



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR -TE 141599

***MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL* UNTUK
MENINGKATKAN AKURASI GERAKAN BENDA KERJA
PADA CNC *MILLING***

Muhammad Yanwar Rifki
NRP 2213 105 028

Dosen Pembimbing
Ir. Joko Susila, M.T.
Ir. Rusdhianto Effendie A.K, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT -TE 141599

**MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL TO IMPROVING
ACCURACY OF WORKPIECE MOVEMENT ON CNC
MILLING MACHINE**

Muhammad Yanwar Rifki
NRP 2213 105 028

Advisor
Ir. Joko Susila, M.T.
Ir. Rusdhianto Effendie A.K, M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL UNTUK
MENINGKATKAN AKURASI GERAKAN BENDA KERJA PADA
CNC MILLING**

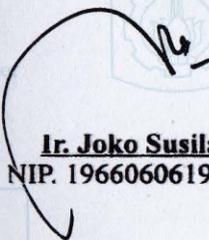
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna 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

Dosen Pembimbing II


Ir. Joko Susila, M.T.
NIP. 196606061991021001


Ir. Rusdhianto Effendie A.K. M.T.
NIP. 195704241985021001



MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GERAKAN BENDA KERJA PADA CNC MILLING

Nama : Muhammad Yanwar Rifki
Pembimbing I : Ir. Joko Susila, M.T.
Pembimbing II : Ir. Rusdhianto Effendie A.K, MT.

ABSTRAK

Akurasi gerakan benda kerja saat proses pembentukan kontur pada mesin CNC *Milling* sangat dipengaruhi oleh pergerakan dari setiap aksis. Kesalahan kontur yang mungkin terjadi diakibatkan oleh ketidakakuratan pergerakan masing-masing aksis saat melakukan *tracking* kontur dan juga gangguan akibat pembebanan saat proses *feeding*. Salah satu cara untuk mengurangi kesalahan kontur adalah dengan melakukan sinkronisasi pengaturan antar aksis. Pada Tugas Akhir ini diajukan metode *Modified Cross-Coupled Control* (MCCC) dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Gain*. Metode ini merupakan hasil modifikasi dari metode *Cross-Coupled Control* konvensional. Struktur MCCC berfungsi untuk melakukan sinkronisasi antar aksis. Metode MCCC terdiri dari sistem pengaturan loop tertutup setiap aksis dan *Cross-Couple Gain* yang berfungsi untuk mereduksi kesalahan yang dihasilkan oleh setiap aksis. Untuk mereduksi kesalahan kontur, digunakanlah kontroler PD sebagai kontroler setiap aksis dan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller*. Pengujian pada Tugas Akhir ini adalah simulasi pembentukan kontur linier dan lingkaran. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang diperoleh pada pembentukan kontur linier dan lingkaran adalah minimal 0.0009 dan 0.0028 dan maksimal 0.00036 dan 0.0011. Hasil dari pengujian Tugas Akhir ini menunjukkan bahwa dengan metode MCCC dengan kontroler PI, mesin CNC dapat mereduksi kesalahan kontur yang terjadi dan meningkatkan akurasi pembentukan kontur.

Kata Kunci : Mesin CNC Milling, *Modified Cross-Coupled Control*, Kontroler PD, Kontroler PI.

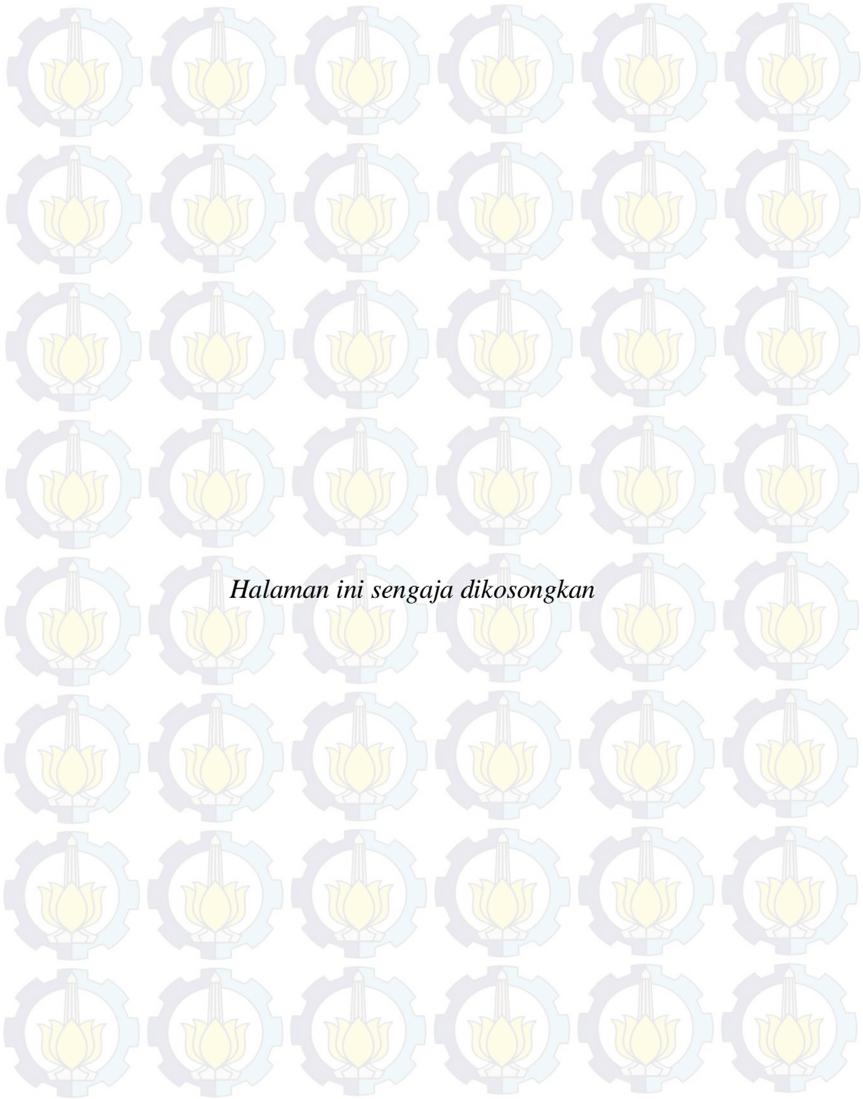
***MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL* UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GERAKAN BENDA KERJA PADA CNC MILLING**

Nama : Muhammad Yanwar Rifki
Pembimbing I : Ir. Joko Susila, M.T.
Pembimbing II : Ir. Rusdhianto Effendie A.K, MT.

ABSTRAK

Akurasi gerakan benda kerja saat proses pembentukan kontur pada mesin CNC *Milling* sangat dipengaruhi oleh pergerakan dari setiap aksis. Kesalahan kontur yang mungkin terjadi diakibatkan oleh ketidakakuratan pergerakan masing-masing aksis saat melakukan *tracking* kontur dan juga gangguan akibat pembebanan saat proses *feeding*. Salah satu cara untuk mengurangi kesalahan kontur adalah dengan melakukan sinkronisasi pengaturan antar aksis. Pada Tugas Akhir ini diajukan metode *Modified Cross-Coupled Control* (MCCC) dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Gain*. Metode ini merupakan hasil modifikasi dari metode *Cross-Coupled Control* konvensional. Struktur MCCC berfungsi untuk melakukan sinkronisasi antar aksis. Metode MCCC terdiri dari sistem pengaturan loop tertutup setiap aksis dan *Cross-Couple Gain* yang berfungsi untuk mereduksi kesalahan yang dihasilkan oleh setiap aksis. Untuk mereduksi kesalahan kontur, digunakanlah kontroler PD sebagai kontroler setiap aksis dan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller*. Pengujian pada Tugas Akhir ini adalah simulasi pembentukan kontur linier dan lingkaran. Nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang diperoleh pada pembentukan kontur linier dan lingkaran adalah minimal 0.0009 dan 0.0028 dan maksimal 0.00036 dan 0.0011. Hasil dari pengujian Tugas Akhir ini menunjukkan bahwa dengan metode MCCC dengan kontroler PI, mesin CNC dapat mereduksi kesalahan kontur yang terjadi dan meningkatkan akurasi pembentukan kontur.

Kata Kunci : Mesin CNC Milling, *Modified Cross-Coupled Control*, Kontroler PD, Kontroler PI.



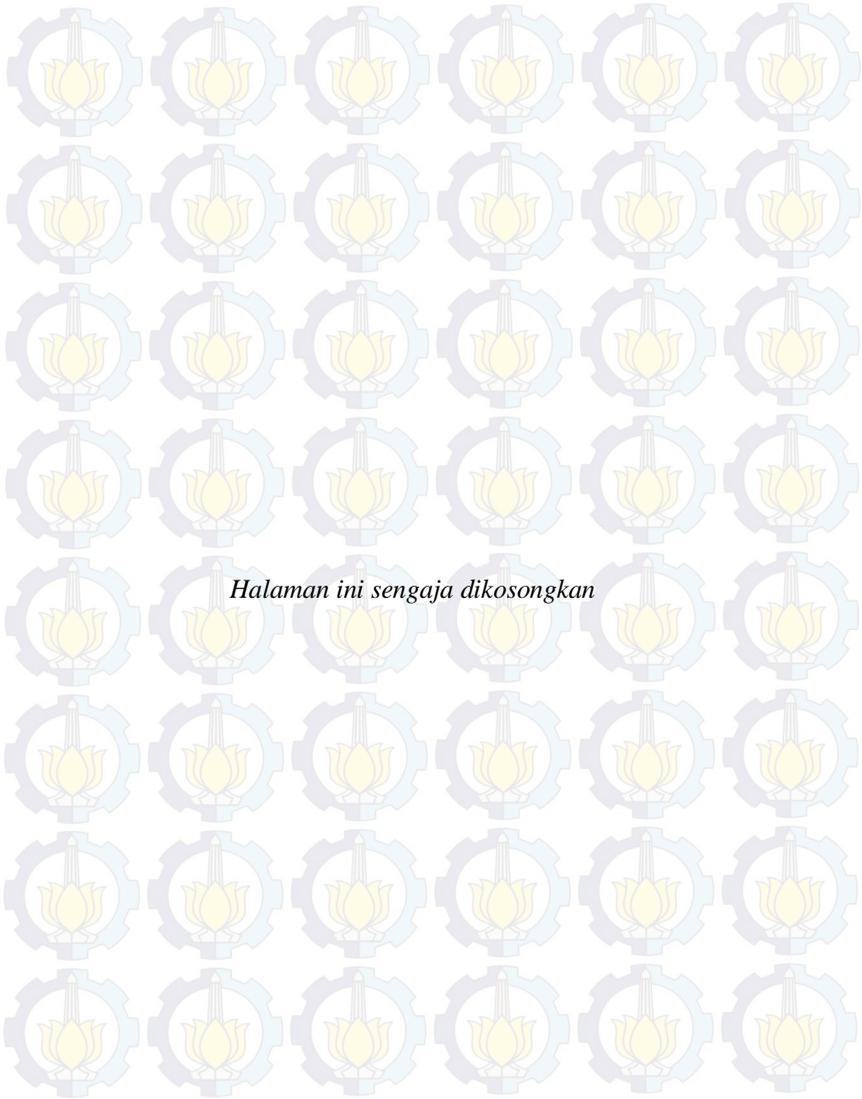
MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL TO IMPROVING ACCURACY OF WORKPIECE MOVEMENT ON CNC MILLING MACHINE

Nama : Muhammad Yanwar Rifki
Advisor I : Ir. Joko Susila, M.T.
Advisor II : Ir. Rusdhianto Effendie A.K, MT.

ABSTRACT

Accuracy of the workpiece movement during the process of contour forming on CNC Milling machines is affected by the movement of each axis. Contour error that may occur due to the inaccuracy of each axis movement when perform contour tracking and also disturbance during the feeding process. One of the ways to reduce contour errors is to synchronize between control system of each axis. Modified Cross-Coupled Control (MCCC) with PI controller as Cross-Couple Controller is proposed in this final project. This method is a modified version of the conventional Cross-Coupled Control. MCCC structure serves to synchronize between each axis. MCCC method consists of a closed loop control system of each axis and Cross-Couple Gain which serves to reduce contour errors by each axis. To reduce the contour error, PD controller is used as the controller of each axis and PI controller as Cross-Couple Gain. Testing in this final project is the simulation of linear and circular contour forming. Root Mean Square Error (RMSE) value obtained in the linear and circular contour forming are minimal 0.0009 and 0.0028 and maximal 0.00036 and 0.0011. The result of testing in this final project shows that the MCCC method with PI controllers, CNC machines can reduce contour errors occur and improve the accuracy of the contour forming.

Keyword : CNC Milling machine, Modified Cross-Coupled Control, PD controller, PI controller.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, karunia, petunjuk, serta kekuatan yang berlimpah tak terhingga yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GERAKAN BENDA KERJA PADA CNC MILLING

Tugas Akhir ini ditujukan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi strata-1 di Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya. Segenap terima kasih penulis ucapkan kepada ibu dan ayah tercinta atas segala dukungan moral, materi, semangat, dan doanya yang tak pernah putus untukku. Kepada Bapak Joko Susila dan Bapak Rusdhianto Effendie, selaku dosen pembimbing, yang secara cermat telah membimbing penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Terima kasih luar biasa penulis haturkan kepada kang Asep, Dimas Bambang S., kang Suwondo, Fadli Wardana, Farida Gamar, Marika Ayu P.R., Aditya Rahmat A., bang Setio Bimantoro, Adin Teguh P., mas Kurniawan K., Mentari Madi P., saudara-saudara seperjuangan yang tidak lelah memberikan dukungan yang luar biasa dan pengalaman kejuangan yang tak terlupakan. Sungguh berharga dan luar biasa kehadiran kalian di momen pengerjaan Tugas Akhir ini. Semoga rahmat dan lindungan Allah selalu mengiringi jalan kalian. Terima kasih kepada keluarga besar Laboratorium Teknik Pengaturan B105 yang telah memberikan cerita indah dan pengalaman luar biasa. Terima kasih pada Mentari Madi Pertiwi selaku teman seperjuangan tugas akhir mesin CNC yang telah memberikan dukungan teknis pengerjaan Tugas Akhir. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2015

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN

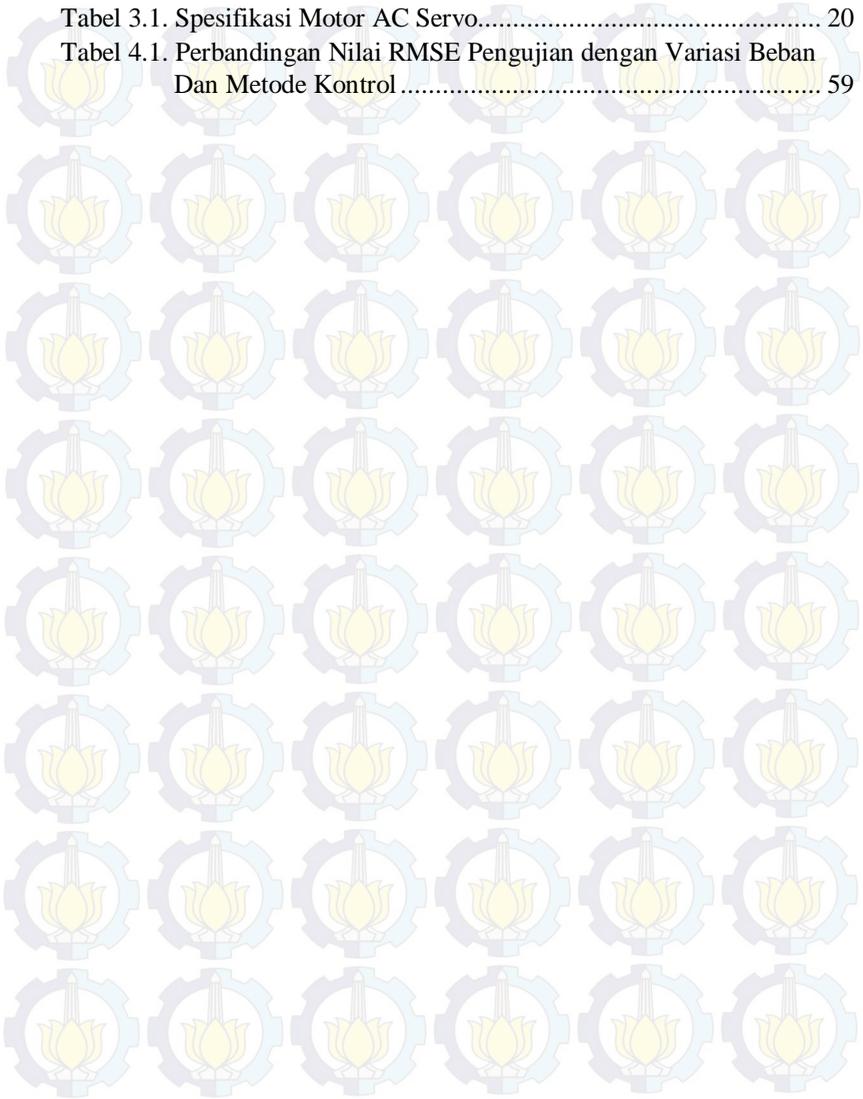
HALAMAN JUDUL	
TUGAS AKHIR - TE 141599	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
Daftar Isi.....	xv
Daftar Gambar.....	xvii
Daftar Tabel.....	xvxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Metodologi.....	3
1.5. Relevansi.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Mesin CNC.....	7
2.2. Motor <i>Servo AC</i>	9
2.3. Kontur.....	12
2.3.1. Kontur Linier.....	12
2.3.2. Kontur Lingkaran.....	13
2.4. Kontroler PID.....	15
2.5. Modified Cross Coupled Control.....	16
BAB III PERANCANGAN METODE <i>MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL</i>	19
3.1. Perancangan Sistem Motor <i>Servo AC</i>	19
3.2. Perancangan <i>Modified Cross Coupled Control</i>	20
3.2.1. Penentuan CETF.....	21
3.2.2. Sistem Tanpa Kopel.....	22
3.2.3. Sistem Dengan Kopel.....	23

3.3. Perancangan Kontroler PD Pada Loop Penggerak Aksis.....	24
3.4. Perancangan Kontroler PI Sebagai <i>Cross-Coupled Gain</i>	26
BAB IV PENGUJIAN METODE MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL	31
4.1. Gambaran Umum Pengujian Sistem.....	31
4.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC.....	32
4.2.1. Karakteristik Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC.....	32
4.2.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD.....	36
4.3. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis Menggunakan Kontroler PD.....	40
4.4. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis dengan PI <i>Modified Cross-Coupled Control</i>	51
BAB V PENUTUP	61
5.1. Kesimpulan.....	61
5.2. Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	65

Daftar Tabel

Tabel 3.1. Spesifikasi Motor AC Servo..... 20

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai RMSE Pengujian dengan Variasi Beban
Dan Metode Kontrol 59





Halaman ini sengaja dikosongkan

Daftar Gambar

Gambar 2.1.	Mesin CNC <i>Milling</i> 3 Aksis.....	8
Gambar 2.2.	Struktur Motor Servo AC.....	10
Gambar 2.3.	Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC.....	11
Gambar 2.4.	Model Kesalahan Kontur pada Kontur Linier.....	12
Gambar 2.5.	Model Kesalahan Kontur pada Kontur Lingkaran.....	13
Gambar 2.6.	Diagram Blok Kontroler PID.....	15
Gambar 2.7.	Diagram Blok <i>Cross-Coupled Control</i> Konvensional.....	17
Gambar 2.8.	Diagram Blok <i>Modified Cross-Coupled Control</i> ..	17
Gambar 3.1.	Sistem CNC dengan Metode M-CCC.....	21
Gambar 3.2.	Diagram Blok Pengaturan CNC dengan Sistem Tanpa Kopel.....	22
Gambar 3.3.	Diagram Blok Pengaturan Sistem dengan Kontroler PD.....	24
Gambar 3.4.	Diagram Blok Pengaturan Aksis dengan Kontroler PD.....	25
Gambar 3.5.	Respon Output Yang Diinginkan.....	27
Gambar 3.6.	Diagram Blok Kontroler PI Sebagai <i>Cross- Couple Gain</i>	29
Gambar 3.7.	Diagram Blok <i>Modified Cross-Coupled Control</i> dengan Kontroler PI Sebagai <i>Cross-Couple Gain</i>	30
Gambar 4.1.	Diagram Blok Sistem Kontrol Loop Tertutup Motor Servo AC.....	32
Gambar 4.2.	Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Step.....	33
Gambar 4.3.	Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Step.....	33
Gambar 4.4.	Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Ramp.....	34
Gambar 4.5.	Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Ramp.....	35
Gambar 4.6.	Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Sinus.....	35
Gambar 4.7.	Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Sinus.....	36

Gambar 4.8.	Diagram Blok Pengaturan Motor Servo AC dengan Kontroler PD.....	36
Gambar 4.9.	Respon Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Step.....	37
Gambar 4.10.	Respon Kesalahan Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal Step.....	37
Gambar 4.11.	Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Ramp.....	38
Gambar 4.12.	Respon Kesalahan Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Ramp.....	39
Gambar 4.13.	Respon Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Sinus.....	39
Gambar 4.14.	Respon Kesalahan Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Sinus.....	40
Gambar 4.15.	Diagram Blok Sistem Untuk Aksis-X dan Aksis-Y menggunakan Kontroler PD.....	41
Gambar 4.16.	Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD....	41
Gambar 4.17.	Kurva Kontur Linier yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i>	42
Gambar 4.18.	Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD Ditambah Pembebanan.....	43
Gambar 4.19.	Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Ditambah Pembebanan...	44
Gambar 4.20.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Ditambah Pembebanan..	44
Gambar 4.21.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i>	45
Gambar 4.22.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i>	46
Gambar 4.23.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Ditambah Pembebanan...	46
Gambar 4.24.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Dengan Beban...	47
Gambar 4.25.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Dengan Variasi Beban...	48
Gambar 4.26.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Ditambah Beban.....	48
Gambar 4.27.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Beban Dilepaskan.....	49

Gambar 4.28.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Dengan Variasi Beban.....	49
Gambar 4.29.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Ditambah Beban.....	50
Gambar 4.30.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Beban Dilepaskan.....	50
Gambar 4.31.	Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PI-MCCC.....	51
Gambar 4.32.	Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk Dengan Kontroler PI-MCCC.....	52
Gambar 4.33.	Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	53
Gambar 4.34.	Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	53
Gambar 4.35.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC.....	54
Gambar 4.36.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	54
Gambar 4.37.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	55
Gambar 4.38.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban.....	56
Gambar 4.39.	Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban.....	56
Gambar 4.40.	Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan.....	57
Gambar 4.41.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban.....	57
Gambar 4.42.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban.....	58
Gambar 4.43.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan.....	58



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Muhammad Yanwar Rifki dan biasa dipanggil Yanwar. Penulis adalah seorang mahasiswa yang berasal dari kota Mojokerto dan terlahir pada tanggal 12 Januari 1993. Penulis telah menempuh pendidikan di TK Roudlotul Atfal Trawas, SDN Ketapanrame 1 Trawas, SMPN 1 Trawas, SMKN 1 Singosari Malang, dan Diploma-3 di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya Jurusan Teknik Elektronika. Saat ini penulis menempuh pendidikan lintas jalur Strata-1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. Selama masa perkuliahan di PENS, penulis aktif di organisasi himpunan mahasiswa Teknik Elektronika, aktif juga di UKM Robotika PENS sebagai pengurus selama 2 tahun, dan selain itu juga aktif di organisasi olah raga futsal jurusan Teknik Elektronika sebagai penanggungjawab latihan. Selama di kampus Teknik Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Pengaturan juga aktif sebagai asisten Laboratorium Teknik Pengaturan selama 2 periode kepengurusan sebagai asisten laboratorium.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada saat ini Mesin CNC (*Computerized Numerical Controller*) merupakan salah satu teknologi yang banyak dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan akan hasil produksi yang presisi. Mesin CNC adalah mesin perkakas yang otomatis beroperasi sesuai dengan perintah-perintah yang terprogram dan tersimpan. Salah satu kendala operasi mesin CNC adalah ketidakakuratan dalam melakukan pembentukan kontur objek yang akan diproduksi. Faktor penyebab ketidakakuratan mesin CNC dalam melakukan pembentukan kontur salah satunya dipengaruhi oleh mekanisme kontrol antar aksis yang tidak sinkron satu sama lain.

Pada umumnya kontrol yang digunakan pada mesin CNC adalah kontrol untuk setiap aksis yang bekerja secara terpisah. Sistem kontrol setiap aksis sangat berpengaruh pada saat proses pembentukan kontur. Untuk mengatasi permasalahan pembentukan kontur, telah banyak dilakukan penelitian untuk mencari metode terbaik dalam pengaturan mesin CNC. Untuk mereduksi kesalahan kontur dapat dilakukan dengan cara selain cara konvensional yaitu dengan meningkatkan respon dinamik dari setiap aksis yang bekerja dan menggunakan metode *Cross-Coupled Control*. Konsep pengaturan CNC yang saat ini populer digunakan adalah *Cross-Coupled Control* (CCC) yang ditemukan oleh Yoram Koren [1]. Metode ini bertujuan untuk melakukan sinkronisasi pengaturan antar aksis. Sinkronisasi pengaturan dilakukan dengan cara meminimalkan kesalahan kontur dengan menerapkan metode kontrol yang tepat untuk meminimalkan nilai fungsi alih kesalahan kontur sistem CNC.

Dengan menggunakan metode *Cross-Coupled Control* diperoleh hasil pembentukan kontur yang lebih baik, namun masih terdapat kelemahan pada akurasi pembentukan kontur dikarenakan adanya dinamisasi sistem yang berasal dari pembebanan saat proses pembentukan kontur dan gaya gesek pada aksis. Oleh karena itu, selain digunakan metode *Cross-Coupled Control*, pada Tugas Akhir ini digunakan kontroler PD pada setiap penggerak aksis dan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* untuk mereduksi nilai kesalahan kontur yang terjadi saat proses pembentukan kontur. Struktur metode *Cross-Coupled*

Control yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah struktur baru yang merupakan modifikasi dari struktur *Cross-Coupled Control* konvensional yang bisa disebut *Modified Cross-Coupled Control*. Metode ini mengacu pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Y.T.Shih [3]. Diharapkan metode ini dapat melakukan sinkronisasi kontrol posisi antara aksis-X dan aksis-Y mesin CNC sehingga dapat diperoleh hasil pembentukan kontur yang lebih baik dan mengurangi nilai kesalahan kontur yang terjadi.

1.2. Perumusan Masalah

Mesin CNC yang akan digunakan pada penelitian ini merupakan jenis mesin CNC *milling*. Pada mesin CNC *milling*, terdapat sebuah motor penggerak mata pahat yang disebut *spindle* dan dua motor penggerak aksis. Konsentrasi pengerjaan Tugas Akhir ini adalah pada pengaturan posisi aksis yang digerakkan oleh motor *servo* AC pada aksis-X dan aksis-Y untuk melakukan *tracking* kontur secara akurat.

Kesalahan kontur yang terjadi disebabkan oleh pengaturan posisi antar aksis yang tidak sinkron dan adanya kesalahan *tracking* kontur pada tiap aksis. Sinkronisasi kontrol berperan penting ketika terjadi kesalahan *tracking* pada salah satu aksis. Ketika terjadi kesalahan pada *tracking* kontur, maka akan dilakukan suatu metode kontrol tertentu untuk meminimalkan kesalahan pembentukan kontur yang terjadi.

Kesalahan *tracking* kontur pada masing-masing aksis disebabkan parameter *plant* yang berubah dikarenakan adanya dinamisasi dari sistem yang salah satunya disebabkan oleh perubahan posisi saat mata pahat menyentuh benda kerja hingga lepas dari benda kerja pada proses pembentukan kontur. Kesalahan pada masing-masing aksis tersebut yang mengakibatkan kesalahan pada kontur yang dibentuk. Disinilah kelemahan dari kontrol individu tiap aksis pada mesin CNC.

1.3. Tujuan

Meninjau permasalahan yang terjadi pada mesin CNC, dirancanglah metode kontrol yang mampu melakukan sinkronisasi kontrol aksis dan mampu mengurangi kesalahan kontur yang diakibatkan oleh kesalahan pada tiap aksis. Hasil perancangan ini berupa simulasi sistem kontrol CNC dengan metode *Modified Cross-Coupled Control* yang merupakan modifikasi dari metode CCC konvensional. Diharapkan dengan Tugas Akhir ini, performa pembentukan kontur pada mesin CNC mampu memiliki hasil pembentukan kontur yang lebih baik,

akurasi saat proses pembentukan kontur menjadi meningkat dan nilai kesalahan kontur yang terjadi dapat direduksi dengan cepat.

1.4. Metodologi

Pada Tugas Akhir ini dilakukan beberapa proses secara bertahap agar tercapai tujuan dari Tugas Akhir ini. Tahap pertama yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini adalah melakukan studi literatur. Literatur yang dipelajari adalah literatur yang mengandung pembahasan yang menyangkut topik Tugas Akhir yang diambil. Materi-materi yang diperlukan meliputi konsep dasar sistem pengaturan, dasar-dasar mesin CNC, mesin CNC *Milling*, motor servo ac, metode *Cross-Coupled Control*. Literatur tersebut dapat diperoleh dari *textbook*, *e-book* dan *paper* yang diambil dari berbagai jurnal konferensi internasional.

Langkah selanjutnya adalah mencari fungsi alih *plant* motor AC servo yang merupakan aktuator aksis X dan Y dari mesin CNC *Miling*. Fungsi alih *plant* motor AC servo yang digunakan, diperoleh dari *paper* M.Vijayakarthick dan P.K.Bhaba yang berjudul “*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*”.

Selanjutnya dilakukanlah perancangan kontroler yang meliputi perancangan *Modified Cross-Coupled Control*. Referensi perancangan metode didapat dari *paper* penelitian sebelumnya oleh Y.T.Shih yang berjudul “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-axis Motion*”. Dalam tahap perancangan kontroler ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan fungsi alih *plant* motor servo ac yang telah didapat berdasarkan *paper*. Simulasi dilakukan pada software Simulink yang berguna sebagai media validasi kontroler. Hasil simulasi dari Simulink akan digunakan untuk analisa performansi metode *Modified Cross-Coupled Control*.

Tahap selanjutnya adalah pembuatan program simulasi. Pada Tugas Akhir ini digunakan software Matlab dan Simulink yang berfungsi sebagai program penghubung antara *user* dengan metode *Modified Cross Coupled Control*.

Tahap selanjutnya adalah pengujian program simulasi untuk mengetahui kemampuan dari metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler yang sudah dirancang pada tahap sebelumnya. Setelah didapat hasil pengujian dengan simulasi, kemudian dilakukan analisa untuk mendapatkan kesimpulan dari pegujian yang dilakukan yang juga sebagai kesimpulan dari Tugas Akhir ini.

Tahap terakhir dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah penulisan buku. Penulisan buku ini berupa laporan yang mencakup semua proses pengerjaan Tugas Akhir mulai dari awal sampai akhir.

1.5. Relevansi

Penulisan Tugas Akhir ini memiliki relevansi dengan topik pengaturan mesin CNC *Milling* yang sedang berkembang. Diharapkan penulisan Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi yang tepat dalam melakukan penelitian pengaturan mesin CNC *Milling* untuk pembentukan kontur.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab yaitu pendahuluan, tinjauan pustaka, perancangan sistem, hasil dan analisa serta penutup.

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini, dibahas mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, relevansi dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori yang berkaitan dengan topik penelitian yang dilakukan. Dasar teori pada bab ini meliputi konsep dasar sistem pengatutan, dasar-dasar mesin CNC, motor servo ac, metode *Cross-Coupled Control*.

BAB III PERANCANGAN *MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL*

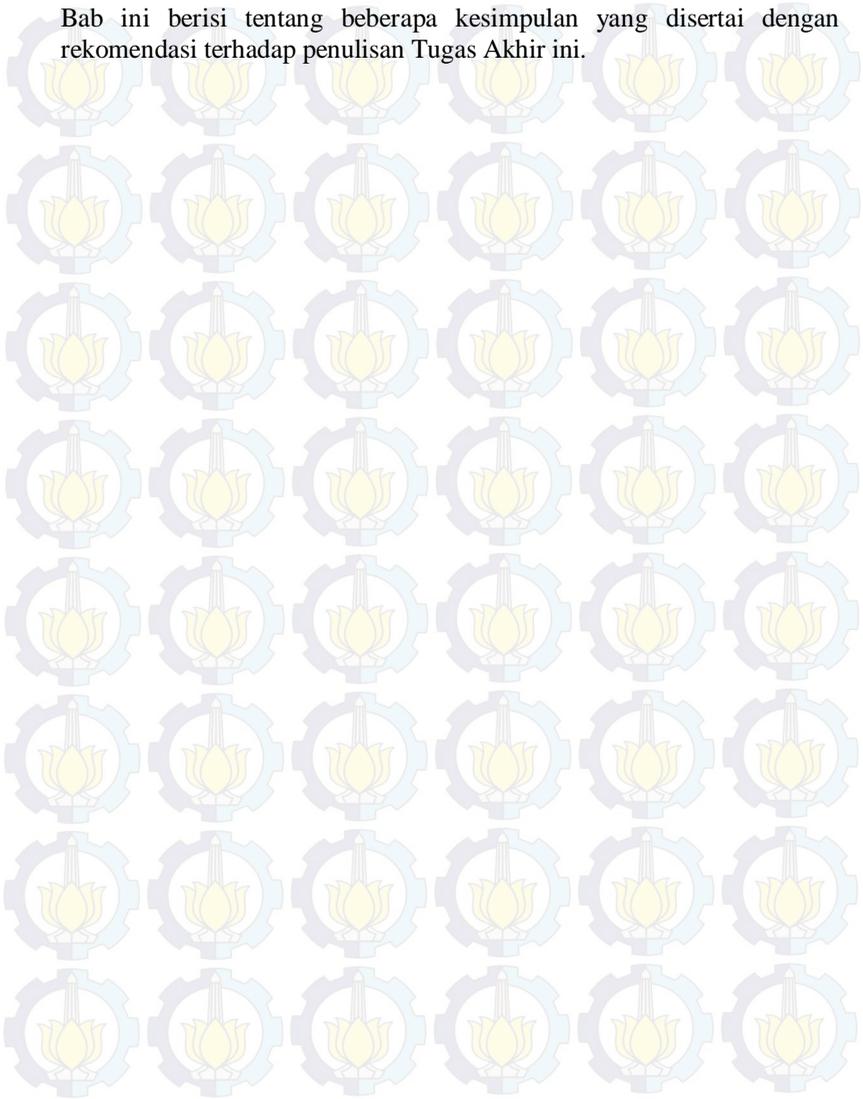
Bab ini berisi perancangan metode *modified Cross-Coupled Control* untuk melakukan *tracking* posisi *plant* motor servo ac.

BAB IV PENGUJIAN METODE *MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL*

Bab ini berisi hasil dari simulasi yang telah dibuat dan analisa terhadap respon yang dihasilkan dalam pembentukan kontur. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian performansi *tracking* kontur dengan variasi nilai paramer kontroler, pengujian *tracking* kontur pada sistem dengan penambahan gangguan pada sistem dan pengujian dengan perbandingan metode kontrol. Analisa yang dilakukan berdasarkan tiga pengujian yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang beberapa kesimpulan yang disertai dengan rekomendasi terhadap penulisan Tugas Akhir ini.





Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

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 servo ac sebagai penggerak aksis pada mesin CNC. Selain itu juga diperlukan pemahaman mengenai metode kontrol yang akan digunakan yaitu teori *Modified Cross Coupled Control*.

