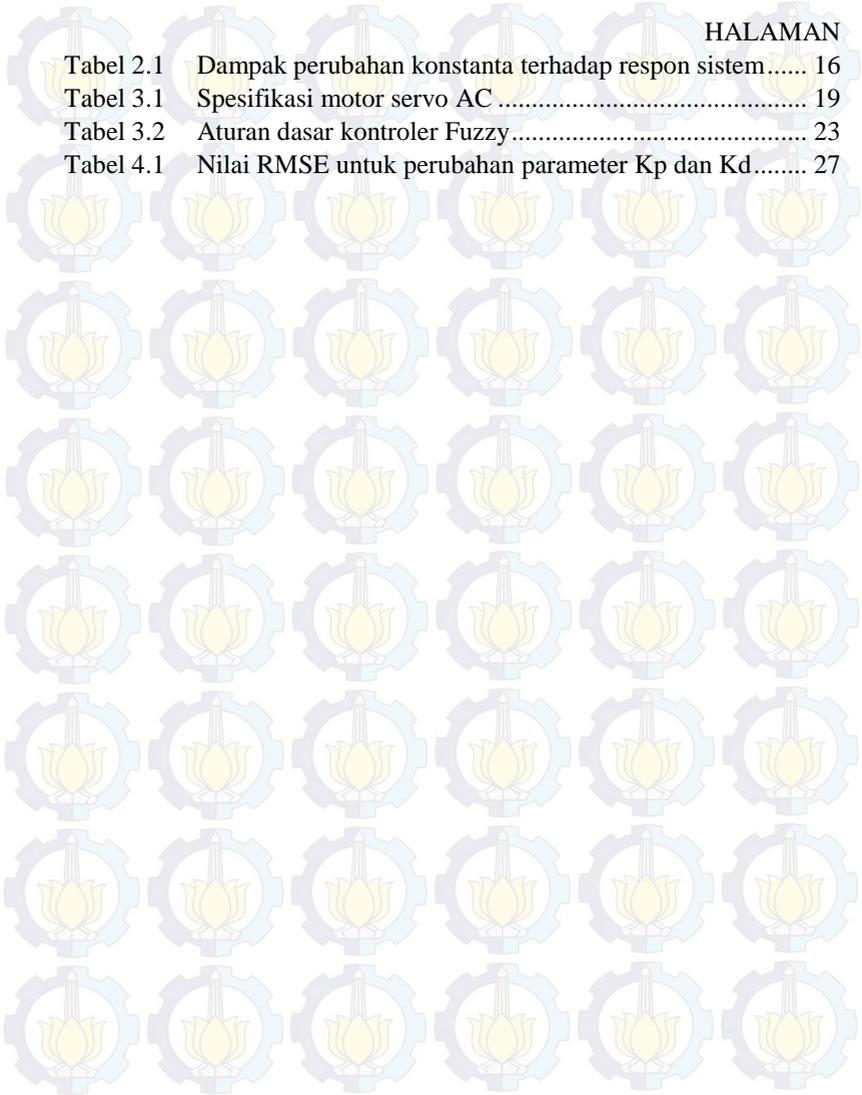
DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1 Mesin CNC milling	8
Gambar 2.2 Struktur sistem servo pada mesin CNC.....	10
Gambar 2.3 Struktur Motor Servo AC.....	10
Gambar 2.4 Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC	11
Gambar 2.5 Diagram kontroler Fuzzy	12
Gambar 2.6 Himpunan Fuzzy	12
Gambar 2.7 Fungsi keanggotaan segitiga	13
Gambar 2.8 Fungsi keanggotaan dengan hubungan and.....	14
Gambar 2.9 Diagram blok kontroler PD.....	15
Gambar 2.10 Keluaran kontroler Derivatif untuk masukan konstan dan ramp	16
Gambar 2.11 Diagram blok sistem orde kedua dengan kontroler PD..	16
Gambar 3.1 Diagram blok sistem	20
Gambar 3.2 Fungsi keanggotaan untuk masukan kesalahan	21
Gambar 3.3 Fungsi keanggotaan untuk masukan perubahan kesalahan.....	21
Gambar 3.4 Fungsi keanggotaan untuk Konstanta Proporsional	22
Gambar 3.5 Fungsi keanggotaan untuk konstanta derivatif	22
Gambar 4.1 Diagram blok pengaturan posisi motor AC servo tanpa menggunakan Kontroler.....	25
Gambar 4.2 Posisi motor AC servo tanpa menggunakan Kontroler	26
Gambar 4.3 Grafik kesalahan sistem tanpa menggunakan kontroler .	26
Gambar 4.4 Posisi motor AC servo menggunakan Kontroler PD.....	27
Gambar 4.5 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler PD	28
Gambar 4.6 Grafik posisi motor AC servo menggunakan Kontroler Fuzzy-PD	29
Gambar 4.7 Grafik kesalahan menggunakan Kontroler Fuzzy-PD....	30
Gambar 4.8 Respon sistem terhadap perubahan masukan dengan kontroler PD	31
Gambar 4.9 Grafik kesalahan sistem dengan menggunakan kontroler PD	31

Gambar 4.10	Respon sistem terhadap perubahan masukan dengan kontroler Fuzzy-PD	32
Gambar 4.11	Grafik Kesalahan sistem dengan kontroler Fuzzy-PD ...	32
Gambar 4.12	Diagram blok sistem dengan gangguan	33
Gambar 4.13	Respon sistem menggunakan kontroler PD terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005	33
Gambar 4.14	Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler PD terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005	34
Gambar 4.15	Respon sistem menggunakan kontroler Fuzzy-PD terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005	35
Gambar 4.16	Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler Fuzzy-PD terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005	35
Gambar 4.17	Respon sistem menggunakan kontroler PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1	36
Gambar 4.18	Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1	37
Gambar 4.19	Respon sistem menggunakan kontroler Fuzzy-PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1	37
Gambar 4.20	Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler Fuzzy-PD terhadap penambahan beban sebesar 0,1	38

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Dampak perubahan konstanta terhadap respon sistem.....	16
Tabel 3.1 Spesifikasi motor servo AC	19
Tabel 3.2 Aturan dasar kontroler Fuzzy	23
Tabel 4.1 Nilai RMSE untuk perubahan parameter Kp dan Kd.....	27



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada awal perkembangannya, mesin CNC merupakan mesin yang tergolong langka dan sangat mahal harganya, akan tetapi saat ini penggunaan mesin CNC dalam dunia industri manufaktur cenderung semakin meluas. Hal ini disebabkan karena tuntutan produktivitas serta tuntutan kualitas produksi yang semakin meningkat dan harga mesin yang semakin murah.

Mesin CNC mempunyai beberapa kelebihan apabila dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional yang digerakkan secara manual semi otomatis, antara lain; teliti, mesin CNC memiliki ketelitian sampai 0,01 mm sedangkan mesin *Milling* konvensional memiliki ketelitian 0,1 mm. Cepat, mesin *Milling* CNC mampu memproduksi banyak dengan waktu singkat karena hanya sekali membuat program dapat menghasilkan banyak produk. Fleksibilitas, dapat mengerjakan berbagai bentuk benda kerja. Tepat, benda kerja yang dihasilkan mesin *Milling* CNC dimensinya lebih mendekati dengan rancangan daripada konvensional.

Saat ini pengaturan mesin CNC dilakukan secara otomatis. Sudah banyak dilakukan penelitian tentang kontroler yang akan diterapkan pada sistem servo yang terdapat pada CNC. Penelitian tersebut mengembangkan kontroler kecerdasan buatan, salah satunya adalah jaringan syaraf tiruan. Kontroler kecerdasan buatan mampu menyesuaikan parameternya dengan mesin yang diatur, mengoptimalkan performansi, dan mengurangi kesalahan *tracking*. Namun kontroler kecerdasan buatan membutuhkan komputasi dan juga struktur kontroler yang kompleks. Oleh karena itu, kontroler kecerdasan buatan sulit untuk mendapatkan keakuratan yang *real-time*. Akibatnya, kontroler kecerdasan buatan tidak cocok apabila diterapkan pada mesin CNC. Selain kontroler kecerdasan buatan, kontroler PID juga sering digunakan pada mesin CNC. Kontroler PID adalah kontroler yang sederhana, namun memiliki ketahanan yang baik sehingga kontroler PID lebih banyak digunakan pada mesin CNC. Namun, kontroler PID pada pengaturan posisi servo motor menunjukkan keterbatasannya ketika kontroler tersebut menyelesaikan kenaikan kebutuhan kepresisian dan keefisienan mesin CNC. Pada kontroler PID, kebutuhan akan respon yang cepat

bertentangan dengan *overshoot* yang diinginkan, karena ketika dibutuhkan *overshoot* tertentu, respon akan semakin lambat, sedangkan *overshoot* akan tinggi jika respon semakin cepat.

Untuk menyelesaikan permasalahan pengaturan posisi, digabungkan kontroler *PD* dengan kontroler *Fuzzy*. Kelebihan dari kontroler *PD* yaitu dapat menghilangkan kesalahan waktu tunak dan meningkatkan kecepatan respon akan digabungkan dengan kelebihan kontroler *Fuzzy* yang memiliki desain yang sederhana, tidak membutuhkan model matematis yang akurat, dan dapat beradaptasi dengan ketidakstabilan dan variasi waktu. Pada mesin CNC, kontroler *Fuzzy* akan beradaptasi dengan kondisi dan kebutuhan mesin CNC sehingga mampu mengatur parameter-parameter kontroler *PD*. Dari gabungan antara kontroler *Fuzzy* dan kontroler *PD* tersebut, diharapkan kontroler dapat memenuhi kebutuhan dari mesin CNC.

1.2 Perumusan Masalah

Mesin CNC adalah suatu alat yang memotong, mengikis, atau melubangi benda kerja, benda kerja adalah obyek yang sedang diproses. Benda kerja tersebut dapat berupa besi, kayu, dan bahan lainnya. Proses memotong, mengikis, atau melubangi ini disebut proses pemakanan. Ketika mesin CNC melakukan proses pemakanan, mesin CNC dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dapat mengurangi kualitas benda kerja yang dihasilkan. Faktor-faktor tersebut antara lain, pembebanan akibat benda kerja itu sendiri, keausan mata bor, dan rancangan mekanik dari mesin CNC. Masing-masing benda kerja memiliki kekuatan yang berbeda-beda, kekuatan ini memengaruhi kecepatan yang diperlukan untuk memakan benda kerja tersebut, sehingga benda kerja yang dihasilkan juga akan terpengaruh. Keausan mata bor juga akan memengaruhi waktu yang diperlukan untuk memakan benda kerja.

Salah satu permasalahan yang diakibatkan oleh faktor-faktor tersebut adalah tidak akuratnya pengaturan posisi *spindle* pada mesin CNC. Pada mesin CNC, *spindle* adalah bagian yang berputar dan sangat membutuhkan akurasi yang tinggi. Pada *spindle* terdapat mata bor yang bersentuhan secara langsung dengan benda kerja, sehingga akan mempengaruhi kualitas benda kerja yang dihasilkan oleh mesin CNC tersebut. Pengaturan posisi *spindle* yang kurang baik akan menimbulkan permasalahan yang disebut dengan kesalahan kontur. Kontur adalah lintasan potong atau permukaan benda kerja yang dihasilkan saat proses

pemakanan mesin CNC. Pada mesin CNC yang baik, posisi *spindle* akan dapat beradaptasi dengan faktor pembebanan dan faktor lainnya sehingga akan tetap memiliki akurasi yang tinggi.

Berbagai faktor yang dapat mengurangi kualitas pemakanan benda kerja pada mesin CNC tentunya menjadi kendala bagi proses produksi pada suatu industri. Padahal, dunia industri saat ini dituntut untuk menghasilkan produk-produk berkualitas dalam waktu yang singkat. Oleh karena itu mesin CNC harus memiliki kemampuan untuk mengatasi kendala tersebut. Untuk dapat mengatasi kendala tersebut tersebut, mesin CNC harus mendapatkan kontroler yang tepat, sehingga mesin CNC dapat beradaptasi dengan kondisi benda kerja, memiliki respon yang cepat serta akurasi yang tinggi. Dengan menggunakan kontroler yang tepat, diharapkan benda kerja yang dihasilkan oleh mesin CNC memiliki kualitas yang baik.

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas pengaturan posisi pada mesin CNC dengan cara merancang kontroler *Fuzzy-PD* yang dapat diterapkan pada servo motor yang digunakan sebagai penggerak *spindle* pada CNC. Hasil perancangan berupa kontroler *Fuzzy-PD* diharapkan mampu beradaptasi dengan kondisi dan kebutuhan mesin CNC sehingga dapat meningkatkan kecepatan respon dan akurasi mesin CNC.

1.4 Metodologi

Penelitian Tugas Akhir membutuhkan beberapa tahap yang harus dilakukan secara berurutan, hal ini bertujuan agar pengerjaan penelitian lebih terarah dan efektif serta dapat memenuhi tujuan penelitian. Tahap pertama yang harus dilakukan dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah melakukan studi literatur. Literatur yang digunakan tentunya berhubungan dengan topik penelitian Tugas Akhir. Materi-materi yang diperlukan meliputi dasar-dasar mesin CNC, metode identifikasi dan pemodelan sistem, perancangan dan implementasi kontroler *Fuzzy* dan *PD*, konsep dasar pengaturan kecepatan motor servo AC. Materi tersebut bisa diperoleh dari berbagai jurnal ilmiah, *proceeding*, dan *text book*.