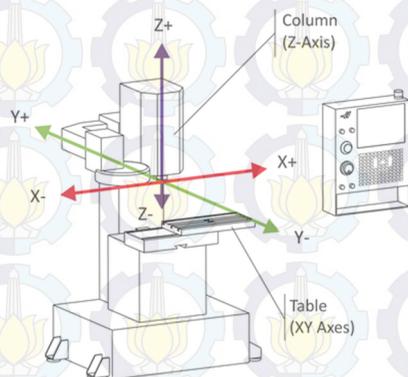
2.1 Mesin CNC [7]

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 proses 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*, benda kerja terdapat pada bagian *spindle*. Mesin CNC *Lathe* digunakan untuk mengikis atau mengukir benda kerja tersebut sehingga menjadi bentuk yang diinginkan. Untuk mesin CNC *milling*, terdapat dua jenis penempatan motor *spindle*, yaitu *spindle* yang bergerak saat penggerak aksis X dan Y. membentuk benda kerja dan motor *spindle* yang diam tetapi benda kerjanya yang bergerak dan digerakkan oleh motor servo ac sebagai

Pada Tugas Akhir ini, mesin CNC yang digunakan adalah mesin CNC jenis *Milling*. Pada *spindle* mesin CNC *Milling* terdapat pisau pemotong dengan berbagai jenis sesuai dengan kebutuhan saat beroperasi. Mesin CNC *Milling* digunakan untuk memotong, melubangi, atau membentuk benda kerja. Dalam membentuk sebuah benda, mesin CNC *Milling* harus dapat beroperasi dan menghasilkan benda kerja sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Oleh karena itu, mesin CNC memiliki tiga aksis gerak. Ketiga aksis tersebut adalah X, Y, dan Z. Aksis X menunjukkan arah gerak ke kanan atau ke kiri. Aksis Y menunjukkan arah gerak ke depan atau ke belakang. Aksis Z

menunjukkan arah gerak secara vertikal, ke atas atau ke bawah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pergerakan aksis ini dilakukan oleh motor servo ac yang terhubung pada mekanik tiap aksis dari mesin CNC *Milling*. Oleh karena itu, pada mesin CNC *Milling* dilakukan perbaikan posisi dan kontur dilakukan dengan mengatur pergerakan motor servo tersebut.



Gambar 2.1 Mesin CNC *Milling* 3 Aksis

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 aksis-aksis 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 aksis-aksis 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 benda kerja. 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 benda kerja 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 benda kerja, sedangkan interpolasi *circular*, adalah ketika mesin pemotong bergerak secara melingkar di atas benda kerja.

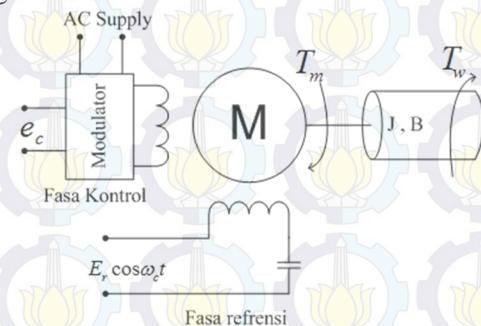
Bahasa pemrograman yang sering digunakan dalam memrogram CNC adalah G-codes (Persiapan), M-codes, F-codes (*Feed*), S-codes (Kecepatan), D-codes (*offset* diameter), T-codes (nomor alat), dan lain sebagainya. Pada mesin CNC, G-codes mengatur beberapa gerakan, misalnya :

- G00 : menuju ke titik tertentu
 - G01 : bergerak sesuai garis lurus
 - G02 : bergerak melingkar searah jarum jam
 - G03 : bergerak melingkar berlawanan dengan arah jarum jam
- dll.

2.2 Motor Servo AC [4]

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan simulasi metode *Modified Cross Coupled Control* pada mesin CNC *milling* yang menggunakan motor servo ac sebagai aktuator penggerak posisi benda kerja. Model motor servo ac yang digunakan mengacu pada referensi paper "*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*" karya M.Vijayakarthick dan P.K.Bhaba.

Motor Servo ac merupakan motor ac 2 fasa yang memiliki satu fasa sebagai fasa referensi dan satu fasa kontrol. Struktur motor servo ac dapat dilihat pada Gambar 2.2 [4]. 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.



Gambar 2.2 Struktur motor servo ac

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 servo ac sangat penting untuk mengetahui hubungan antara masukan dengan keluaran motor. Masukan motor servo ac berupa tegangan sedangkan keluarannya berupa kecepatan motor yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Gambar 2.3 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:

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

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 servo ac secara keseluruhan dapat ditulis :

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

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

Apabila diubah ke dalam domain S persamaan menjadi:

$$k_1 e_c(s) - k_2 s\theta(s) = Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) + T_w \dots\dots\dots(2.4)$$

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

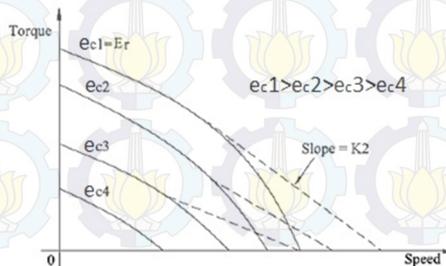
$$k_1 e_c(s) - k_2 s\theta(s) = Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) \dots\dots\dots(2.5)$$

sehingga hubungan antara kecepatan dengan tegangan kontrol dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{k_1}{Js^2 + k_2s + Bs} \dots\dots\dots(2.6a)$$

Persamaan 2.6a dapat disederhanakan menjadi seperti pada persamaan 2.6b.

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)} \dots\dots\dots(2.6b)$$



Gambar 2.3 Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC

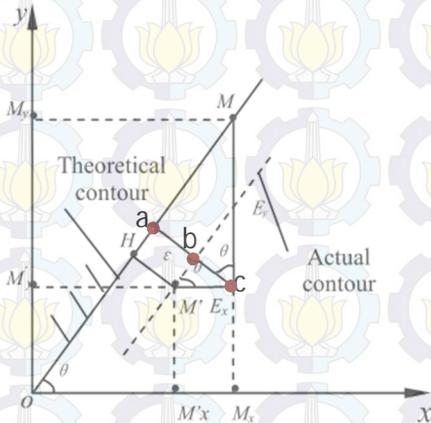
2.3 Kontur [5]

Untuk menghasilkan bentuk benda kerja sesuai dengan yang diinginkan, perlu dilakukan *tracking* lintasan kontur untuk setiap aksis secara akurat. Kesalahan *tracking* pada setiap aksis dapat mengakibatkan kesalahan kontur yang dibentuk. Kesalahan kontur yang terjadi dapat direduksi dengan menerapkan metode kontrol tertentu yang sesuai untuk meminimumkan nilai kesalahan kontur yang dibentuk [5].

Pada umumnya, kontur untuk membentuk suatu bentuk benda kerja terdiri atas kontur linier dan lingkaran. Penjelasan untuk setiap kontur adalah sebagai berikut :

2.3.1. Kontur Linier

Kontur linier ditunjukkan pada Gambar 2.4. Dalam perhitungan untuk mendapatkan model dari kesalahan kontur pada kontur linier dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 2.4 Model Kesalahan Kontur pada Kontur Linier

Dari gambar di atas dapat dilihat, E_x adalah kesalahan posisi pada aksis X, E_y adalah kesalahan posisi pada aksis Y, dan θ adalah sudut lintasan linier terhadap aksis X. Maka kesalahan posisi tiap aksis dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$E_x = M_x - M'_x \dots\dots\dots(2.7)$$

$$E_y = M_y - M'_y \dots\dots\dots(2.8)$$

Kesalahan kontur dinyatakan dengan ϵ , sehingga dari gambar di atas didapatkan,

$$\epsilon = ac - bc \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan,

$$bc = \text{Sin}\theta.E_x \dots\dots\dots(2.10)$$

$$ac = \text{Cos}\theta.E_y \dots\dots\dots(2.11)$$

Jika disubstitusikan (2.10 & 2.11) ke (2.9) maka didapatkan model kesalahan kontur untuk kontur linier sebagai berikut :

$$\epsilon = \text{Cos}\theta.E_y - \text{Sin}\theta.E_x \dots\dots\dots(2.12)$$

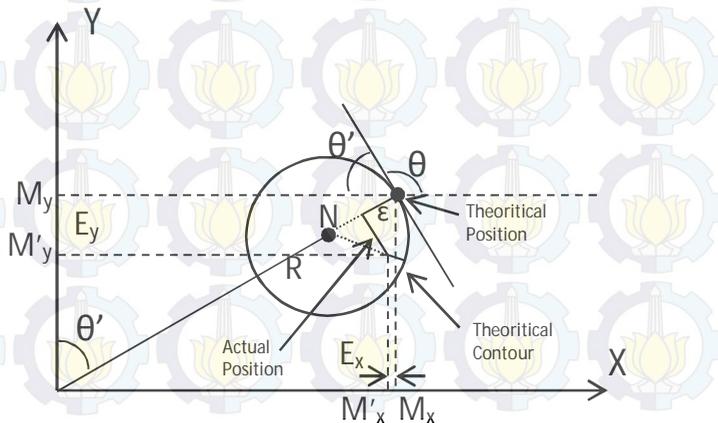
atau,

$$\epsilon = -E_x.\text{Sin}\theta + E_y.\text{Cos}\theta \dots\dots\dots(2.13)$$

2.3.2. Kontur Lingkaran

Dapat dilihat pada Gambar 2.5 yaitu kontur lingkaran pada bidang XY dengan titik pusat lingkaran pada N dan jari-jari lingkaran R. Model kesalahan kontur untuk kontur lingkaran dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\epsilon = R - \sqrt{(M'_x - N_x)^2 + (M'_y - N_y)^2} \dots\dots\dots(2.14)$$



Gambar 2.5 Model Kesalahan Kontur pada Kontur Lingkaran

Dalam perhitungan untuk mendapatkan model dari kesalahan kontur pada kontur lingkaran dapat dilihat sebagai berikut :

Kesalahan terhadap aksis X :

$$M'_x = M_x - E_x$$

$$M'_x = N_x + R \sin \theta' - E_x$$

$$M'_x = N_x + R \sin(\pi - \theta) - E_x$$

$$M'_x = N_x + R \sin \theta - E_x$$

Kesalahan terhadap aksis Y :

$$M'_y = M_y - E_y$$

$$M'_y = N_y + R \cos \theta' - E_y$$

$$M'_y = N_y + R \cos(\pi - \theta) - E_y$$

$$M'_y = N_y - R \cos \theta - E_y$$

Dari penurunan di atas, kemudian disubstitusikan ke persamaan (2.14).

$$\varepsilon = R - \sqrt{(R \sin \theta - E_x)^2 + (-R \cos \theta - E_y)^2}$$

$$\varepsilon = R - \sqrt{R^2 - 2R(E_x \sin \theta - E_y \cos \theta) + (E_x^2 - E_y^2)}$$

$$\varepsilon = R - R \sqrt{1 + \frac{E_x^2 - E_y^2}{R^2} - 2 \frac{E_x \sin \theta - E_y \cos \theta}{R}}$$

$$\approx R - R \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_x^2 + E_y^2 - 2RE_x \sin \theta + 2RE_y \cos \theta}{R^2} \right) \right]$$

$$\varepsilon = \left(\sin \theta - \frac{E_x}{2R} \right) \cdot E_x - \left(\cos \theta + \frac{E_y}{2R} \right) \cdot E_y$$

$$\varepsilon = C_x E_x - C_y E_y$$

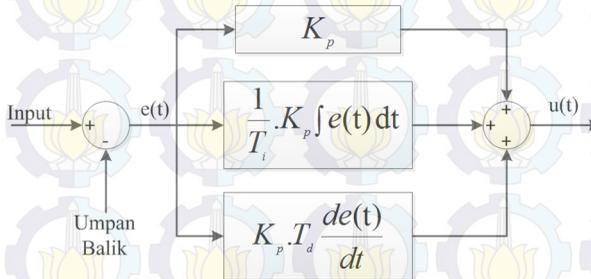
dengan,

$$C_x = \sin \theta - \frac{E_x}{2R} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$C_y = \cos \theta + \frac{E_y}{2R} \dots\dots\dots(2.16)$$

2.4 Kontroler PID

Kontroler PID merupakan kontroler yang paling banyak digunakan di dunia industri karena kemudahan, kesederhanaan, kehandalan dan penggunaannya yang aplikatif. Kontroler PID terdiri dari tiga komponen yaitu proporsional, integral dan *derivative*. Kontroler PID dapat digunakan secara terpisah maupun dengan melakukan kombinasi tertentu seperti P, PI, PD dan PID. Setiap kekurangan dari tiap kontroler proporsional, integral, dan *derivative* (kontroler P, I, dan D) dapat diminimalkan dengan cara mengkombinasikan secara paralel agar dapat saling melengkapi dengan kelebihan masing-masing. Blok diagram kontroler PID ditunjukkan pada Gambar 2.6 menghasilkan keluaran yang bergantung pada *magnitude* dan laju perubahan dari sinyal kesalahan. Karakteristik kontroler PID dipengaruhi oleh ketiga parameter penyusunnya, yaitu K_p , K_i , dan K_d .



Gambar 2.6 Diagram Blok Kontroler PID

Adapun keluaran dari kontroler PID sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.17)$$

- dengan,
- $u(t)$ = sinyal keluaran kontroler PID
 - K_p = konstanta proporsional
 - T_i = waktu integral
 - T_d = waktu *derivative*

K_i = konstanta integral (K_p/T_i)
 K_d = konstanta *derivative* ($K_p \times T_d$)
 $e(t)$ = sinyal kesalahan

Dari Persamaan 2.17, nilai K_p berlaku untuk penguatan saja tanpa memberikan efek dinamik terhadap kinerja kontroler. Penggunaan kontroler P memiliki keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamis, sehingga tidak sesuai untuk *plant* dengan karakter dinamis.

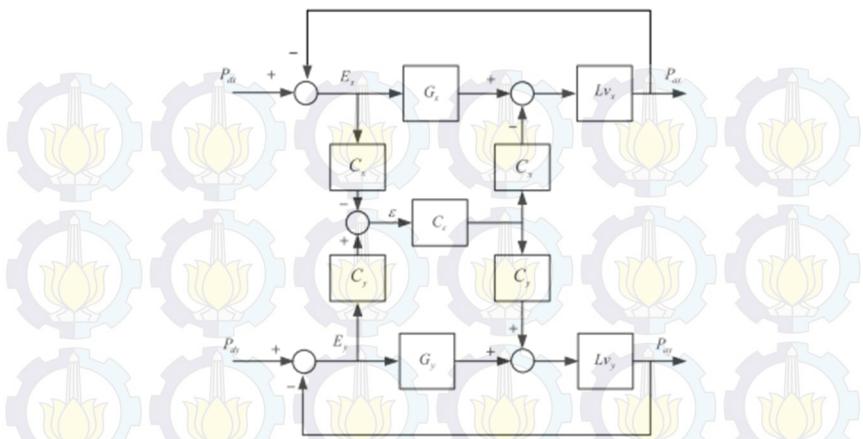
Kontroler integral lebih banyak digunakan untuk meminimalkan kesalahan (*error*). Konstanta integral K_i , dapat memperbaiki sekaligus mengurangi *steady-state error* (E_{ss}), namun pemilihan K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Selain itu pemilihan K_i yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan timbulnya osilasi karena bertambahnya orde sistem.

Kontroler *derivative* tidak dapat berdiri sendiri karena sifat dari kontroler ini hanya berubah saat ada perubahan kesalahan sehingga saat terjadi kesalahan statis, kontroler ini tidak akan bereaksi. Dibalik kelemahan tersebut, kontroler *derivative* mempunyai kecepatan respon yang baik untuk mengatasi adanya sinyal kesalahan yang terjadi, sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki respon transien.

2.5 Modified Cross Coupled Control [3]

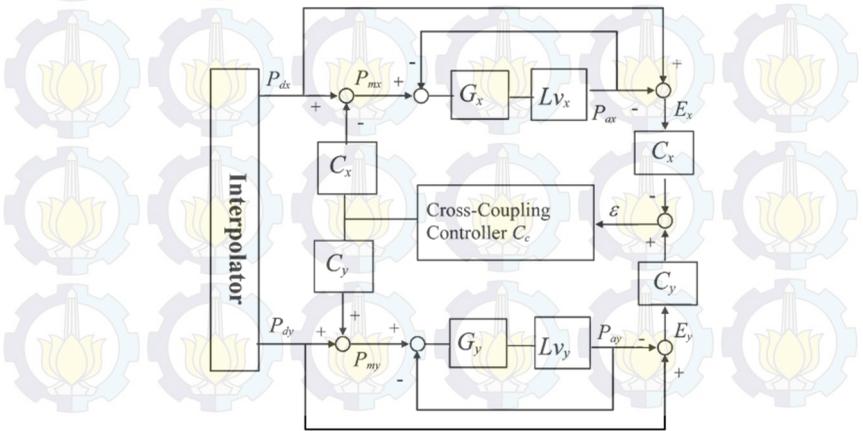
Cross Coupled Control (CCC) merupakan struktur kontroler mesin CNC *multiaxis* yang diajukan oleh Yoram Koren pada tahun 1980 untuk sinkronisasi antar aksis mesin CNC sehingga dapat mengurangi kesalahan kontur yang dibentuk. CCC dirancang untuk memperbaiki kesalahan kontur yang diakibatkan oleh kesalahan dari posisi tiap aksis penggerak.

Awal mula perancangan kontroler ini berdasarkan ide untuk upaya meminimalkan kesalahan kontur yang dapat diestimasi berdasarkan nilai kesalahan pada tiap aksis X dan Y [1],[2]. Estimasi nilai kesalahan dilakukan dengan menurunkan formula dari kesalahan tiap aksis berdasarkan struktur dari diagram blok CCC seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram Blok *Cross-Coupled Control* Konvensional

Pada gambar tersebut merupakan struktur CCC konvensional yang cocok untuk pengaturan pada mode kecepatan tetapi kurang cocok untuk pengaturan pada mode posisi. Hal inilah yang menjadi motivasi Tugas Akhir ini menggunakan metode *Modified CCC*, sehingga konfigurasi dapat digunakan pada mode pengaturan posisi. Selain itu, dengan struktur *Modified CCC* ini dapat mempermudah dalam proses analisa kestabilannya[3]. Struktur dari *Modified Cross-Coupled Control* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Blok *Modified Cross-Coupled Control*

Pada struktur diagram blok *Modified Cross-Coupled Control* di atas terdapat beberapa gain kontrol yang nilainya diestimasi dari ilustrasi terjadinya kesalahan kontur seperti pada Gambar 2.4. jika posisi referensi yang diinginkan berada pada titik P^* dan posisi aktual berada pada titik P , maka dapat dihitung kesalahan dari masing-masing aksisnya (E_x dan E_y). Selanjutnya kesalahan kontur yang terjadi dapat dihitung berdasarkan selisih proyeksi kesalahan masing-masing aksis. Perhitungan kesalahan kontur (ε) ditunjukkan pada persamaan (2.18) dan (2.19).

$$\varepsilon = -E_x C_x + E_y C_y \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\varepsilon = -E_x \text{Sin}\theta + E_y \text{Cos}\theta \dots\dots\dots(2.19)$$

dimana, C_x dan C_y merupakan gain variabel yang besarnya ditentukan oleh sudut kemiringan untuk kontur linear (θ) dan juga dipengaruhi besar jari-jari untuk kontur circular (R).

Modified Cross-Coupled Control memiliki desain blok diagram khusus yang didalamnya terdapat proses estimasi untuk mendapatkan kesalahan kontur dari sistem kontrol mesin CNC. Hasil estimasi tersebut digunakan sebagai masukan pada *Cross-coupled Controller* (C_c), sedangkan keluarannya digunakan untuk memanipulasi sinyal kontrol untuk tiap aksis. Adanya sistem manipulasi sinyal kontrol pada tiap aksis ini yang dapat meminimalkan kesalahan kontur yang dibentuk.

BAB III

PERANCANGAN METODE *MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL*

3.1. Perancangan Sistem Motor Servo AC

Pada Tugas Akhir ini, digunakan model motor servo ac yang pada umumnya digunakan sebagai penggerak dari setiap aksis mesin CNC *Milling*. Model dari motor servo ac yang digunakan untuk pengujian metode hasil perancangan yang merujuk pada paper “*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Repetitive Control Strategy*”.

Model matematika motor servo ac diperoleh melalui persamaan antara motor, beban, dan torsi. Seperti pada persamaan (3.1) yang merupakan persamaan dari torsi motor.

$$T_m = K_c e_c - K_n \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan e_c merupakan tegangan pada fasa kontrol motor servo, $\frac{d\theta}{dt}$ adalah posisi sudut motor AC servo. K_c dan K_n adalah konstanta motor. Nilai K_c dan K_n dapat diperoleh jika diketahui nilai untuk torsi (T), tegangan kontrol (E_c) dan kecepatan motor (ω_n) melalui persamaan berikut :

$$K_c = \frac{T}{E_c} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$K_n = \frac{T}{\omega_n} \cdot \frac{60}{2\pi} \dots\dots\dots(3.3)$$

Sedangkan persamaan (3.4) merupakan persamaan dari torsi pada beban.

$$T_w = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(3.4)$$

dengan $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ merupakan kecepatan sudut. Untuk J dan B merupakan momen inersia dan koefisien gesek viskos dari motor yang dituliskan dalam persamaan (3.5)

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_c e_c - K_n \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(3.5)$$

Dari persamaan (3.5) diperoleh fungsi alih motor servo untuk pengaturan posisi di mana,

$$\left[Js^2 + Bs + K_n s \right] \theta(s) = K_c E_c(s) \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{Js^2 + K_n s + B_s} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \dots\dots\dots(3.8)$$

dengan τ_m adalah konstanta waktu motor dan k_m adalah konstanta penguatan motor. Spesifikasi yang digunakan untuk motor servo ac disesuaikan referensi [4], ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi Motor Servo Ac

Type	GSM 62AE
Tegangan	230 Volt
Daya	100 Watt
Kecepatan	50 rpm
Momen Inersia (J)	0.052 Kg.cm ²
Koefisien Gesek (B)	0.01875
Rasio Gearbox	36
Rasio Poros	0.0175 m

Dari spesifikasi di atas, diperoleh fungsi alih dari motor servo ac ditunjukkan pada persamaan (3.9).

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,776s + 1)} \dots\dots\dots(3.9)$$

3.2. Perancangan *Modified Cross Couple Control*

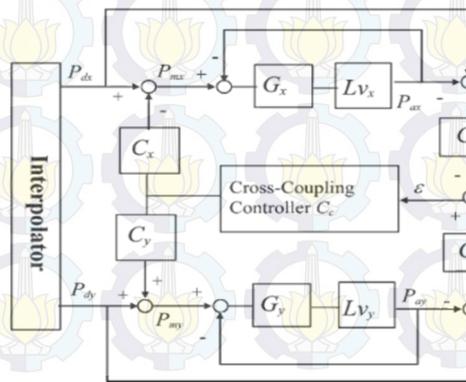
Metode *Modified Cross Coupled Control* merupakan hasil modifikasi dari metode *Cross Coupled Control* konvensional.

Perbedaannya terletak pada sinyal yang dimodifikasi yaitu sinyal referensi posisi aksis-X dan aksis-Y. Metode *Modified Cross Coupled Control* bertugas untuk melakukan sinkronisasi pengaturan antar aksis mesin CNC dengan cara mereduksi model kesalahan kontur. Struktur dari *Modified Cross Coupled Control* merujuk pada paper “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-Axis Motion*”. Desain dari *Modified Cross Coupled Control* difokuskan pada pemilihan algoritma kontrol C_c untuk mereduksi kesalahan kontur. Fungsi alih dari kesalahan kontur selanjutnya akan disebut *Contour Error Transfer Function* (CETF).

Tahap perancangan *Modified Cross Coupled Control* memiliki tiga tahapan yaitu penentuan bentuk *Contour Error Transfer Function* (CETF), penurunan bentuk kesalahan kontur dari sistem tanpa kopel, dan penurunan bentuk kesalahan kontur dari sistem dengan kopel.

3.2.1. Penentuan CETF

CETF diturunkan berdasarkan pada perbandingan kesalahan kontur pada sistem tanpa kopel antar aksis dengan kesalahan kontur pada sistem dengan kopel antar aksis yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Perhitungan dilakukan pada kondisi sistem tanpa kopel untuk mendapatkan ε_0 . Kemudian, perhitungan dilakukan pada kondisi sistem dengan kopel untuk mendapatkan ε . Setelah didapat kedua bentuk error ε_0 dan ε , maka dibentuk fungsi alih sebagai hubungan antara kesalahan kontur tanpa kopel dengan kesalahan kontur dengan kopel. Bentuk fungsi alih kesalahan kontur tersebut yang akan digunakan untuk menentukan kontroler sebagai *Cross-Couple Controller*.



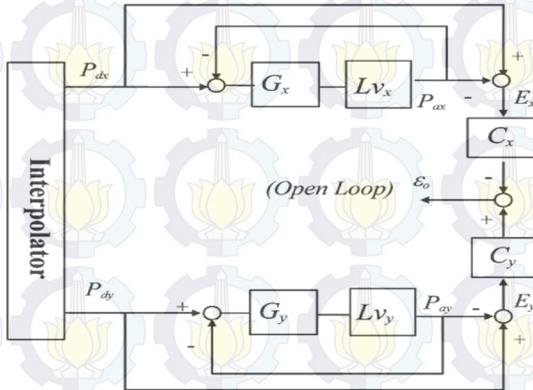
Gambar 3.1. Sistem CNC dengan Metode M-CCC

3.2.2. Sistem Tanpa Kopel

Kesalahan kontur dari sistem tanpa kopel didefinisikan pada Persamaan (3.10).

$$\varepsilon_0 = -E_x C_x + E_y C_y \dots\dots\dots(3.10)$$

Diagram blok pengaturan CNC pada sistem tanpa kopel ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram Blok Pengaturan CNC dengan Sistem Tanpa Kopel

Dari diagram blok di atas, dapat dilakukan perhitungan penurunan untuk mendapatkan ε_0 dengan mencari kesalahan dari tiap aksis, sehingga didapat persamaan (3.11) dan (3.12) :

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= P_{dx} - \frac{G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} P_{dx} \\ &= \frac{P_{dx}}{1 + G_x L v_x} \dots\dots\dots(3.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= P_{dy} - P_{ay} \\ &= \frac{P_{dy}}{1 + G_y L v_y} \dots\dots\dots(3.12) \end{aligned}$$

Selanjutnya substitusi persamaan (3.11) dan (3.12) ke persamaan (3.10), maka akan didapat persamaan kesalahan kontur pada sistem tanpa kopel yang ditunjukkan pada persamaan (3.13).

$$\varepsilon_0 = -\frac{C_x P_{dx}}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1 + G_y L v_y} \dots\dots\dots(3.13)$$

3.2.3. Sistem Dengan Kopel

Kesalahan kontur sistem dengan kopel didefinisikan pada persamaan (3.14).

$$\varepsilon = -E_x C_x + E_y C_y \dots\dots\dots(3.14)$$

Kesalahan dari aksis X dan aksis Y didefinisikan pada persamaan (3.15).

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= \frac{P_{dx} + \varepsilon C_c C_x G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} \dots\dots\dots(3.15a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= P_{dy} - P_{ay} \\ &= \frac{P_{dy} + \varepsilon C_c C_y G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \dots\dots\dots(3.15b) \end{aligned}$$

Dilakukan substitusi persamaan (3.15) ke persamaan (3.14), sehingga didapat persamaan (3.16)

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{C_x P_{dx} + \varepsilon C_c C_x^2 G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy} - \varepsilon C_c C_y^2 G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \\ \varepsilon &= \frac{-C_x P_{dx}}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1 + G_y L v_y} - \frac{\varepsilon C_c C_x^2 G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} - \frac{\varepsilon C_c C_y^2 G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \\ \varepsilon \left[1 + \frac{C_c C_x^2 G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_c C_y^2 G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \right] &= \frac{-C_x P_{dx}}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1 + G_y L v_y} \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{-(1+G_yLv_y)C_x}{\Delta} P_{dx} + \frac{(1+G_xLv_x)C_y}{\Delta} P_{dy} \dots\dots\dots(3.16)$$

dengan :

$$\Delta = (1+G_xLv_x)(1+G_yLv_y) + C_c C_x^2 G_x Lv_x (1+G_yLv_y) + C_c C_y^2 G_y Lv_y (1+G_xLv_x)$$

CETF didapatkan dengan menyatakan hubungan antara ε dan ε_0 . Hubungan tersebut didapatkan dengan melihat persamaan (3.13) dan (3.16) sehingga didapatkan persamaan (3.17).

$$\varepsilon = \frac{1}{1+C_c P} \varepsilon_0 \dots\dots\dots(3.17)$$

dengan P adalah,

$$P = \frac{C_x^2 G_x Lv_x (1+G_yLv_y) + C_y^2 G_y Lv_y (1+G_xLv_x)}{(1+G_xLv_x)(1+G_yLv_y)} = \frac{C_x^2 G_x Lv_x}{(1+G_xLv_x)} + \frac{C_y^2 G_y Lv_y}{(1+G_yLv_y)}$$

3.3. Perancangan Kontroler PD Pada Loop Penggerak Aksis

Pengaturan untuk tiap aksis dilakukan untuk mendapatkan respon dari pergerakan tiap aksis lebih baik. Berdasarkan persamaan (3.9) yaitu model dari motor servo ac sebagai penggerak tiap aksis, dirancang kontroler PD untuk mengatur pergerakan posisi tiap aksis. Model motor servo ac diketahui pada subbab 3.1 seperti di bawah ini :

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

Dari fungsi alih di atas didapatkan konstanta sistem dan konstanta waktu sistem sebagai berikut :

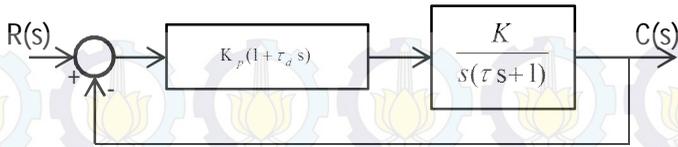
$$K = 0,4$$

$$\tau = 2,776s$$

Struktur dari kontroler PD adalah sebagai berikut :

$$C(s) = K_p (1 + \tau_d s) \dots\dots\dots(3.19)$$

Dari struktur kontroler PD tersebut jika dinyatakan dengan diagram blok dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Diagram Blok Pengaturan Sistem dengan Kontroler PD

Kemudian direncanakan kontroler PD dengan hasil respon orde pertama, tanpa overshoot dan konstanta waktu 0.05 detik. Untuk mendapatkan nilai parameter kontroler yang diinginkan, maka dapat dilakukan perhitungan dengan penyederhanaan diagram blok. Dengan menentukan nilai τ_d sama dengan τ .

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{K_p K (1 + \tau_d s)}{1 + \frac{K_p K (1 + \tau_d s)}{s(\tau s + 1)}} = \frac{K_p K}{1 + \frac{K_p K}{s}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_p K / s}}$$

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{1}{\frac{1}{K_p K} s + 1} \dots \dots \dots (3.20)$$

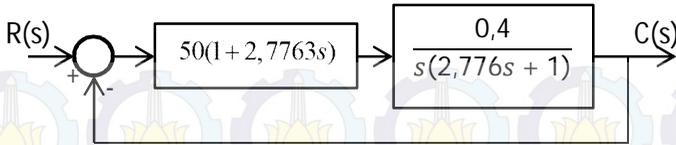
Dari persamaan (3.20) di atas dapat ditentukan nilai K_p dengan menggunakan nilai konstanta waktu hasil (τ^*) yaitu 0.05 detik.

$$K_p = \frac{1}{\tau^* K} = \frac{1}{0,05 \cdot 0,4} = 50 \dots \dots \dots (3.21)$$

Sehingga didapat bentuk kontroler hasil rancangan dan nilai parameter kontroler PD sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{e(s)} = 50(1 + 2,7763s) \dots \dots \dots (3.22)$$

dengan K_p adalah konstanta proporsional kontroler dan τ_d adalah konstanta waktu differensial kontroler. Diagram blok sistem pengaturan tiap aksis menjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram Blok Pengaturan Aksis dengan Kontroler PD

3.4. Perancangan Kontroler PI Sebagai *Cross-Coupled Controller*

Pada Tugas Akhir ini, dipilih kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* (C_c) untuk memperbaiki kesalahan kontur dan mendapatkan respon transien kesalahan kontur yang diinginkan. Pada Tugas Akhir ini digunakan model motor servo ac seperti pada persamaan (3.23). Motor servo ac dipilih karena pada umumnya motor ini digunakan sebagai penggerak tiap aksis mesin CNC Milling.

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{Js^2 + (f + K_n)s} \Rightarrow \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \dots\dots\dots(3.23)$$

dengan $\theta(s)$ adalah posisi sudut motor servo ac, $E(s)$ adalah tegangan motor yang diatur. J dan f adalah momen inersia motor (Kg.m^2) dan koefisien gaya gesek motor, sedangkan K_c dan K_n adalah konstanta motor. K_m dan T_m merupakan konstanta penguatan motor dan konstanta waktu motor. Dari model motor servo ac yang didapatkan dari identifikasi parameter fisik, diubah ke dalam bentuk fungsi alih dengan konstanta penguatan dan konstanta waktu dengan cara seperti pada persamaan (3.24).

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{\frac{K_c}{(f + K_n)}}{\frac{J}{(f + K_n)} s^2 + s} \dots\dots\dots(3.24)$$

sehingga didapatkan,

$$K_m = \frac{K_c}{(f + K_n)} \dots\dots\dots(3.25)$$

$$T_m = \frac{J}{(f + K_n)} \dots\dots\dots(3.26)$$

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 3.1, blok untuk penggerak aksis dalam Tugas Akhir ini dipilih motor servo ac adalah blok Lv_x untuk aksis-X dan Lv_y untuk aksis-Y. Untuk mempermudah dalam analisa, digunakan model yang sama untuk tiap aksis $Lv_x = Lv_y = Lv$. Pada subbab 3.4 telah ditentukan sistem pengaturan aksis-X dan aksis-Y menggunakan kontroler PD. Penyederhanaan blok pengaturan tiap aksis pada gambar 3.4 dapat disederhanakan sehingga didapat bentuk sistem setelah ditambahkan kontroler menjadi orde pertama seperti ditunjukkan pada persamaan (3.27).

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{1}{0.05s + 1} \dots\dots\dots(3.27)$$

Perancangan kontroler sebagai *Cross-Couple Controller* digunakan model dari kesalahan kontur yang telah dibahas pada subbab 3.2.1 seperti ditunjukkan pada persamaan (3.28).

$$CETF \Rightarrow \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + C_c P} \dots\dots\dots(3.28)$$

Dari model kesalahan kontur di atas, dengan C_c sebagai *Cross Couple Controller* dan P adalah hasil penurunan dari diagram blok *Modified Cross-Coupled Control* yang ditunjukkan pada persamaan (3.29).

$$P = \frac{C_x^2 G_x Lv_x}{(1 + G_x Lv_x)} + \frac{C_y^2 G_y Lv_y}{(1 + G_y Lv_y)} \dots\dots\dots(3.29)$$

Jika ditentukan,

$$G_v = C_x^2 + C_y^2$$

Untuk kontur linier, didapatkan persamaan di bawah ini,

$$G_v = C_x^2 + C_y^2 = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

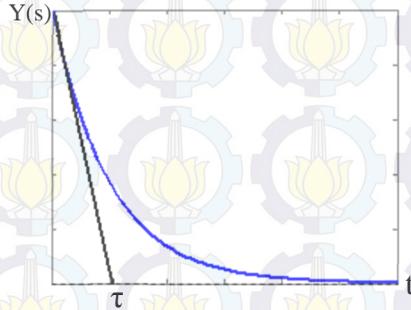
Maka didapatkan bentuk dari P ditunjukkan pada persamaan (3.30).

$$P = \frac{GL_v G_v}{1 + GL_v} \dots\dots\dots(3.30)$$

Penentuan kontroler sebagai *Cross-Couple Controller*, mengacu pada persamaan CETF yaitu menentukan bentuk C_c menggunakan pendekatan fungsi alih dengan respon keluaran menurun secara ekponensial dari nilai tertentu menuju nol dengan konstanta waktu saat transien sebesar 0.01s. Dipilih pendekatan tersebut karena perancangan

kontroler bertujuan untuk mereduksi kesalahan kontur. Bentuk fungsi alih yang digunakan sebagai pendekatan respon ditunjukkan pada persamaan (3.31) dan gambaran respon keluaran ditunjukkan pada Gambar 3.5.

$$G(s) = \frac{Ks}{\tau s + 1} \dots\dots\dots(3.31)$$



Gambar 3.5. Respon Output Yang Diinginkan

dengan, $Y(s)$ adalah output sistem , t adalah waktu sistem, τ adalah konstanta waktu sistem.

Untuk dapat menghasilkan respon tersebut, pada persamaan CETF ditentukan C_c agar mengandung sebuah integrator. Maka dari itu, dipilih kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* untuk mereduksi kesalahan kontur yang terjadi saat proses pembentukan benda kerja. Substitusi model tiap aksis kedalam bentuk P pada persamaan CETF, ditunjukkan pada persamaan (3.32).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + C_c \left[\frac{1}{\tau^* s + 1} + \frac{1}{\tau^* s + 1} \right]}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + C_c \left[\frac{1}{\tau^* s + 2} \right]} \dots\dots\dots(3.32)$$

dengan τ^* adalah konstanta waktu sistem pengaturan tiap aksis dan C_c adalah *Cross-Coupling Controller*. Selanjutnya dimasukkan kontroler PI untuk menggantikan C_c yang ditunjukkan pada persamaan (3.33).

$$C_c = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) = \frac{K_p (\tau_i + 1)}{\tau_i s} \dots\dots\dots(3.33)$$

dengan, K_p : Konstanta proporsional

τ_i : Konstanta waktu integral

Dari substitusi persamaan yang telah dilakukan di atas, didapatkan bentuk CETF seperti ditunjukkan pada persamaan (3.34).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + \left[\frac{K_p (\tau_i + 1)}{\tau_i s} \right] \left[\frac{1}{\tau^* s + 2} \right]}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + \left[\frac{K_p (\tau_i + 1)}{\tau_i s} \right] \left[\frac{0,5}{0,5\tau^* s + 1} \right]} \dots\dots\dots(3.34)$$

Ditentukan nilai konstanta waktu integral $\tau_i = 0,5\tau^*$, maka didapatkan persamaan seperti ditunjukkan pada (3.35).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + \frac{K_p}{\tau^* s}} = \frac{\tau^* s}{\tau^* s + K_p}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\frac{\tau^*}{K_p} s}{\frac{\tau^*}{K_p} s + 1} \approx \frac{Ks}{\tau s + 1} \dots\dots\dots(3.35)$$

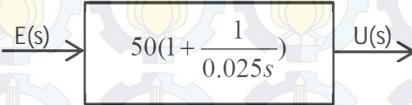
dengan, K : konstanta sistem yang diinginkan

τ : Konstanta waktu sistem yang diinginkan

Dari persamaan (3.32), dapat diperoleh nilai K_p jika nilai K dan τ ditentukan seperti di bawah ini :

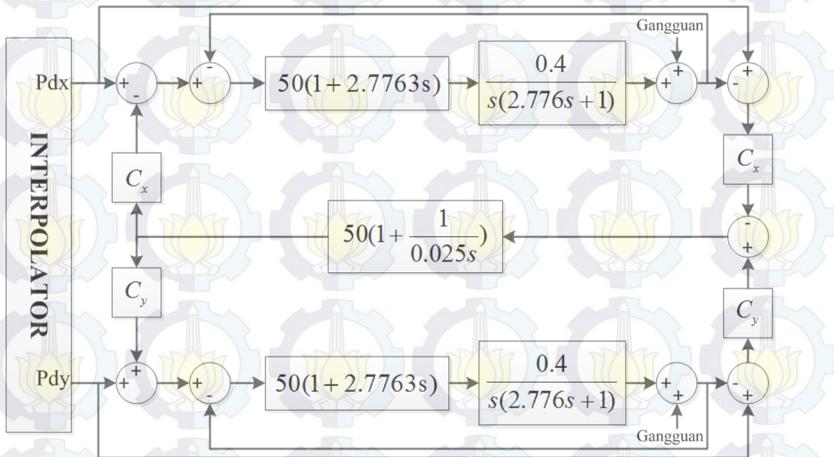
$$K = \tau = 0.001$$

Sehingga didapat nilai K_p sebesar 50 dan blok diagram kontroler PI ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Diagram Blok Kontroler PI Sebagai *Cross-Couple Controller*

Dengan demikian didapatkan diagram blok keseluruhan dari *Modified Cross-Coupled Control* dengan Kontroler PI yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Diagram Blok *Modified Cross-Coupled Control* dengan Kontroler PI Sebagai *Cross-Couple Controller*

BAB IV

PENGUJIAN METODE *MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL*

4.1. Gambaran Umum Pegujian Sistem

Pada Tugas Akhir ini, digunakan sistem mesin CNC *Milling* 3 aksis dengan penggerak aksis menggunakan motor servo ac. Pengujian metode *Modified Cross-Coupled Control* diterapkan untuk pengaturan posisi tiap aksis saat melakukan pembentukan kontur. Metode ini diuji tingkat kesalahan konturnya untuk membentuk sebuah lintasan linier dan lingkaran. Pada kasus ini disimulasikan sistem kontrol posisi pada aksis X dan aksis Y, digunakan model motor servo ac yang diperoleh dari penelitian sebelumnya [4]. Nilai parameter untuk model motor servo ac yang didapat adalah, $K_m = 0,4$ dan $T_m = 2.7763$.

Dalam pengujian ini simulasi proses *feeding* dijalankan pada waktu $t = 0$ detik sampai $t = 58$ detik. Untuk merepresentasikan kondisi saat *feeding*, ditambahkan pembebanan pada aksis X yang berupa pengurangan atau penambahan posisi aktual aksis X sebesar 1 cm untuk beban 1, 2 cm untuk beban 2, dan 3 cm untuk beban 3.

Kontur yang diinginkan berupa kontur linier dan kontur lingkaran. Untuk kontur linier, adalah garis miring yang memiliki titik awal dan titik target dengan gradien yang ditentukan. Untuk merepresentasikan kondisi tersebut, dirancang sebuah fungsi matematika yang dapat menghasilkan sinyal keluaran berupa garis linier dengan masukan titik awal, titik target, dan *cutting speed* yang digunakan. Untuk kontur lingkaran juga dirancang sebuah fungsi matematika yang dapat menghasilkan keluaran yang jika di plot pada grafik XY akan membentuk kontur lingkaran dengan masukan titik pusat lingkaran, jari-jari yang diinginkan, sudut awal, dan *cutting speed*.

Pengujian dilakukan dengan waktu yang disesuaikan dengan *cutting speed* dan panjang lintasan kontur yang akan dibentuk. Pengujian dengan beban juga disesuaikan dengan waktu simulasi. Hasil dari pengujian berupa plot kurva kontur referensi, kontur aktual dan kurva kesalahan kontur. Kurva kesalahan kontur yang dibentuk pada saat pengujian ini akan dihitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*). Formula untuk menghitung nilai RMSE adalah sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

dengan n adalah jumlah data, y_i adalah output yang diinginkan, dan \hat{y}_i adalah output yang terjadi. Dari nilai RMSE yang didapat pada setiap pengujian menggunakan metode yang berbeda akan dibandingkan. Hasil dari setiap pengujian yang dilakukan dan analisa yang dilakukan digunakan untuk mendapatkan kesimpulan dari hasil pengujian.

4.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC

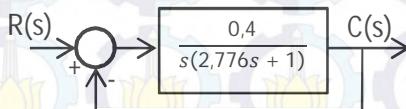
Pengujian pertama dilakukan untuk mengetahui karakteristik respon motor servo ac yang akan digunakan pada simulasi dan pengujian pada subbab berikutnya. Model matematika dari motor servo ac yang ditunjukkan pada persamaan 4.1 merupakan sistem orde kedua yang memiliki satu kutub di pusat koordinat. Respon dari keluaran motor servo ac tidak stabil, sehingga jika diberikan masukan sinyal unit step, hasil respon keluaran akan bertambah terus menerus mengikuti berjalannya waktu.

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,776s+1)} \dots \dots \dots (4.1)$$

Untuk membuat sistem menjadi stabil, dirancang sistem loop tertutup dengan umpan balik negatif. Kemudian untuk memperbaiki spesifikasi respon keluaran sistem, ditambahkan sebuah kontroler PD.

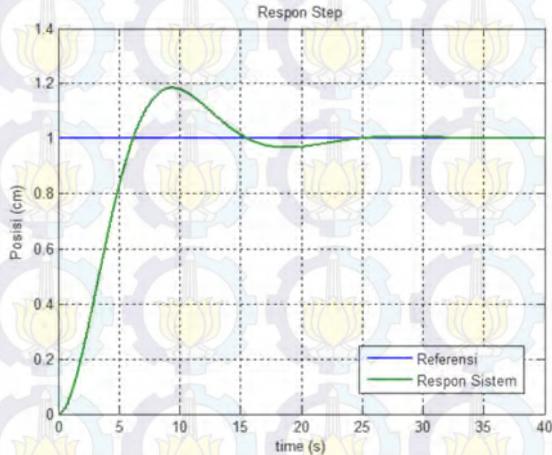
4.2.1. Karakteristik Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC

Salah satu metode kontrol sederhana untuk membuat sistem menjadi stabil adalah kontrol loop tertutup dengan umpan balik negatif. Diagram blok sistem kontrol loop tertutup pada motor servo ac ditunjukkan pada Gambar 4.1.

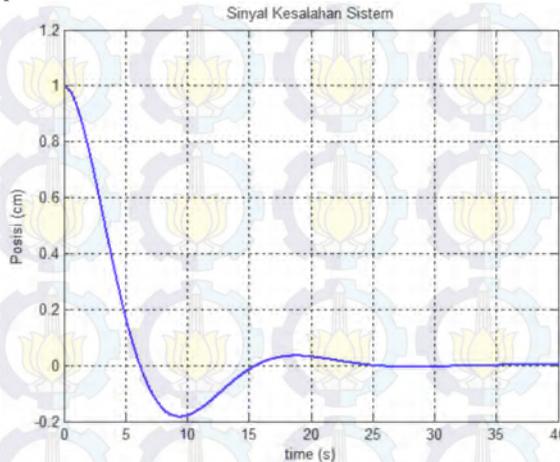


Gambar 4.1. Diagram Blok Sistem Kontrol Loop Tertutup Motor Servo Ac

Dari diagram blok di atas diperoleh respon keluaran sistem dengan masukan *step* ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan respon kesalahan sistem ditunjukkan pada gambar 4.3.



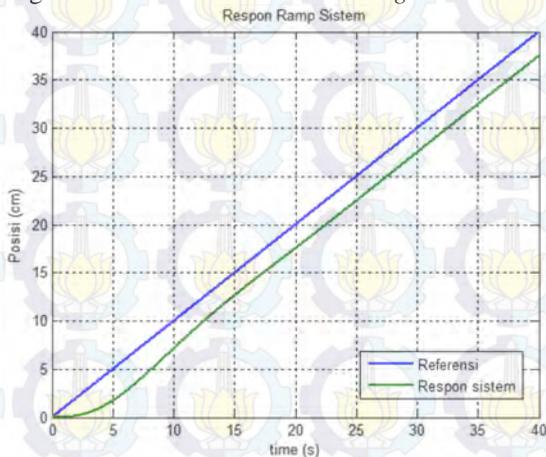
Gambar 4.2. Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Step*



Gambar 4.3. Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Step*

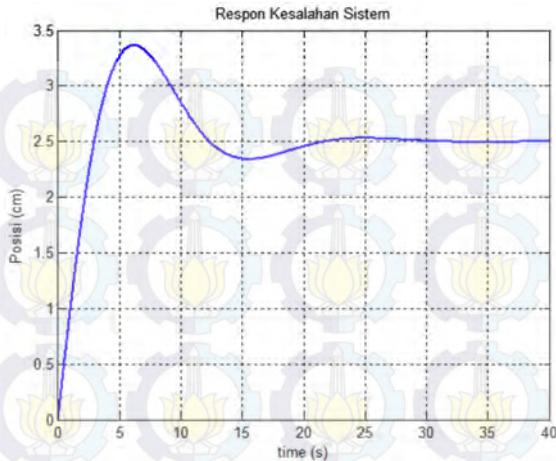
Berdasarkan Gambar 4.2 diketahui bahwa nilai yang diperoleh saat kondisi sinyal mencapai 63.2% adalah 4 detik sehingga diperoleh nilai $\tau = 4$ detik, nilai $\tau_s(\pm 5\%) \approx 3\tau \approx 12$ detik, dengan $\tau_r(5\% - 95\%) \approx 11.77$ detik. Dari sinyal kesalahan juga dapat dilihat bahwa sistem mulai mencapai kondisi yang konstan mendekati nol pada waktu mendekati 30 detik. Hal ini menunjukkan bahwa performansi dari sistem masih belum baik dikarenakan masih lamanya waktu kesalahan untuk menuju nol. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *step* diperoleh 0,506.

Sistem motor servo ac juga diuji dengan sinyal masukan *ramp* dengan hasil respon keluaran sistem ditunjukkan Gambar 4.4. Dari gambar hasil respon keluaran diperoleh bahwa masih terdapat selisih antara sinyal referensi dengan respon sinyal yang sebenarnya. Hal ini membuktikan sistem motor servo ac jika hanya menggunakan kontrol loop tertutup dengan sinyal masukan *ramp*, masih belum dapat menghasilkan respon yang sesuai dengan sinyal referensi. Pengujian menggunakan sinyal *ramp* akan mewakili pembentukan kontur linier yang biasa digunakan dalam mesin CNC *Milling*.



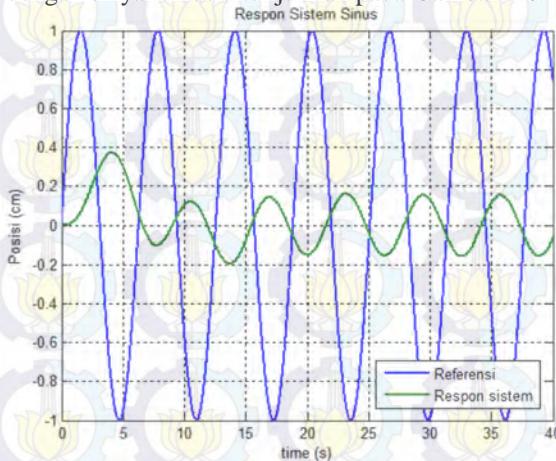
Gambar 4.4. Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Ramp*

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.5. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *ramp* diperoleh 2.5405.



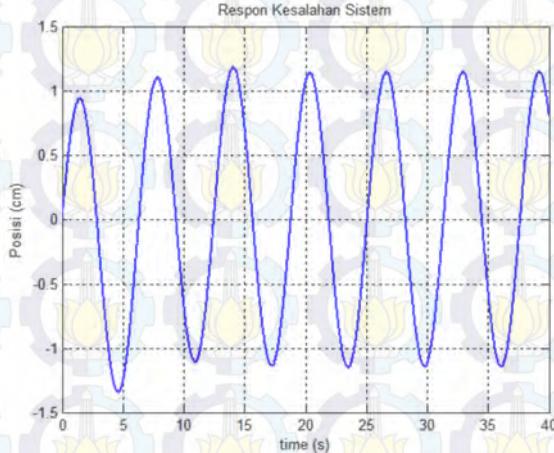
Gambar 4.5. Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Ramp*

Untuk pembentukan kontur lingkaran, setiap aksis juga harus diuji menggunakan sinyal masukan sinus untuk mengetahui kemampuan motor servo ac saat tracking sinyal masukan yang berubah-ubah. Hasil pengujian dengan sinyal sinus ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal Sinus

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan sinus diperoleh 2.4234.

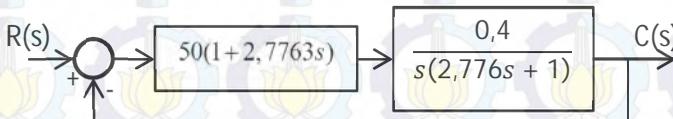


Gambar 4.7. Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal Sinus

Performansi yang ditunjukkan dari pengujian yang dilakukan mulai dari pemberian sinyal *step*, *ramp*, dan sinus, menunjukkan sistem masih memerlukan perbaikan dalam hal kecepatan respon dan akurasi terhadap referensi. Sehingga perlu ditambahkan kontroler pada sistem motor servo ac sebagai penggerak aksis mesin CNC *Milling* yang akan dijelaskan pada subbab pengujian berikutnya.

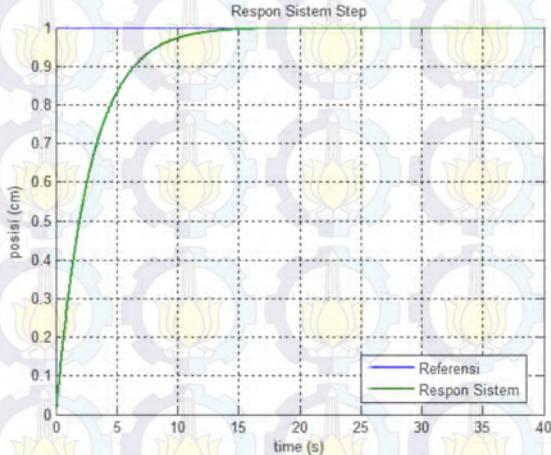
4.2.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD

Diagram blok sistem kontrol PD pada motor servo ac ditunjukkan pada Gambar 4.8.

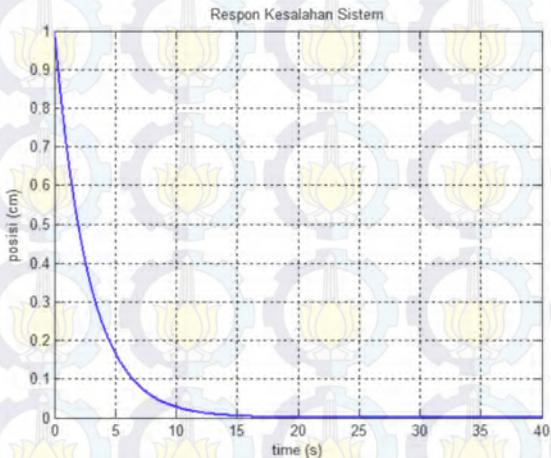


Gambar 4.8. Diagram Blok Pengaturan Motor Servo Ac dengan Kontroler PD

Dari diagram blok di atas diperoleh respon keluaran sistem dengan masukan *step* ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.10,



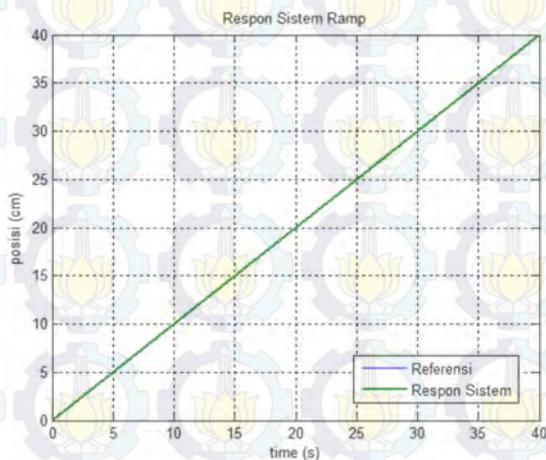
Gambar 4.9. Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Step*



Gambar 4.10, Respon Kesalahan Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Step*

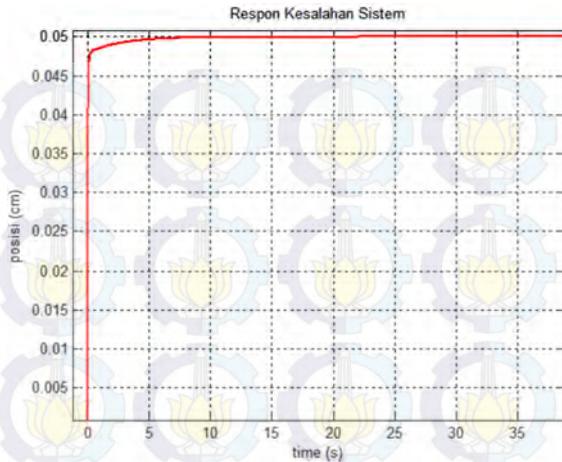
Berdasarkan Gambar 4.9 diketahui bahwa nilai yang diperoleh saat kondisi sinyal mencapai 63.2% adalah 2.8 detik sehingga diperoleh nilai $\tau = 2.8$ detik, nilai $\tau_s(\pm 5\%) \approx 3\tau \approx 8.4$ detik, dengan $\tau_r(5\% - 95\%) \approx 8.31$ detik. Dari sinyal kesalahan juga dapat dilihat bahwa sistem mulai mencapai kondisi yang konstan mendekati nol pada waktu mendekati 14 detik. Hal ini menunjukkan bahwa performansi dari sistem lebih baik dari sebelumnya dengan waktu kesalahan untuk menuju nol dua kali lebih cepat. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *step* diperoleh 0,1967.

Sistem motor servo ac juga diuji dengan sinyal masukan *ramp* dengan hasil respon keluaran sistem ditunjukkan gambar 4.11. Dari gambar hasil respon keluaran diperoleh bahwa respon keluaran sistem mendekati sinyal referensi. Hal ini membuktikan sistem motor servo ac jika ditambahkan kontroler PD untuk pengaturan posisi dengan sinyal masukan *ramp*, dapat menghasilkan respon yang sesuai dengan sinyal referensi. Pengujian menggunakan sinyal *ramp* akan mewakili pembentukan kontur linier yang biasa digunakan dalam mesin CNC *Milling*.



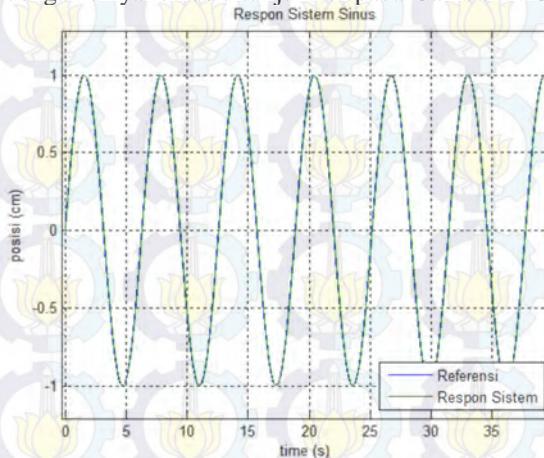
Gambar 4.11. Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Ramp*

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.12. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *ramp* diperoleh 0,0497.



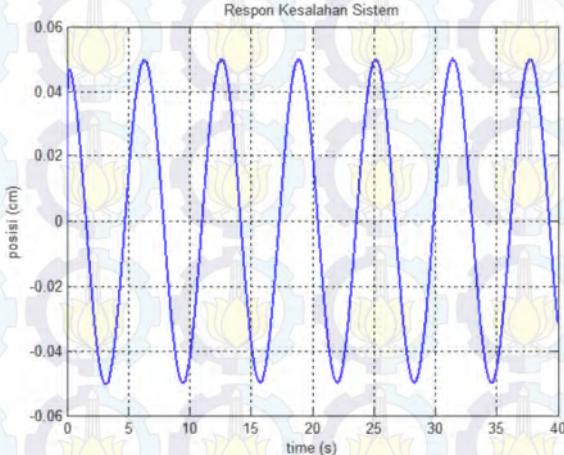
Gambar 4.12. Respon Kesalahan Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Ramp*

Untuk pembentukan kontur lingkaran, setiap aksis juga harus diuji menggunakan sinyal masukan sinus untuk mengetahui kemampuan motor servo ac saat tracking sinyal masukan yang berubah-ubah. Hasil pengujian dengan sinyal sinus ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal Sinus

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.14. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan kontroler PD dan masukan sinus diperoleh 0,0350,



Gambar 4.14. Respon Kesalahan Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal Sinus

Performansi yang ditunjukkan dari pengujian yang dilakukan mulai dari pemberian sinyal *step*, *ramp*, dan sinus, menunjukkan sistem sudah lebih baik dalam hal kecepatan respon dan akurasi terhadap referensi dari pada tanpa kontroler.

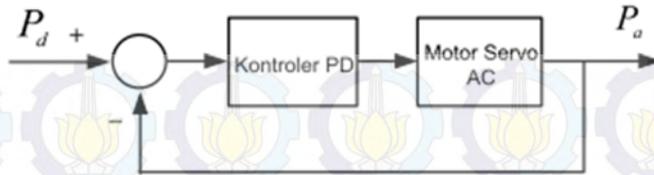
4.3. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis Menggunakan Kontroler PD

Pada sistem motor servo ac untuk aksis-X dan aksis-Y diberikan kontroler yang sama. Parameter kontroler yang digunakan adalah parameter yang didapatkan pada perancangan kontroler aksis pada subbab sebelumnya, yaitu :

$$K_p=50$$

$$\tau_d=2.7763$$

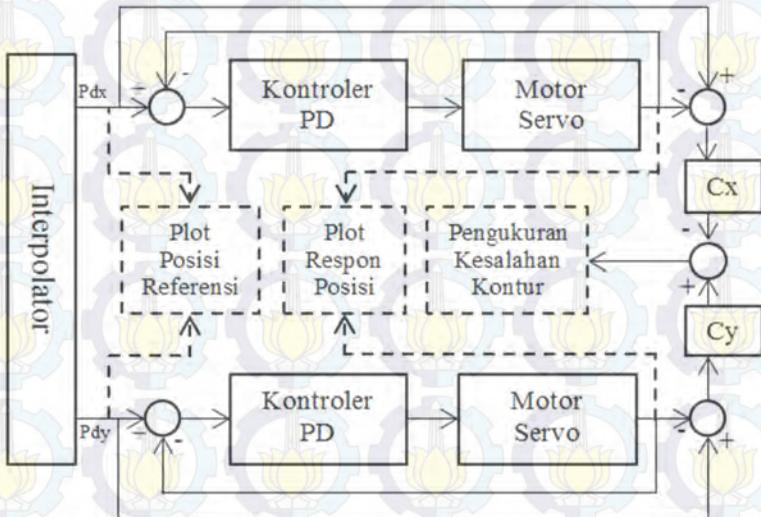
Diagram blok sistem kontrol untuk setiap aksis-X dan aksis-Y dapat dilihat pada Gambar 4.15, dimana sinyal masukan adalah posisi referensi setiap aksis (P_d) dan keluarannya adalah posisi aktual yang dihasilkan setiap aksis (P_a).



Gambar 4.15. Diagram Blok Sistem Kontrol Untuk Aksis-X dan Aksis-Y Menggunakan Kontroler PD

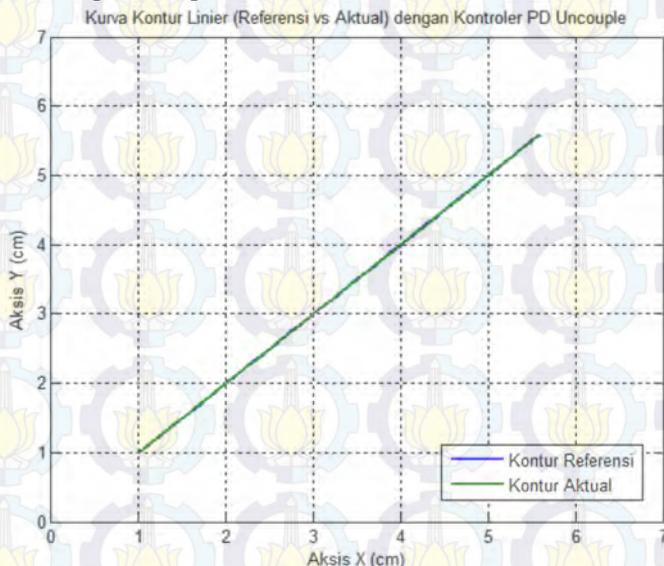
Untuk proses pembentukan kontur linier dibutuhkan sinyal masukan berupa sinyal dengan fungsi garis miring linier dengan kemiringan tertentu untuk sinyal masukan tiap aksis. Dari pergerakan tiap aksis dapat menghasilkan suatu kontur linier dengan titik awal dan titik akhir yang diinginkan. Pada pengujian ini digunakan kontur linier dengan titik awal (1,1) dan titik target (5,5) dengan *cutting speed* 0,1cm/s. Dari penentuan titik awal dan titik target tersebut akan menghasilkan kontur linier dengan gradien 1 dan sudut yang dibentuk garis terhadap aksis X adalah 45° .

Selanjutnya diagram blok pengujian pertama ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon aksis saat mengikuti kontur referensi.



Gambar 4.16. Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD

Dapat dilihat pada diagram blok pengujian di atas, titik – titik pengukuran ditunjukkan dengan garis merah dan blok merah sebagai proses pengambilan data. Untuk gambar diagram blok secara detail dapat dilihat pada lampiran C.

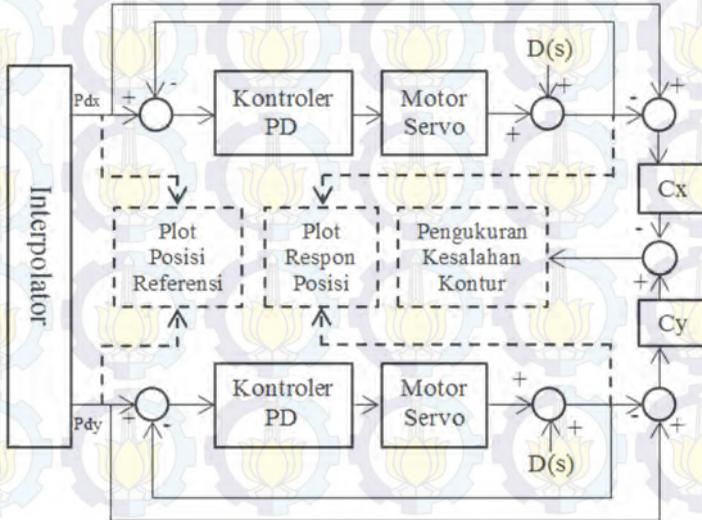


Gambar 4.17. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple*

Terlihat pada Gambar 4.17 bahwa dengan kontroler PD pada tiap aksis, hasil respon *tracking* tiap aksis sudah dapat mencapai sinyal kontur referensi. Hal ini disebabkan karena respon motor servo ac setelah ditambahkan kontroler adalah orde pertama tanpa kesalahan *steady state*. Kontur aktual tampak mengikuti kontur referensi dan dapat dilihat kesalahan kontur hampir mendekati nol. Akan tetapi, sistem juga perlu diuji dengan pemberian beban untuk mengetahui kemampuan dari sistem saat proses pembentukan benda kerja. Begitu juga kemampuan dalam *tracking* kontur yang sangat dipengaruhi oleh hasil respon *tracking* posisi tiap aksis, sehingga dapat diartikan bahwa sistem masih bekerja secara individu yang bergantung pada tiap aksis dan belum ada mekanisme sinkronisasi tiap aksis. Untuk pengujian menggunakan

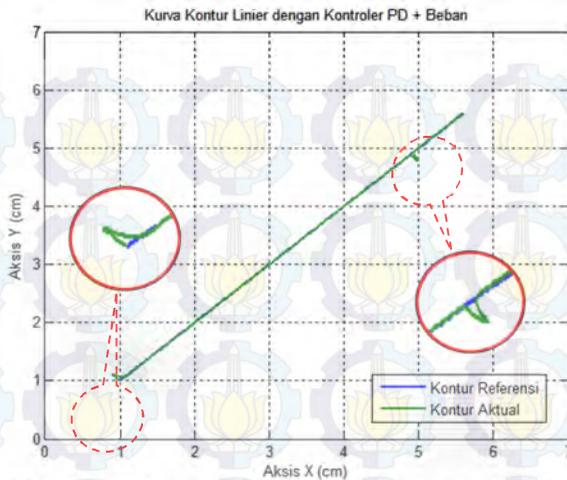
metode dengan mekanisme sinkronisasi antar aksis akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengetahui kontur saat posisi tiap aksis diberi beban yang merepresentasikan proses saat mata pahat menyentuh benda kerja dan saat mata pahat lepas dari benda kerja. Diagram blok pengujian dengan pembebanan ditunjukkan pada gambar 4.18.



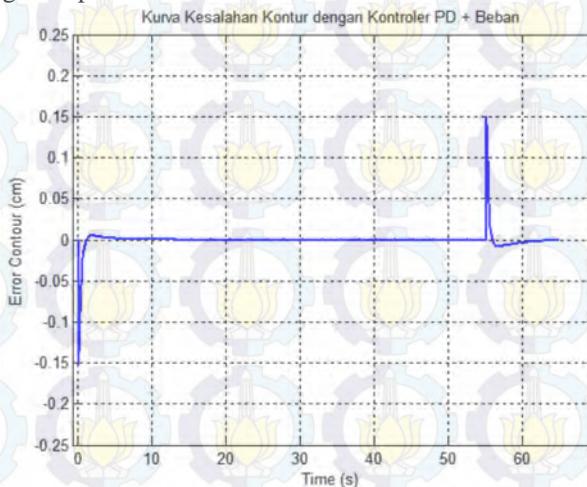
Gambar 4.18. Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD Ditambah Gangguan

Terlihat pada diagram blok di atas bahwa gangguan diberikan berupa pergeseran posisi aksis-X dan aksis-Y pada waktu ke-0 sampai 55 detik. Gangguan pembebanan diberikan pada output posisi aktual dari motor servo ac tiap aksis. Pembebanan yang diberikan berupa pergeseran posisi dengan menambahkan jarak dari posisi yang dihasilkan tiap aksis. Kurva kontur linier yang dibentuk dapat diamati pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple* Ditambah Pembebanan

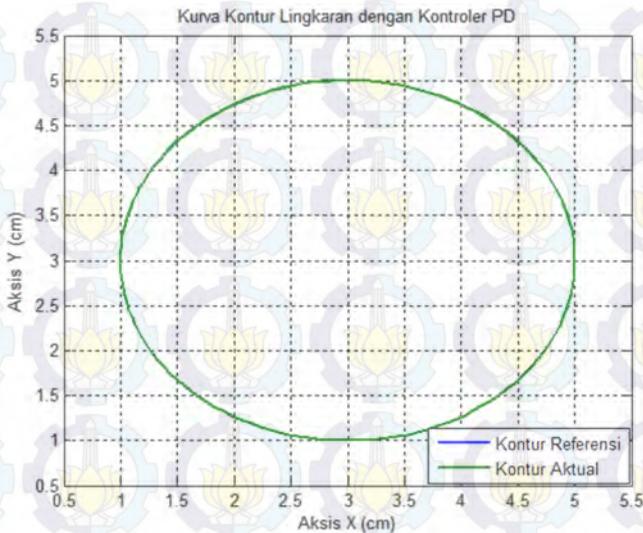
Kontur linier yang dibentuk juga dapat diamati bahwa terjadi kesalahan kontur saat diberikan beban yang ditunjukkan pada Gambar 4.20 yang merupakan kurva kesalahan kontur.



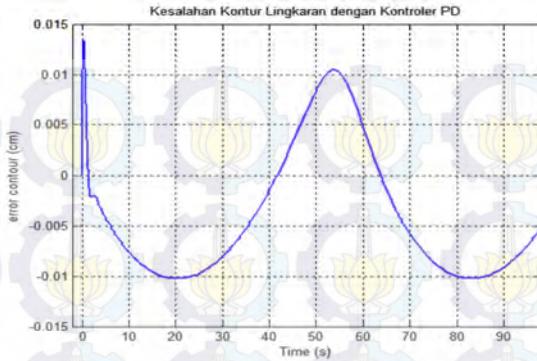
Gambar 4.20, Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple* Ditambah Pembebanan

Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,15 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi sehingga kesalahan kontur perlahan mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis sehingga kesalahan *tracking* pada aksis dapat direduksi. Akan tetapi, sistem masih bekerja secara individu yang bergantung pada tiap aksis dan belum ada mekanisme sinkronisasi tiap aksis. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PD pada kontur linier ditambah pembebanan adalah 0,0293.