Langkah selanjutnya adalah pemodelan matematis sistem. Pemodelan sistem dilakukan dengan penurunan model fisik sistem di mana karakteristik motor, seperti torsi motor, torsi beban, momen inersia

motor, tegangan, dan kecepatan motor akan dihitung untuk mendapatkan model dinamis dari sistem. Setelah itu, dapat dirumuskan model matematis dari plant. Data-data karakteristik motor tersebut didapatkan dari paper yang menjadi referensi pengerjaan Tugas Akhir ini.

Berdasarkan model matematis yang telah diperoleh, dirancang kontroler *PD* dan kontroler *Fuzzy*. Penggunaan dua kontroler ini bertujuan untuk mendapatkan gabungan kebaikan dari masing-masing kontroler dalam mengatasi permasalahan perubahan parameter *plant*.

Setelah diperoleh spesifikasi kontroler, tahap selanjutnya adalah simulasi dan pengujian sistem. Simulasi dilakukan dengan tujuan untuk menguji kontroler hasil desain apakah sudah dapat memberikan performansi yang terbaik terhadap sistem.

Kegiatan selanjutnya adalah analisa data. Analisa dilakukan terhadap hasil simulasi untuk membandingkan respon keluaran sistem apakah sesuai dengan karakteristik yang diinginkan. Apabila belum sesuai maka perlu dilakukan kembali perancangan kontroler yang dapat memberikan performansi terbaik dari sistem.

Tahap terakhir dari penelitian Tugas Akhir ini adalah penulisan buku. Buku Tugas Akhir merupakan laporan ilmiah yang mencakup semua proses penelitian Tugas Akhir, mulai dari teori yang digunakan hingga kesimpulan dan rekomendasi yang dihasilkan dari penelitian. Semua tahap penelitian Tugas Akhir didokumentasikan secara sistematis sehingga menjadi sebuah pendukung dari rangkaian penjelasan yang ada. Selain buku, dibuat pula prosiding sebagai ringkasan dan materi Tugas Akhir presentasi dalam bentuk *PowerPoint*[®].

1.5 Sistematika

Sistematika pembahasan Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab yaitu pendahuluan, dasar teori, perancangan sistem, pengujian dan analisis, serta penutup.

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini, dibahas mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, kontribusi, metodologi, relevansi, dan sistematika laporan.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi mengenai teori-teori yang berkaitan dengan topik penelitian yang dilakukan. Dasar teori pada bab ini meliputi

konsep kontroler yang akan digunakan dan gambaran umum *plant* yang akan digunakan.

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi menjelaskan secara rinci tentang sistem yang akan digunakan. Sistem yang telah dibangun meliputi *plant* mesin CNC dan perancangan mekanisme kontroler *Fuzzy-PD*.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian dilakukan terhadap sistem yang telah dirancang sebelumnya. Pengujian tersebut dilakukan beberapa tahap, yaitu pengujian untuk mencapai sinyal referensi, pengujian dengan perubahan sinyal referensi, pengujian dengan gangguan, dan pengujian dengan beban. Analisis dilakukan berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan serta menggunakan perhitungan RMSE untuk membandingkan respon sistem.

BAB V PENUTUP

Setelah proses pengujian dilakukan, disajikan beberapa kesimpulan yang disertai dengan rekomendasi terhadap penulisan Tugas Akhir ini.

1.6 Relevansi

Hasil tugas akhir ini juga diharapkan dapat memberikan manfaat kepada dunia industri, pendidikan, dan masyarakat umum. Manfaat tersebut berupa pengetahuan serta dapat diterapkan secara langsung pada dunia industri sehingga kualitas hasil produksi industri tersebut semakin meningkat.



BAB II TEORI DASAR

Untuk dapat mengatur sebuah plant, sangat penting untuk memahami berbagai teori yang dapat menunjang pengaturan tersebut. Oleh karena itu diperlukan studi literatur untuk memahami keseluruhan teori yang diperlukan. Pada pengaturan mesin CNC, beberapa teori yang perlu dipahami antara lain dasar mesin CNC yang meliputi bagian-bagian mesin CNC, konfigurasi pengaturan mesin CNC, serta Motor AC Servo sebagai penggerak sumbu pada mesin CNC. Selain itu juga diperlukan pemahaman mengenai metode kontrol yang akan digunakan yaitu teori *Fuzzy* dan *PD*.

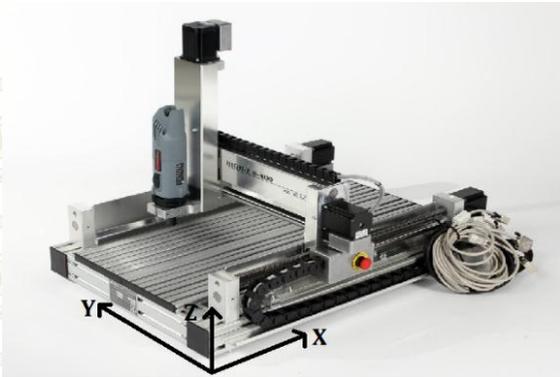
2.1 Mesin CNC

Mesin CNC adalah mesin perkakas yang digunakan untuk mengikis, memotong, atau membentuk sebuah benda. Mesin CNC adalah pengembangan dari mesin perkakas yang menggunakan program dalam melakukan membentuk sebuah benda.

Pada mesin CNC terdapat bagian yang berputar yang disebut dengan *spindle*. Berdasarkan bagian tersebut, mesin CNC dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu mesin CNC *Lathe* dan Milling. Pada mesin CNC *Lathe*, pada bagian *spindle* terdapat benda kerja. Mesin CNC *Lathe* digunakan untuk mengikis atau mengukir benda kerja tersebut sehingga menjadi bentuk yang diinginkan.

Pada penelitian Tugas Akhir ini, mesin CNC yang digunakan adalah mesin CNC Milling. Pada *spindle* mesin CNC *milling* terdapat pisau pemotong atau biasa disebut dengan bor. Mesin CNC Milling digunakan untuk memotong, melubangi, atau membentuk benda kerja.

Dalam membentuk sebuah benda, mata bor mesin CNC *Milling* harus dapat bergerak sesuai dengan bentuk benda yang diinginkan. Oleh karena itu, mesin CNC memiliki tiga sumbu gerak. Ketiga sumbu tersebut adalah X, Y, dan Z. Sumbu X menunjukkan arah gerak ke kanan atau ke kiri. Sumbu Y menunjukkan arah gerak ke depan atau ke belakang. Sumbu Z menunjukkan arah gerak secara vertikal, ke atas atau ke bawah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pergerakan sumbu ini dilakukan oleh motor servo yang terhubung pada mekanik dari mesin



Gambar 2.1 Mesin CNC *milling*

CNC. Oleh karena itu, pada mesin CNC perbaikan posisi dan kontur dilakukan dengan mengatur motor servo tersebut.

2.1.1 Prinsip Kerja CNC Milling

Pada mesin CNC, terdapat beberapa cara dalam pemrograman posisi. Salah satunya adalah pemrograman berdasarkan titik referensi. Berdasarkan titik referensi, terdapat dua cara pemrograman mesin CNC, yaitu :

a. Incremental

Pemrograman secara *incremental* meletakkan titik yang dituju berdasarkan titik sebelumnya. Sebagai contoh, X+ akan membuat pisau pemotong bergerak ke kanan dari posisi sebelumnya, Y- akan membuat pisau pemotong bergerak menjauhi posisi sebelumnya, dan begitu juga untuk sumbu-sumbu lainnya.

b. Absolute

Pemrograman secara *absolute* menggunakan titik origin (0,0) sebagai titik referensi, sehingga semua pergerakan akan dibandingkan dengan posisi titik referensi. Misalnya, X+ akan membuat pisau pemotong bergerak ke kanan dari titik origin, Y- akan membuat pisau pemotong bergerak menjauhi titik origin, dan begitu juga untuk sumbu-sumbu lainnya.

Selain berdasarkan titik referensi, pemrograman posisi pada mesin CNC juga berdasarkan cara gerak dari *spindle*. Berdasarkan cara geraknya, pemrograman CNC dibagi menjadi dua, yaitu :

a. Titik ke Titik

Pengaturan posisi dari titik ke titik digunakan saat dibutuhkan ketepatan dari posisi *spindle* terhadap preparat. Hal ini biasa digunakan saat melakukan pengeboran, melebarkan lubang, percabangan, atau melubangi. Pengaturan posisi titik ke titik adalah suatu proses ketika *spindle* ditaruh pada posisi tertentu, melakukan pekerjaan, kemudian berpindah ke posisi selanjutnya, untuk melakukan pekerjaan kembali, dan seterusnya hingga semua titik yang diinginkan selesai.

b. *Continous path* (Interpolasi)

Interpolasi bisa juga disebut dengan *contouring*. Proses interpolasi adalah proses ketika pisau pemotong terus bersentuhan dengan preparat ketika bergerak dari satu titik ke titik lainnya. Proses interpolasi sendiri terbagi menjadi dua jenis, yaitu *Linear* dan *circular*. Interpolasi *linear* adalah ketika mesin pemotong bergerak membuat garis lurus pada preparat, sedangkan interpolasi *circular*, adalah ketika mesin pemotong bergerak secara melingkar di atas preparat.

Bahasa pemrograman yang sering digunakan dalam memrogram CNC adalah G-codes (Persiapan), M-codes, F-codes (*Feed*), S-codes (Kecepatan), D-codes (*offset* diameter), T-codes (nomor alat), dan lain sebagainya.

Pada mesin CNC, G-codes mengatur beberapa gerakan, misalnya :

G00 : menuju ke titik tertentu

G01 : bergerak sesuai garis lurus

G02 : bergerak melingkar searah jarum jam

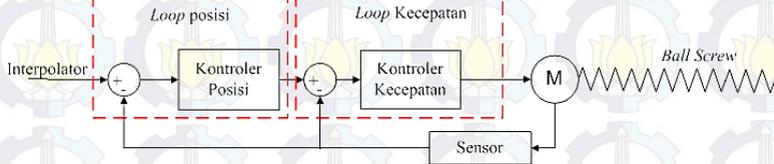
G03 : bergerak melingkar berlawanan dengan arah jarum jam

2.1.2 Sistem Servo Pada Mesin CNC

Pada mesin CNC, sistem pengaturan umpan balik terdiri dari dua loop, yaitu *loop* posisi dan *loop* kecepatan. Umpan balik yang digunakan diperoleh dari *encoder* motor servo yang menyatakan posisi dan kecepatan motor servo. Gambar 2.2 menunjukkan *loop* pengaturan sistem servo pada mesin CNC.

Pengaturan posisi pada mesin CNC adalah pengaturan loop tertutup. Loop pengaturan tertutup melihat posisi spindle sebagai

obyek dan menggunakan sinyal kesalahan sebagai umpan balik [1].
Pengaturan



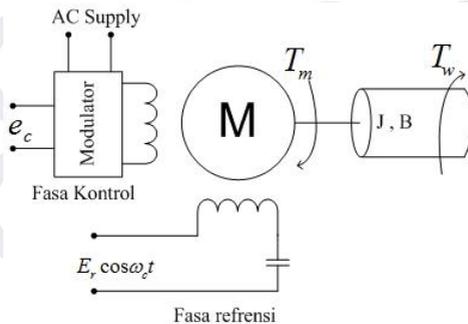
Gambar 2.2 Struktur sistem servo pada mesin CNC posisi pada mesin CNC memegang peranan penting dalam ketepatan pembentukan benda kerja serta dapat membuat mesin CNC bekerja dengan efektif [2].

2.2 Motor Servo AC

Motor Servo AC merupakan motor AC 2 fasa yang memiliki satu fasa sebagai fasa referensi dan satu fasa kontrol. Struktur Motor AC Servo dapat dilihat pada Gambar 2.3 [3]. Sumber tegangan AC masuk ke dalam fasa kontrol. Sumber tegangan ini kemudian dimodulasi dengan tegangan kontrol (e_c), tegangan kontrol diperoleh dari sinyal kesalahan pada sistem umpan balik, sedangkan tegangan masukan pada fasa referensi adalah $E_r \cos \omega_c t$. ω_c adalah frekuensi karier sedangkan E_r adalah tegangan referensi.

Motor Servo AC menghasilkan torsi yang disebut dengan T_m , torsi ini mendapat gangguan yang berlawanan arah oleh torsi gangguan T_w . Motor kemudian menggerakkan beban. Pada beban motor, terdapat parameter B dan J.

Dalam pengaturan Motor AC Servo sangat penting untuk



Gambar 2.3 Struktur Motor Servo AC

mengetahui hubungan antara masukan dengan keluaran motor. Masukan Motor AC Servo berupa tegangan sedangkan keluarannya berupa kecepatan motor yang dapat dilihat pada Gambar 2.4. Gambar 2.4 merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara torsi dengan kecepatan motor. Torsi dan kecepatan memiliki hubungan terbalik, semakin besar torsi maka kecepatan akan semakin berkurang, dan sebaliknya semakin kecil torsi maka kecepatan akan semakin bertambah. Selain itu kecepatan dan torsi juga dipengaruhi oleh tegangan kontrol, semakin besar tegangan kontrol torsi akan semakin meningkat. Kemiringan kurva ditentukan oleh besarnya K_2 yang diperoleh dari percobaan, sedangkan besarnya e_c dipengaruhi oleh K_1 sehingga persamaan torsi motor dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$T_m = K_1 e_c(t) - K_2 \dot{\theta}(t) \quad 2.1$$

Beban motor dipengaruhi oleh momen inersia J dan koefisien gesekan B sehingga persamaan beban pada motor menjadi $J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_w$ sehingga persamaan torsi Motor AC Servo secara keseluruhan dapat ditulis :

$$k_1 e_c(t) = J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + T_w + k_2 \dot{\theta}(t) \quad 2.2$$

$$T_m = k_1 e_c(t) - k_2 \dot{\theta}(t) = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_w \quad 2.3$$

Apabila diubah ke dalam domain S persamaan menjadi:

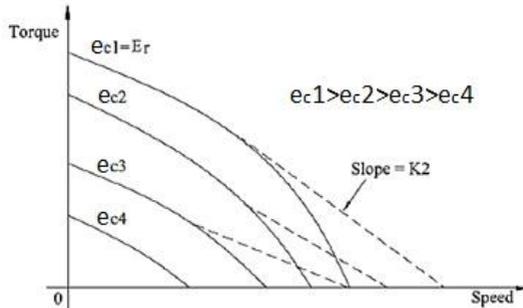
$$k_1 e_c(s) - k_2 \cdot s \cdot \theta(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + B \cdot s \cdot \theta(s) + T_w \quad 2.4$$

Dengan membuat $T_w = 0$, maka diperoleh persamaan:

$$k_1 e_c(s) - k_2 \cdot s \cdot \theta(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + B \cdot s \cdot \theta(s) \quad 2.5$$

sehingga hubungan antara kecepatan dengan tegangan kontrol dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{k_1}{J \cdot s^2 + k_2 \cdot s + B \cdot s} = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)} \quad 2.6$$



Gambar 2.4 Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC

2.3 Teori Fuzzy

Kontroler *Fuzzy* adalah pengaturan yang bekerja seperti pemikiran manusia, di mana tidak ada batasan yang jelas antara ‘iya’ atau ‘tidak’. Pengaturan ini bersifat tidak biner, tidak dapat dimodelkan secara matematis, dan tidak menentu.[4]

2.3.1 Sistem Fuzzy

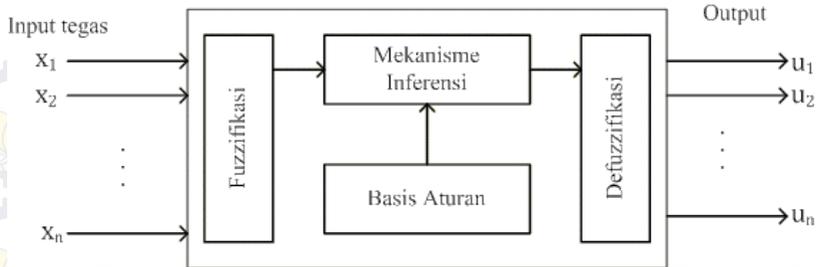
Sistem *Fuzzy* adalah serangkaian proses yang terjadi pada kontroler *Fuzzy*. Beberapa bagian yang membangun sistem *Fuzzy* dapat dilihat pada diagram kontroler *Fuzzy* pada Gambar 2.5.[5]

2.3.1.1 Himpunan Fuzzy

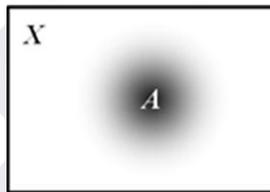
Jika X adalah kumpulan dari obyek yang dinotasikan sebagai x , maka himpunan *Fuzzy* A dalam X didefinisikan menjadi:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$$

di mana $\mu_A(x)$ adalah fungsi keanggotaan untuk himpunan *Fuzzy* A . Fungsi keanggotaan tersebut memetakan masing-masing elemen X ke dalam nilai keanggotaan antara 0 sampai 1. Hal ini dapat digambarkan pada Gambar 2.6 di mana semakin ke tengah, derajat keanggotaan x akan



Gambar 2.5 Diagram kontroler *Fuzzy*



Gambar 2.6 Himpunan *Fuzzy* semakin besar. Derajat keanggotaan juga dapat diartikan tingkatan kebenaran bahwa x adalah anggota dari himpunan A . [6]

2.3.1.2 *Fuzzifikasi*

Untuk menyatakan derajat keanggotaan suatu nilai digunakan fungsi keanggotaan dari himpunan *Fuzzy*. Salah satu bentuk fungsi keanggotaan tersebut adalah fungsi segitiga. Fungsi keanggotaan segitiga dinyatakan dalam Persamaan 2.7 dan bentuk dari fungsi keanggotaan segitiga dapat dilihat pada Gambar 2.7 di mana $\mu(x)$ menyatakan derajat keanggotaan dari x terhadap suatu himpunan *Fuzzy*, sedangkan a, b , dan c adalah parameter dari fungsi segitiga.

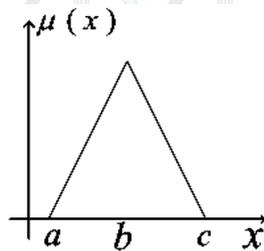
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad 2.7$$

2.3.1.3 *Mekanisme Inferensi*

Proses fuzzifikasi mengaktifkan himpunan masukan *Fuzzy*. Selanjutnya mekanisme inferensi menentukan fungsi keluaran *Fuzzy*

yang akan digunakan. Mekanisme inferensi Fuzzy dilakukan dengan menggunakan aturan “Jika Maka”. Pada mekanisme inferensi sendiri terdapat beberapa tahap, yaitu aplikasi operator Fuzzy, aplikasi metode implikasi, dan yang terakhir adalah agregasi semua keluaran.

Pada kontroler Fuzzy dengan lebih dari satu masukan, akan terdapat lebih dari satu fungsi keanggotaan pada setiap keadaan, oleh karena itu diperlukan suatu operasi penggabungan dua fungsi



Gambar 2.7 Fungsi keanggotaan segitiga

keanggotaan tersebut. Pada operasi penggabungan dua fungsi keanggotaan tersebut, digunakan operasi *and* atau interseksi. Operasi *and* mengambil nilai minimum dari dua himpunan yang saling berpotongan. Operasi *and* atau minimum digambarkan pada Gambar 2.8 dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

1) *Minimum*

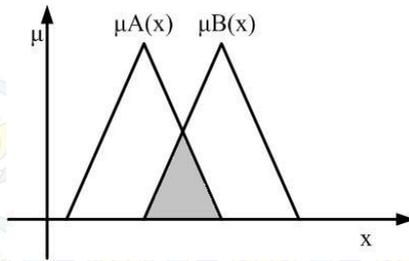
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \text{ untuk } x \in X$$

2) *Product (and)*

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x) \text{ untuk } x \in X \mu_A \mu_B$$

Tahap selanjutnya adalah metode implikasi. Metode implikasi adalah menentukan kesimpulan yang akan dihasilkan dari masukan yang telah diperoleh. Metode implikasi ini merujuk pada aturan ‘Jika Maka’ yang telah dibuat.

Masing-masing aturan *Fuzzy* akan menghasilkan satu kesimpulan. Oleh karena itu diperlukan proses agregasi untuk memperoleh sebuah kesimpulan dari keseluruhan aturan. Pada proses agregasi ini, semua keluaran dari aturan tersebut dikumpulkan untuk selanjutnya dilakukan proses defuzzifikasi.



Gambar 2.8 Fungsi keanggotaan dengan hubungan *and*

2.3.1.3. Defuzzifikasi

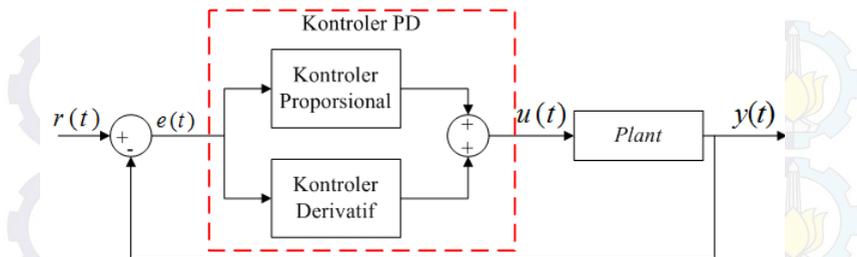
Defuzzifikasi adalah proses mengembalikan suatu keluaran dari bentuk himpunan *Fuzzy* ke dalam angka tertentu. Salah satu metode defuzzifikasi adalah *Center Of Gravity* yang dinyatakan dalam persamaan:

$$z_{COG} = \frac{\sum_i b_i \int \mu(i)}{\sum_i \int \mu(i)} \quad 2.8$$

di mana b_i adalah titik tengah fungsi keanggotaan ke- i , $\int \mu(i)$ adalah luas trapesium hasil inferensi *Fuzzy* dan z_{COG} adalah nilai keluaran dari kontroler *Fuzzy*.

2.4 Kontroler PD[7]

Kontroler *PD* adalah gabungan dari kontroler Proporsional dan Derivatif dengan struktur yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Kontroler *PD* memiliki sifat gabungan dari kedua kontroler tersebut. Kontroler proporsional adalah kontroler yang sinyal keluarannya merupakan perkalian dari konstanta proporsional dengan sinyal kesalahan yang masuk ke dalam kontroler proporsional. Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh kontroler proporsional sebanding dengan besarnya sinyal kesalahan. Kontroler proporsional berfungsi untuk mengurangi kesalahan waktu tunak, serta meningkatkan respon sistem, namun penambahan kontroler proporsional juga akan mengurangi kestabilan sistem sehingga dibutuhkan kontroler derivatif. Kontroler derivatif dapat mendeteksi adanya perubahan kesalahan dan bergerak mengikutinya pada $t+T_d$, di mana T_d adalah konstanta waktu kontroler derivatif.



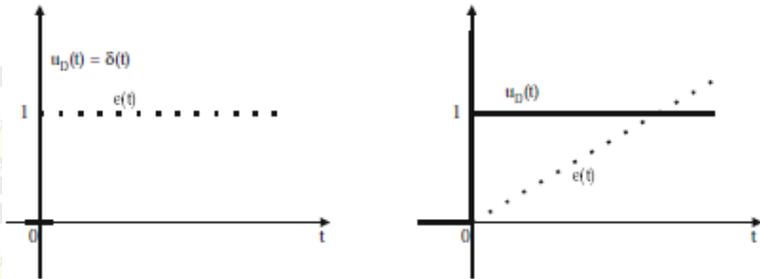
Gambar 2.9 Diagram blok kontroler *PD*

Sifat dari kontroler derivatif tidak dapat digunakan secara tersendiri karena kontroler tersebut tidak dapat menghilangkan kesalahan. Kontroler derivatif hanya berpengaruh apabila terdapat perubahan terhadap masukan pada kontroler, hal ini tampak pada Gambar 2.10. Berdasarkan Gambar 2.10 tersebut, kontroler derivatif akan mengeluarkan sinyal impulse (δ) jika mendapat masukan berupa sinyal step, sedangkan ketika memperoleh masukan berupa sinyal ramp, kontroler derivatif akan menghasilkan sinyal keluaran berupa sinyal step.

Berdasarkan uraian tersebut, pengaruh dari konstanta *PD* terhadap respon sistem dapat dilihat pada Tabel 2.1:

Tabel 2.1 Dampak perubahan konstanta terhadap respon sistem

Closed-Loop Response	Rise time	Overshoot	Settling time	Ess	Stabilitas
Kp	Semakin Cepat	Meningkat	Sedikit Meningkat	Menurun	Menurun
Kd	Sedikit mempercepat	Menurun	Menurun	Tidak berubah	Meningkat

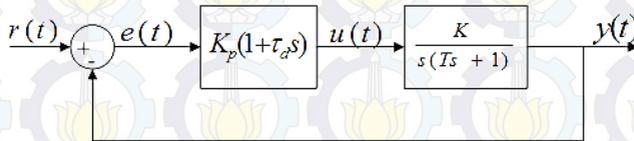


a) Respon kontroler Derivatif terhadap sinyal konstan
 b) Respon kontroler Derivatif terhadap sinyal ramp

Gambar 2.10 Keluaran kontroler Derivatif untuk masukan konstan dan ramp

2.4.1 Perancangan Kontroler PD untuk sistem orde ke-2

Diagram blok kontroler PD yang diterapkan pada suatu sistem orde dua adalah :



Gambar 2.11 Diagram blok sistem orde kedua dengan kontroler PD di mana:

K_p =Konstanta Proporsional

τ_d =Waktu diferensial

K =gain

T =Konstanta

Jika dipilih $\tau_d = T$ maka:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_p \cdot K / s}{\frac{1}{K_p \cdot K s + 1}} \quad 3.3$$

sehingga suatu plant orde kedua dengan Kontroler PD akan menghasilkan sistem orde pertama dengan fungsi alih :

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K^*}{\tau^* s + 1} \quad 3.4$$

di mana τ^* dan K^* adalah konstanta waktu dan gain yang diinginkan.

2.5 Variabel Acak Normal (Gaussian)[8]

Variabel acak normal atau Gaussian adalah contoh kondisi di mana kerapatan probabilitas dari proses acak dapat terukur dan sesuai sehingga pada variabel acak normal atau Gaussian semua fungsi kerapatan menggambarkan keseluruhan proses dalam bentuk normal. Pada variabel acak normal atau Gaussian tidak hanya amplitudo yang terdistribusi secara normal, melainkan keseluruhan fungsi kerapatannya dapat dinyatakan dalam fungsi normal.