Sistem dengan kontroler PD juga diuji untuk membentuk kontur lingkaran. Pembentukan kontur lingkaran dibutuhkan sinyal masukan untuk dua aksis sehingga dapat membentuk kontur lingkaran. Diagram blok pengujian kontur lingkaran sama dengan kontur linier pada pengujian sebelumnya. Yang membedakan adalah pada blok interpolator yang diganti dengan interpolator untuk kontur lingkaran. Pada pengujian kali ini digunakan kontur lingkaran dengan jari-jari 2 cm, titik pusat lingkaran XY (3,3), *cutting speed* 0,1 cm/s, dan sudut awal 180°. Hasil kontur yang dibentuk dapat dilihat pada Gambar 4.21. dan kurva kesalahan kontur dapat juga dilihat pada Gambar 4.22.

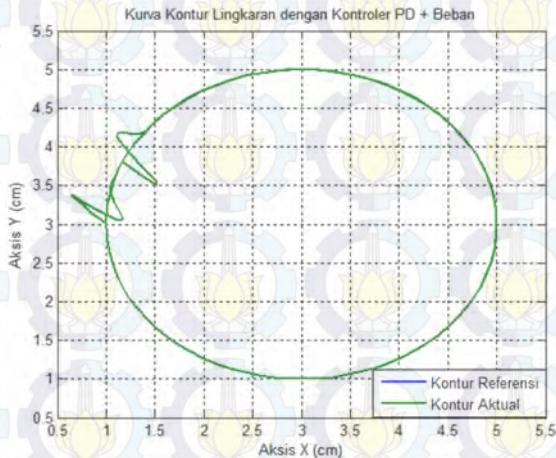


Gambar 4.21. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple*

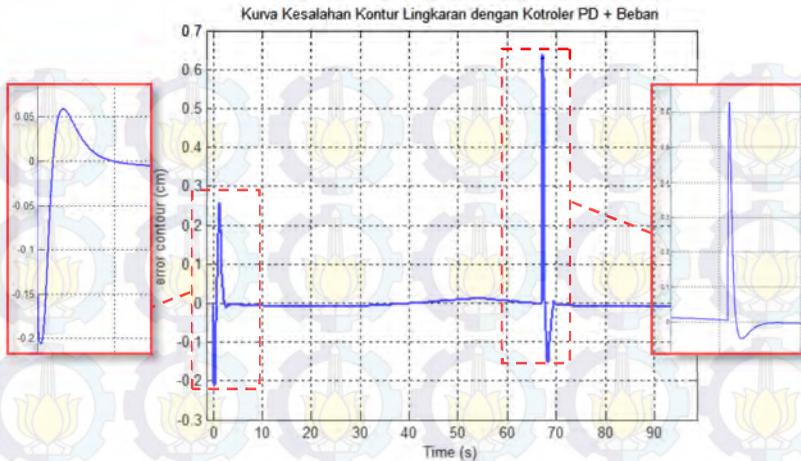


Gambar 4.22. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple*

Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum saat *tracking* kontur lingkaran mencapai 0,01 cm. Masih relatif kecil karena saat pembentukan kontur sistem masih belum ditambahkan pembebanan. Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan beban sebagai representasi dari proses saat mata pahat menyentuh benda kerja. Kurva kontur lingkaran yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan kurva kesalahan kontur dapat juga dilihat pada Gambar 4.24.



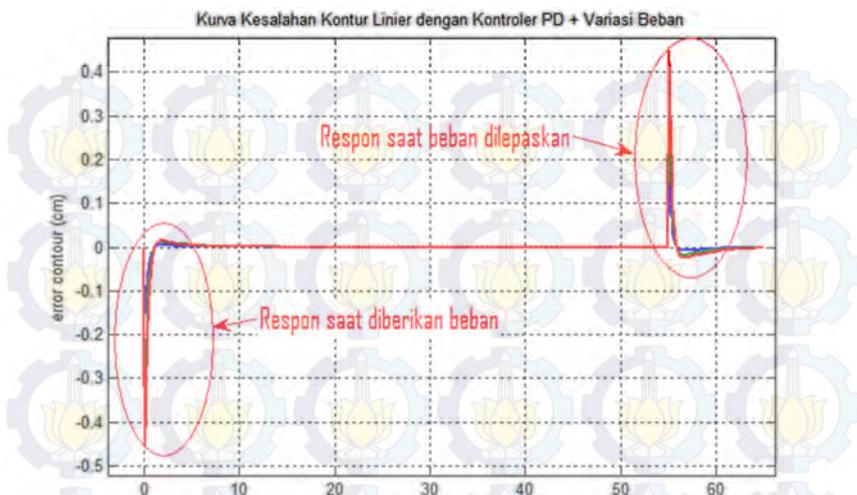
Gambar 4.23. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple* Ditambah Pembebanan



Gambar 4.24. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple* Dengan Beban

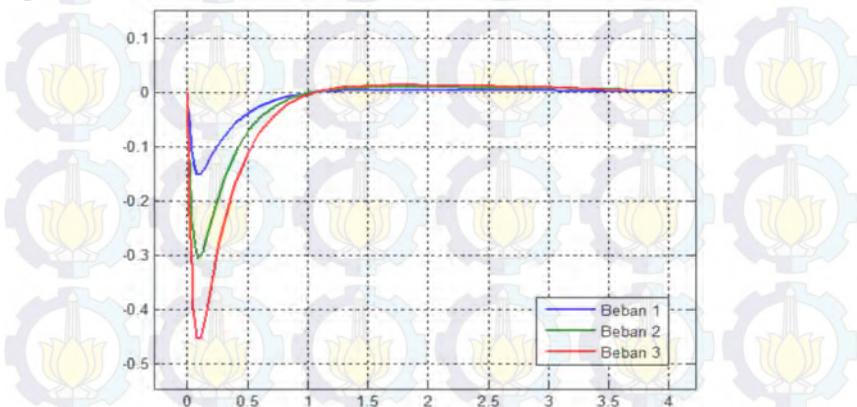
Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,6 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi sehingga kesalahan kontur perlahan mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis sehingga kesalahan *tracking* pada aksis dapat direduksi. Akan tetapi, sistem masih bekerja secara individu yang bergantung pada tiap aksis dan belum ada mekanisme sinkronisasi tiap aksis. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PD pada kontur lingkaran ditambah pembebanan adalah 0,0976.

Pengujian dengan kontroler PD ditambah pembebanan juga dilakukan dengan variasi kondisi beban seperti dijelaskan pada gambaran umum pengujian sistem. Dengan variasi beban dapat diamati berdasarkan kesalahan kontur pada semua kondisi beban didapat perbandingan seperti pada Gambar 4.25 dan 4.28. Kesalahan kontur yang terjadi semakin besar dengan penambahan beban yang semakin besar pula. Akan tetapi, pada akhirnya kesalahan dapat diminimalkan. Nilai RMSE dari pengujian dengan variasi beban adalah kontur linier dengan beban 1 sebesar 0,0293, dengan beban 2 sebesar 0,0586, dan dengan beban 3 sebesar 0,0879. sedangkan untuk kontur lingkaran dengan beban 1 sebesar 0,0976, dengan beban 2 sebesar 0,2333, dan dengan beban 3 sebesar 0,4358.

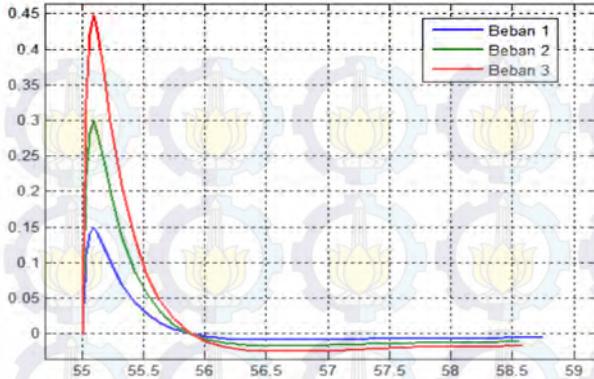


Gambar 4.25. Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem Dengan Kontroler PD *Uncouple* Dengan Variasi Beban

Dari hasil pengujian dengan variasi beban kontur linier pada Gambar 4.25 dapat diperjelas untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.27.

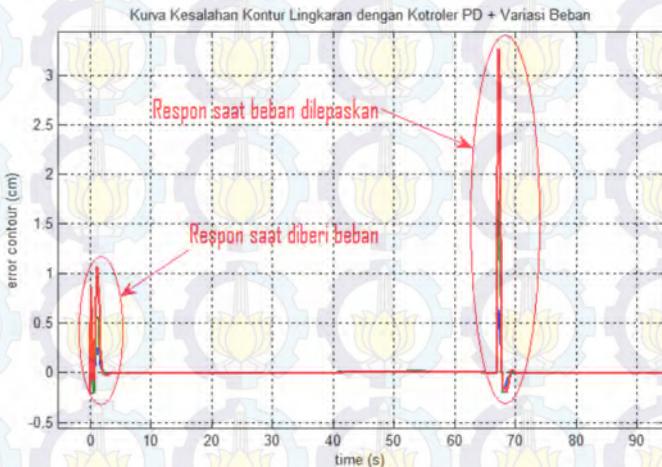


Gambar 4.26. Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Ditambah Beban

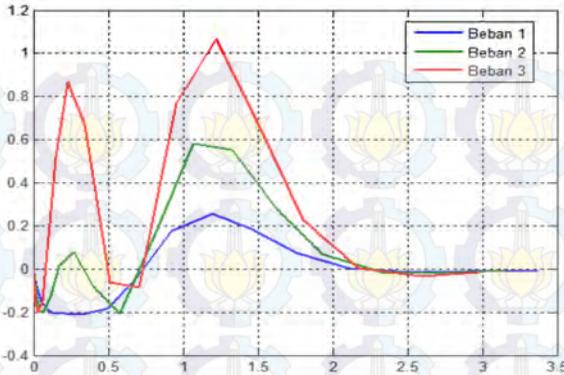


Gambar 4.27. Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Beban Dilepaskan

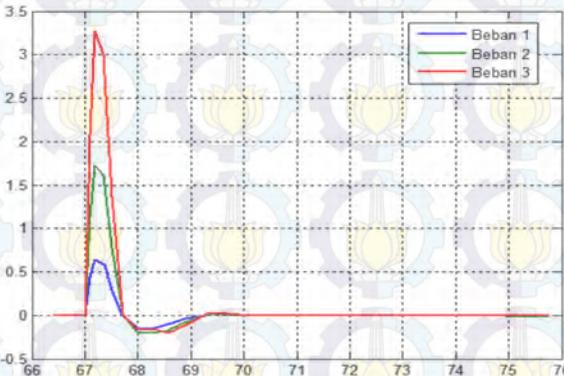
Selanjutnya pengujian variasi beban pada kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.28. Untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.29 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.30,



Gambar 4.28. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple* Dengan Variasi Beban



Gambar 4.29. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Ditambah Beban

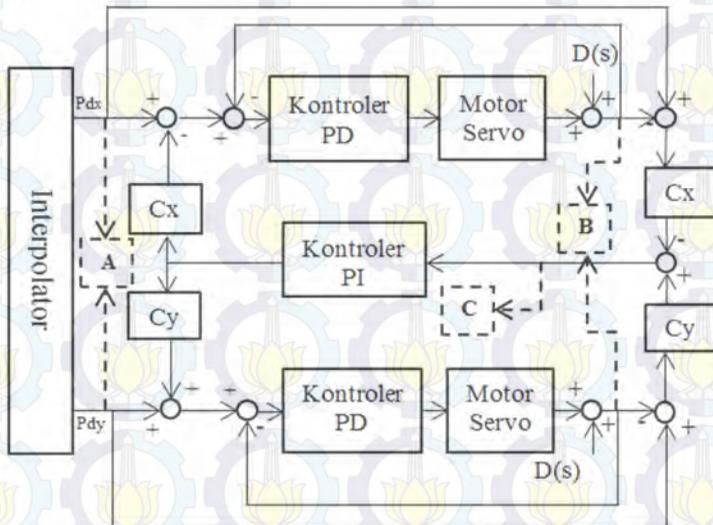


Gambar 4.30, Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Beban Dilepaskan

Pengujian dengan kontroler PD pada tiap aksis dapat disimpulkan bahwa respon tiap aksis dapat melakukan *tracking* kontur sesuai dengan kontur referensi. Akan tetapi hasil kesalahan kontur masih besar karena sistem bekerja secara terpisah tanpa sinkronisasi antar aksis sehingga kesalahan kontur dipengaruhi oleh kesalahan *tracking* tiap aksis. Pada saat *tracking* kontur tanpa beban, hasil respon sistem tampak tidak ada overshoot. Hal ini disebabkan karena respon tiap aksis setelah diberikan kontroler PD. Sehingga karakteristik respon tiap aksis menjadi respon orde pertama tanpa *error steady state*.

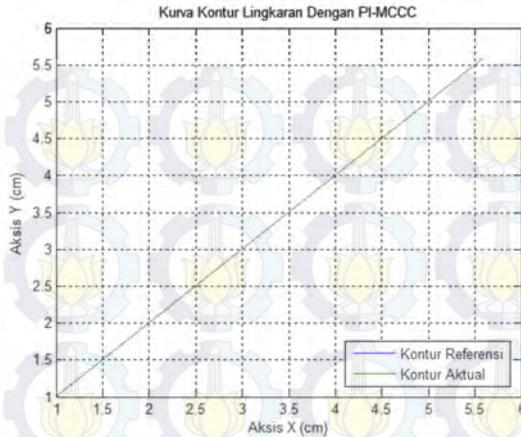
4.4. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis dengan PI Modified Cross-Coupled Control

Pada pengujian kali ini, digunakan metode *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross Couple Controller*. Pengujian dilakukan pada pembentukan kontur linier dan lingkaran dengan pemberian beban yang bervariasi pada tiap aksis untuk mengetahui respon dari sistem. Selanjutnya diagram blok pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.31. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon kesalahan kontur yang terjadi saat proses pembentukan kontur.



Gambar 4.31. Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PI-MCCC

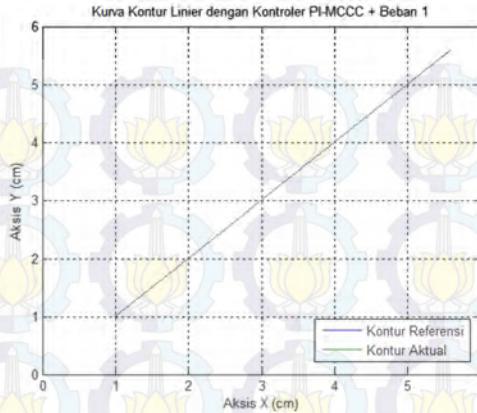
Dapat dilihat pada gambar diagram blok, terdapat titik-titik pengujian saat sistem dioperasikan, yaitu blok A untuk pengukuran kontur referensi, blok B untuk pengukuran kontur aktual tiap aksis dan blok C untuk pengukuran kesalahan kontur. Pengujian pertama dilakukan pada proses pembentukan kontur linier tanpa pemberian beban. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC

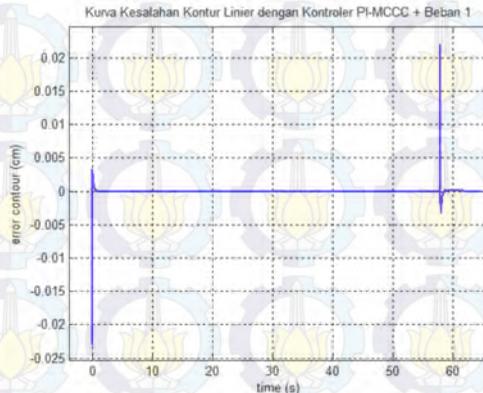
Dapat dilihat pada Gambar 4.32 bahwa dengan kontroler PI pada *Cross-Couple Controller*, hasil respon *tracking* kontur dapat mencapai sinyal kontur referensi. Hal ini disebabkan karena respon kesalahan motor servo ac tiap aksis dapat direduksi oleh mekanisme kontrol *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller*. Kontur aktual tampak mengikuti kontur referensi dan dapat dilihat kesalahan kontur hampir mendekati nol. Akan tetapi, sistem juga perlu diuji dengan pemberian beban untuk mengetahui kemampuan dari sistem saat proses pembentukan benda kerja. Begitu juga kemampuan dalam *tracking* kontur yang sangat dipengaruhi oleh hasil respon *tracking* posisi tiap aksis dan pengaruh kontroler PI dalam melakukan sinkronisasi antar aksis. Sehingga, dapat diartikan bahwa sistem sudah bekerja secara bersamaan karena terdapat mekanisme sinkronisasi tiap aksis.

Pengujian berikutnya dengan melakukan pembentukan kontur linier dengan pemberian beban 1 yaitu perubahan posisi aktual tiap aksis sebesar 1 cm. Hasil kontur yang diperoleh dengan beban 1 ditunjukkan pada Gambar 4.33. Dari gambar tersebut pengaruh penambahan nilai beban mempengaruhi kesalahan konturnya.



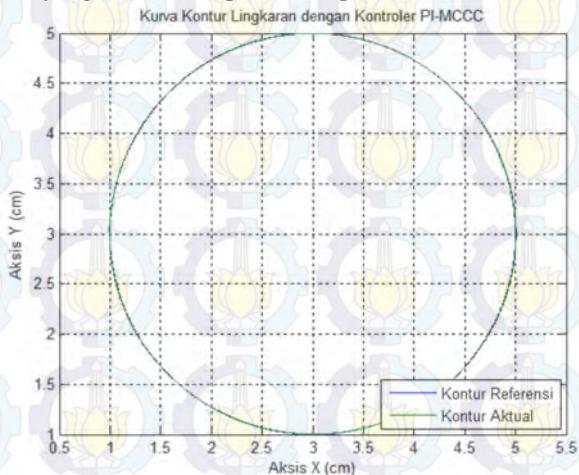
Gambar 4.33. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1

Kurva kesalahan kontur yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.34. Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,02 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi dengan cepat sehingga kesalahan kontur mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis dan mekanisme sinkronisasi tiap aksis dengan kontroler PI sehingga kesalahan *tracking* kontur dapat direduksi. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PI-MCCC pada kontur linier ditambah beban 1 adalah 0,000872.

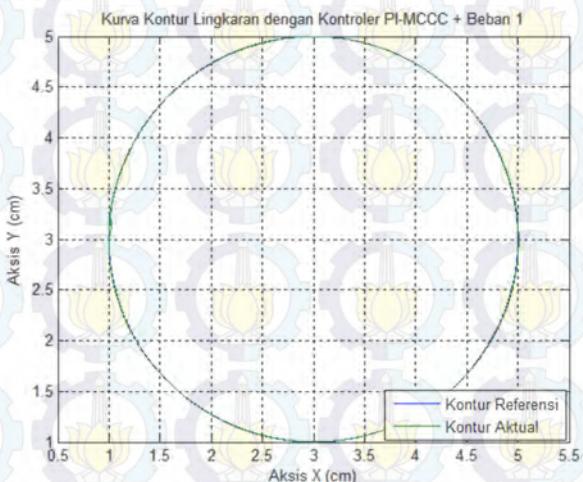


Gambar 4.34. Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1

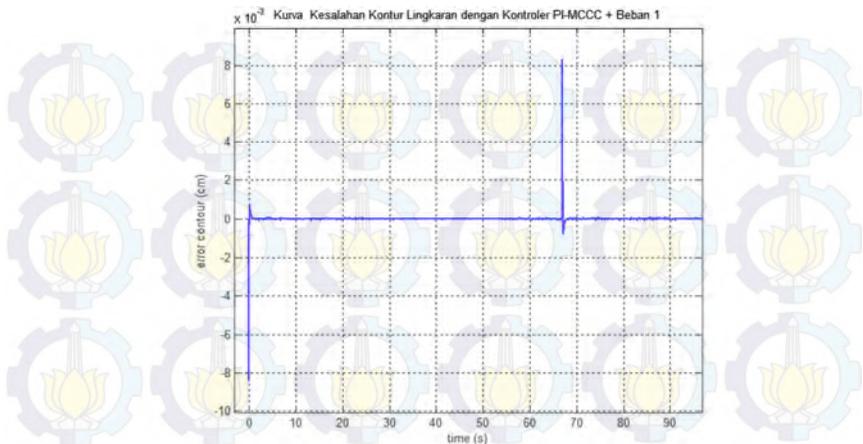
Sistem dengan kontroler PI-MCCC juga diuji untuk membentuk kontur lingkaran. Digunakan kontur lingkaran dengan jari-jari 2 cm, titik pusat lingkaran XY (3,3), *cutting speed* 0,1 cm/s, dan sudut awal 180°. Hasil kontur yang dibentuk dapat dilihat pada Gambar 4.35.



Gambar 4.35. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC



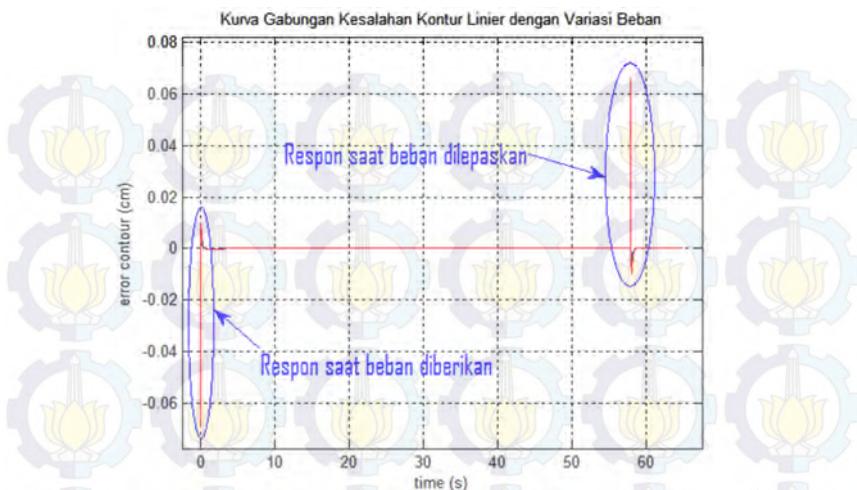
Gambar 4.36. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1



Gambar 4.37. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1

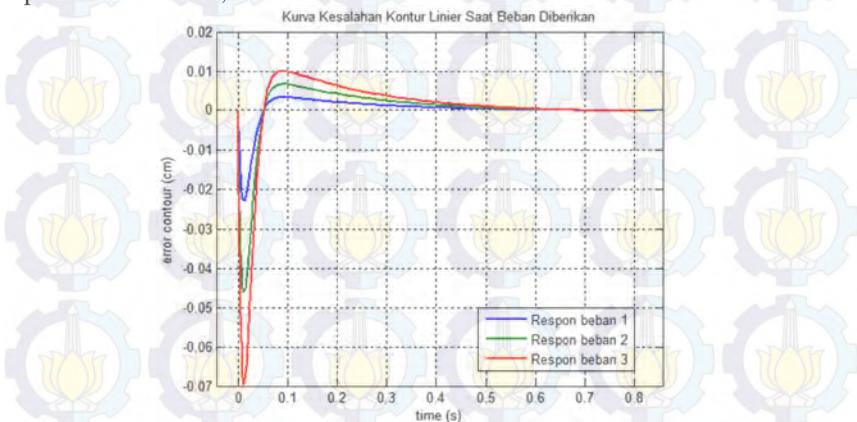
Kurva kesalahan kontur yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.37. Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,008 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi dengan cepat sehingga kesalahan kontur mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis dan mekanisme sinkronisasi tiap aksis dengan kontroler PI sehingga kesalahan *tracking* kontur dapat direduksi. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PI-MCCC pada kontur lingkaran ditambah beban 1 adalah 0,00036.

Pengujian dengan kontroler PI-MCCC ditambah pembebanan juga dilakukan dengan variasi kondisi beban. Dengan variasi beban dapat diamati berdasarkan kesalahan kontur pada semua kondisi beban didapat perbandingan seperti pada Gambar 4.38 dan 4.41. Kesalahan kontur yang terjadi semakin besar dengan penambahan beban yang semakin besar pula. Akan tetapi, pada akhirnya kesalahan dapat diminimalkan. Nilai RMSE dari pengujian dengan variasi beban adalah kontur linier dengan beban 1 sebesar 0,000872, dengan beban 2 sebesar 0,0019, dan dengan beban 3 sebesar 0,0028. sedangkan untuk kontur lingkaran dengan beban 1 sebesar 0,00036, dengan beban 2 sebesar 0,00074, dan dengan beban 3 sebesar 0,0011.

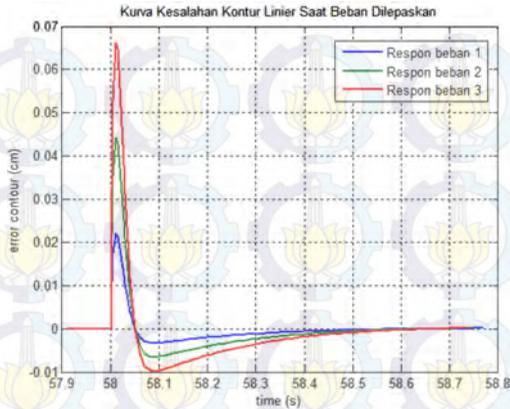


Gambar 4.38. Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban

Dari hasil pengujian dengan variasi beban kontur linier pada Gambar 4.38 dapat diperjelas untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.39 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.40,



Gambar 4.39. Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban



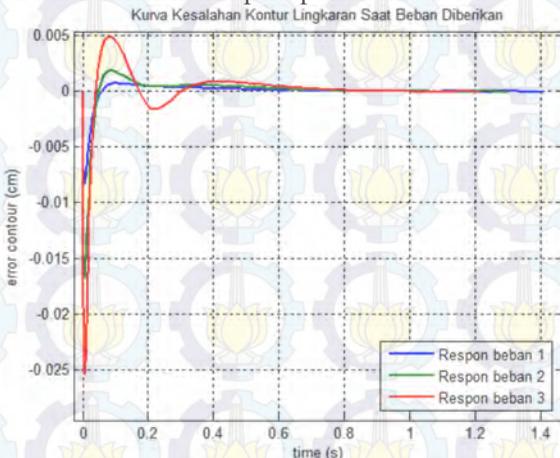
Gambar 4.40. Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan

Selanjutnya pengujian variasi beban pada kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.41.

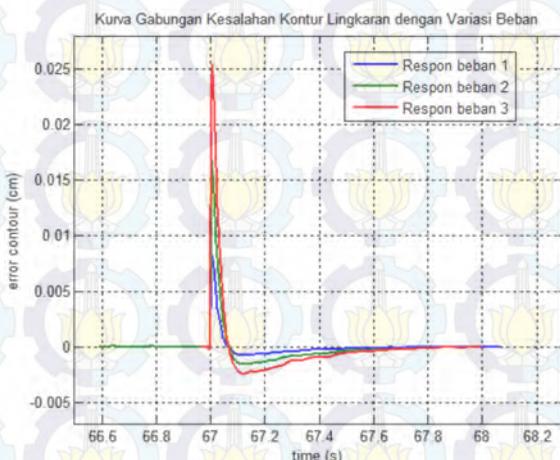


Gambar 4.41. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban

Untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.42 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.43.



Gambar 4.42. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban



Gambar 4.43. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan

Untuk melakukan perbandingan performansi antara metode kontrol *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI dan metode kontrol terpisah dengan kontroler PD, digunakan perhitungan RMSE yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai RMSE Pengujian dengan Variasi Beban Dan Metode Kontrol

Kontur	Beban	Kontrol PD	Kontrol PI-MCCC
Linier	1 (1 cm)	0,0293	0,0008
	2 (2 cm)	0,0586	0,0019
	3 (3 cm)	0,0879	0,0028
Lingkaran	1 (1 cm)	0,0976	0,0004
	2 (2 cm)	0,2333	0,0007
	3 (3 cm)	0,4358	0,0011

Dari tabel 4.1 tersebut, dapat terlihat bahwa metode *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI memiliki nilai RMSE yang paling kecil dalam berbagai kondisi pengujian dengan variasi pembebanan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Koren, Y, “*Cross Coupled Biaxal Computer Control for Manufacturing Systems*”, *Trans ASME J. Dynamic Syst., Meas., Contr.* Vol 102 pp. 265-272, 1980.
- [2] Koren, Y, “*Variable-gain cross-coupling controller for contouring*”, *Proc, Ann. CIRP.* vol. 40. pp. 371–374, 1991.
- [3] Y.T.Shih, dkk, “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-axis Motion. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42*”, pp 1539-1548, 2002.
- [4] M.Vijayakarthick dan P.K.Bhaba, “*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*”, *IJRRAS* Vol 10. pp 119-128, 2014.
- [5] Jianren SUN dan Chibing HU, “*Research on Modeling of Contour Error for Motion Control Sstem of CNC Machine*”, pp 1553 – 1556, 2011.
- [6] Ogata, K., “*Modern Control Engineering 8th ed*”, Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 1997.
- [7] HSMWorks, “*CNC Handbook*” [Online Handbook]. <<http://www.hsmworks.com/docs/cncbook/en/>>, 2012.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

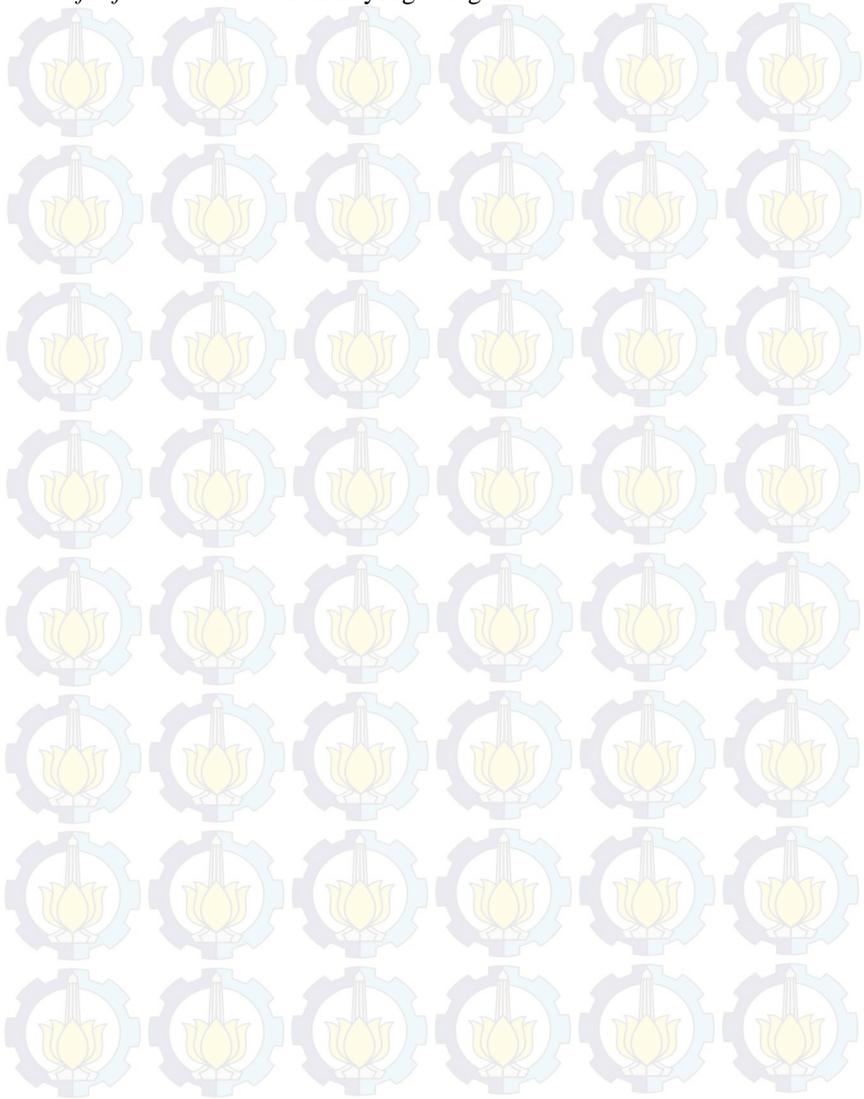
Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Kesalahan kontur yang dipengaruhi perubahan beban pada tiap aksis mesin CNC dalam melakukan *tracking* kontur dan sinkronisasi kontrol antar aksis dapat dikompensasi dengan menggunakan metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller*.
2. Pada pengujian dengan variasi nilai beban, metode *Modified Cross Coupled Control* mampu melakukan *tracking* dengan baik pada saat diberikan gangguan dengan variasi beban berupa perubahan posisi sebesar 1 cm, 2 cm, dan 3 cm dengan nilai RMSE yang dihasilkan lebih kecil dari toleransi kesalahan sebesar 0,3 cm.
3. Untuk pembentukan kontur linier dengan penambahan beban, dengan menggunakan kontrol aksis secara terpisah didapat nilai RMSE sebesar 0.0879, sistem dengan PI-MCCC menghasilkan nilai RMSE sebesar 0.0028, hal ini membuktikan bahwa terjadi peningkatan performa sistem terhadap beban.
4. Metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* mampu melakukan *tracking* kontur dengan lebih baik jika dibandingkan dengan metode kontrol aksis secara terpisah.

5.2. Saran

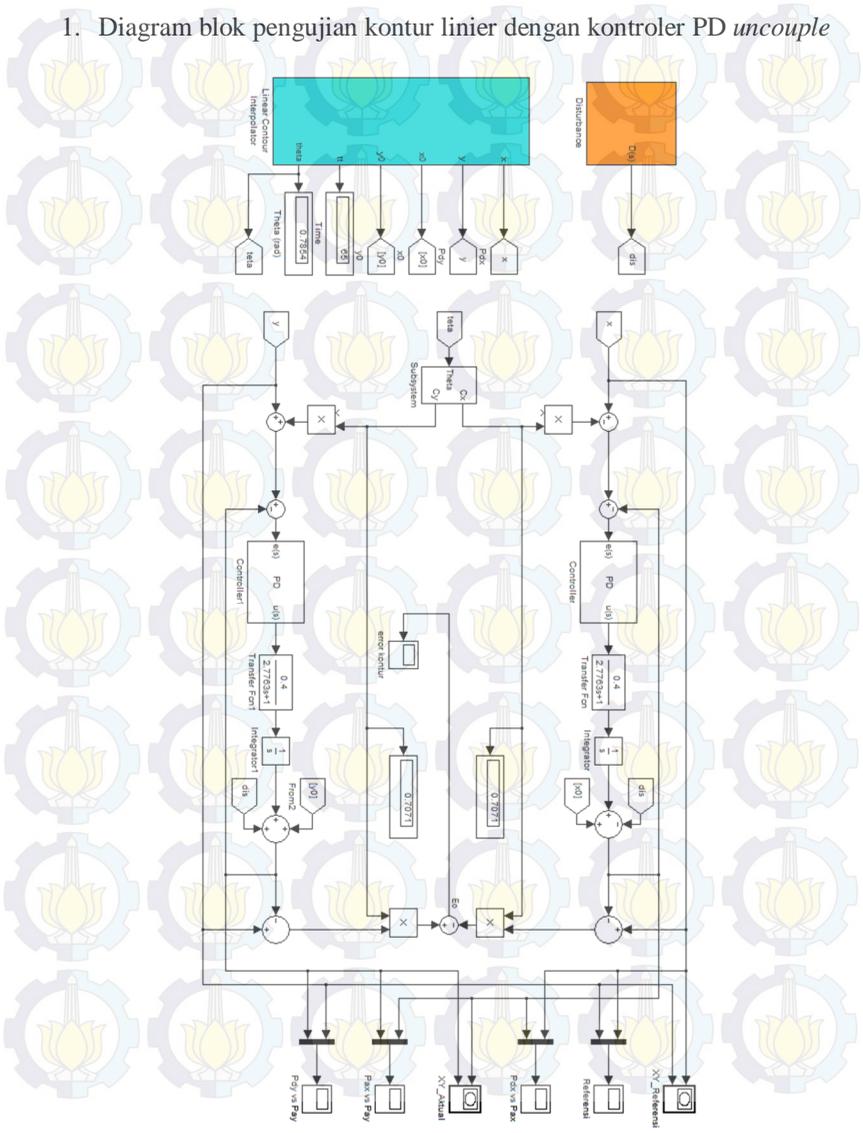
Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian dari tugas akhir pengaturan mesin CNC *Milling* dengan menggunakan *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* ini dapat dirumuskan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya. Rekomendasinya yaitu saat pengujian, dilakukan dengan beberapa fungsi alih motor servo ac yang berbeda. Sehingga akan mampu dianalisa dan dikembangkan metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* untuk

meningkatkan akurasi kontur pada berbagai mesin CNC *Milling* dengan *transfer function* aktuator aksis yang beragam.