Variabel Acak normal atau Gaussian dinyatakan menggunakan persamaan :

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x - m_x)^2\right] \quad 2.13$$

Fungsi tersebut memiliki dua parameter yaitu rata-rata variabel acak m_x dan varian σ^2 . Hubungan antara rata-rata dan varian dengan f_x dinyatakan dalam persamaan:

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx \quad 2.14$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f_x(x) dx \quad 2.15$$

2.6 Root Mean Square Error

Tujuan dari pemberian kontroler pada suatu plant adalah untuk memperoleh respon yang mirip dengan sinyal referensi yang diinginkan. Salah satu metode untuk mengecek kemiripan antara respon dengan sinyal referensi adalah menggunakan perhitungan *Root Mean Square Error (RMSE)*.

RMSE dinyatakan menggunakan persamaan :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_{2i})^2}{n}} \quad 2.16$$

dengan y_1 adalah nilai sinyal referensi, y_2 adalah respon plant, dan n adalah jumlah data. Kemiripan antara hasil respon dan sinyal referensi dapat dilihat pada besarnya nilai RMSE. Semakin kecil nilai RMSE, artinya sinyal respon memiliki kesalahan yang semakin kecil, maka sinyal referensi dengan respon semakin mirip.

BAB III

PERANCANGAN KONTROL FUZZY-PD PADA MOTOR SERVO AC

Salah satu tahapan dalam pengaturan sebuah plant adalah perancangan kontroler yang akan digunakan. Perancangan kontroler tersebut berdasarkan proses pemodelan matematis yang telah dilakukan terhadap plant. Proses perancangan kontrol terdiri dari beberapa tahap, tahap pertama yaitu pemodelan matematis Motor Servo AC, perancangan parameter K_p dan K_d , dan perancangan kontroler *Fuzzy*.

3.1 Pemodelan Matematis Motor Servo AC

Motor AC Servo memiliki karakteristik yang dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi motor servo AC

Type	GSM62AE
Tegangan	230 V
Daya	100 W
Kecepatan sudut	50 rpm
Momen inersia (J)	0,052 kg.cm ²
Koefisien gesek viskos (B)	0,01875 Pa.s
GB rasio	36
Radius keluaran poros	0,0175 m

Untuk memperoleh nilai K_c dan K_n dilakukan uji coba, sehingga diperoleh fungsi alih dari motor AC servo untuk pengaturan kecepatan seperti pada Persamaan 3.1 [9].

$$G(s) = \frac{0,4}{2,776s+1} \quad 3.1$$

Karena integral dari kecepatan adalah posisi maka untuk memperoleh fungsi alih motor servo untuk pengaturan posisi, dapat fungsi alih pada Persamaan 3.1 dapat diintegrasikan, menjadi fungsi alih kecepatan pada Persamaan 3.2.

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,776s+1)} \quad 3.2$$

3.2 Perancangan Kontrol

Perancangan kontrol dilakukan berdasarkan model matematis *plant* pada Persamaan 3.2. Perancangan kontrol tersebut dilakukan dengan menghitung parameter K_p dan K_d , kemudian hasil dari perhitungan tersebut digunakan sebagai acuan pada perancangan kontroler *fuzzy*.

3.2.1 Perancangan kontroler PD

Berdasarkan persamaan 3.2 diketahui:

$$K = 0,4 \text{ dan } T = 2,7763$$

Besarnya waktu differensial:

$$\tau_d = T = 2,7763$$

Besarnya K_p jika diinginkan $\tau_s^*(\pm 2\%) \approx 4\tau^*$ tercapai saat 0,5 detik, maka $\tau^* = 0.125$

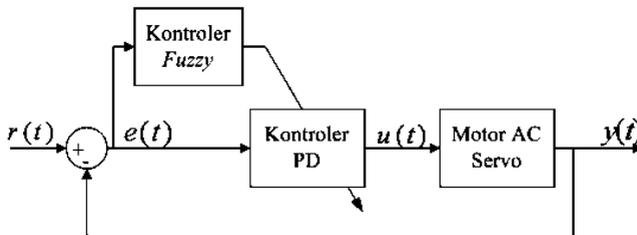
$$K_p = \frac{1}{\tau^* K} = \frac{1}{0,125(0,4)} = 20$$

Besarnya K_d :

$$K_d = K_p \tau_d = 20(2,7763) = 55,526$$

3.2.2 Perancangan kontroler Fuzzy

Kontroler *Fuzzy* melakukan pengaturan nilai K_p dan K_d berdasarkan besarnya kesalahan dan juga perubahan kesalahan pada sistem. Hal ini dapat dilihat pada diagram blok kontroler *Fuzzy-PD* yang terdapat pada Gambar 3.1.

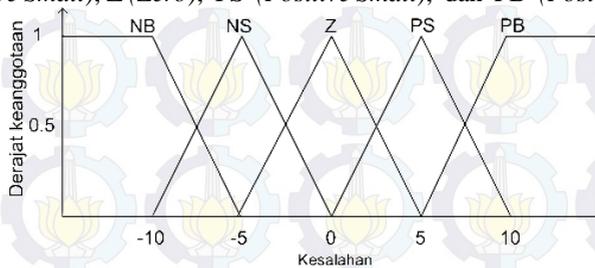


Gambar 3.1 Diagram blok sistem

3.2.2.1 Fungsi Keanggotaan Himpunan Fuzzy

Fungsi keanggotaan untuk masukan kesalahan dapat dilihat pada Gambar 3.2. Fungsi keanggotaan tersebut terdiri dari tiga buah fungsi

seitiga dan dua fungsi z. Fungsi tersebut yaitu NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), dan PB (*Positive Big*).

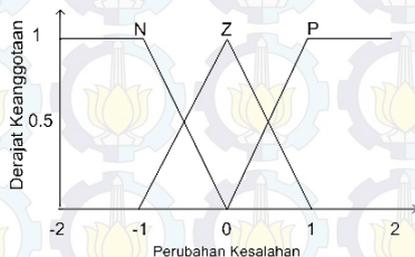


Gambar 3.2 Fungsi keanggotaan untuk masukan kesalahan

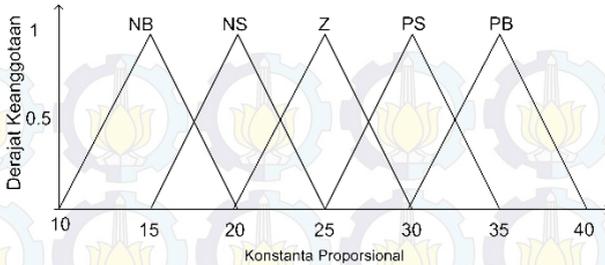
Batas-batas fungsi dibuat berdasarkan respon plant tanpa menggunakan kontroler dengan sinyal referensi sepuluh.

Fungsi keanggotaan untuk masukan perubahan kesalahan dapat dilihat pada Gambar 3.3. Fungsi keanggotaan tersebut terdiri dari sebuah fungsi seitiga dan dua fungsi z. Fungsi tersebut yaitu N (*Negative*), Z (*Zero*), P (*Positive*). Fungsi keanggotaan perubahan kesalahan dibuat berdasarkan kemiringan grafik kesalahan sistem jika mendapat sinyal referensi sebesar sepuluh .

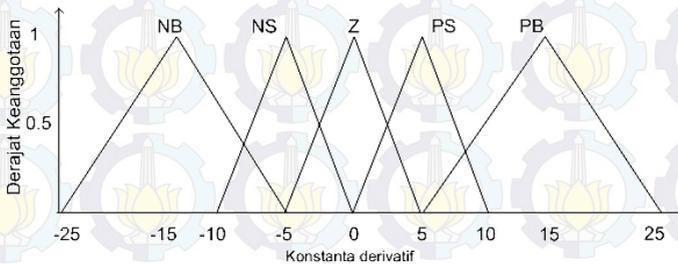
Keluaran kontroler *Fuzzy* adalah Konstanta proporsional dan konstanta derivatif. Fungsi keanggotaan untuk keluaran dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5. Fungsi keanggotaan tersebut terdiri dari lima buah fungsi seitiga. Fungsi tersebut yaitu NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), Z (*Zero*), PS (*Positive Small*), dan PB (*Positive Big*). Batas-batas fungsi dibuat berdasarkan perhitungan secara analitis.



Gambar 3.3 Fungsi keanggotaan untuk masukan perubahan kesalahan



Gambar 3.4 Fungsi keanggotaan untuk Konstanta Proporsional



Gambar 3.5 Fungsi keanggotaan untuk konstanta derivatif

3.2.2.2 Pembuatan Aturan Dasar

Prinsip pembuatan aturan dasar :

- (1) Ketika $e > 0$, $de > 0$, diperlukan penambahan K_p dan K_d , hal ini bertujuan untuk mengurangi kesalahan waktu tunak dan meningkatkan kestabilan
- (2) Ketika $e > 0$, $de < 0$, sistem dalam keadaan menuju waktu tunak, sehingga K_p harus ditambah, sedangkan K_d harus diturunkan, hal ini bertujuan untuk mempercepat rise time.
- (3) Ketika $e < 0$, $de > 0$, sistem akan mendekati waktu tunak setelah *overshoot*, oleh karena itu nilai K_p harus diturunkan, sedangkan nilai K_d dinaikkan sehingga akan mengurangi kesalahan waktu tunak dan meningkatkan kestabilan

(4) Ketika $e < 0$, $ec < 0$, hal ini menunjukkan sistem akan mengalami *overshoot*, sehingga nilai K_p harus dikurangi dan K_d harus ditingkatkan.

Berdasarkan prinsip tersebut, maka aturan dasar *Fuzzy* untuk K_p dan K_d adalah :

Tabel 3.2 Aturan dasar kontroler *Fuzzy*

Kp dan Kd		kesalahan				
		NB	NS	Z	PS	PB
Perubahan kesalahan	N	NB,NB	NS,NS	PS,Z	PS,PS	PB,PB
	Z	NS,PS	NS,PS	Z,Z	PS,5NS	PB,NB
	P	NB,PB	NS,PS	NS,Z	PS,NS	PB,NB



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

PENGUJIAN PENGATURAN POSISI *SPINDLE* MENGUNAKAN KONTROLER *FUZZY-PD*

Pengujian dilakukan dengan cara simulasi. Pengujian tersebut dilakukan dengan beberapa kondisi, yaitu pengujian untuk mencapai sunyal referensi, pengujian dengan perubahan sinyal referensi, pengujian dengan pemberian gangguan, dan pengujian dengan pemberian beban. Berbagai macam kondisi tersebut bertujuan untuk menggambarkan kondisi sistem sebenarnya. Pengujian juga dilakukan terhadap kontroler *PD*, hal ini bertujuan untuk membuktikan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* yang dapat meningkatkan performa dari sistem.

4.1 Pengujian untuk mencapai Sinyal referensi

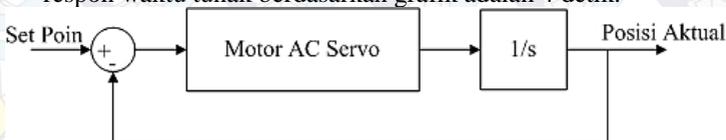
Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan respon sistem secara dalam menerima sinyal referensi tertentu. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sinyal referensi sebesar 5 cm kepada sistem tanpa menggunakan kontroler, menggunakan kontroler *PD*, dan menggunakan kontroler *Fuzzy-PD*.

Pengujian pertama dilakukan terhadap sistem tanpa menggunakan kontroler. Diagram blok sistem dapat dilihat pada Gambar 4.1. Hasil keluaran sistem dapat dilihat pada Gambar 4.2, sedangkan kesalahan sistem dapat dilihat pada Gambar 4.3. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai RMSE sistem tanpa menggunakan kontroler sebesar 1,4844.

Analisa respon sistem tanpa menggunakan kontroler adalah sebagai berikut:

- Penentuan konstanta waktu (τ)

Waktu yang dibutuhkan sistem dalam mencapai 63,2% dari respon waktu tunak berdasarkan grafik adalah 4 detik.



Gambar 4.1 Diagram blok pengaturan posisi motor AC servo tanpa menggunakan Kontroler.

- *Overshoot*

Simpangan puncak terjadi saat 9,42 detik sebesar 18,4%.

- Waktu tunak atau *settling time* (t_s)

Waktu yang menyatakan bahwa sistem telah mencapai keadaan stabil yaitu:

$$t_s(\pm 3\%) \approx 5\tau \approx 20 \text{ detik}$$

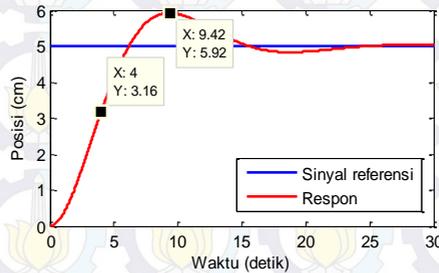
- Waktu naik atau *rise time* (t_r)

Waktu naik adalah waktu yang menyatakan bahwa *output* telah naik dari 5% menuju 95% dinyatakan dengan:

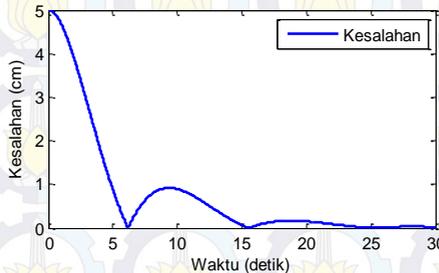
$$t_r(5\% - 95\%) \approx \tau \ln 19 \approx 11,77 \text{ detik}$$

- Kesalahan Waktu tunak (e_{ss})

Berdasarkan grafik diperoleh nilai kesalahan waktu tunak sebesar $1-1=0$.



Gambar 4.2 Posisi motor AC servo tanpa menggunakan Kontroler



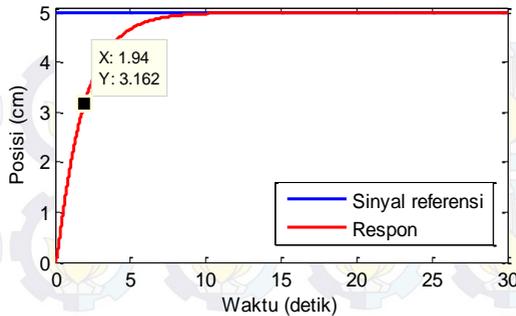
Gambar 4.3 Grafik kesalahan sistem tanpa menggunakan kontroler

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan menggunakan kontroler *PD*. Pengujian juga dilakukan dengan merubah konstanta proporsional dan diferensial. Hal ini bertujuan untuk melihat pengaruh dari K_p dan K_d terhadap sistem. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan perubahan dilakukan terhadap konstanta proporsional dan differensial yang dapat dilihat pada Tabel 4.1. Setelah disimulasikan, diperoleh hasil terbaik yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 dengan grafik kesalahan terdapat pada Gambar 4.5, sedangkan hasil percobaan lain dapat dilihat pada Lampiran. Hasil terbaik tersebut dilihat dari nilai RMSE untuk masing-masing percobaan yang terdapat pada Tabel 4.1.

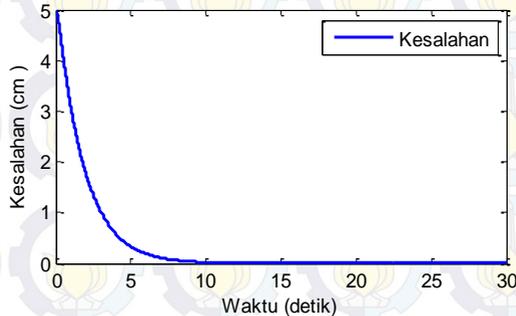
Tabel 4.1 Nilai RMSE untuk perubahan parameter K_p dan K_d

Percobaan	K_p	K_d	RMSE
1	10	55,526	1,5717
2	20	55,526	1,1231
3	30	55,526	0,9265
4	20	27,763	0,8524
5	20	111,052	1,5474

Tabel 4.1 menunjukkan nilai RMSE pada percobaan 1, 2, dan 3 akan semakin mengecil. Hal tersebut disebabkan karena penambahan nilai K_p akan mempercepat respon sistem, sehingga kesalahan akan lebih cepat diperbaiki, sedangkan pada percobaan ke 3, 4, dan 5 nilai RMSE turun ketika nilai K_d besar dan turun ketika nilai K_d kecil. Hal tersebut disebabkan karena penambahan nilai K_d akan menurunkan kecepatan respon sistem. Namun, penambahan kontroler derivatif tetap diperlukan demi mengurangi *overshoot* yang dapat dihasilkan oleh kontroler proporsional.



Gambar 4.4 Posisi motor AC servo menggunakan Kontroler *PD*



Gambar 4.5 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD*

Analisa respon sistem pengaturan posisi dengan menggunakan kontroler *PD* adalah sebagai berikut:

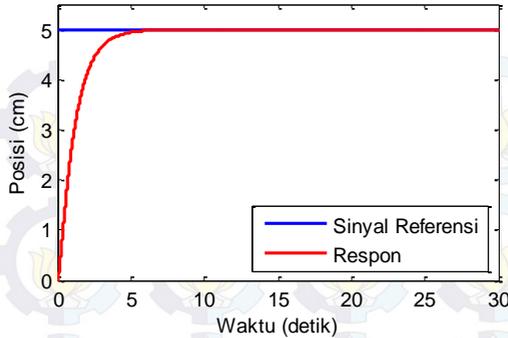
- Penentuan konstanta waktu (τ)
Waktu yang dibutuhkan sistem dalam mencapai 63,2% dari respon waktu tunak berdasarkan grafik adalah 1,94 detik.
- Waktu tunak atau *settling time* (t_s)
Waktu yang menyatakan bahwa sistem telah mencapai keadaan stabil yaitu:
 $t_s(\pm 3\%) \approx 5\tau \approx 9,7$ detik
- Waktu naik atau *rise time* (t_r)
Waktu naik adalah waktu yang menyatakan bahwa *output* telah naik dari 5% menuju 95% dinyatakan dengan:
 $t_r(5\% - 95\%) \approx \tau \ln 19 \approx 5,7$ detik

- Kesalahan Waktu tunak (e_{ss})
Berdasarkan grafik diperoleh nilai kesalahan waktu tunak sebesar 1-1=0.

Pengujian ketiga dilakukan terhadap sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD*. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan perubahan pada basis aturan yang digunakan, hal ini bertujuan untuk memperoleh basis aturan yang terbaik. Basis aturan untuk percobaan pertama, kedua, keempat, dan kelima dapat dilihat pada Lampiran, sedangkan basis aturan untuk percobaan ketiga merupakan hasil perancangan pada Bab III yang terlihat pada Tabel 3.2, sedangkan struktur kontroler *Fuzzy* yang digunakan merupakan hasil rancangan pada Bab III, kontroler *Fuzzy* hasil perancangan menggunakan masukan kesalahan dan perubahan kesalahan sedangkan keluarannya adalah K_p dan K_d .

Masing-masing aturan dasar memiliki respon yang berbeda dengan aturan dasar lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh nilai RMSE respon tersebut. Nilai RMSE untuk aturan dasar pertama sebesar 0,7746, untuk aturan dasar kedua sebesar 0,7748, untuk aturan dasar ketiga sebesar 0,7531, untuk aturan dasar keempat sebesar 0,7745, dan untuk aturan dasar kelima sebesar 0,7746.

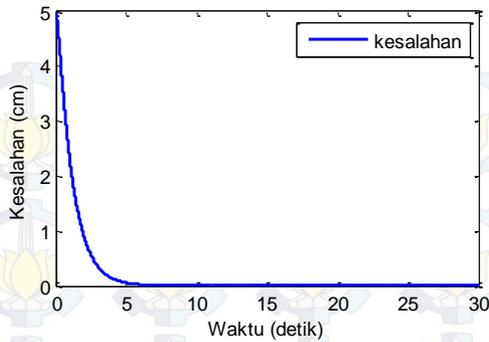
Berdasarkan nilai RMSE tersebut, hasil respon terbaik diperoleh pada percobaan ketiga yang tampak pada Gambar 4.6 dengan grafik kesalahan terdapat pada Gambar 4.7. Perbandingan nilai respon tersebut menunjukkan bahwa pemilihan aturan dasar pada kontroler *Fuzzy* akan berpengaruh terhadap performansi sistem, pemilihan aturan dasar yang tepat dapat meningkatkan kualitas respon sistem. Selain itu pemilihan batas-batas fungsi keanggotaan himpunan *Fuzzy* juga mempengaruhi performansi sistem.



Gambar 4.6 Grafik posisi motor AC servo menggunakan Kontroler *Fuzzy-PD*

Analisa respon sistem pengaturan posisi dengan menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* adalah sebagai berikut:

- Penentuan konstanta waktu (τ)
Waktu yang dibutuhkan sistem dalam mencapai 63,2% dari respon waktu tunak berdasarkan grafik adalah 1.22 detik.
- Waktu tunak atau *settling time* (t_s)
Waktu yang menyatakan bahwa sistem telah mencapai keadaan stabil yaitu:
 $t_s(\pm 3\%) \approx 5\tau \approx 6,1$ detik
- Waktu naik atau *rise time* (t_r)
Waktu naik adalah waktu yang menyatakan bahwa *output* telah naik dari 5% menuju 95% dinyatakan dengan:
 $t_r(5\% - 95\%) \approx \tau \ln 19 \approx 3,59$ detik
- Kesalahan Waktu tunak (e_{ss})
Berdasarkan grafik diperoleh nilai kesalahan waktu tunak sebesar $1-1=0$.

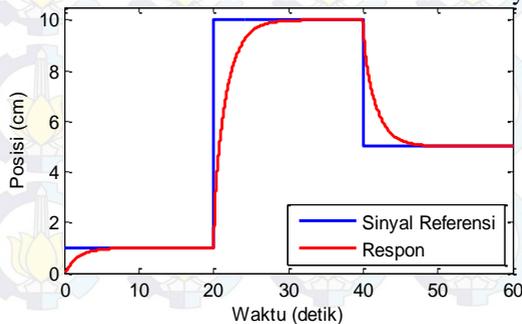


Gambar 4.7 Grafik kesalahan menggunakan Kontroler *Fuzzy-PD*

4.2 Pengujian dengan Perubahan Sinyal referensi

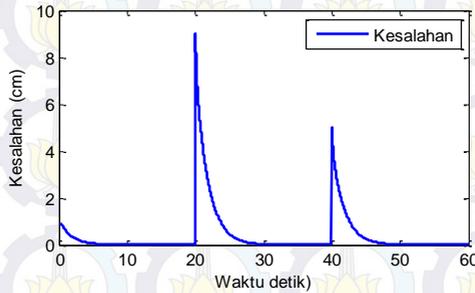
Pengujian dengan perubahan sinyal referensi bertujuan untuk melihat kemampuan kontroler dalam mengatasi perubahan parameter. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sinyal referensi berupa sinyal step dengan nilai yang berubah-ubah pada selang waktu tertentu. Besar sinyal referensi yang digunakan yaitu 1, 5, dan 10.

Pengujian pertama dilakukan terhadap sistem dengan menggunakan kontroler *PD*. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh respon sistem yang terlihat pada Gambar 4.8. Berdasarkan Gambar 4.8 terlihat bahwa respon sistem yang menggunakan kontroler *PD* dapat beradaptasi dengan perubahan sinyal referensi yang diberikan, namun waktu untuk mencapai keadaan waktu tunak melambat untuk masukan yang besar.



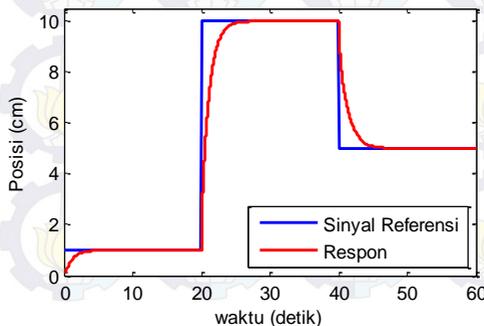
Gambar 4.8 Respon sistem terhadap perubahan masukan dengan kontroler *PD*

Kemampuan kontroler *PD* dalam menghadapi perubahan sinyal referensi juga dapat dilihat pada Gambar 4.9 yang menunjukkan kesalahan yang terjadi pada sistem. Gambar 4.9 menunjukkan kesalahan sistem akan meningkat ketika perubahan sinyal referensi diberikan, namun nilai kesalahan akan segera mengecil hingga mendekati nol beberapa saat kemudian.



Gambar 4.9 Grafik kesalahan sistem dengan menggunakan kontroler *PD*

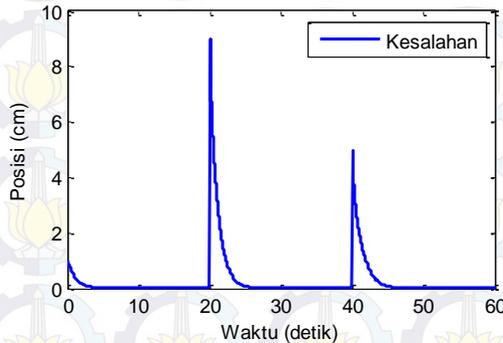
Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD*. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh respon sistem yang terlihat pada Gambar 4.10. Berdasarkan Gambar 4.10 terlihat bahwa respon sistem yang menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dapat beradaptasi dengan perubahan sinyal referensi yang diberikan.



Gambar 4.10 Respon sistem terhadap perubahan masukan dengan kontroler *Fuzzy-PD*

Kemampuan adaptasi kontroler *Fuzzy-PD* juga dapat dilihat pada Gambar 4.11 di mana gambar tersebut menunjukkan kesalahan yang terjadi pada sistem. Gambar 4.11 menunjukkan kesalahan sistem akan meningkat ketika perubahan sinyal referensi diberikan, namun nilai kesalahan akan segera mengecil beberapa saat kemudian.

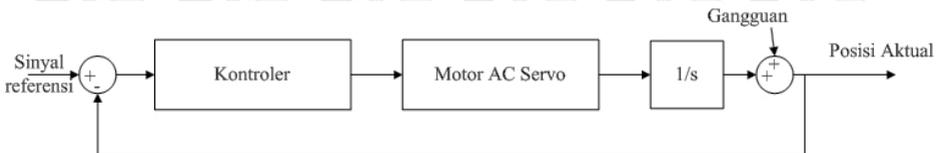
Berdasarkan pengujian terhadap kontroler *PD* dan *Fuzzy-PD* diperoleh nilai RMSE untuk sistem dengan kontroler *PD* sebesar 1,3656 dan sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* sebesar 0,9247. Nilai RMSE tersebut menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki kemampuan lebih baik dalam menerima perubahan sinyal referensi. Hal ini disebabkan oleh kemampuan kontroler *Fuzzy* untuk merubah parameter K_p dan K_d sesuai dengan perubahan kesalahan yang terjadi sehingga kontroler *PD* mampu mengatur sistem lebih efektif.