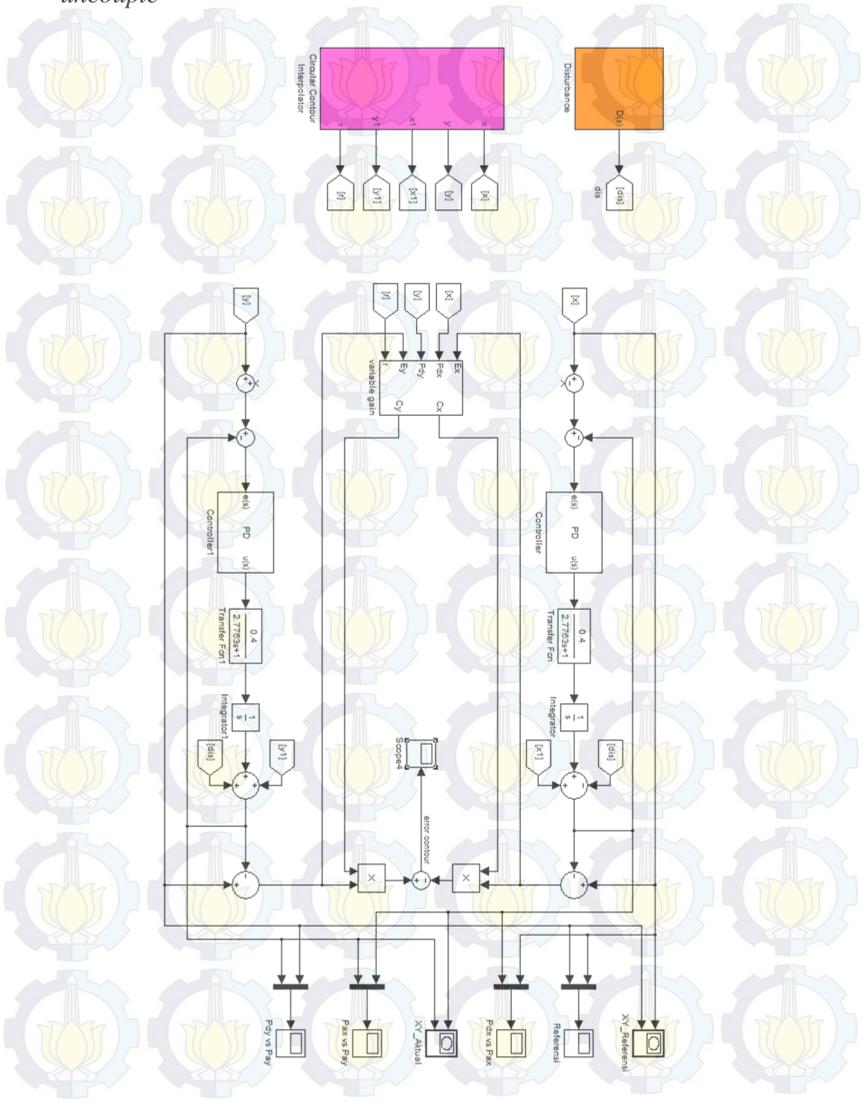


LAMPIRAN A

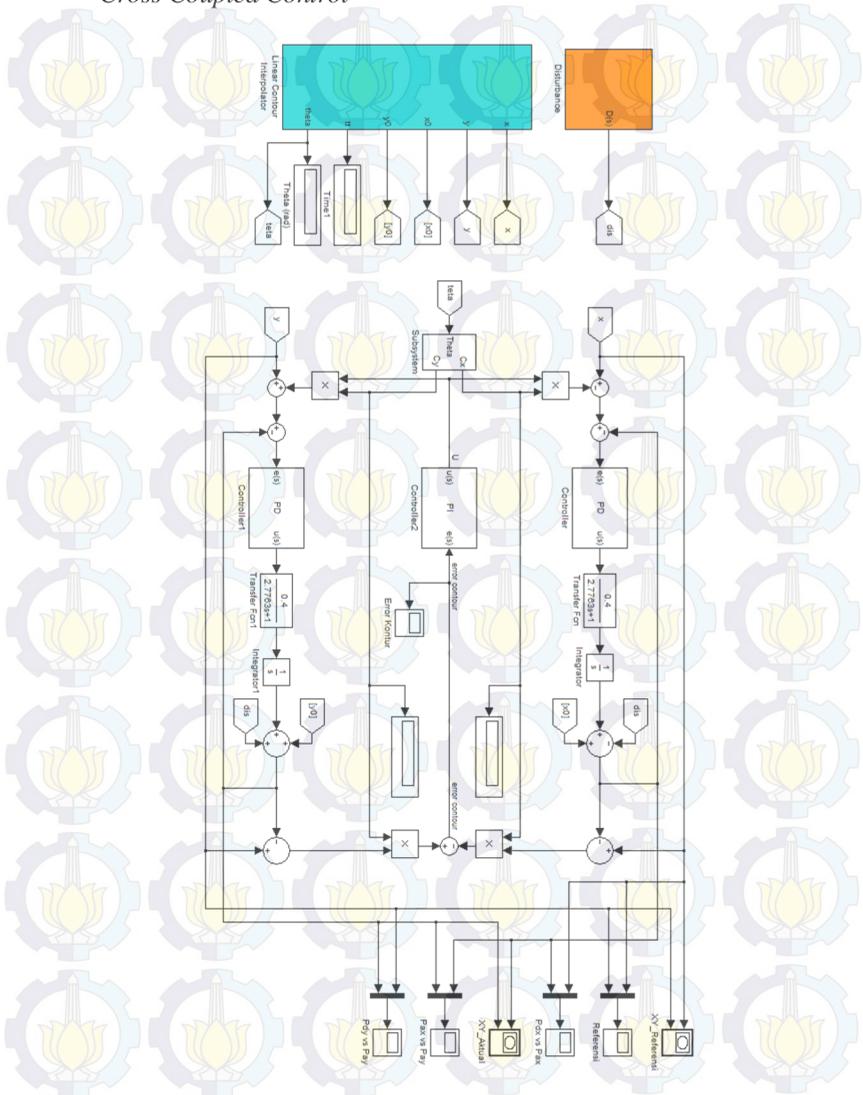
1. Diagram blok pengujian kontrol linier dengan kontroler PD *uncouple*



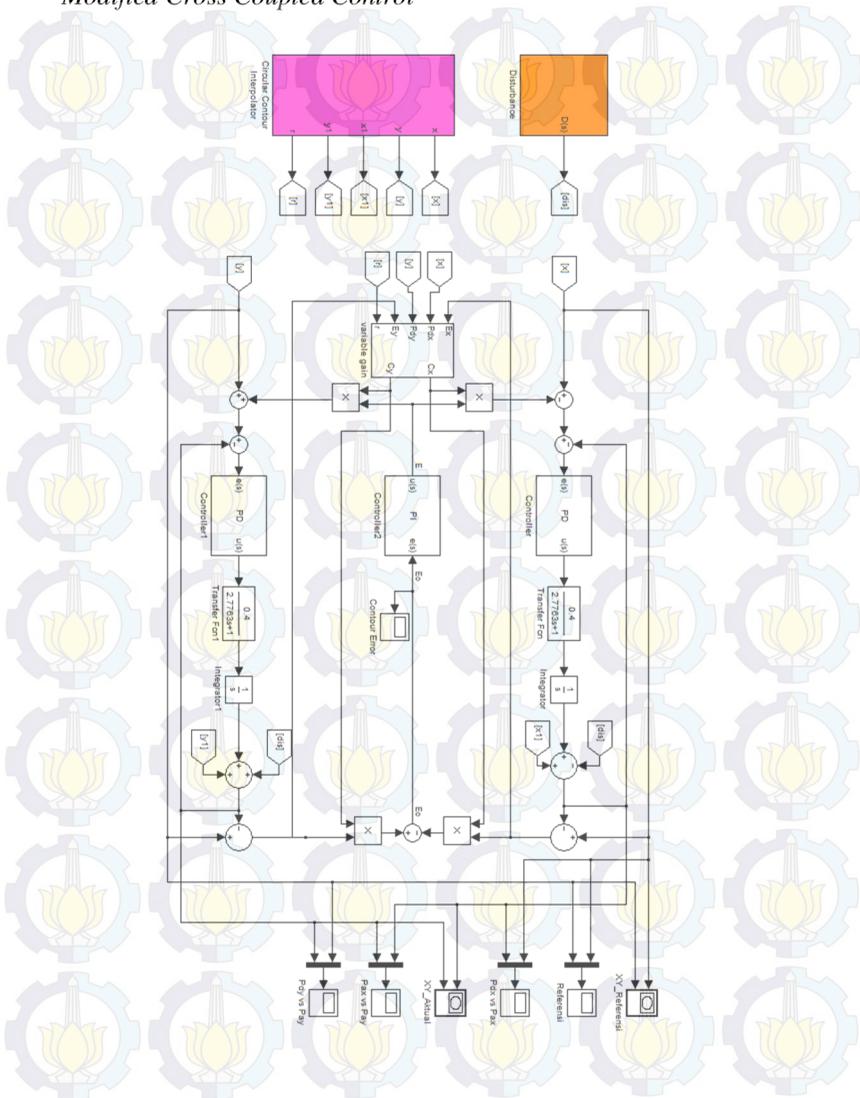
2. Diagram blok pengujian kontur lingkaran dengan kontroler PD *uncouple*



3. Diagram blok pengujian kontur linier dengan kontroler PI-Modified Cross Coupled Control



4. Diagram blok pengujian kontur lingkaran dengan kontroler PI-
Modified Cross Coupled Control



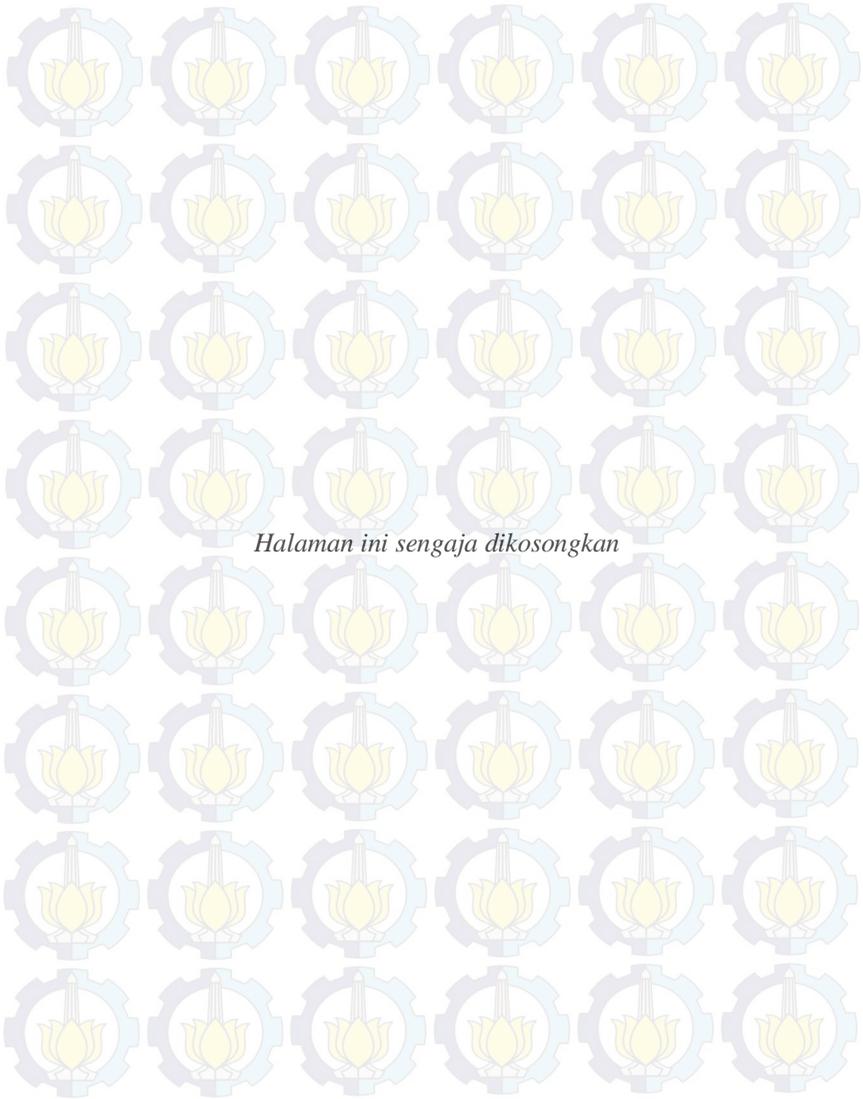
5. Source program interpolator kontur linier

```
function out=lurus(xx)
global theta sudut;
x0=xx(1);
y0=xx(2);
xt=xx(3);
yt=xx(4);
v=xx(5);
tt=xx(6);

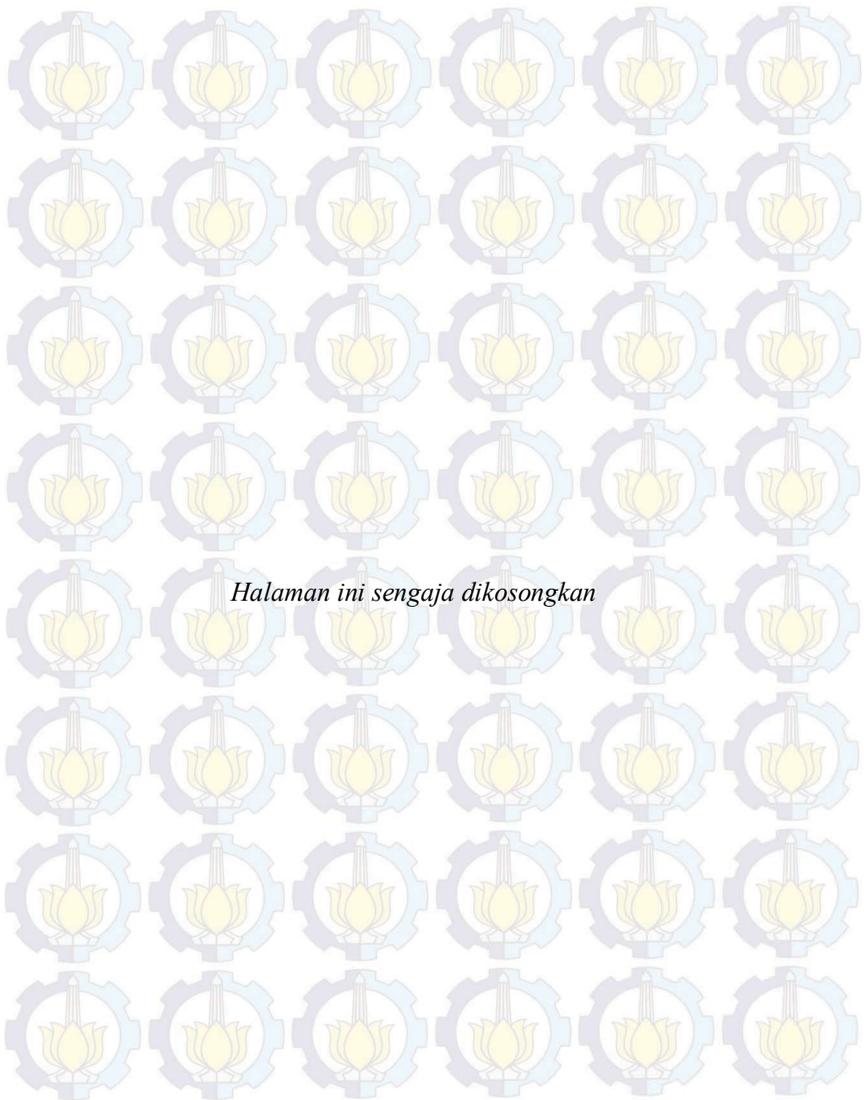
if tt==0;
    theta=atan((yt-y0)/(xt-x0));
end
vx=v*cos(theta);
vy=v*sin(theta);
x=x0+vx*tt;
y=y0+vy*tt;
sudut=rad2deg(theta);
out=[x;y;x0;y0;tt;theta];
```

6. Source program interpolator kontur lingkaran

```
function out=lingkaran(xx)
global r x1 y1;
xc=xx(1);
yc=xx(2);
r=xx(3);
omega=xx(4);
theta0=xx(5);
tt=xx(6);
if tt==0
    x1=xc+r*cos((omega*tt)+theta0);
    y1=yc+r*sin((omega*tt)+theta0);
end
x=xc+r*cos((omega*tt)+theta0);
y=yc+r*sin((omega*tt)+theta0);
out=[x;y;x1;y1;r];
```



Halaman ini sengaja dikosongkan



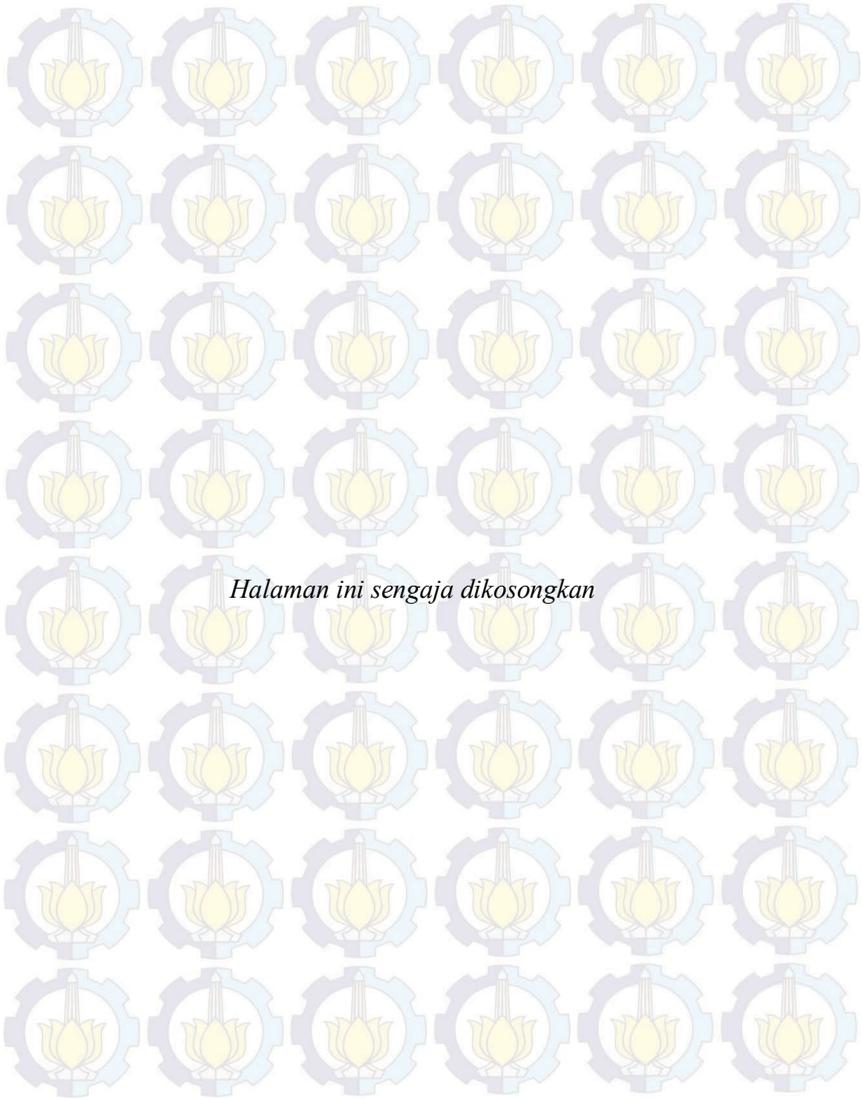
MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL TO IMPROVING ACCURACY OF WORKPIECE MOVEMENT ON CNC MILLING MACHINE

Nama : Muhammad Yanwar Rifki
Advisor I : Ir. Joko Susila, M.T.
Advisor II : Ir. Rusdhianto Effendie A.K, MT.

ABSTRACT

Accuracy of the workpiece movement during the process of contour forming on CNC Milling machines is affected by the movement of each axis. Contour error that may occur due to the inaccuracy of each axis movement when perform contour tracking and also disturbance during the feeding process. One of the ways to reduce contour errors is to synchronize between control system of each axis. Modified Cross-Coupled Control (MCCC) with PI controller as Cross-Couple Controller is proposed in this final project. This method is a modified version of the conventional Cross-Coupled Control. MCCC structure serves to synchronize between each axis. MCCC method consists of a closed loop control system of each axis and Cross-Couple Gain which serves to reduce contour errors by each axis. To reduce the contour error, PD controller is used as the controller of each axis and PI controller as Cross-Couple Gain. Testing in this final project is the simulation of linear and circular contour forming. Root Mean Square Error (RMSE) value obtained in the linear and circular contour forming are minimal 0.0009 and 0.0028 and maximal 0.00036 and 0.0011. The result of testing in this final project shows that the MCCC method with PI controllers, CNC machines can reduce contour errors occur and improve the accuracy of the contour forming.

Keyword : CNC Milling machine, Modified Cross-Coupled Control, PD controller, PI controller.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, karunia, petunjuk, serta kekuatan yang berlimpah tak terhingga yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL UNTUK MENINGKATKAN AKURASI GERAKAN BENDA KERJA PADA CNC MILLING

Tugas Akhir ini ditujukan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi strata-1 di Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya. Segenap terima kasih penulis ucapkan kepada ibu dan ayah tercinta atas segala dukungan moral, materi, semangat, dan doanya yang tak pernah putus untukku. Kepada Bapak Joko Susila dan Bapak Rusdhianto Effendie, selaku dosen pembimbing, yang secara cermat telah membimbing penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Terima kasih luar biasa penulis haturkan kepada kang Asep, Dimas Bambang S., kang Suwondo, Fadli Wardana, Farida Gamar, Marika Ayu P.R., Aditya Rahmat A., bang Setio Bimantoro, Adin Teguh P., mas Kurniawan K., Mentari Madi P., saudara-saudara seperjuangan yang tidak lelah memberikan dukungan yang luar biasa dan pengalaman kejuangan yang tak terlupakan. Sungguh berharga dan luar biasa kehadiran kalian di momen pengerjaan Tugas Akhir ini. Semoga rahmat dan lindungan Allah selalu mengiringi jalan kalian. Terima kasih kepada keluarga besar Laboratorium Teknik Pengaturan B105 yang telah memberikan cerita indah dan pengalaman luar biasa. Terima kasih pada Mentari Madi Pertiwi selaku teman seperjuangan tugas akhir mesin CNC yang telah memberikan dukungan teknis pengerjaan Tugas Akhir. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2015

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN

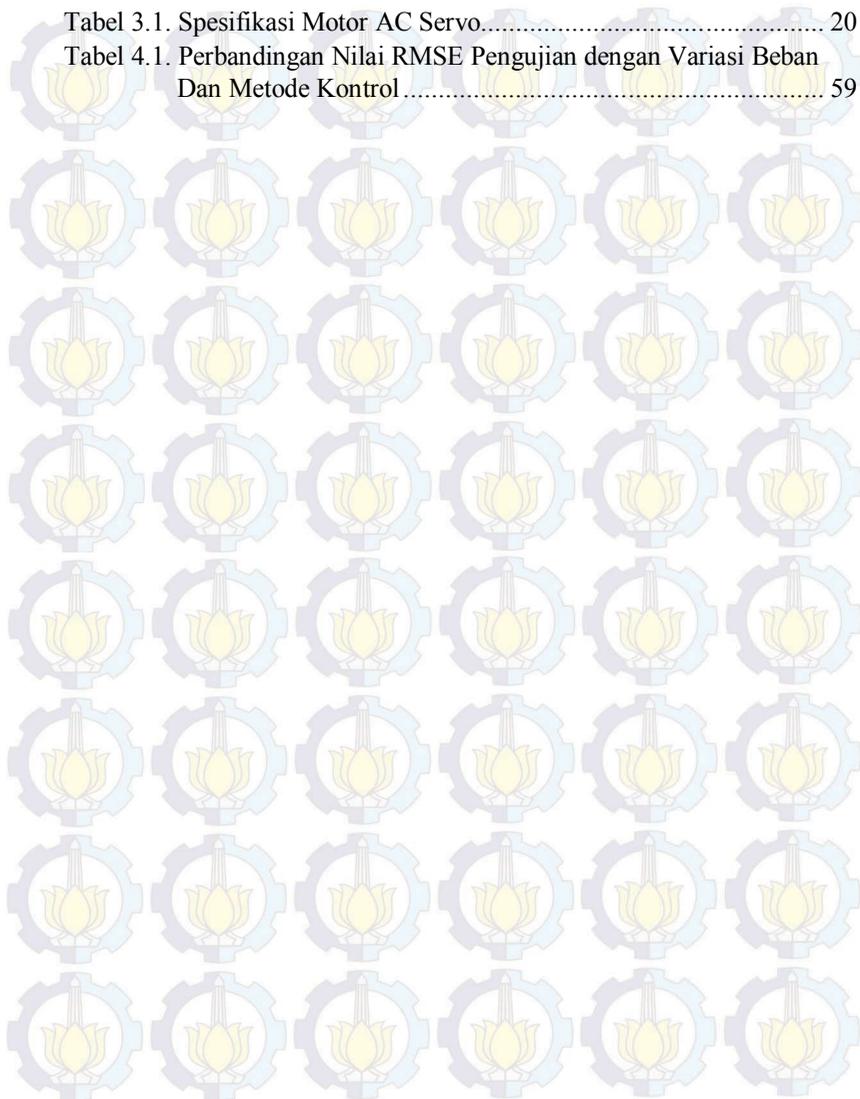
HALAMAN JUDUL	
TUGAS AKHIR - TE 141599	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
Daftar Isi.....	xv
Daftar Gambar.....	xvii
Daftar Tabel.....	xvxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Metodologi.....	3
1.5. Relevansi.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Mesin CNC.....	7
2.2. Motor <i>Servo</i> AC.....	9
2.3. Kontur.....	12
2.3.1. Kontur Linier.....	12
2.3.2. Kontur Lingkaran.....	13
2.4. Kontroler PID.....	15
2.5. Modified Cross Coupled Control.....	16
BAB III PERANCANGAN METODE <i>MODIFIED CROSS</i> <i>COUPLED CONTROL</i>	19
3.1. Perancangan Sistem Motor <i>Servo</i> AC.....	19
3.2. Perancangan <i>Modified Cross Coupled Control</i>	20
3.2.1. Penentuan CETF.....	21
3.2.2. Sistem Tanpa Kopel.....	22
3.2.3. Sistem Dengan Kopel.....	23

3.3. Perancangan Kontroler PD Pada Loop Penggerak Aksis.....	24
3.4. Perancangan Kontroler PI Sebagai <i>Cross-Coupled Gain</i>	26
BAB IV PENGUJIAN METODE MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL	31
4.1. Gambaran Umum Pengujian Sistem.....	31
4.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC.....	32
4.2.1. Karakteristik Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC.....	32
4.2.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD.....	36
4.3. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis Menggunakan Kontroler PD.....	40
4.4. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis dengan PI <i>Modified Cross-Coupled Control</i>	51
BAB V PENUTUP	61
5.1. Kesimpulan.....	61
5.2. Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	65

Daftar Tabel

Tabel 3.1. Spesifikasi Motor AC Servo..... 20

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai RMSE Pengujian dengan Variasi Beban
Dan Metode Kontrol 59





Halaman ini sengaja dikosongkan

Daftar Gambar

Gambar 2.1.	Mesin CNC <i>Milling</i> 3 Aksis.....	8
Gambar 2.2.	Struktur Motor Servo AC.....	10
Gambar 2.3.	Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC.....	11
Gambar 2.4.	Model Kesalahan Kontur pada Kontur Linier.....	12
Gambar 2.5.	Model Kesalahan Kontur pada Kontur Lingkaran.....	13
Gambar 2.6.	Diagram Blok Kontroler PID.....	15
Gambar 2.7.	Diagram Blok <i>Cross-Coupled Control</i> Konvensional.....	17
Gambar 2.8.	Diagram Blok <i>Modified Cross-Coupled Control</i> ..	17
Gambar 3.1.	Sistem CNC dengan Metode M-CCC.....	21
Gambar 3.2.	Diagram Blok Pengaturan CNC dengan Sistem Tanpa Kopel.....	22
Gambar 3.3.	Diagram Blok Pengaturan Sistem dengan Kontroler PD.....	24
Gambar 3.4.	Diagram Blok Pengaturan Aksis dengan Kontroler PD.....	25
Gambar 3.5.	Respon Output Yang Diinginkan.....	27
Gambar 3.6.	Diagram Blok Kontroler PI Sebagai <i>Cross- Couple Gain</i>	29
Gambar 3.7.	Diagram Blok <i>Modified Cross-Coupled Control</i> dengan Kontroler PI Sebagai <i>Cross-Couple Gain</i>	30
Gambar 4.1.	Diagram Blok Sistem Kontrol Loop Tertutup Motor Servo AC.....	32
Gambar 4.2.	Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Step.....	33
Gambar 4.3.	Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Step.....	33
Gambar 4.4.	Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Ramp.....	34
Gambar 4.5.	Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Ramp.....	35
Gambar 4.6.	Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Sinus.....	35
Gambar 4.7.	Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC Terhadap Sinyal Sinus.....	36

Gambar 4.8.	Diagram Blok Pengaturan Motor Servo AC dengan Kontroler PD.....	36
Gambar 4.9.	Respon Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Step.....	37
Gambar 4.10.	Respon Kesalahan Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal Step.....	37
Gambar 4.11.	Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Ramp.....	38
Gambar 4.12.	Respon Kesalahan Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Ramp.....	39
Gambar 4.13.	Respon Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Sinus.....	39
Gambar 4.14.	Respon Kesalahan Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD terhadap Sinyal Sinus.....	40
Gambar 4.15.	Diagram Blok Sistem Untuk Aksis-X dan Aksis-Y menggunakan Kontroler PD.....	41
Gambar 4.16.	Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD....	41
Gambar 4.17.	Kurva Kontur Linier yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i>	42
Gambar 4.18.	Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD Ditambah Pembebanan.....	43
Gambar 4.19.	Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Ditambah Pembebanan...	44
Gambar 4.20.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Ditambah Pembebanan..	44
Gambar 4.21.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i>	45
Gambar 4.22.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i>	46
Gambar 4.23.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Ditambah Pembebanan...	46
Gambar 4.24.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Dengan Beban....	47
Gambar 4.25.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Dengan Variasi Beban....	48
Gambar 4.26.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Ditambah Beban.....	48
Gambar 4.27.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Beban Dilepaskan.....	49

Gambar 4.28.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD <i>Uncouple</i> Dengan Variasi Beban.....	49
Gambar 4.29.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Ditambah Beban.....	50
Gambar 4.30.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Beban Dilepaskan.....	50
Gambar 4.31.	Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PI-MCCC.....	51
Gambar 4.32.	Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk Dengan Kontroler PI-MCCC.....	52
Gambar 4.33.	Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	53
Gambar 4.34.	Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	53
Gambar 4.35.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC.....	54
Gambar 4.36.	Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	54
Gambar 4.37.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1.....	55
Gambar 4.38.	Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban.....	56
Gambar 4.39.	Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban.....	56
Gambar 4.40.	Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan.....	57
Gambar 4.41.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban.....	57
Gambar 4.42.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban.....	58
Gambar 4.43.	Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan.....	58



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Muhammad Yanwar Rifki dan biasa dipanggil Yanwar. Penulis adalah seorang mahasiswa yang berasal dari kota Mojokerto dan terlahir pada tanggal 12 Januari 1993. Penulis telah menempuh pendidikan di TK Roudlotul Atfal Trawas, SDN Ketapanrame 1 Trawas, SMPN 1 Trawas, SMKN 1 Singosari Malang, dan Diploma-3 di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya Jurusan Teknik Elektronika. Saat ini penulis menempuh pendidikan lintas jalur Strata-1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. Selama masa perkuliahan di PENS, penulis aktif di organisasi himpunan mahasiswa Teknik Elektronika, aktif juga di UKM Robotika PENS sebagai pengurus selama 2 tahun, dan selain itu juga aktif di organisasi olah raga futsal jurusan Teknik Elektronika sebagai penanggungjawab latihan. Selama di kampus Teknik Elektro ITS bidang studi Teknik Sistem Pengaturan juga aktif sebagai asisten Laboratorium Teknik Pengaturan selama 2 periode kepengurusan sebagai asisten laboratorium.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada saat ini Mesin CNC (*Computerized Numerical Controller*) merupakan salah satu teknologi yang banyak dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan akan hasil produksi yang presisi. Mesin CNC adalah mesin perkakas yang otomatis beroperasi sesuai dengan perintah-perintah yang terprogram dan tersimpan. Salah satu kendala operasi mesin CNC adalah ketidakakuratan dalam melakukan pembentukan kontur objek yang akan diproduksi. Faktor penyebab ketidakakuratan mesin CNC dalam melakukan pembentukan kontur salah satunya dipengaruhi oleh mekanisme kontrol antar aksis yang tidak sinkron satu sama lain.

Pada umumnya kontrol yang digunakan pada mesin CNC adalah kontrol untuk setiap aksis yang bekerja secara terpisah. Sistem kontrol setiap aksis sangat berpengaruh pada saat proses pembentukan kontur. Untuk mengatasi permasalahan pembentukan kontur, telah banyak dilakukan penelitian untuk mencari metode terbaik dalam pengaturan mesin CNC. Untuk mereduksi kesalahan kontur dapat dilakukan dengan cara selain cara konvensional yaitu dengan meningkatkan respon dinamik dari setiap aksis yang bekerja dan menggunakan metode *Cross-Coupled Control*. Konsep pengaturan CNC yang saat ini populer digunakan adalah *Cross-Coupled Control* (CCC) yang ditemukan oleh Yoram Koren [1]. Metode ini bertujuan untuk melakukan sinkronisasi pengaturan antar aksis. Sinkronisasi pengaturan dilakukan dengan cara meminimalkan kesalahan kontur dengan menerapkan metode kontrol yang tepat untuk meminimalkan nilai fungsi alih kesalahan kontur sistem CNC.

Dengan menggunakan metode *Cross-Coupled Control* diperoleh hasil pembentukan kontur yang lebih baik, namun masih terdapat kelemahan pada akurasi pembentukan kontur dikarenakan adanya dinamisasi sistem yang berasal dari pembebanan saat proses pembentukan kontur dan gaya gesek pada aksis. Oleh karena itu, selain digunakan metode *Cross-Coupled Control*, pada Tugas Akhir ini digunakan kontroler PD pada setiap penggerak aksis dan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* untuk mereduksi nilai kesalahan kontur yang terjadi saat proses pembentukan kontur. Struktur metode *Cross-Coupled*

Control yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah struktur baru yang merupakan modifikasi dari struktur *Cross-Coupled Control* konvensional yang bisa disebut *Modified Cross-Coupled Control*. Metode ini mengacu pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Y.T.Shih [3]. Diharapkan metode ini dapat melakukan sinkronisasi kontrol posisi antara aksis-X dan aksis-Y mesin CNC sehingga dapat diperoleh hasil pembentukan kontur yang lebih baik dan mengurangi nilai kesalahan kontur yang terjadi.