Gambar 4.11 Grafik Kesalahan sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD*

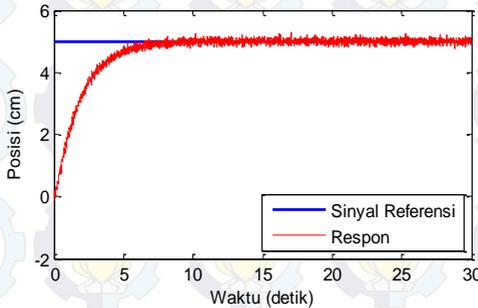
4.3 Pengujian dengan Pemberian Gangguan

Pemberian gangguan bertujuan untuk menguji ketahanan dari sistem. Gangguan yang diberikan merupakan gangguan terukur berupa sinyal acak normal. Gangguan diberikan sebanyak tiga kali dengan nilai rata-rata adalah nol dan varian sebesar 0,005, 0,05, dan 5. Diagram blok sistem dengan gangguan dapat dilihat pada Gambar 4.12.

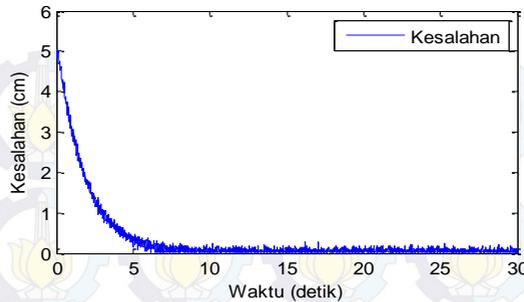


Gambar 4.12 Diagram blok sistem dengan gangguan

Pengujian yang pertama dilakukan terhadap sistem dengan kontroler *PD*. Pengujian dilakukan secara bertahap untuk masing-masing varian. Respon sistem dengan varian gangguan 0,005 dapat dilihat pada Gambar 4.13, sedangkan respon sistem dengan varian gangguan sebesar 0,5 dan 5 dapat dilihat pada Lampiran. Respon sistem menggunakan gangguan menunjukkan bahwa respon masih dapat menuju sinyal referensi yang diberikan. Gambar 4.13 terlihat bahwa gangguan tidak mempengaruhi kemampuan sistem dalam menuju sinyal referensi yang diberikan. Hal tersebut juga terlihat pada Gambar 4.14 yang menunjukkan grafik kesalahan sistem, di mana kesalahan menurun hingga mencapai nol.

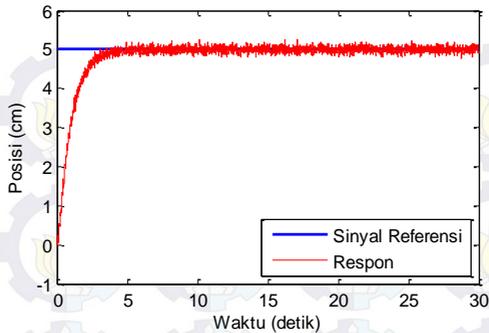


Gambar 4.13 Respon sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005



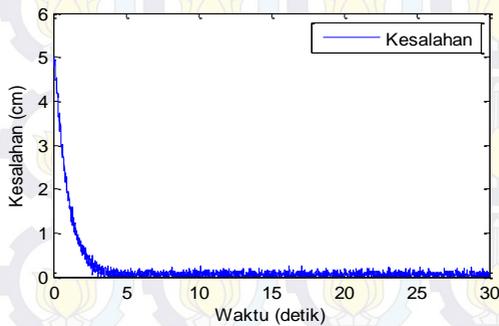
Gambar 4.14 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD*. Respon sistem dengan varian gangguan 0,005 dapat dilihat pada Gambar 4.15, sedangkan respon sistem dengan varian gangguan sebesar 0,5 dan 5 dapat dilihat pada Lampiran. Respon sistem menggunakan gangguan menunjukkan bahwa respon masih dapat menuju sinyal referensi yang diberikan. Pada Gambar 4.15 terlihat bahwa gangguan tidak mempengaruhi kemampuan sistem dalam menuju sinyal referensi yang diberikan, namun terdapat *ripple* pada respon sistem yang diakibatkan oleh pemberian gangguan. Hal tersebut juga terlihat pada Gambar 4.16 yang menunjukkan grafik kesalahan sistem, di mana kesalahan menurun hingga mencapai nol. Besar *ripple* pada respon sistem akan semakin besar sesuai dengan besarnya gangguan yang diberikan. Perbandingan respon sistem dilakukan berdasarkan nilai RMSE-nya. Nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *PD* dengan gangguan sebesar 0,005 adalah 0,9621, nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *PD* dengan gangguan sebesar 0,5 adalah 1,1476, dan nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *PD* dengan gangguan sebesar 5 adalah 2,4216, sedangkan Nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dengan gangguan sebesar 0,005 adalah 0,7657, nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dengan gangguan sebesar 0,5 adalah 1,0330, nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dengan gangguan sebesar 5 adalah 2,3787.



Gambar 4.15 Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005

Perbandingan antara nilai RMSE untuk sistem dengan kontroler *PD* dan sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* menunjukkan bahwa pada sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* nilai RMSE untuk masing-masing varian gangguan lebih kecil apabila dibandingkan dengan sistem dengan kontroler *PD*. Hal tersebut menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan.

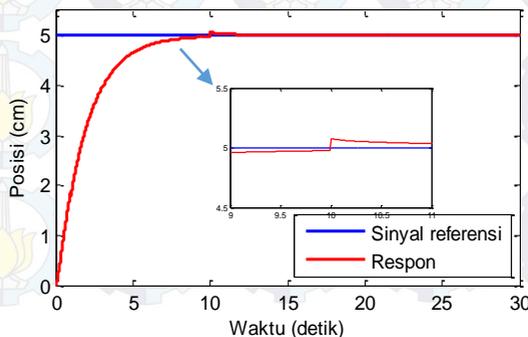


Gambar 4.16 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,005

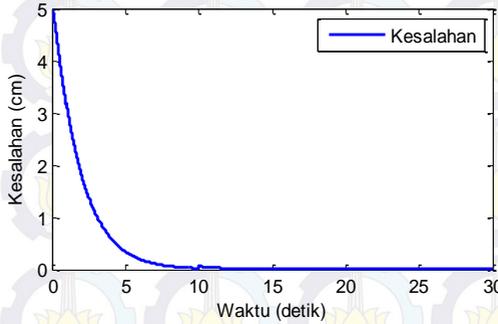
4.4 Pengujian dengan Pemberian Beban

Pengujian dengan pemberian beban bertujuan untuk melihat kemampuan kontroler dalam menghadapi beban yang ada pada mesin CNC. Pada saat melakukan proses pemakanan, mesin CNC memperoleh pembebanan dari benda kerja, besar pembebanan tersebut memiliki nilai yang berbeda-beda yang ditentukan oleh jenis benda kerja ataupun kedalaman pemotongan yang dilakukan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban senilai 0.1, 0.3, dan 0.5 pada selang waktu tertentu. Selang waktu tersebut disesuaikan dengan *rise time* masing-masing sistem. Pengujian dengan memberikan beban yang berbeda-beda bertujuan untuk menggambarkan kondisi mesin CNC saat melakukan proses pemakanan.

Pertamkali dilakukan pengujian terhadap sistem dengan kontroler *PD*. Pengujian ini dilakukan secara bertahap untuk masing-masing beban. Respon sistem untuk beban sebesar 0,1 dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pemberian beban mempengaruhi sistem saat menuju sinyal referensi yang ditentukan. Pada detik pertama, sistem mengalami perlambatan ketika beban pertamakali diberikan. Hal tersebut juga terlihat pada Gambar 4.18 yang menunjukkan kesalahan akan menurun hingga mendekati nol, namun kesalahan akan membesar ketika beban dilepas. Namun, setelah itu, respon kembali menuju sinyal referensi yang diinginkan, sedangkan pengurangan beban, menyebabkan respon meningkat sehingga terjadi *overshoot*. Nilai *overshoot* tersebut masih dapat ditoleransi karena akan segera menurun beberapa saat kemudian. Semakin besar beban yang diberikan, pengaruh terhadap respon sistem juga akan semakin besar.

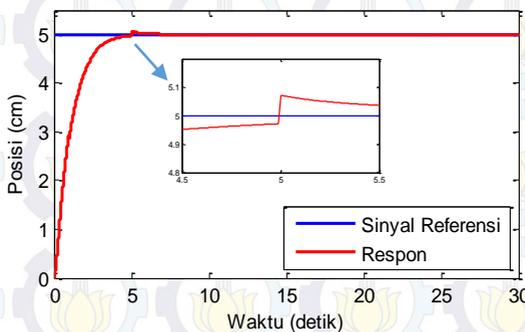


Gambar 4.17 Respon sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,1

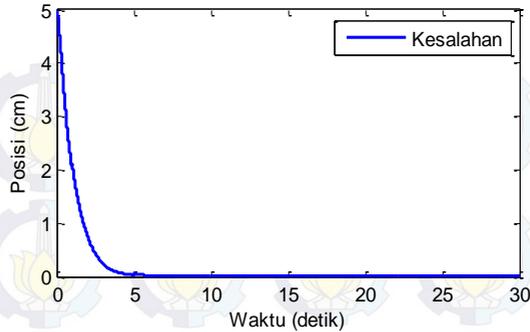


Gambar 4.18 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,1

Pengujian kedua dilakukan terhadap sistem dengan menggunakan kontroler *Fuzzy-PD*. Respon sistem dapat dilihat pada Gambar 4.19, sedangkan grafik kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.20. Pemberian beban mempengaruhi sistem saat menuju sinyal referensi yang ditentukan. Pada detik pertama, sistem mengalami perlambatan ketika beban pertamakali diberikan, sedangkan pengurangan beban menyebabkan respon meningkat sehingga terjadi *overshoot*.



Gambar 4.19 Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,1



Gambar 4.20 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,1

Perbandingan respon sistem dilakukan berdasarkan nilai RMSE-nya. Nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *PD* dengan beban sebesar 0,1 adalah 0,9355, nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *PD* dengan beban sebesar 0,3 adalah 0,9544, dan nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *PD* dengan beban sebesar 0,5 adalah 0,9748, sedangkan Nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dengan beban sebesar 0,1 adalah 0,7583, nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dengan beban sebesar 0,3 adalah 0,7696, nilai RMSE untuk sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* dengan beban sebesar 0,5 adalah 0,7824.

Dengan membandingkan nilai RMSE untuk sistem dengan kontroler *PD* dan sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* dapat dilihat bahwa peningkatan nilai RMSE sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* untuk masing-masing beban lebih kecil apabila dibandingkan dengan sistem dengan kontroler *PD*. Hal tersebut menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki kemampuan lebih baik untuk beradaptasi dengan nilai beban yang berubah-ubah. Hal ini disebabkan karena pada kontroler *Fuzzy-PD* terdapat mekanisme adaptasi terhadap perubahan kesalahan yang terjadi, ketika beban diberikan atau dilepas, kontroler *Fuzzy* akan menyesuaikan parameter K_p dan K_d sehingga kontroler *PD* dapat mengatur *plant* dengan lebih efektif.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Sistem dengan kontroler *Fuzzy-PD* mampu mencapai posisi yang diinginkan pada waktu 3,59 detik, hal ini lebih baik daripada kontroler *PD*.

Hasil simulasi dengan gangguan menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan dengan nilai RMSE sebesar 0,7657.

Hasil simulasi dengan beban menunjukkan bahwa kontroler *Fuzzy-PD* memiliki ketahanan yang baik terhadap beban dengan nilai RMSE meningkat 0,69% dari nilai RMSE tanpa beban, hal ini lebih kecil daripada sistem dengan kontroler *PD* yang peningkatan nilai RMSE-nya sebesar 0,95%.

Penentuan aturan dasar kontroler *Fuzzy* sangat berpengaruh terhadap respon dari sistem. Pemilihan aturan dasar yang baik akan meningkatkan performansi sistem, sedangkan pemilihan aturan dasar yang salah dapat mengurangi performansi dari sistem bahkan dapat membuat sistem tidak stabil.

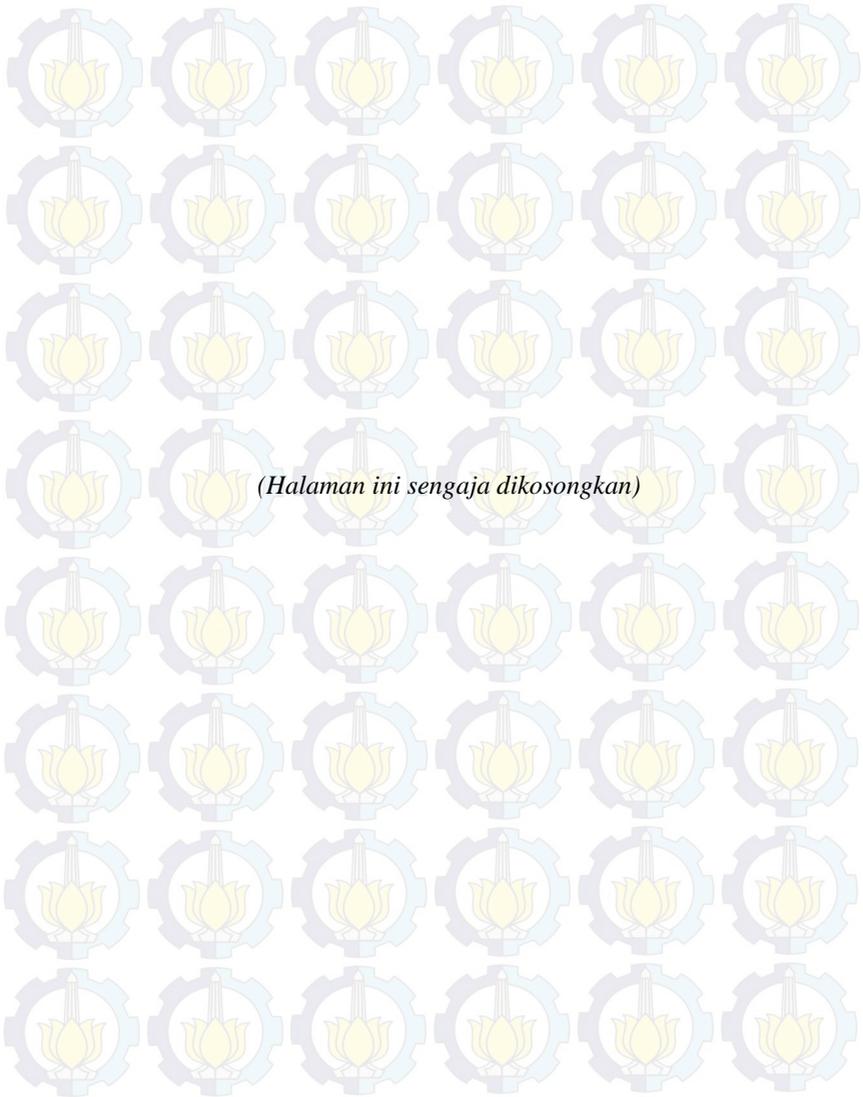
5.2 Saran

Kontroler *Fuzzy-PD* terbukti mampu mengatur posisi mata pahat mesin CNC dengan baik. Namun, dalam proses pembuatan *contour*, kontroler ini masih belum bisa menghasilkan *contour* yang baik. Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan kontroler *Cross Couple* untuk memperoleh hasil pembentukan *Contour* yang lebih baik.



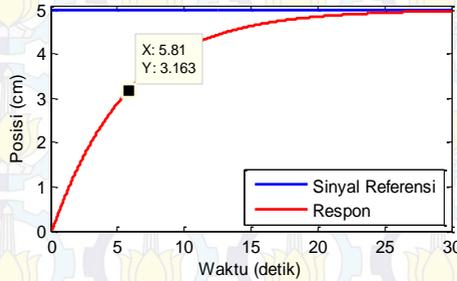
Daftar Pustaka

- [1] Guoyong Zhao, Yugang Zhao, Lili Zhang, and Amei Dong, *Research on Nonlinear PID Position Controller of CNC System*, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 2446-2450, 2007
- [2] Xiaodiao, Huang and Liting Shi, *Simulation on a Fuzzy-PID Position Kontroler of the CNC Servo System*, Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2006
- [3] Madan Gopal, *Models of Industrial Control Devices and Systems*, volume 14 Lecture of Control Engineering, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Delhi
- [4] Roger Jang, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1997
- [5] Kevin M. Passino, *Fuzzy Control*, Addison Wesley Longman, Inc, California, 1998
- [6] Jun Yan, *Using Fuzzy Logic*, Prentice Hall International, Cambridge, 1994
- [7] Zoran Vukic and Ognjen Kuljaca, *Lectures on PID Controllers*, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, 2002
- [8] Robert Grover Brown and Patrick Y.C.Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied kalman Filtering*, John Wiley & Sons, Inc, Canada, 1992
- [9] M. Vijayakarthick and P.K. Bhaba, *Position Tracking Performance Of Ac Servomotor Based*, Ijrras 10(1),pp. 119-128, 2012

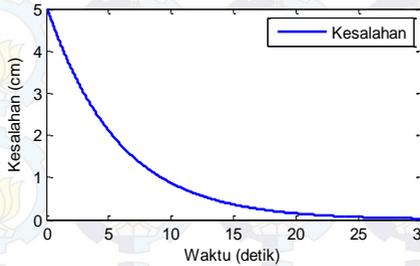


Lampiran

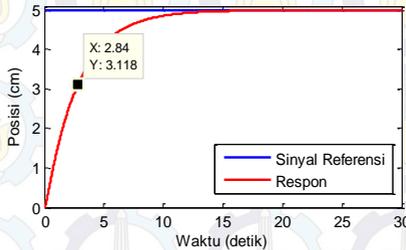
A. Hasil Simulasi Pengujian untuk mencapai sinyal Referensi



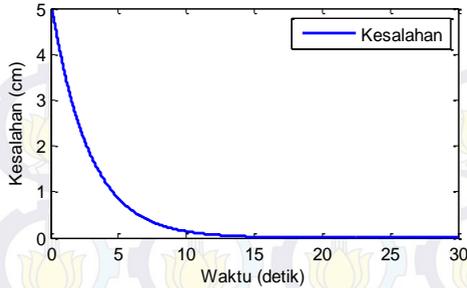
Gambar A1 Posisi motor AC servo menggunakan Kontroler *PD* dengan $K_p = 10$ dan $K_d = 55.526$



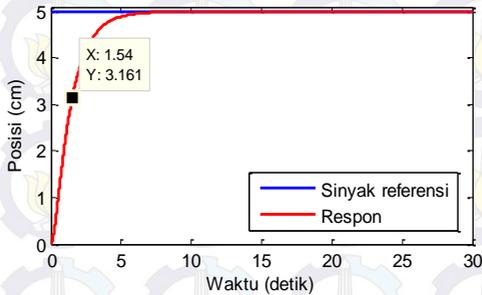
Gambar A2 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* dengan $K_p = 10$ dan $K_d = 55.526$



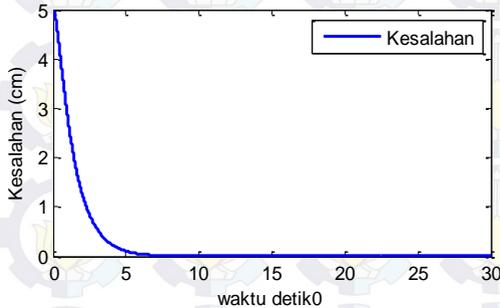
Gambar A3 Posisi motor AC servo menggunakan Kontroler *PD* dengan $K_p = 20$ dan $K_d = 55.526$



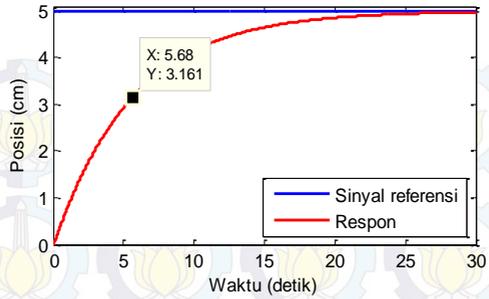
Gambar A4 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* dengan $K_p = 20$ dan $K_d = 55.526$



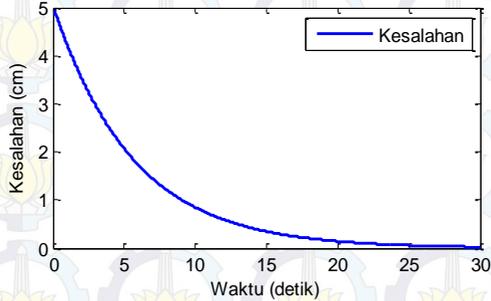
Gambar A5 Posisi motor AC servo menggunakan Kontroler *PD* dengan $K_p = 20$ dan $K_d = 27.763$



Gambar A6 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* dengan $K_p = 20$ dan $K_d = 27.763$



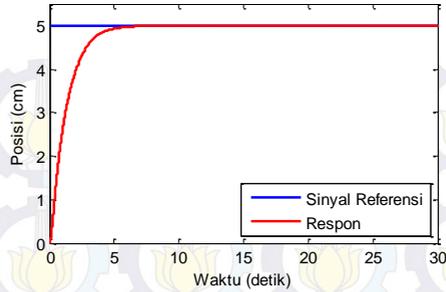
Gambar A7 Posisi motor AC servo menggunakan Kontroler *PD* dengan $K_p = 20$ dan $K_d = 111.052$



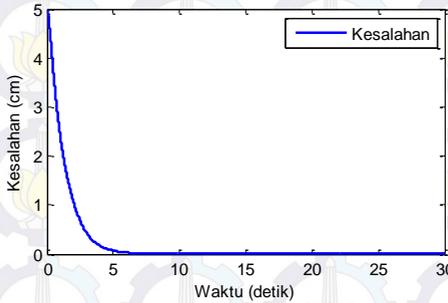
Gambar A8 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* dengan $K_p = 20$ dan $K_d = 111.052$

Tabel A1 Aturan dasar kontroler *Fuzzy 2*

Kp dan Kd		error				
		NB	NS	Z	PS	PB
delta error	N	NB,NB	NS,NS	Z,Z	PS,PS	PB,PB
	Z	NS,PS	NS,PS	Z,Z	PS,NS	PS,NS
	P	NS,PB	NS,PS	Z,Z	PS,NS	PS,NB



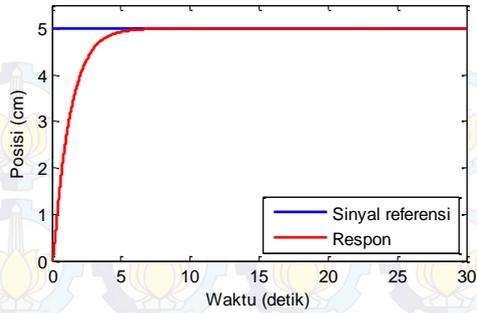
Gambar A9 Respon sistem untuk aturan dasar 1



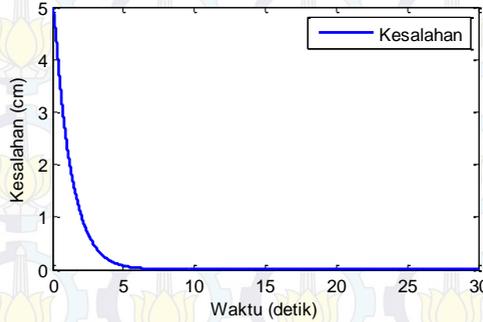
Gambar A10 Grafik kesalahan sistem untuk aturan dasar 1

Tabel A2 Aturan dasar kontroler *Fuzzy 2*

FusiPD2		error				
		NB	NS	Z	PS	PB
delta error	N	NB,NB	NS,NS	NS,Z	PS,PS	PB,PB
	Z	NS,PS	NS,PS	Z,Z	PS,NS	PB,NB
	P	NB,PB	NS,PS	PS,Z	PS,NS	PB,NB



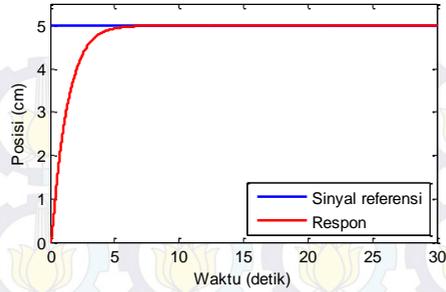
Gambar A11 Respon sistem untuk aturan dasar 2



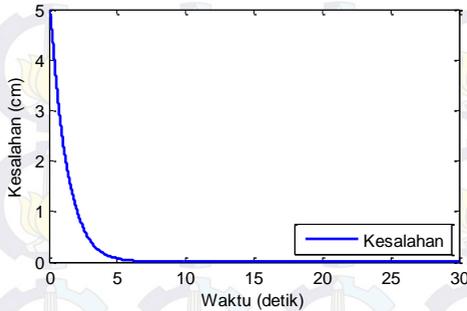
Gambar A12 Grafik kesalahan sistem untuk aturan dasar 2

Tabel A 3 Aturan dasar kontroler *Fuzzy 4*

Kp dan Kd		kesalahan				
		NB	NS	Z	PS	PB
Perubahan kesalahan	N	NB,NB	NS,NS	PS,Z	PS,PS	PB,PB
	Z	NS,PS	NS,PS	Z,Z	PS,5NS	PB,NB
	P	NB,PB	NS,PS	NS,Z	PS,NS	PB,NB



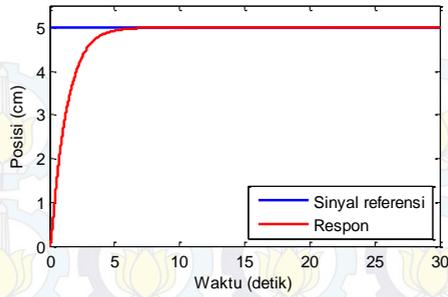
Gambar A13 Respon sistem untuk aturan dasar 4