1.2. Perumusan Masalah

Mesin CNC yang akan digunakan pada penelitian ini merupakan jenis mesin CNC *milling*. Pada mesin CNC *milling*, terdapat sebuah motor penggerak mata pahat yang disebut *spindle* dan dua motor penggerak aksis. Konsentrasi pengerjaan Tugas Akhir ini adalah pada pengaturan posisi aksis yang digerakkan oleh motor *servo* AC pada aksis-X dan aksis-Y untuk melakukan *tracking* kontur secara akurat.

Kesalahan kontur yang terjadi disebabkan oleh pengaturan posisi antar aksis yang tidak sinkron dan adanya kesalahan *tracking* kontur pada tiap aksis. Sinkronisasi kontrol berperan penting ketika terjadi kesalahan *tracking* pada salah satu aksis. Ketika terjadi kesalahan pada *tracking* kontur, maka akan dilakukan suatu metode kontrol tertentu untuk meminimalkan kesalahan pembentukan kontur yang terjadi.

Kesalahan *tracking* kontur pada masing-masing aksis disebabkan parameter *plant* yang berubah dikarenakan adanya dinamisasi dari sistem yang salah satunya disebabkan oleh perubahan posisi saat mata pahat menyentuh benda kerja hingga lepas dari benda kerja pada proses pembentukan kontur. Kesalahan pada masing-masing aksis tersebut yang mengakibatkan kesalahan pada kontur yang dibentuk. Disinilah kelemahan dari kontrol individu tiap aksis pada mesin CNC.

1.3. Tujuan

Meninjau permasalahan yang terjadi pada mesin CNC, dirancanglah metode kontrol yang mampu melakukan sinkronisasi kontrol aksis dan mampu mengurangi kesalahan kontur yang diakibatkan oleh kesalahan pada tiap aksis. Hasil perancangan ini berupa simulasi sistem kontrol CNC dengan metode *Modified Cross-Coupled Control* yang merupakan modifikasi dari metode CCC konvensional. Diharapkan dengan Tugas Akhir ini, performa pembentukan kontur pada mesin CNC mampu memiliki hasil pembentukan kontur yang lebih baik,

akurasi saat proses pembentukan kontur menjadi meningkat dan nilai kesalahan kontur yang terjadi dapat direduksi dengan cepat.

1.4. Metodologi

Pada Tugas Akhir ini dilakukan beberapa proses secara bertahap agar tercapai tujuan dari Tugas Akhir ini. Tahap pertama yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini adalah melakukan studi literatur. Literatur yang dipelajari adalah literatur yang mengandung pembahasan yang menyangkut topik Tugas Akhir yang diambil. Materi-materi yang diperlukan meliputi konsep dasar sistem pengaturan, dasar-dasar mesin CNC, mesin CNC *Milling*, motor servo ac, metode *Cross-Coupled Control*. Literatur tersebut dapat diperoleh dari *textbook*, *e-book* dan *paper* yang diambil dari berbagai jurnal konferensi internasional.

Langkah selanjutnya adalah mencari fungsi alih *plant* motor AC servo yang merupakan aktuator aksis X dan Y dari mesin CNC *Miling*. Fungsi alih *plant* motor AC servo yang digunakan, diperoleh dari *paper* M.Vijayakarthick dan P.K.Bhaba yang berjudul “*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*”.

Selanjutnya dilakukanlah perancangan kontroler yang meliputi perancangan *Modified Cross-Coupled Control*. Referensi perancangan metode didapat dari *paper* penelitian sebelumnya oleh Y.T.Shih yang berjudul “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-axis Motion*”. Dalam tahap perancangan kontroler ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan fungsi alih *plant* motor servo ac yang telah didapat berdasarkan *paper*. Simulasi dilakukan pada software Simulink yang berguna sebagai media validasi kontroler. Hasil simulasi dari Simulink akan digunakan untuk analisa performansi metode *Modified Cross-Coupled Control*.

Tahap selanjutnya adalah pembuatan program simulasi. Pada Tugas Akhir ini digunakan software Matlab dan Simulink yang berfungsi sebagai program penghubung antara *user* dengan metode *Modified Cross Coupled Control*.

Tahap selanjutnya adalah pengujian program simulasi untuk mengetahui kemampuan dari metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler yang sudah dirancang pada tahap sebelumnya. Setelah didapat hasil pengujian dengan simulasi, kemudian dilakukan analisa untuk mendapatkan kesimpulan dari pegujian yang dilakukan yang juga sebagai kesimpulan dari Tugas Akhir ini.

Tahap terakhir dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah penulisan buku. Penulisan buku ini berupa laporan yang mencakup semua proses pengerjaan Tugas Akhir mulai dari awal sampai akhir.

1.5. Relevansi

Penulisan Tugas Akhir ini memiliki relevansi dengan topik pengaturan mesin CNC *Milling* yang sedang berkembang. Diharapkan penulisan Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi yang tepat dalam melakukan penelitian pengaturan mesin CNC *Milling* untuk pembentukan kontur.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab yaitu pendahuluan, tinjauan pustaka, perancangan sistem, hasil dan analisa serta penutup.

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini, dibahas mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, relevansi dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori yang berkaitan dengan topik penelitian yang dilakukan. Dasar teori pada bab ini meliputi konsep dasar sistem pengatuan, dasar-dasar mesin CNC, motor servo ac, metode *Cross-Coupled Control*.

BAB III PERANCANGAN *MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL*

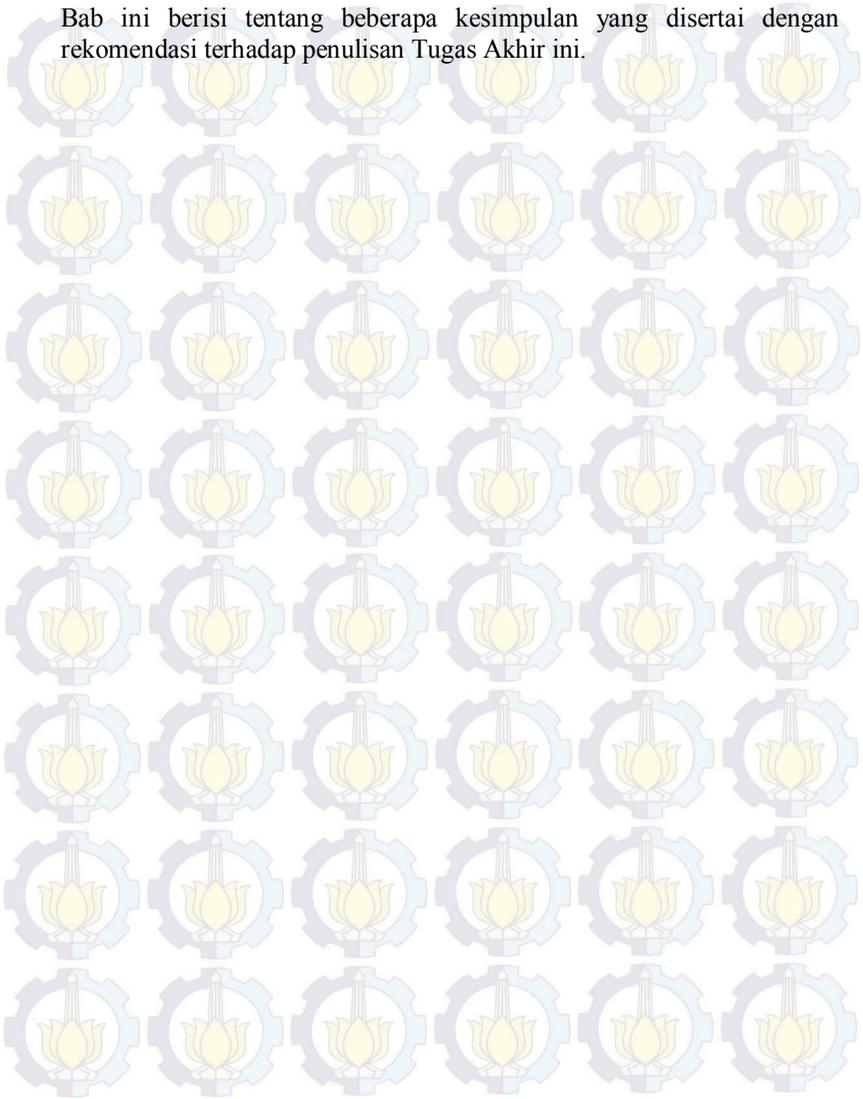
Bab ini berisi perancangan metode *modified Cross-Coupled Control* untuk melakukan *tracking* posisi *plant* motor servo ac.

BAB IV PENGUJIAN METODE *MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL*

Bab ini berisi hasil dari simulasi yang telah dibuat dan analisa terhadap respon yang dihasilkan dalam pembentukan kontur. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian performansi *tracking* kontur dengan variasi nilai paramer kontroler, pengujian *tracking* kontur pada sistem dengan penambahan gangguan pada sistem dan pengujian dengan perbandingan metode kontrol. Analisa yang dilakukan berdasarkan tiga pengujian yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang beberapa kesimpulan yang disertai dengan rekomendasi terhadap penulisan Tugas Akhir ini.





BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

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 servo ac sebagai penggerak aksis pada mesin CNC. Selain itu juga diperlukan pemahaman mengenai metode kontrol yang akan digunakan yaitu teori *Modified Cross Coupled Control*.

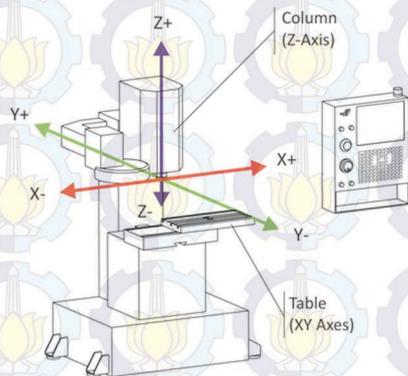
2.1 Mesin CNC [7]

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 proses 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*, benda kerja terdapat pada bagian *spindle*. Mesin CNC *Lathe* digunakan untuk mengikis atau mengukir benda kerja tersebut sehingga menjadi bentuk yang diinginkan. Untuk mesin CNC *milling*, terdapat dua jenis penempatan motor *spindle*, yaitu *spindle* yang bergerak saat penggerak aksis X dan Y. membentuk benda kerja dan motor *spindle* yang diam tetapi benda kerjanya yang bergerak dan digerakkan oleh motor servo ac sebagai

Pada Tugas Akhir ini, mesin CNC yang digunakan adalah mesin CNC jenis *Milling*. Pada *spindle* mesin CNC *Milling* terdapat pisau pemotong dengan berbagai jenis sesuai dengan kebutuhan saat beroperasi. Mesin CNC *Milling* digunakan untuk memotong, melubangi, atau membentuk benda kerja. Dalam membentuk sebuah benda, mesin CNC *Milling* harus dapat beroperasi dan menghasilkan benda kerja sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Oleh karena itu, mesin CNC memiliki tiga aksis gerak. Ketiga aksis tersebut adalah X, Y, dan Z. Aksis X menunjukkan arah gerak ke kanan atau ke kiri. Aksis Y menunjukkan arah gerak ke depan atau ke belakang. Aksis Z

menunjukkan arah gerak secara vertikal, ke atas atau ke bawah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pergerakan aksis ini dilakukan oleh motor servo ac yang terhubung pada mekanik tiap aksis dari mesin CNC *Milling*. Oleh karena itu, pada mesin CNC *Milling* dilakukan perbaikan posisi dan kontur dilakukan dengan mengatur pergerakan motor servo tersebut.



Gambar 2.1 Mesin CNC *Milling* 3 Aksis

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 aksis-aksis 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 aksis-aksis 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 benda kerja. 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 benda kerja 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 benda kerja, sedangkan interpolasi *circular*, adalah ketika mesin pemotong bergerak secara melingkar di atas benda kerja.

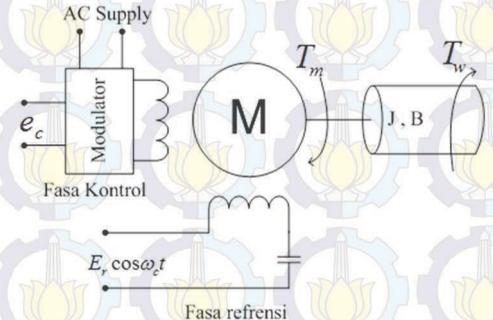
Bahasa pemrograman yang sering digunakan dalam memrogram CNC adalah G-codes (Persiapan), M-codes, F-codes (*Feed*), S-codes (Kecepatan), D-codes (*offset* diameter), T-codes (nomor alat), dan lain sebagainya. Pada mesin CNC, G-codes mengatur beberapa gerakan, misalnya :

- G00 : menuju ke titik tertentu
 - G01 : bergerak sesuai garis lurus
 - G02 : bergerak melingkar searah jarum jam
 - G03 : bergerak melingkar berlawanan dengan arah jarum jam
- dll.

2.2 Motor Servo AC [4]

Pada Tugas Akhir ini akan dilakukan simulasi metode *Modified Cross Coupled Control* pada mesin CNC *milling* yang menggunakan motor servo ac sebagai aktuator penggerak posisi benda kerja. Model motor servo ac yang digunakan mengacu pada referensi paper "*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*" karya M.Vijayakarthick dan P.K.Bhaba.

Motor Servo ac merupakan motor ac 2 fasa yang memiliki satu fasa sebagai fasa referensi dan satu fasa kontrol. Struktur motor servo ac dapat dilihat pada Gambar 2.2 [4]. 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.



Gambar 2.2 Struktur motor servo ac

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 servo ac sangat penting untuk mengetahui hubungan antara masukan dengan keluaran motor. Masukan motor servo ac berupa tegangan sedangkan keluarannya berupa kecepatan motor yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Gambar 2.3 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:

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

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 servo ac secara keseluruhan dapat ditulis :

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

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

Apabila diubah ke dalam domain S persamaan menjadi:

$$k_1 e_c(s) - k_2 s\theta(s) = Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) + T_w \dots\dots\dots(2.4)$$

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

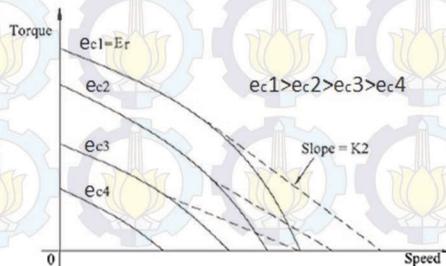
$$k_1 e_c(s) - k_2 s\theta(s) = Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) \dots\dots\dots(2.5)$$

sehingga hubungan antara kecepatan dengan tegangan kontrol dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{k_1}{Js^2 + k_2s + Bs} \dots\dots\dots(2.6a)$$

Persamaan 2.6a dapat disederhanakan menjadi seperti pada persamaan 2.6b.

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)} \dots\dots\dots(2.6b)$$



Gambar 2.3 Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC

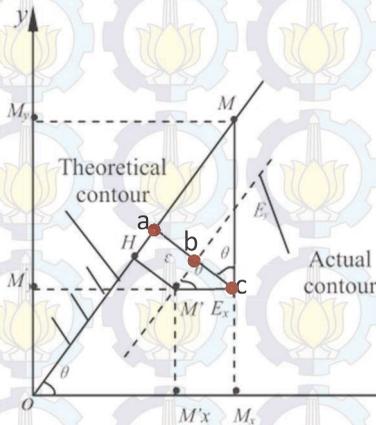
2.3 Kontur [5]

Untuk menghasilkan bentuk benda kerja sesuai dengan yang diinginkan, perlu dilakukan *tracking* lintasan kontur untuk setiap aksis secara akurat. Kesalahan *tracking* pada setiap aksis dapat mengakibatkan kesalahan kontur yang dibentuk. Kesalahan kontur yang terjadi dapat direduksi dengan menerapkan metode kontrol tertentu yang sesuai untuk meminimumkan nilai kesalahan kontur yang dibentuk [5].

Pada umumnya, kontur untuk membentuk suatu bentuk benda kerja terdiri atas kontur linier dan lingkaran. Penjelasan untuk setiap kontur adalah sebagai berikut :

2.3.1. Kontur Linier

Kontur linier ditunjukkan pada Gambar 2.4. Dalam perhitungan untuk mendapatkan model dari kesalahan kontur pada kontur linier dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 2.4 Model Kesalahan Kontur pada Kontur Linier

Dari gambar di atas dapat dilihat, E_x adalah kesalahan posisi pada aksis X, E_y adalah kesalahan posisi pada aksis Y, dan θ adalah sudut lintasan linier terhadap aksis X. Maka kesalahan posisi tiap aksis dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$E_x = M_x - M'_x \dots\dots\dots(2.7)$$

$$E_y = M_y - M'_y \dots\dots\dots(2.8)$$

Kesalahan kontur dinyatakan dengan ϵ , sehingga dari gambar di atas didapatkan,

$$\epsilon = ac - bc \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan,

$$bc = \text{Sin}\theta.E_x \dots\dots\dots(2.10)$$

$$ac = \text{Cos}\theta.E_y \dots\dots\dots(2.11)$$

Jika disubstitusikan (2.10 & 2.11) ke (2.9) maka didapatkan model kesalahan kontur untuk kontur linier sebagai berikut :

$$\epsilon = \text{Cos}\theta.E_y - \text{Sin}\theta.E_x \dots\dots\dots(2.12)$$

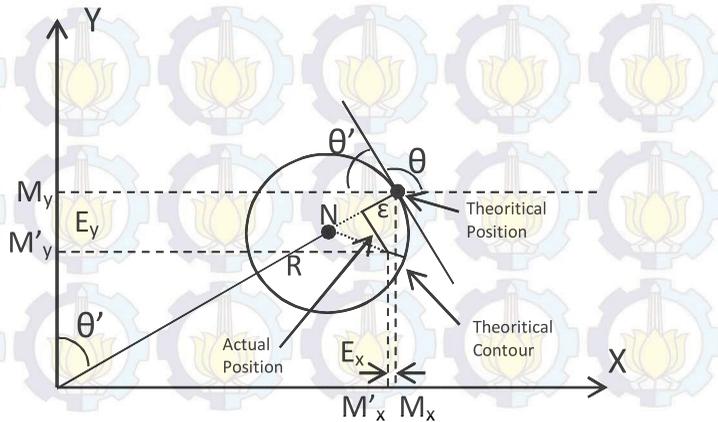
atau,

$$\epsilon = -E_x.\text{Sin}\theta + E_y.\text{Cos}\theta \dots\dots\dots(2.13)$$

2.3.2. Kontur Lingkaran

Dapat dilihat pada Gambar 2.5 yaitu kontur lingkaran pada bidang XY dengan titik pusat lingkaran pada N dan jari-jari lingkaran R. Model kesalahan kontur untuk kontur lingkaran dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\epsilon = R - \sqrt{(M'_x - N_x)^2 + (M'_y - N_y)^2} \dots\dots\dots(2.14)$$



Gambar 2.5 Model Kesalahan Kontur pada Kontur Lingkaran

Dalam perhitungan untuk mendapatkan model dari kesalahan kontur pada kontur lingkaran dapat dilihat sebagai berikut :

Kesalahan terhadap aksis X :

$$M'_x = M_x - E_x$$

$$M'_x = N_x + R \sin \theta' - E_x$$

$$M'_x = N_x + R \sin(\pi - \theta) - E_x$$

$$M'_x = N_x + R \sin \theta - E_x$$

Kesalahan terhadap aksis Y :

$$M'_y = M_y - E_y$$

$$M'_y = N_y + R \cos \theta' - E_y$$

$$M'_y = N_y + R \cos(\pi - \theta) - E_y$$

$$M'_y = N_y - R \cos \theta - E_y$$

Dari penurunan di atas, kemudian disubstitusikan ke persamaan (2.14).

$$\varepsilon = R - \sqrt{(R \sin \theta - E_x)^2 + (-R \cos \theta - E_y)^2}$$

$$\varepsilon = R - \sqrt{R^2 - 2R(E_x \sin \theta - E_y \cos \theta) + (E_x^2 - E_y^2)}$$

$$\varepsilon = R - R \sqrt{1 + \frac{E_x^2 - E_y^2}{R^2} - 2 \frac{E_x \sin \theta - E_y \cos \theta}{R}}$$

$$\approx R - R \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_x^2 + E_y^2 - 2RE_x \sin \theta + 2RE_y \cos \theta}{R^2} \right) \right]$$

$$\varepsilon = \left(\sin \theta - \frac{E_x}{2R} \right) \cdot E_x - \left(\cos \theta + \frac{E_y}{2R} \right) \cdot E_y$$

$$\varepsilon = C_x E_x - C_y E_y$$

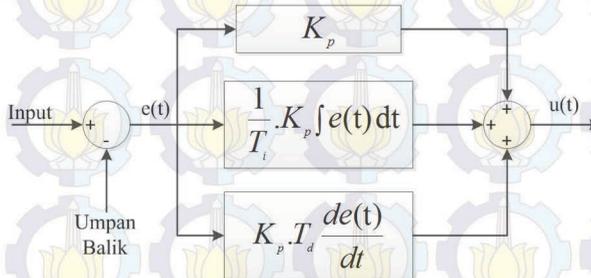
dengan,

$$C_x = \sin \theta - \frac{E_x}{2R} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$C_y = \cos \theta + \frac{E_y}{2R} \dots\dots\dots(2.16)$$

2.4 Kontroler PID

Kontroler PID merupakan kontroler yang paling banyak digunakan di dunia industri karena kemudahan, kesederhanaan, kehandalan dan penggunaannya yang aplikatif. Kontroler PID terdiri dari tiga komponen yaitu proporsional, integral dan *derivative*. Kontroler PID dapat digunakan secara terpisah maupun dengan melakukan kombinasi tertentu seperti P, PI, PD dan PID. Setiap kekurangan dari tiap kontroler proporsional, integral, dan *derivative* (kontroler P, I, dan D) dapat diminimalkan dengan cara mengkombinasikan secara paralel agar dapat saling melengkapi dengan kelebihan masing-masing. Blok diagram kontroler PID ditunjukkan pada Gambar 2.6 menghasilkan keluaran yang bergantung pada *magnitude* dan laju perubahan dari sinyal kesalahan. Karakteristik kontroler PID dipengaruhi oleh ketiga parameter penyusunnya, yaitu K_p , K_i , dan K_d .



Gambar 2.6 Diagram Blok Kontroler PID

Adapun keluaran dari kontroler PID sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.17)$$

- dengan,
- $u(t)$ = sinyal keluaran kontroler PID
 - K_p = konstanta proporsional
 - T_i = waktu integral
 - T_d = waktu *derivative*

K_i = konstanta integral (K_p/T_i)
 K_d = konstanta *derivative* ($K_p \times T_d$)
 $e(t)$ = sinyal kesalahan

Dari Persamaan 2.17, nilai K_p berlaku untuk penguatan saja tanpa memberikan efek dinamik terhadap kinerja kontroler. Penggunaan kontroler P memiliki keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamis, sehingga tidak sesuai untuk *plant* dengan karakter dinamis.

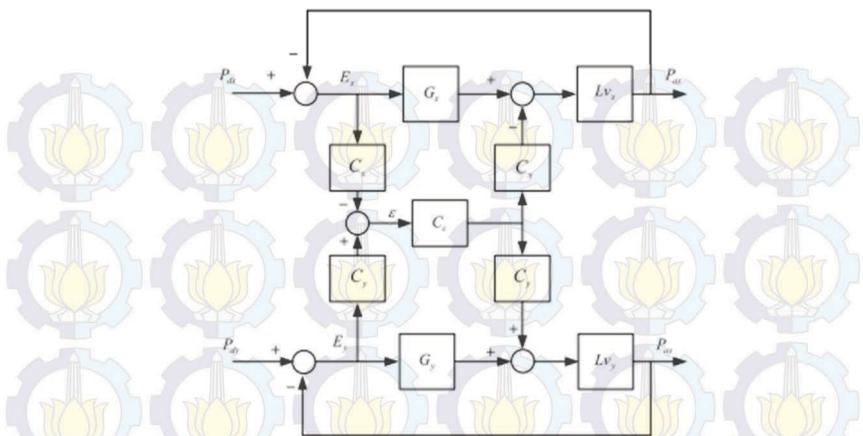
Kontroler integral lebih banyak digunakan untuk meminimalkan kesalahan (*error*). Konstanta integral K_i , dapat memperbaiki sekaligus mengurangi *steady-state error* (E_{ss}), namun pemilihan K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Selain itu pemilihan K_i yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan timbulnya osilasi karena bertambahnya orde sistem.

Kontroler *derivative* tidak dapat berdiri sendiri karena sifat dari kontroler ini hanya berubah saat ada perubahan kesalahan sehingga saat terjadi kesalahan statis, kontroler ini tidak akan bereaksi. Dibalik kelemahan tersebut, kontroler *derivative* mempunyai kecepatan respon yang baik untuk mengatasi adanya sinyal kesalahan yang terjadi, sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki respon transien.

2.5 Modified Cross Coupled Control [3]

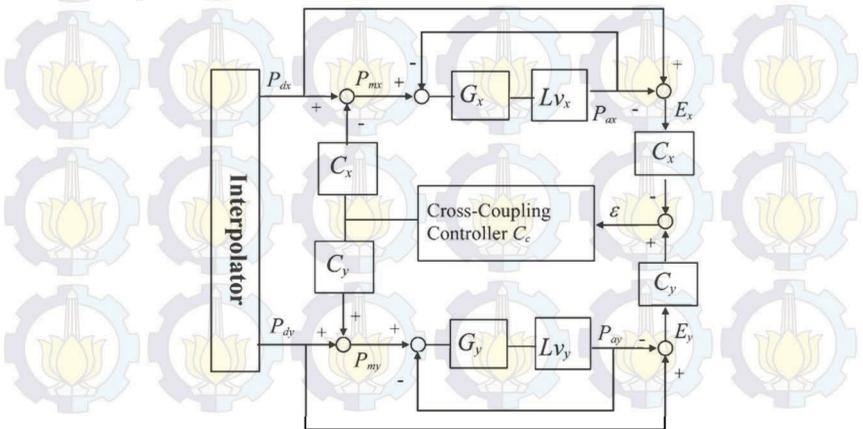
Cross Coupled Control (CCC) merupakan struktur kontroler mesin CNC *multiaxis* yang diajukan oleh Yoram Koren pada tahun 1980 untuk sinkronisasi antar aksis mesin CNC sehingga dapat mengurangi kesalahan kontur yang dibentuk. CCC dirancang untuk memperbaiki kesalahan kontur yang diakibatkan oleh kesalahan dari posisi tiap aksis penggerak.

Awal mula perancangan kontroler ini berdasarkan ide untuk upaya meminimalkan kesalahan kontur yang dapat diestimasi berdasarkan nilai kesalahan pada tiap aksis X dan Y [1],[2]. Estimasi nilai kesalahan dilakukan dengan menurunkan formula dari kesalahan tiap aksis berdasarkan struktur dari diagram blok CCC seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram Blok *Cross-Coupled Control* Konvensional

Pada gambar tersebut merupakan struktur CCC konvensional yang cocok untuk pengaturan pada mode kecepatan tetapi kurang cocok untuk pengaturan pada mode posisi. Hal inilah yang menjadi motivasi Tugas Akhir ini menggunakan metode *Modified CCC*, sehingga konfigurasi dapat digunakan pada mode pengaturan posisi. Selain itu, dengan struktur *Modified CCC* ini dapat mempermudah dalam proses analisa kestabilannya[3]. Struktur dari *Modified Cross-Coupled Control* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Blok *Modified Cross-Coupled Control*

Pada struktur diagram blok *Modified Cross-Coupled Control* di atas terdapat beberapa gain kontrol yang nilainya diestimasi dari ilustrasi terjadinya kesalahan kontur seperti pada Gambar 2.4. jika posisi referensi yang diinginkan berada pada titik P^* dan posisi aktual berada pada titik P , maka dapat dihitung kesalahan dari masing-masing aksisnya (E_x dan E_y). Selanjutnya kesalahan kontur yang terjadi dapat dihitung berdasarkan selisih proyeksi kesalahan masing-masing aksis. Perhitungan kesalahan kontur (ε) ditunjukkan pada persamaan (2.18) dan (2.19).

$$\varepsilon = -E_x C_x + E_y C_y \dots\dots\dots(2.18)$$

$$\varepsilon = -E_x \text{Sin}\theta + E_y \text{Cos}\theta \dots\dots\dots(2.19)$$

dimana, C_x dan C_y merupakan gain variabel yang besarnya ditentukan oleh sudut kemiringan untuk kontur linear (θ) dan juga dipengaruhi besar jari-jari untuk kontur circular (R).

Modified Cross-Coupled Control memiliki desain blok diagram khusus yang didalamnya terdapat proses estimasi untuk mendapatkan kesalahan kontur dari sistem kontrol mesin CNC. Hasil estimasi tersebut digunakan sebagai masukan pada *Cross-coupled Controller* (C_c), sedangkan keluarannya digunakan untuk memanipulasi sinyal kontrol untuk tiap aksis. Adanya sistem manipulasi sinyal kontrol pada tiap aksis ini yang dapat meminimalkan kesalahan kontur yang dibentuk.

BAB III

PERANCANGAN METODE *MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL*

3.1. Perancangan Sistem Motor Servo AC

Pada Tugas Akhir ini, digunakan model motor servo ac yang pada umumnya digunakan sebagai penggerak dari setiap aksis mesin CNC *Milling*. Model dari motor servo ac yang digunakan untuk pengujian metode hasil perancangan yang merujuk pada paper “*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Repetitive Control Strategy*”.

Model matematika motor servo ac diperoleh melalui persamaan antara motor, beban, dan torsi. Seperti pada persamaan (3.1) yang merupakan persamaan dari torsi motor.

$$T_m = K_c e_c - K_n \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan e_c merupakan tegangan pada fasa kontrol motor servo, $\frac{d\theta}{dt}$ adalah posisi sudut motor AC servo. K_c dan K_n adalah konstanta motor. Nilai K_c dan K_n dapat diperoleh jika diketahui nilai untuk torsi (T), tegangan kontrol (E_c) dan kecepatan motor (ω_n) melalui persamaan berikut :

$$K_c = \frac{T}{E_c} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$K_n = \frac{T}{\omega_n} \cdot \frac{60}{2\pi} \dots\dots\dots(3.3)$$

Sedangkan persamaan (3.4) merupakan persamaan dari torsi pada beban.

$$T_w = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(3.4)$$

dengan $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ merupakan kecepatan sudut. Untuk J dan B merupakan momen inersia dan koefisien gesek viskos dari motor yang dituliskan dalam persamaan (3.5)

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = K_c e_c - K_n \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(3.5)$$

Dari persamaan (3.5) diperoleh fungsi alih motor servo untuk pengaturan posisi di mana,

$$\left[Js^2 + Bs + K_n s \right] \theta(s) = K_c E_c(s) \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{Js^2 + K_n s + B_s} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{k_m}{s(\tau_m s + 1)} \dots\dots\dots(3.8)$$

dengan τ_m adalah konstanta waktu motor dan k_m adalah konstanta penguatan motor. Spesifikasi yang digunakan untuk motor servo ac disesuaikan referensi [4], ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi Motor Servo Ac

Type	GSM 62AE
Tegangan	230 Volt
Daya	100 Watt
Kecepatan	50 rpm
Momen Inersia (J)	0.052 Kg.cm ²
Koefisien Gesek (B)	0.01875
Rasio Gearbox	36
Rasio Poros	0.0175 m

Dari spesifikasi di atas, diperoleh fungsi alih dari motor servo ac ditunjukkan pada persamaan (3.9).

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,776s + 1)} \dots\dots\dots(3.9)$$

3.2. Perancangan *Modified Cross Couple Control*

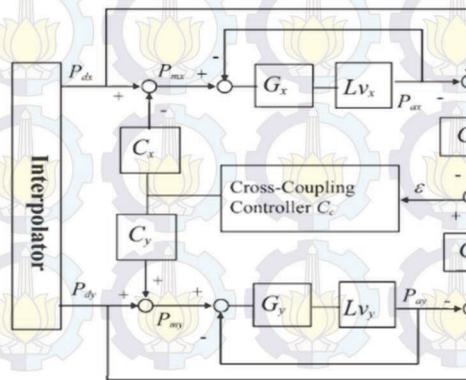
Metode *Modified Cross Coupled Control* merupakan hasil modifikasi dari metode *Cross Coupled Control* konvensional.

Perbedaannya terletak pada sinyal yang dimodifikasi yaitu sinyal referensi posisi aksis-X dan aksis-Y. Metode *Modified Cross Coupled Control* bertugas untuk melakukan sinkronisasi pengaturan antar aksis mesin CNC dengan cara mereduksi model kesalahan kontrol. Struktur dari *Modified Cross Coupled Control* merujuk pada paper “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-Axis Motion*”. Desain dari *Modified Cross Coupled Control* difokuskan pada pemilihan algoritma kontrol C_c untuk mereduksi kesalahan kontrol. Fungsi alih dari kesalahan kontrol selanjutnya akan disebut *Contour Error Transfer Function* (CETF).

Tahap perancangan *Modified Cross Coupled Control* memiliki tiga tahapan yaitu penentuan bentuk *Contour Error Transfer Function* (CETF), penurunan bentuk kesalahan kontrol dari sistem tanpa kopel, dan penurunan bentuk kesalahan kontrol dari sistem dengan kopel.

3.2.1. Penentuan CETF

CETF diturunkan berdasarkan pada perbandingan kesalahan kontrol pada sistem tanpa kopel antar aksis dengan kesalahan kontrol pada sistem dengan kopel antar aksis yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Perhitungan dilakukan pada kondisi sistem tanpa kopel untuk mendapatkan ε_0 . Kemudian, perhitungan dilakukan pada kondisi sistem dengan kopel untuk mendapatkan ε . Setelah didapat kedua bentuk error ε_0 dan ε , maka dibentuk fungsi alih sebagai hubungan antara kesalahan kontrol tanpa kopel dengan kesalahan kontrol dengan kopel. Bentuk fungsi alih kesalahan kontrol tersebut yang akan digunakan untuk menentukan kontroler sebagai *Cross-Couple Controller*.



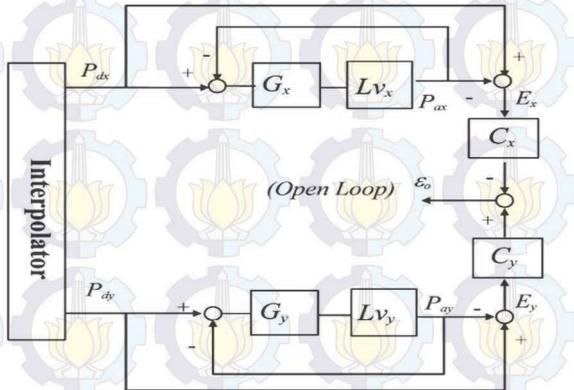
Gambar 3.1. Sistem CNC dengan Metode M-CCC

3.2.2. Sistem Tanpa Kopel

Kesalahan kontur dari sistem tanpa kopel didefinisikan pada Persamaan (3.10).

$$\varepsilon_0 = -E_x C_x + E_y C_y \dots\dots\dots(3.10)$$

Diagram blok pengaturan CNC pada sistem tanpa kopel ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram Blok Pengaturan CNC dengan Sistem Tanpa Kopel

Dari diagram blok di atas, dapat dilakukan perhitungan penurunan untuk mendapatkan ε_0 dengan mencari kesalahan dari tiap aksis, sehingga didapat persamaan (3.11) dan (3.12) :

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= P_{dx} - \frac{G_x L_{v_x}}{1 + G_x L_{v_x}} P_{dx} \\ &= \frac{P_{dx}}{1 + G_x L_{v_x}} \dots\dots\dots(3.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= P_{dy} - P_{ay} \\ &= \frac{P_{dy}}{1 + G_y L_{v_y}} \dots\dots\dots(3.12) \end{aligned}$$

Selanjutnya substitusi persamaan (3.11) dan (3.12) ke persamaan (3.10), maka akan didapat persamaan kesalahan kontur pada sistem tanpa kopel yang ditunjukkan pada persamaan (3.13).

$$\varepsilon_0 = -\frac{C_x P_{dx}}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1 + G_y L v_y} \dots \dots \dots (3.13)$$

3.2.3. Sistem Dengan Kopel

Kesalahan kontur sistem dengan kopel didefinisikan pada persamaan (3.14).

$$\varepsilon = -E_x C_x + E_y C_y \dots \dots \dots (3.14)$$

Kesalahan dari aksis X dan aksis Y didefinisikan pada persamaan (3.15).