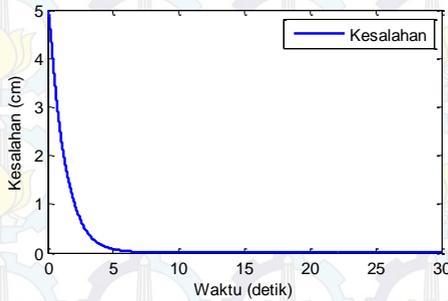
Gambar A14 Grafik kesalahan sistem untuk aturan dasar 4

Tabel A4 Aturan dasar kontroler *Fuzzy 5*

FusiPD5	error					
	NB	NS	Z	PS	PB	
delta error	N	NB,NB	NS,NS	PS,Z	PS,PS	PB,PB
	Z	NS,PS	NS,PS	Z,PS	PS,NS	PS,NB
	P	NB,PB	NS,PS	NS,Z	PS,NS	PB,NB

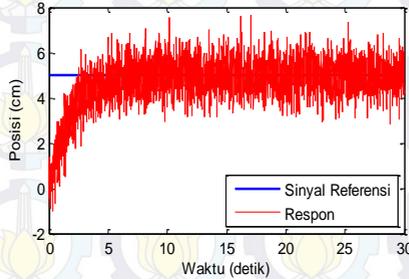


Gambar A15 Respon sistem untuk aturan dasar 5

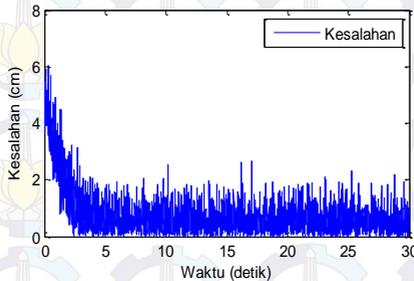


Gambar A16 Grafik kesalahan sistem untuk aturan dasar 5

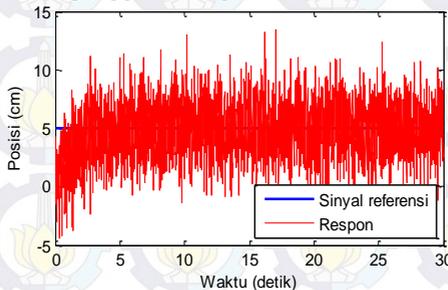
B. Hasil Simulasi Pengujian dengan Pemberian Gangguan



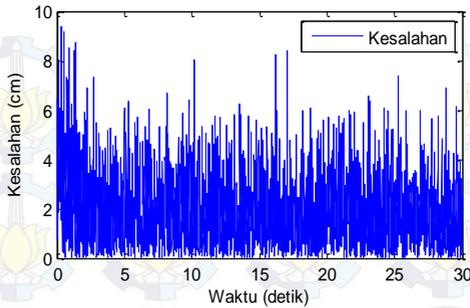
Gambar B 1 Respon sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,5



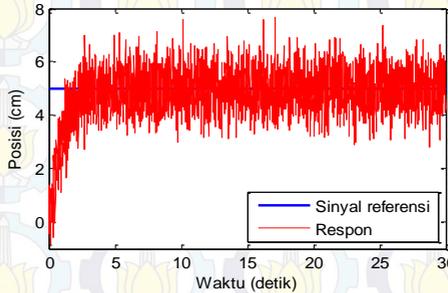
Gambar B2 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,5



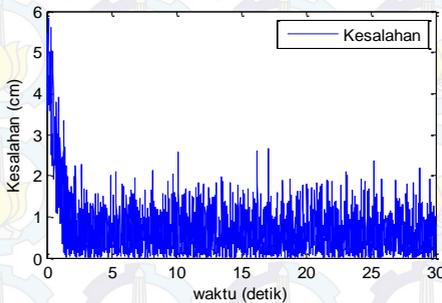
Gambar B3 Respon sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 5



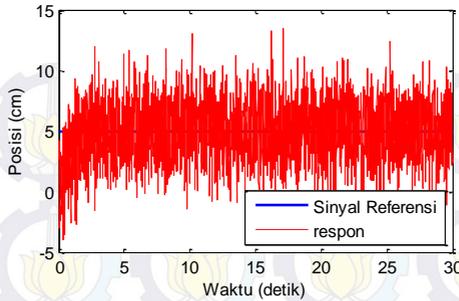
Gambar B4 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 5



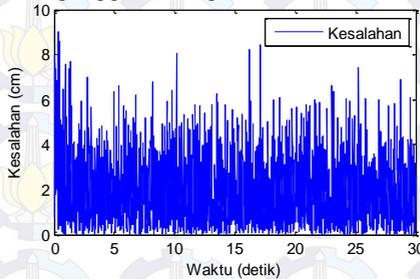
Gambar B5 Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,5



Gambar B6 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 0,5

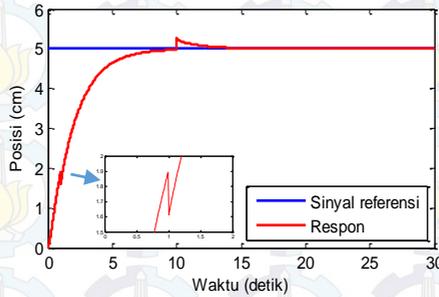


Gambar B7 Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 5

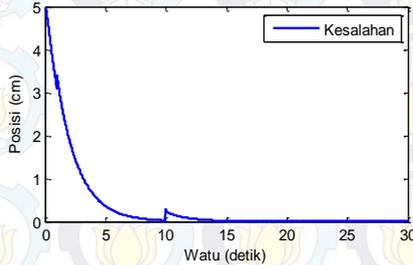


Gambar B8 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap pemberian gangguan dengan rata-rata nol dan varian 5

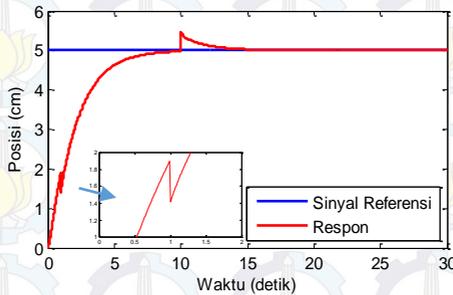
C. Hasil Simulasi Pengujian dengan Pemberian Beban



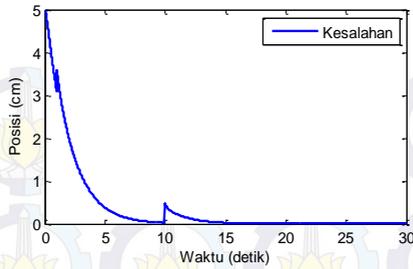
Gambar C1 Respon sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,3



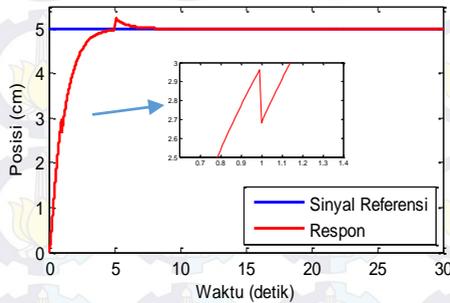
Gambar C2 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,3



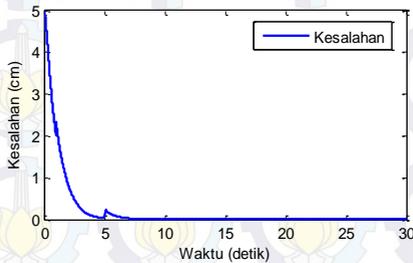
Gambar C3 Respon sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,5



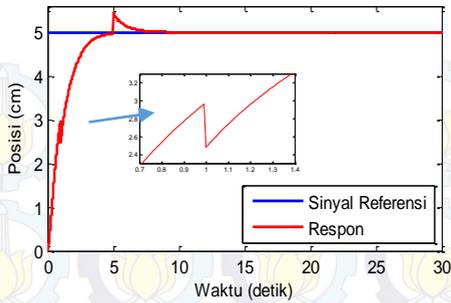
Gambar C4 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,5



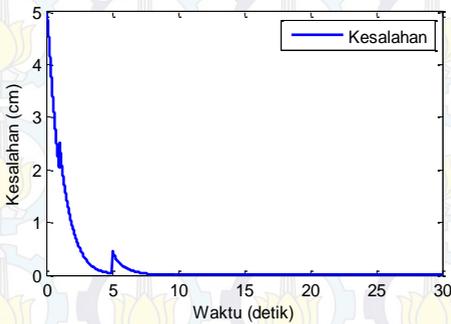
Gambar C5 Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,3



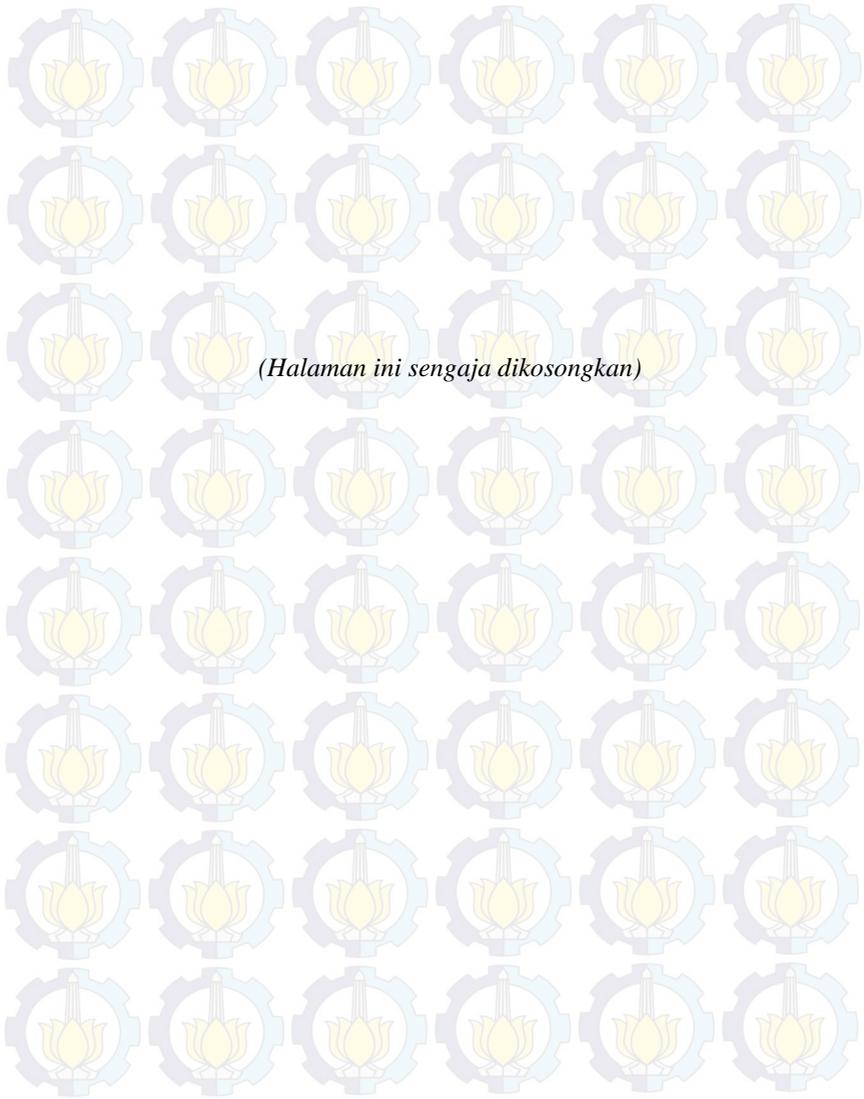
Gambar C6 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,3



Gambar C7 Respon sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,5



Gambar C8 Grafik kesalahan sistem menggunakan kontroler *Fuzzy-PD* terhadap penambahan beban sebesar 0,5



RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap Ahdijat Darda'. Penulis dilahirkan di kota Malang, pada 23 Februari 1992. Sebagai anak kedua dari pasangan Mardianto dan Dyah renowati. Penulis memiliki seorang kakak bernama Dyanita Hardaningtyas yang merupakan mahasiswi Kedokteran Gigi di Universitas Brawijaya, sedangkan ayahnya berprofesi sebagai dosen di Universitas Negeri Malang.

Penulis menjalani pendidikan kota kelahirannya, yaitu Kota Malang. Pendidikan dasar penulis ditempuh di SD Negeri Sawojajar 1 Malang, kemudian dilanjutkan di SMP Negeri 3 Malang, dan bersekolah SMA di SMA Negeri 3 Malang. Hingga pada saat kuliah penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang ada di Kota Surabaya

Penulis adalah orang yang memiliki kegemaran membaca dan berolahraga, terutama olahraga voli. Ketika SMA penulis bergabung dengan tim voli di sekolahnya. Hingga masa kuliah, penulis selalu menyempatkan waktu untuk berolahraga. Selain gemar berolahraga, ia juga aktif dalam organisasi di sekolah, saat duduk di bangku SMP dan SMA, penulis mengikuti organisasi perwakilan kelas di sekolahnya, bahkan ketika SMA ia sempat mendapat amanah untuk menjadi ketua dari organisasi tersebut. Ketika kuliah penulis bergabung dengan beberapa organisasi yaitu BEM ITS, Himatekro, sampai unit kegiatan mahasiswa Robotika ITS. Hal ini dilakukannya karena kegemarannya dalam berorganisasi dan menjalin hubungan dengan sekitar. Selain itu, untuk menunjang kemampuan akademis, penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Pengaturan Teknik Elektro ITS.