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= \frac{P_{dx} + \varepsilon C_c C_x G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} \dots \dots \dots (3.15a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= P_{dy} - P_{ay} \\ &= \frac{P_{dy} + \varepsilon C_c C_y G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \dots \dots \dots (3.15b) \end{aligned}$$

Dilakukan substitusi persamaan (3.15) ke persamaan (3.14), sehingga didapat persamaan (3.16)

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{C_x P_{dx} + \varepsilon C_c C_x^2 G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy} - \varepsilon C_c C_y^2 G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \\ \varepsilon &= \frac{-C_x P_{dx}}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1 + G_y L v_y} - \frac{\varepsilon C_c C_x^2 G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} - \frac{\varepsilon C_c C_y^2 G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \\ \varepsilon \left[1 + \frac{C_c C_x^2 G_x L v_x}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_c C_y^2 G_y L v_y}{1 + G_y L v_y} \right] &= \frac{-C_x P_{dx}}{1 + G_x L v_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1 + G_y L v_y} \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{-(1+G_yLv_y)C_x}{\Delta} P_{dx} + \frac{(1+G_xLv_x)C_y}{\Delta} P_{dy} \dots\dots\dots(3.16)$$

dengan :

$$\Delta = (1+G_xLv_x)(1+G_yLv_y) + C_c C_x^2 G_x Lv_x (1+G_yLv_y) + C_c C_y^2 G_y Lv_y (1+G_xLv_x)$$

CETF didapatkan dengan menyatakan hubungan antara ε dan ε_0 . Hubungan tersebut didapatkan dengan melihat persamaan (3.13) dan (3.16) sehingga didapatkan persamaan (3.17).

$$\varepsilon = \frac{1}{1+C_c P} \varepsilon_0 \dots\dots\dots(3.17)$$

dengan P adalah,

$$P = \frac{C_x^2 G_x Lv_x (1+G_yLv_y) + C_y^2 G_y Lv_y (1+G_xLv_x)}{(1+G_xLv_x)(1+G_yLv_y)} = \frac{C_x^2 G_x Lv_x}{(1+G_xLv_x)} + \frac{C_y^2 G_y Lv_y}{(1+G_yLv_y)}$$

3.3. Perancangan Kontroler PD Pada Loop Penggerak Aksis

Pengaturan untuk tiap aksis dilakukan untuk mendapatkan respon dari pergerakan tiap aksis lebih baik. Berdasarkan persamaan (3.9) yaitu model dari motor servo ac sebagai penggerak tiap aksis, dirancang kontroler PD untuk mengatur pergerakan posisi tiap aksis. Model motor servo ac diketahui pada subbab 3.1 seperti di bawah ini :

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

Dari fungsi alih di atas didapatkan konstanta sistem dan konstanta waktu sistem sebagai berikut :

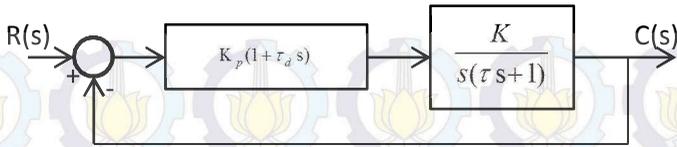
$$K = 0,4$$

$$\tau = 2,776s$$

Struktur dari kontroler PD adalah sebagai berikut :

$$C(s) = K_p (1 + \tau_d s) \dots\dots\dots(3.19)$$

Dari struktur kontroler PD tersebut jika dinyatakan dengan diagram blok dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Diagram Blok Pengaturan Sistem dengan Kontroler PD

Kemudian direncanakan kontroler PD dengan hasil respon orde pertama, tanpa overshoot dan konstanta waktu 0.05 detik. Untuk mendapatkan nilai parameter kontroler yang diinginkan, maka dapat dilakukan perhitungan dengan penyederhanaan diagram blok. Dengan menentukan nilai τ_d sama dengan τ .

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{\frac{K_p K (1 + \tau_d s)}{s(\tau s + 1)}}{1 + \frac{K_p K (1 + \tau_d s)}{s(\tau s + 1)}} = \frac{K_p K}{1 + \frac{K_p K}{s}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_p K / s}}$$

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{1}{\frac{1}{K_p K} s + 1} \dots \dots \dots (3.20)$$

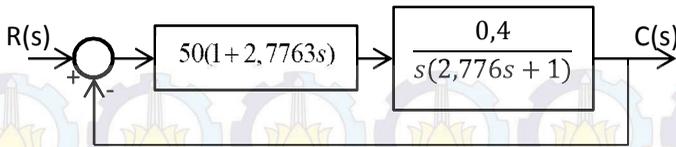
Dari persamaan (3.20) di atas dapat ditentukan nilai K_p dengan menggunakan nilai konstanta waktu hasil (τ^*) yaitu 0.05 detik.

$$K_p = \frac{1}{\tau^* K} = \frac{1}{0,05 \cdot 0,4} = 50 \dots \dots \dots (3.21)$$

Sehingga didapat bentuk kontroler hasil rancangan dan nilai parameter kontroler PD sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{e(s)} = 50(1 + 2,7763s) \dots \dots \dots (3.22)$$

dengan K_p adalah konstanta proporsional kontroler dan τ_d adalah konstanta waktu differensial kontroler. Diagram blok sistem pengaturan tiap aksis menjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram Blok Pengaturan Aksis dengan Kontroler PD

3.4. Perancangan Kontroler PI Sebagai *Cross-Coupled Controller*

Pada Tugas Akhir ini, dipilih kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* (C_c) untuk memperbaiki kesalahan kontur dan mendapatkan respon transien kesalahan kontur yang diinginkan. Pada Tugas Akhir ini digunakan model motor servo ac seperti pada persamaan (3.23). Motor servo ac dipilih karena pada umumnya motor ini digunakan sebagai penggerak tiap aksis mesin CNC Milling.

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{Js^2 + (f + K_n)s} \Rightarrow \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \dots\dots\dots(3.23)$$

dengan $\theta(s)$ adalah posisi sudut motor servo ac, $E(s)$ adalah tegangan motor yang diatur. J dan f adalah momen inersia motor (Kg.m^2) dan koefisien gaya gesek motor, sedangkan K_c dan K_n adalah konstanta motor. K_m dan T_m merupakan konstanta penguatan motor dan konstanta waktu motor. Dari model motor servo ac yang didapatkan dari identifikasi parameter fisik, diubah ke dalam bentuk fungsi alih dengan konstanta penguatan dan konstanta waktu dengan cara seperti pada persamaan (3.24).

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_c}{(f + K_n) \frac{J}{(f + K_n) s^2 + s}} \dots\dots\dots(3.24)$$

sehingga didapatkan,

$$K_m = \frac{K_c}{(f + K_n)} \dots\dots\dots(3.25)$$

$$T_m = \frac{J}{(f + K_n)} \dots\dots\dots(3.26)$$

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 3.1, blok untuk penggerak aksis dalam Tugas Akhir ini dipilih motor servo ac adalah blok Lv_x untuk aksis-X dan Lv_y untuk aksis-Y. Untuk mempermudah dalam analisa, digunakan model yang sama untuk tiap aksis $Lv_x=Lv_y=Lv$. Pada subbab 3.4 telah ditentukan sistem pengaturan aksis-X dan aksis-Y menggunakan kontroler PD. Penyederhanaan blok pengaturan tiap aksis pada gambar 3.4 dapat disederhanakan sehingga didapat bentuk sistem setelah ditambahkan kontroler menjadi orde pertama seperti ditunjukkan pada persamaan (3.27).

$$\frac{R(s)}{C(s)} = \frac{1}{0.05s + 1} \dots\dots\dots(3.27)$$

Perancangan kontroler sebagai *Cross-Couple Controller* digunakan model dari kesalahan kontur yang telah dibahas pada subbab 3.2.1 seperti ditunjukkan pada persamaan (3.28).

$$CETF \Rightarrow \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + C_c P} \dots\dots\dots(3.28)$$

Dari model kesalahan kontur di atas, dengan C_c sebagai *Cross Couple Controller* dan P adalah hasil penurunan dari diagram blok *Modified Cross-Coupled Control* yang ditunjukkan pada persamaan (3.29).

$$P = \frac{C_x^2 G_x L v_x}{(1 + G_x L v_x)} + \frac{C_y^2 G_y L v_y}{(1 + G_y L v_y)} \dots\dots\dots(3.29)$$

Jika ditentukan,

$$G_v = C_x^2 + C_y^2$$

Untuk kontur linier, didapatkan persamaan di bawah ini,

$$G_v = C_x^2 + C_y^2 = \sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

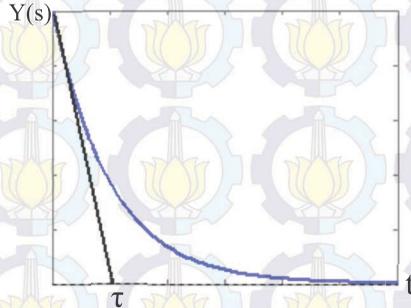
Maka didapatkan bentuk dari P ditunjukkan pada persamaan (3.30).

$$P = \frac{GLvG_v}{1 + GLv} \dots\dots\dots(3.30)$$

Penentuan kontroler sebagai *Cross-Couple Controller*, mengacu pada persamaan CETF yaitu menentukan bentuk C_c menggunakan pendekatan fungsi alih dengan respon keluaran menurun secara ekponensial dari nilai tertentu menuju nol dengan konstanta waktu saat transien sebesar 0.01s. Dipilih pendekatan tersebut karena perancangan

kontroler bertujuan untuk mereduksi kesalahan kontur. Bentuk fungsi alih yang digunakan sebagai pendekatan respon ditunjukkan pada persamaan (3.31) dan gambaran respon keluaran ditunjukkan pada Gambar 3.5.

$$G(s) = \frac{Ks}{\tau s + 1} \dots\dots\dots(3.31)$$



Gambar 3.5. Respon Output Yang Diinginkan

dengan, $Y(s)$ adalah output sistem , t adalah waktu sistem, τ adalah konstanta waktu sistem.

Untuk dapat menghasilkan respon tersebut, pada persamaan CETF ditentukan C_c agar mengandung sebuah integrator. Maka dari itu, dipilih kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* untuk mereduksi kesalahan kontur yang terjadi saat proses pembentukan benda kerja. Substitusi model tiap aksis kedalam bentuk P pada persamaan CETF, ditunjukkan pada persamaan (3.32).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + C_c \left[\frac{1}{\tau^* s + 1} + \frac{1}{\tau^* s + 1} \right]}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + C_c \left[\frac{1}{\tau^* s + 2} \right]} \dots\dots\dots(3.32)$$

dengan τ^* adalah konstanta waktu sistem pengaturan tiap aksis dan C_c adalah *Cross-Coupling Controller*. Selanjutnya dimasukkan kontroler PI untuk menggantikan C_c yang ditunjukkan pada persamaan (3.33).

$$C_c = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) = \frac{K_p (\tau_i + 1)}{\tau_i s} \dots\dots\dots(3.33)$$

dengan, K_p : Konstanta proporsional

τ_i : Konstanta waktu integral

Dari substitusi persamaan yang telah dilakukan di atas, didapatkan bentuk CETF seperti ditunjukkan pada persamaan (3.34).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + \left[\frac{K_p (\tau_i + 1)}{\tau_i s} \right] \left[\frac{1}{\tau^* s + 2} \right]}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + \left[\frac{K_p (\tau_i + 1)}{\tau_i s} \right] \left[\frac{0,5}{0,5\tau^* s + 1} \right]} \dots\dots\dots(3.34)$$

Ditentukan nilai konstanta waktu integral $\tau_i = 0,5\tau^*$, maka didapatkan persamaan seperti ditunjukkan pada (3.35).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{1 + \frac{K_p}{\tau^* s}} = \frac{\tau^* s}{\tau^* s + K_p}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\frac{\tau^*}{K_p} s}{\frac{\tau^*}{K_p} s + 1} \approx \frac{Ks}{\tau s + 1} \dots\dots\dots(3.35)$$

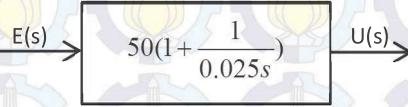
dengan, K : konstanta sistem yang diinginkan

τ : Konstanta waktu sistem yang diinginkan

Dari persamaan (3.32), dapat diperoleh nilai K_p jika nilai K dan τ ditentukan seperti di bawah ini :

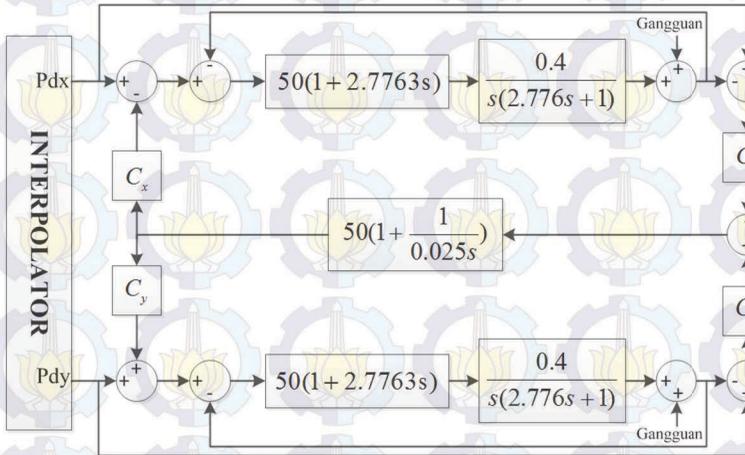
$$K = \tau = 0.001$$

Sehingga didapat nilai K_p sebesar 50 dan blok diagram kontroler PI ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Diagram Blok Kontroler PI Sebagai *Cross-Couple Controller*

Dengan demikian didapatkan diagram blok keseluruhan dari *Modified Cross-Coupled Control* dengan Kontroler PI yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Diagram Blok *Modified Cross-Coupled Control* dengan Kontroler PI Sebagai *Cross-Couple Controller*

BAB IV

PENGUJIAN METODE *MODIFIED CROSS COUPLED CONTROL*

4.1. Gambaran Umum Pegujian Sistem

Pada Tugas Akhir ini, digunakan sistem mesin CNC *Milling* 3 aksis dengan penggerak aksis menggunakan motor servo ac. Pengujian metode *Modified Cross-Coupled Control* diterapkan untuk pengaturan posisi tiap aksis saat melakukan pembentukan kontur. Metode ini diuji tingkat kesalahan konturnya untuk membentuk sebuah lintasan linier dan lingkaran. Pada kasus ini disimulasikan sistem kontrol posisi pada aksis X dan aksis Y, digunakan model motor servo ac yang diperoleh dari penelitian sebelumnya [4]. Nilai parameter untuk model motor servo ac yang didapat adalah, $K_m = 0,4$ dan $T_m = 2.7763$.

Dalam pengujian ini simulasi proses *feeding* dijalankan pada waktu $t = 0$ detik sampai $t = 58$ detik. Untuk merepresentasikan kondisi saat *feeding*, ditambahkan pembebanan pada aksis X yang berupa pengurangan atau penambahan posisi aktual aksis X sebesar 1 cm untuk beban 1, 2 cm untuk beban 2, dan 3 cm untuk beban 3.

Kontur yang diinginkan berupa kontur linier dan kontur lingkaran. Untuk kontur linier, adalah garis miring yang memiliki titik awal dan titik target dengan gradien yang ditentukan. Untuk merepresentasikan kondisi tersebut, dirancang sebuah fungsi matematika yang dapat menghasilkan sinyal keluaran berupa garis linier dengan masukan titik awal, titik target, dan *cutting speed* yang digunakan. Untuk kontur lingkaran juga dirancang sebuah fungsi matematika yang dapat menghasilkan keluaran yang jika di plot pada grafik XY akan membentuk kontur lingkaran dengan masukan titik pusat lingkaran, jari-jari yang diinginkan, sudut awal, dan *cutting speed*.

Pengujian dilakukan dengan waktu yang disesuaikan dengan *cutting speed* dan panjang lintasan kontur yang akan dibentuk. Pengujian dengan beban juga disesuaikan dengan waktu simulasi. Hasil dari pengujian berupa plot kurva kontur referensi, kontur aktual dan kurva kesalahan kontur. Kurva kesalahan kontur yang dibentuk pada saat pengujian ini akan dihitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*). Formula untuk menghitung nilai RMSE adalah sebagai berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

dengan n adalah jumlah data, y_i adalah output yang diinginkan, dan \hat{y}_i adalah output yang terjadi. Dari nilai RMSE yang didapat pada setiap pengujian menggunakan metode yang berbeda akan dibandingkan. Hasil dari setiap pengujian yang dilakukan dan analisa yang dilakukan digunakan untuk mendapatkan kesimpulan dari hasil pengujian.

4.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC

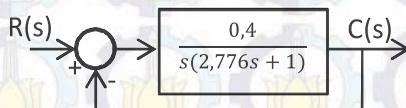
Pengujian pertama dilakukan untuk mengetahui karakteristik respon motor servo ac yang akan digunakan pada simulasi dan pengujian pada subbab berikutnya. Model matematika dari motor servo ac yang ditunjukkan pada persamaan 4.1 merupakan sistem orde kedua yang memiliki satu kutub di pusat koordinat. Respon dari keluaran motor servo ac tidak stabil, sehingga jika diberikan masukan sinyal unit step, hasil respon keluaran akan bertambah terus menerus mengikuti berjalannya waktu.

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,776s+1)} \dots \dots \dots (4.1)$$

Untuk membuat sistem menjadi stabil, dirancang sistem loop tertutup dengan umpan balik negatif. Kemudian untuk memperbaiki spesifikasi respon keluaran sistem, ditambahkan sebuah kontroler PD.

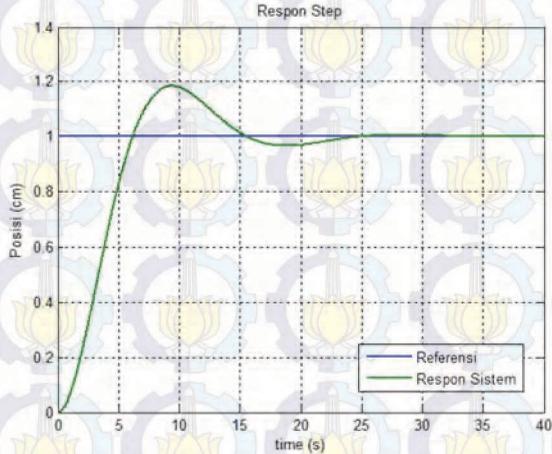
4.2.1. Karakteristik Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo AC

Salah satu metode kontrol sederhana untuk membuat sistem menjadi stabil adalah kontrol loop tertutup dengan umpan balik negatif. Diagram blok sistem kontrol loop tertutup pada motor servo ac ditunjukkan pada Gambar 4.1.

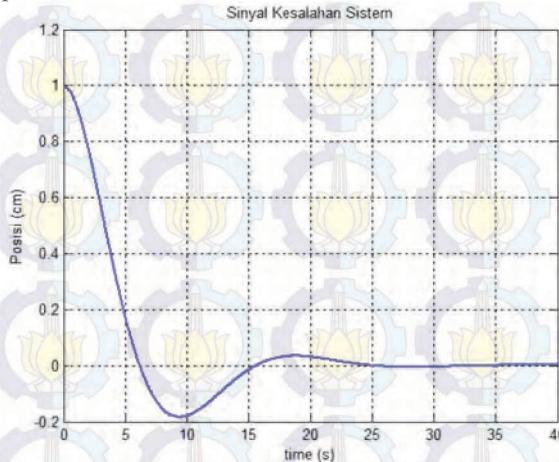


Gambar 4.1. Diagram Blok Sistem Kontrol Loop Tertutup Motor Servo Ac

Dari diagram blok di atas diperoleh respon keluaran sistem dengan masukan *step* ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan respon kesalahan sistem ditunjukkan pada gambar 4.3.



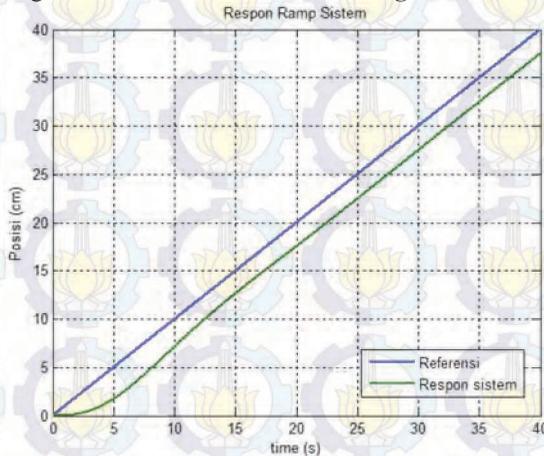
Gambar 4.2. Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Step*



Gambar 4.3. Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Step*

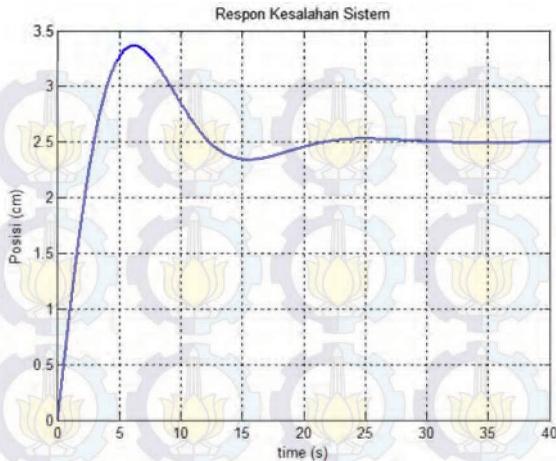
Berdasarkan Gambar 4.2 diketahui bahwa nilai yang diperoleh saat kondisi sinyal mencapai 63.2% adalah 4 detik sehingga diperoleh nilai $\tau = 4$ detik, nilai $\tau_s(\pm 5\%) \approx 3\tau \approx 12$ detik, dengan $\tau_r(5\% - 95\%) \approx 11.77$ detik. Dari sinyal kesalahan juga dapat dilihat bahwa sistem mulai mencapai kondisi yang konstan mendekati nol pada waktu mendekati 30 detik. Hal ini menunjukkan bahwa performansi dari sistem masih belum baik dikarenakan masih lamanya waktu kesalahan untuk menuju nol. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *step* diperoleh 0,506.

Sistem motor servo ac juga diuji dengan sinyal masukan *ramp* dengan hasil respon keluaran sistem ditunjukkan Gambar 4.4. Dari gambar hasil respon keluaran diperoleh bahwa masih terdapat selisih antara sinyal referensi dengan respon sinyal yang sebenarnya. Hal ini membuktikan sistem motor servo ac jika hanya menggunakan kontrol loop tertutup dengan sinyal masukan *ramp*, masih belum dapat menghasilkan respon yang sesuai dengan sinyal referensi. Pengujian menggunakan sinyal *ramp* akan mewakili pembentukan kontur linier yang biasa digunakan dalam mesin CNC Milling.



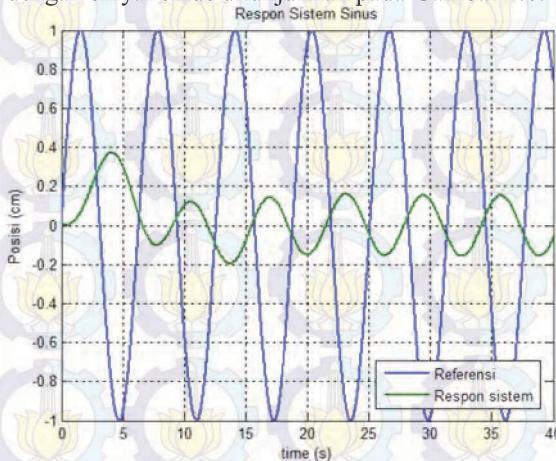
Gambar 4.4. Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Ramp*

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.5. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *ramp* diperoleh 2.5405.



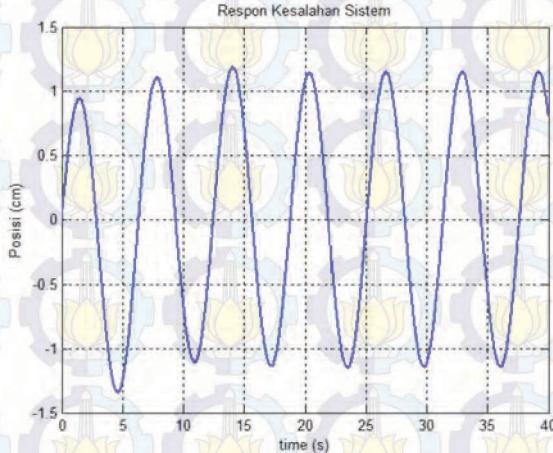
Gambar 4.5. Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal *Ramp*

Untuk pembentukan kontur lingkaran, setiap aksis juga harus diuji menggunakan sinyal masukan sinus untuk mengetahui kemampuan motor servo ac saat tracking sinyal masukan yang berubah-ubah. Hasil pengujian dengan sinyal sinus ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Respon Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal Sinus

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan sinus diperoleh 2.4234.

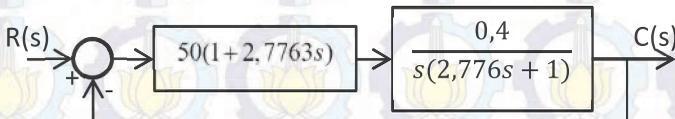


Gambar 4.7. Respon Kesalahan Sistem Loop Tertutup Motor Servo Ac Terhadap Sinyal Sinus

Performansi yang ditunjukkan dari pengujian yang dilakukan mulai dari pemberian sinyal *step*, *ramp*, dan sinus, menunjukkan sistem masih memerlukan perbaikan dalam hal kecepatan respon dan akurasi terhadap referensi. Sehingga perlu ditambahkan kontroler pada sistem motor servo ac sebagai penggerak aksis mesin CNC *Milling* yang akan dijelaskan pada subbab pengujian berikutnya.

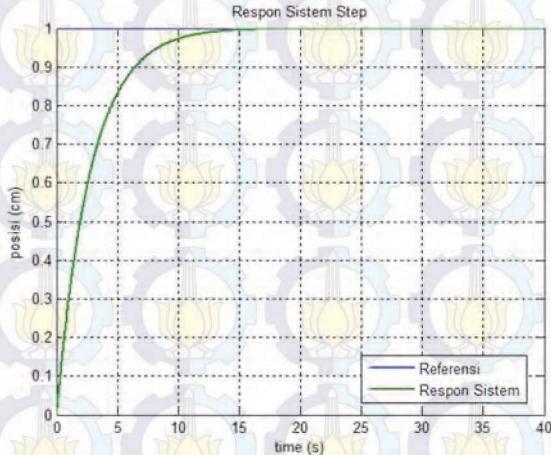
4.2.2. Karakteristik Respon Sistem Motor Servo AC dengan Kontroler PD

Diagram blok sistem kontrol PD pada motor servo ac ditunjukkan pada Gambar 4.8.

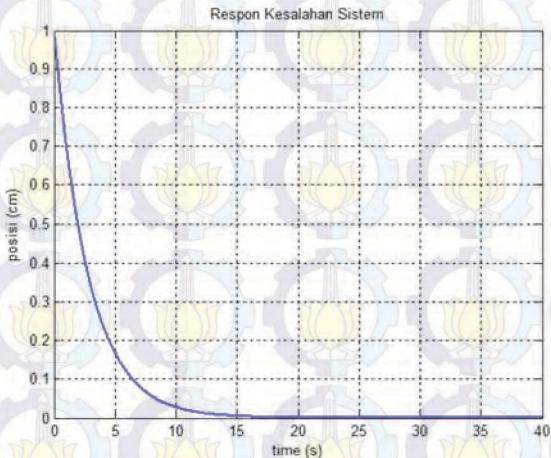


Gambar 4.8. Diagram Blok Pengaturan Motor Servo Ac dengan Kontroler PD

Dari diagram blok di atas diperoleh respon keluaran sistem dengan masukan *step* ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.10,



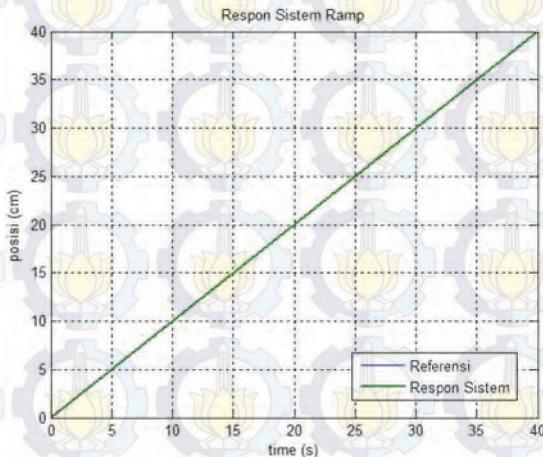
Gambar 4.9. Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Step*



Gambar 4.10, Respon Kesalahan Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Step*

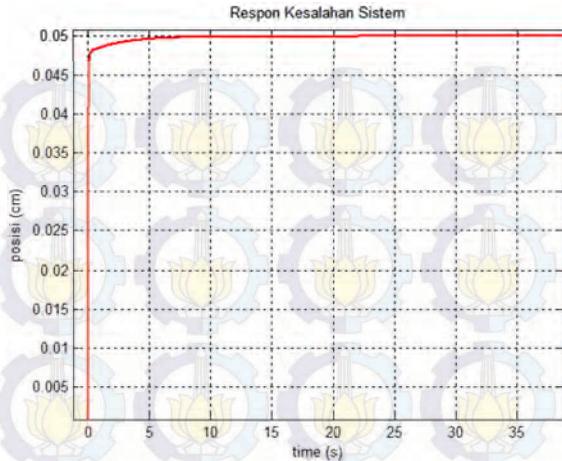
Berdasarkan Gambar 4.9 diketahui bahwa nilai yang diperoleh saat kondisi sinyal mencapai 63.2% adalah 2.8 detik sehingga diperoleh nilai $\tau = 2.8$ detik, nilai $\tau_s(\pm 5\%) \approx 3\tau \approx 8.4$ detik, dengan $\tau_r(5\% - 95\%) \approx 8.31$ detik. Dari sinyal kesalahan juga dapat dilihat bahwa sistem mulai mencapai kondisi yang konstan mendekati nol pada waktu mendekati 14 detik. Hal ini menunjukkan bahwa performansi dari sistem lebih baik dari sebelumnya dengan waktu kesalahan untuk menuju nol dua kali lebih cepat. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *step* diperoleh 0,1967.

Sistem motor servo ac juga diuji dengan sinyal masukan *ramp* dengan hasil respon keluaran sistem ditunjukkan gambar 4.11. Dari gambar hasil respon keluaran diperoleh bahwa respon keluaran sistem mendekati sinyal referensi. Hal ini membuktikan sistem motor servo ac jika ditambahkan kontroler PD untuk pengaturan posisi dengan sinyal masukan *ramp*, dapat menghasilkan respon yang sesuai dengan sinyal referensi. Pengujian menggunakan sinyal *ramp* akan mewakili pembentukan kontur linier yang biasa digunakan dalam mesin CNC *Milling*.



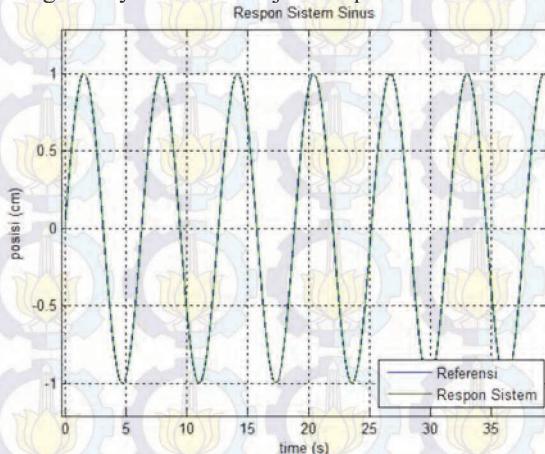
Gambar 4.11. Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Ramp*

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.12. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan masukan *ramp* diperoleh 0,0497.



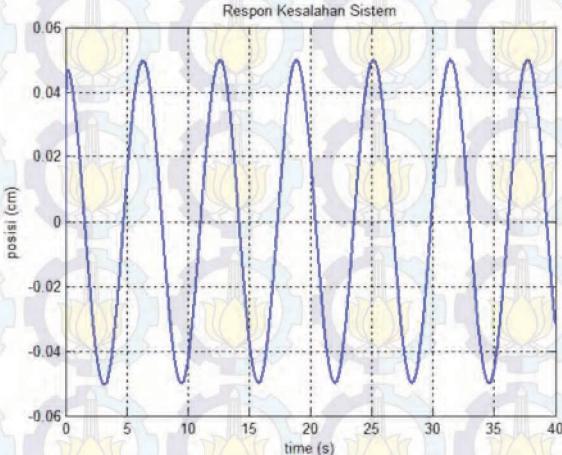
Gambar 4.12. Respon Kesalahan Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal *Ramp*

Untuk pembentukan kontur lingkaran, setiap aksis juga harus diuji menggunakan sinyal masukan sinus untuk mengetahui kemampuan motor servo ac saat tracking sinyal masukan yang berubah-ubah. Hasil pengujian dengan sinyal sinus ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Respon Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal Sinus

Respon kesalahan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.14. Nilai RMSE yang menyatakan nilai rata-rata kesalahan sistem motor servo ac dengan kontroler PD dan masukan sinus diperoleh 0,0350,



Gambar 4.14. Respon Kesalahan Sistem Motor Servo Ac dengan Kontroler PD Terhadap Sinyal Sinus

Performansi yang ditunjukkan dari pengujian yang dilakukan mulai dari pemberian sinyal *step*, *ramp*, dan sinus, menunjukkan sistem sudah lebih baik dalam hal kecepatan respon dan akurasi terhadap referensi dari pada tanpa kontroler.

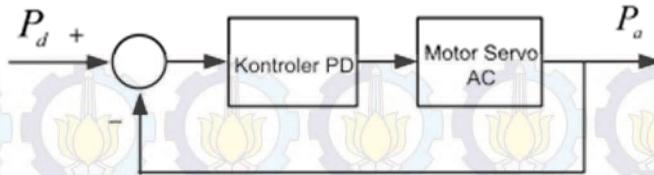
4.3. Simulasi Sistem Kontrol Dua Aksis Menggunakan Kontroler PD

Pada sistem motor servo ac untuk aksis-X dan aksis-Y diberikan kontroler yang sama. Parameter kontroler yang digunakan adalah parameter yang didapatkan pada perancangan kontroler aksis pada subbab sebelumnya, yaitu :

$$K_p=50$$

$$\tau_d=2.7763$$

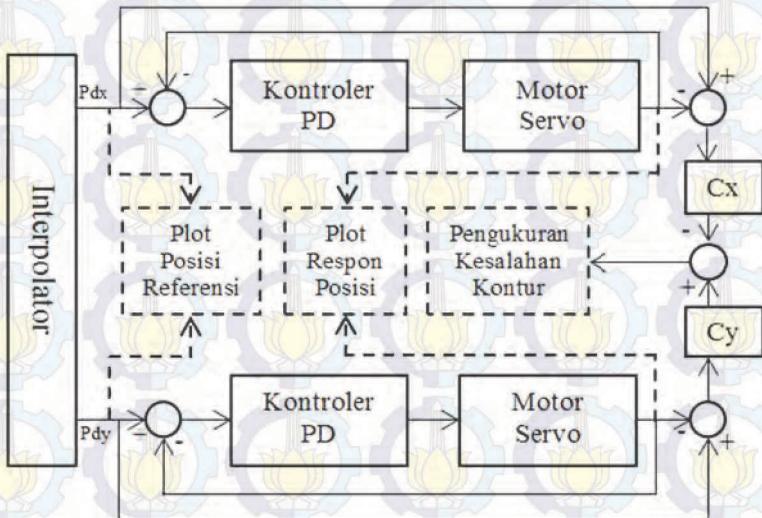
Diagram blok sistem kontrol untuk setiap aksis-X dan aksis-Y dapat dilihat pada Gambar 4.15, dimana sinyal masukan adalah posisi referensi setiap aksis (P_d) dan keluarannya adalah posisi aktual yang dihasilkan setiap aksis (P_a).



Gambar 4.15. Diagram Blok Sistem Kontrol Untuk Aksis-X dan Aksis-Y Menggunakan Kontroler PD

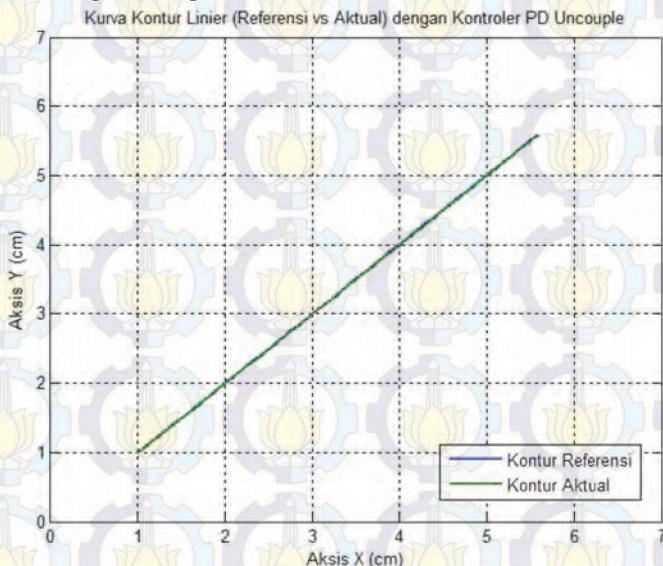
Untuk proses pembentukan kontur linier dibutuhkan sinyal masukan berupa sinyal dengan fungsi garis miring linier dengan kemiringan tertentu untuk sinyal masukan tiap aksis. Dari pergerakan tiap aksis dapat menghasilkan suatu kontur linier dengan titik awal dan titik akhir yang diinginkan. Pada pengujian ini digunakan kontur linier dengan titik awal (1,1) dan titik target (5,5) dengan *cutting speed* 0,1cm/s. Dari penentuan titik awal dan titik target tersebut akan menghasilkan kontur linier dengan gradien 1 dan sudut yang dibentuk garis terhadap aksis X adalah 45° .

Selanjutnya diagram blok pengujian pertama ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon aksis saat mengikuti kontur referensi.



Gambar 4.16. Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD

Dapat dilihat pada diagram blok pengujian di atas, titik – titik pengukuran ditunjukkan dengan garis merah dan blok merah sebagai proses pengambilan data. Untuk gambar diagram blok secara detail dapat dilihat pada lampiran C.

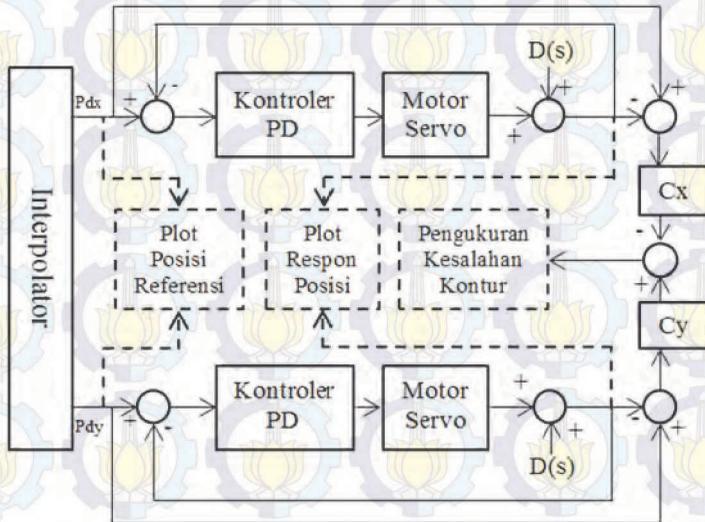


Gambar 4.17. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple*

Terlihat pada Gambar 4.17 bahwa dengan kontroler PD pada tiap aksis, hasil respon *tracking* tiap aksis sudah dapat mencapai sinyal kontur referensi. Hal ini disebabkan karena respon motor servo ac setelah ditambahkan kontroler adalah orde pertama tanpa kesalahan *steady state*. Kontur aktual tampak mengikuti kontur referensi dan dapat dilihat kesalahan kontur hampir mendekati nol. Akan tetapi, sistem juga perlu diuji dengan pemberian beban untuk mengetahui kemampuan dari sistem saat proses pembentukan benda kerja. Begitu juga kemampuan dalam *tracking* kontur yang sangat dipengaruhi oleh hasil respon *tracking* posisi tiap aksis, sehingga dapat diartikan bahwa sistem masih bekerja secara individu yang bergantung pada tiap aksis dan belum ada mekanisme sinkronisasi tiap aksis. Untuk pengujian menggunakan

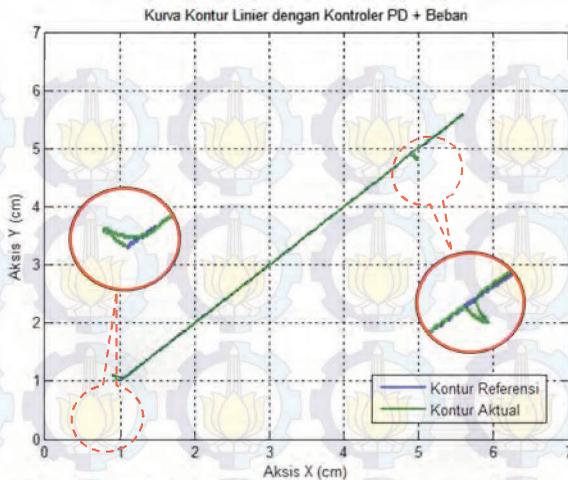
metode dengan mekanisme sinkronisasi antar aksis akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengetahui kontur saat posisi tiap aksis diberi beban yang merepresentasikan proses saat mata pahat menyentuh benda kerja dan saat mata pahat lepas dari benda kerja. Diagram blok pengujian dengan pembebanan ditunjukkan pada gambar 4.18.



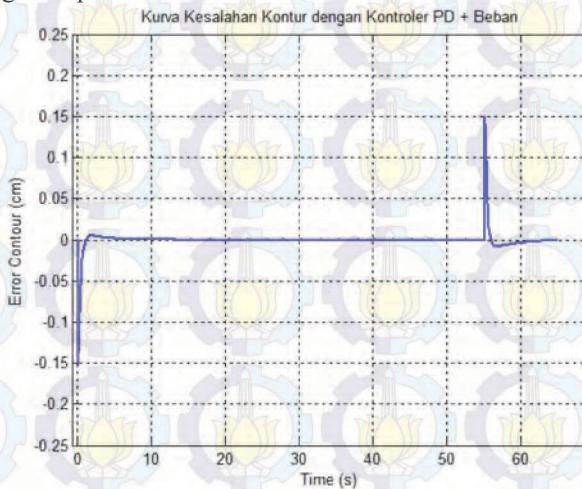
Gambar 4.18. Diagram Blok Pengujian dengan Kontroler PD Ditambah Gangguan

Terlihat pada diagram blok di atas bahwa gangguan diberikan berupa pergeseran posisi aksis-X dan aksis-Y pada waktu ke-0 sampai 55 detik. Gangguan pembebanan diberikan pada output posisi aktual dari motor servo ac tiap aksis. Pembebanan yang diberikan berupa pergeseran posisi dengan menambahkan jarak dari posisi yang dihasilkan tiap aksis. Kurva kontur linier yang dibentuk dapat diamati pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple* Ditambah Pembebanan

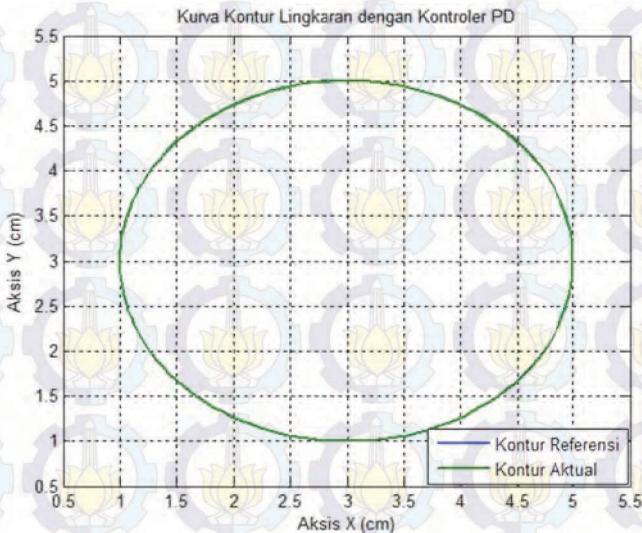
Kontur linier yang dibentuk juga dapat diamati bahwa terjadi kesalahan kontur saat diberikan beban yang ditunjukkan pada Gambar 4.20 yang merupakan kurva kesalahan kontur.



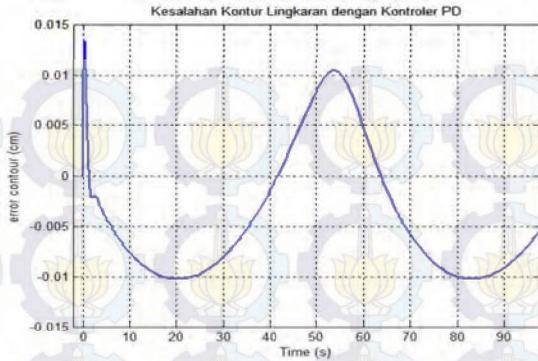
Gambar 4.20, Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple* Ditambah Pembebanan

Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,15 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi sehingga kesalahan kontur perlahan mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis sehingga kesalahan *tracking* pada aksis dapat direduksi. Akan tetapi, sistem masih bekerja secara individu yang bergantung pada tiap aksis dan belum ada mekanisme sinkronisasi tiap aksis. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PD pada kontur linier ditambah pembebanan adalah 0,0293.

Sistem dengan kontroler PD juga diuji untuk membentuk kontur lingkaran. Pembentukan kontur lingkaran dibutuhkan sinyal masukan untuk dua aksis sehingga dapat membentuk kontur lingkaran. Diagram blok pengujian kontur lingkaran sama dengan kontur linier pada pengujian sebelumnya. Yang membedakan adalah pada blok interpolator yang diganti dengan interpolator untuk kontur lingkaran. Pada pengujian kali ini digunakan kontur lingkaran dengan jari-jari 2 cm, titik pusat lingkaran XY (3,3), *cutting speed* 0,1 cm/s, dan sudut awal 180°. Hasil kontur yang dibentuk dapat dilihat pada Gambar 4.21. dan kurva kesalahan kontur dapat juga dilihat pada Gambar 4.22.

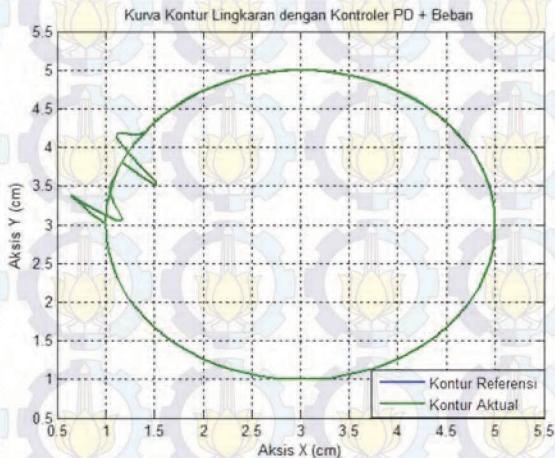


Gambar 4.21. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple*

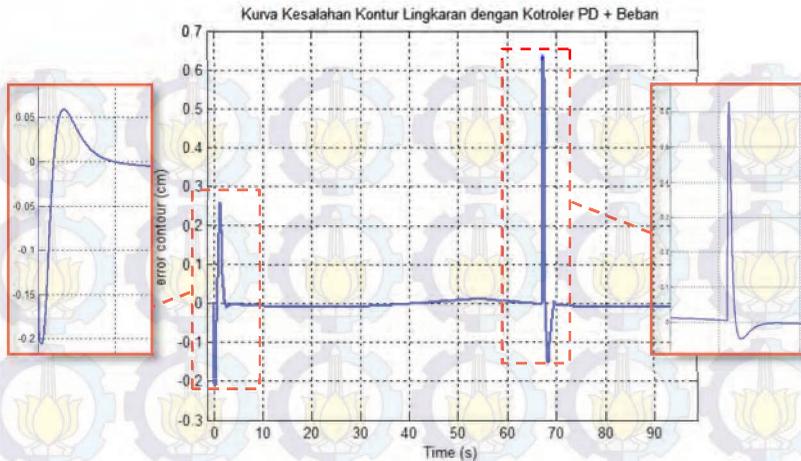


Gambar 4.22. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple*

Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum saat *tracking* kontur lingkaran mencapai 0,01 cm. Masih relatif kecil karena saat pembentukan kontur sistem masih belum ditambahkan pembebanan. Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan beban sebagai representasi dari proses saat mata pahat menyentuh benda kerja. Kurva kontur lingkaran yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan kurva kesalahan kontur dapat juga dilihat pada Gambar 4.24.



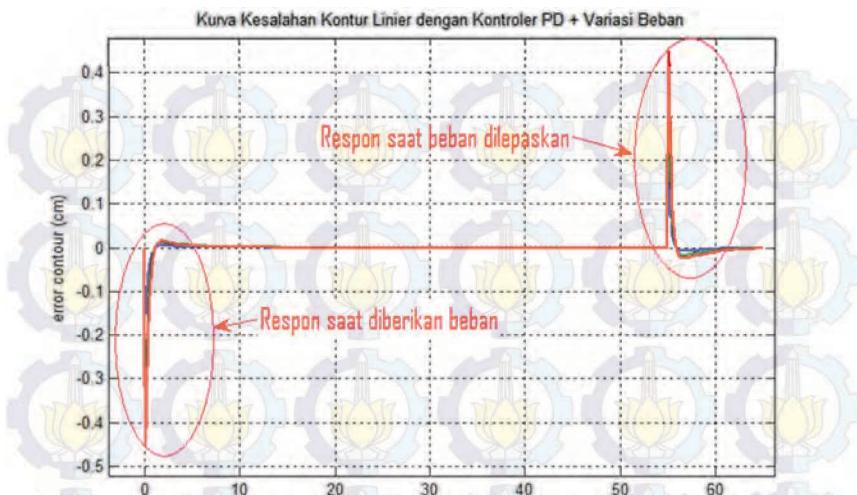
Gambar 4.23. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PD *Uncouple* Ditambah Pembebanan



Gambar 4.24. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple* Dengan Beban

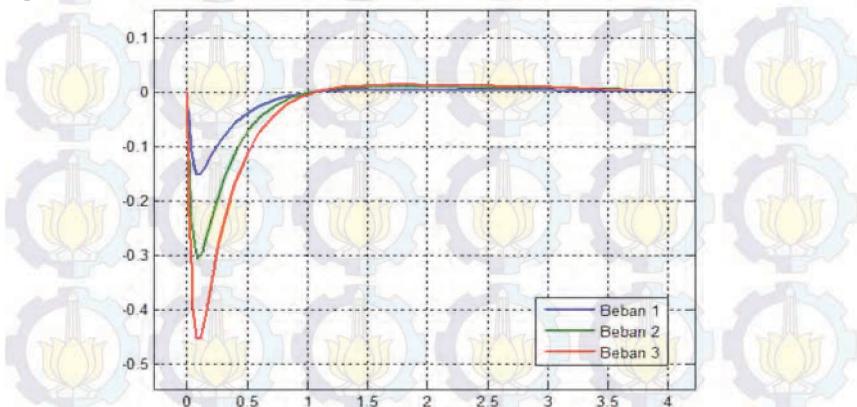
Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,6 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi sehingga kesalahan kontur perlahan mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis sehingga kesalahan *tracking* pada aksis dapat direduksi. Akan tetapi, sistem masih bekerja secara individu yang bergantung pada tiap aksis dan belum ada mekanisme sinkronisasi tiap aksis. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PD pada kontur lingkaran ditambah pembebanan adalah 0,0976.

Pengujian dengan kontroler PD ditambah pembebanan juga dilakukan dengan variasi kondisi beban seperti dijelaskan pada gambaran umum pengujian sistem. Dengan variasi beban dapat diamati berdasarkan kesalahan kontur pada semua kondisi beban didapat perbandingan seperti pada Gambar 4.25 dan 4.28. Kesalahan kontur yang terjadi semakin besar dengan penambahan beban yang semakin besar pula. Akan tetapi, pada akhirnya kesalahan dapat diminimalkan. Nilai RMSE dari pengujian dengan variasi beban adalah kontur linier dengan beban 1 sebesar 0,0293, dengan beban 2 sebesar 0,0586, dan dengan beban 3 sebesar 0,0879. sedangkan untuk kontur lingkaran dengan beban 1 sebesar 0,0976, dengan beban 2 sebesar 0,2333, dan dengan beban 3 sebesar 0,4358.

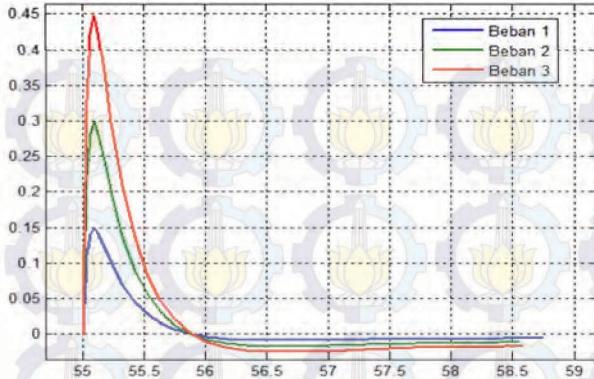


Gambar 4.25. Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem Dengan Kontroler PD *Uncouple* Dengan Variasi Beban

Dari hasil pengujian dengan variasi beban kontur linier pada Gambar 4.25 dapat diperjelas untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.27.

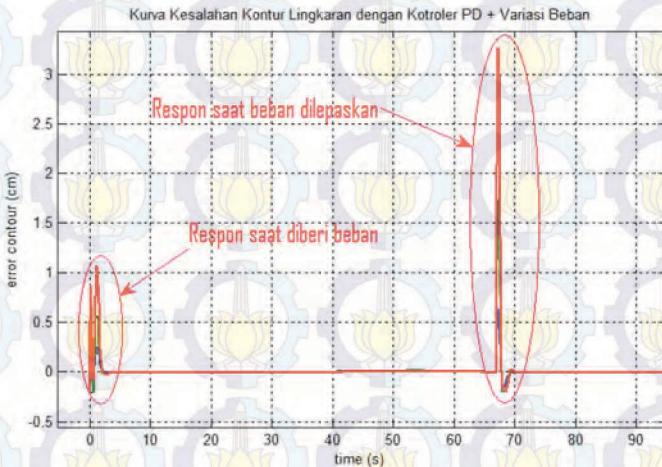


Gambar 4.26. Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Ditambah Beban

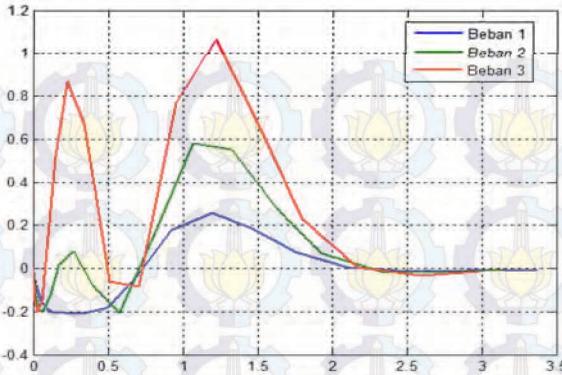


Gambar 4.27. Kurva Kesalahan Kontur Linier Saat Beban Dilepaskan

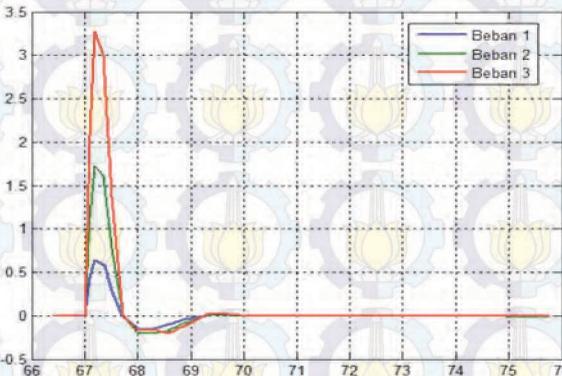
Selanjutnya pengujian variasi beban pada kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.28. Untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.29 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.30,



Gambar 4.28. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Sistem dengan Kontroler PD *Uncouple* Dengan Variasi Beban

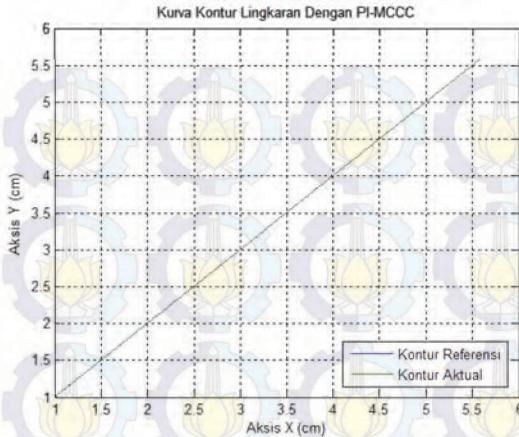


Gambar 4.29. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Ditambah Beban



Gambar 4.30, Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran Saat Beban Dilepaskan

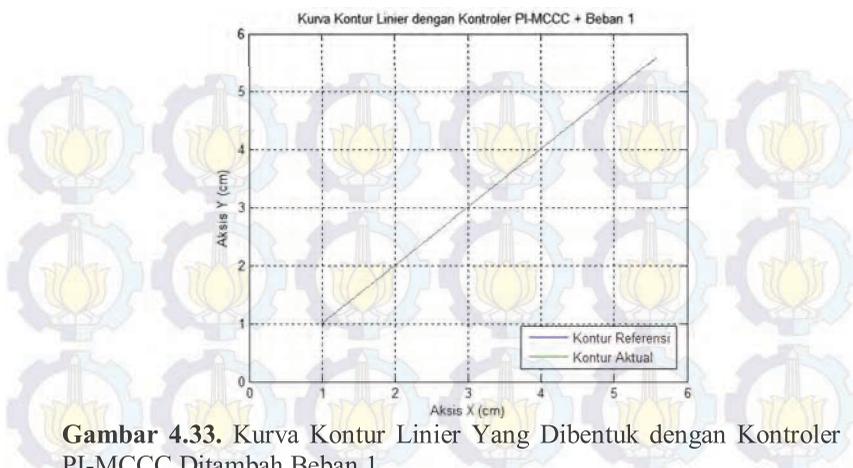
Pengujian dengan kontroler PD pada tiap aksis dapat disimpulkan bahwa respon tiap aksis dapat melakukan *tracking* kontur sesuai dengan kontur referensi. Akan tetapi hasil kesalahan kontur masih besar karena sistem bekerja secara terpisah tanpa sinkronisasi antar aksis sehingga kesalahan kontur dipengaruhi oleh kesalahan *tracking* tiap aksis. Pada saat *tracking* kontur tanpa beban, hasil respon sistem tampak tidak ada overshoot. Hal ini disebabkan karena respon tiap aksis setelah diberikan kontroler PD. Sehingga karakteristik respon tiap aksis menjadi respon orde pertama tanpa *error steady state*.



Gambar 4.32. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC

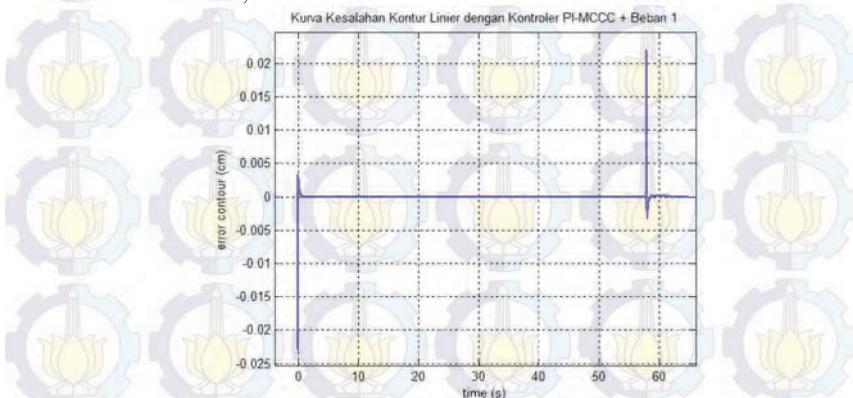
Dapat dilihat pada Gambar 4.32 bahwa dengan kontroler PI pada *Cross-Couple Controller*, hasil respon *tracking* kontur dapat mencapai sinyal kontur referensi. Hal ini disebabkan karena respon kesalahan motor servo ac tiap aksis dapat direduksi oleh mekanisme kontrol *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller*. Kontur aktual tampak mengikuti kontur referensi dan dapat dilihat kesalahan kontur hampir mendekati nol. Akan tetapi, sistem juga perlu diuji dengan pemberian beban untuk mengetahui kemampuan dari sistem saat proses pembentukan benda kerja. Begitu juga kemampuan dalam *tracking* kontur yang sangat dipengaruhi oleh hasil respon *tracking* posisi tiap aksis dan pengaruh kontroler PI dalam melakukan sinkronisasi antar aksis. Sehingga, dapat diartikan bahwa sistem sudah bekerja secara bersamaan karena terdapat mekanisme sinkronisasi tiap aksis.

Pengujian berikutnya dengan melakukan pembentukan kontur linier dengan pemberian beban 1 yaitu perubahan posisi aktual tiap aksis sebesar 1 cm. Hasil kontur yang diperoleh dengan beban 1 ditunjukkan pada Gambar 4.33. Dari gambar tersebut pengaruh penambahan nilai beban mempengaruhi kesalahan konturnya.



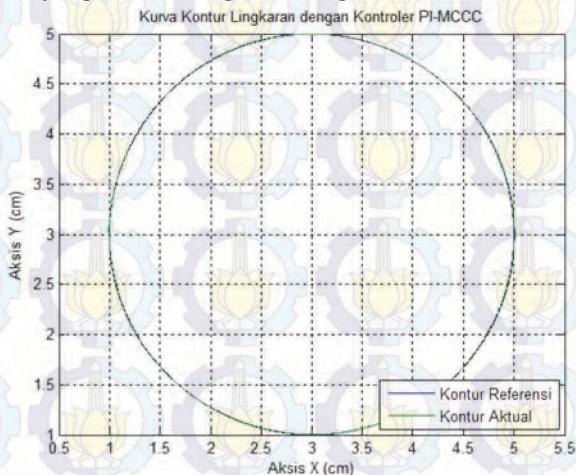
Gambar 4.33. Kurva Kontur Linier Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1

Kurva kesalahan kontur yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.34. Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,02 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi dengan cepat sehingga kesalahan kontur mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis dan mekanisme sinkronisasi tiap aksis dengan kontroler PI sehingga kesalahan *tracking* kontur dapat direduksi. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PI-MCCC pada kontur linier ditambah beban 1 adalah 0,000872.

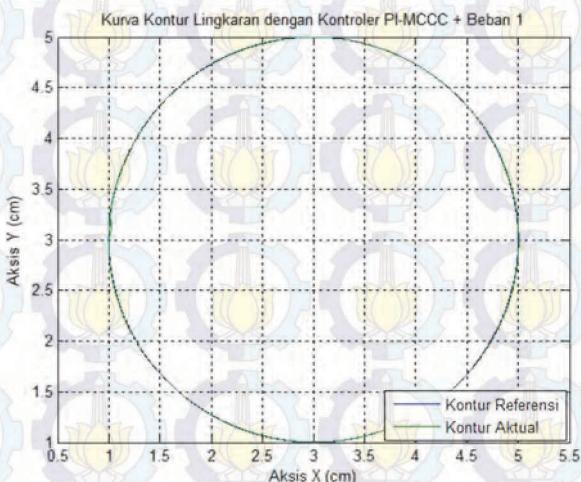


Gambar 4.34. Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1

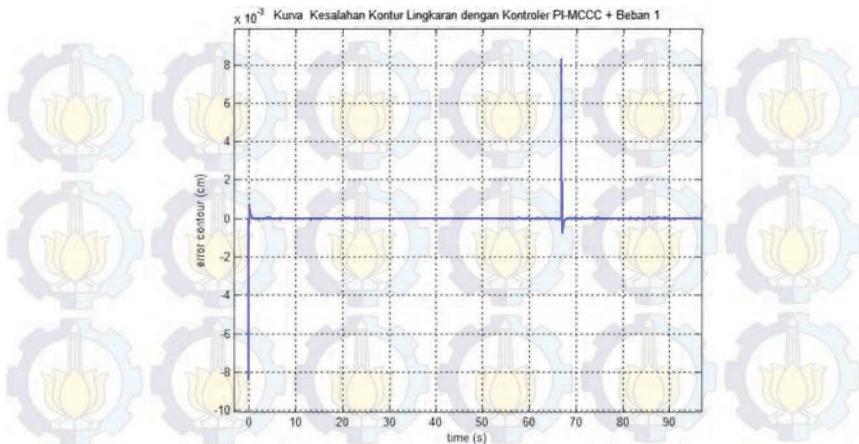
Sistem dengan kontroler PI-MCCC juga diuji untuk membentuk kontur lingkaran. Digunakan kontur lingkaran dengan jari-jari 2 cm, titik pusat lingkaran XY (3,3), *cutting speed* 0,1 cm/s, dan sudut awal 180°. Hasil kontur yang dibentuk dapat dilihat pada Gambar 4.35.



Gambar 4.35. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC



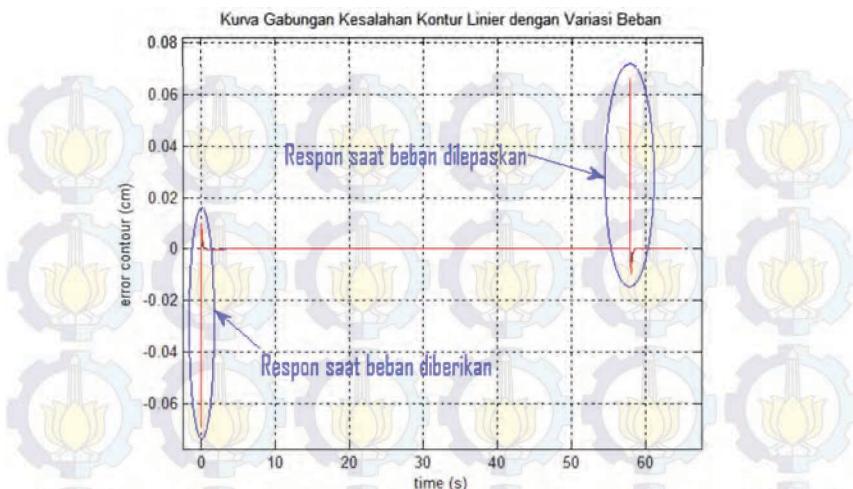
Gambar 4.36. Kurva Kontur Lingkaran Yang Dibentuk dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1



Gambar 4.37. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Ditambah Beban 1

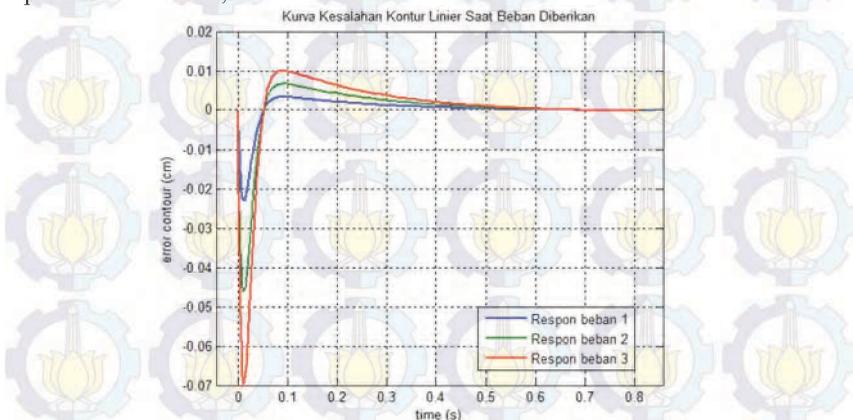
Kurva kesalahan kontur yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.37. Terlihat bahwa kesalahan kontur maksimum mencapai 0,008 cm pada saat awal beban diberikan. Kurva kesalahan tampak dapat direduksi dengan cepat sehingga kesalahan kontur mengecil mendekati nol. Fenomena tersebut merupakan adanya pengaruh dari kontroler PD pada tiap aksis dan mekanisme sinkronisasi tiap aksis dengan kontroler PI sehingga kesalahan *tracking* kontur dapat direduksi. Nilai RMSE dari pengujian dengan kontroler PI-MCCC pada kontur lingkaran ditambah beban 1 adalah 0,00036.

Pengujian dengan kontroler PI-MCCC ditambah pembebanan juga dilakukan dengan variasi kondisi beban. Dengan variasi beban dapat diamati berdasarkan kesalahan kontur pada semua kondisi beban didapat perbandingan seperti pada Gambar 4.38 dan 4.41. Kesalahan kontur yang terjadi semakin besar dengan penambahan beban yang semakin besar pula. Akan tetapi, pada akhirnya kesalahan dapat diminimalkan. Nilai RMSE dari pengujian dengan variasi beban adalah kontur linier dengan beban 1 sebesar 0,000872, dengan beban 2 sebesar 0,0019, dan dengan beban 3 sebesar 0,0028. sedangkan untuk kontur lingkaran dengan beban 1 sebesar 0,00036, dengan beban 2 sebesar 0,00074, dan dengan beban 3 sebesar 0,0011.

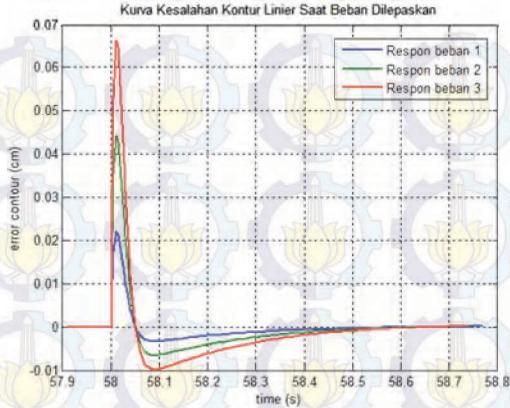


Gambar 4.38. Kurva Kesalahan Kontur Linier Sistem dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban

Dari hasil pengujian dengan variasi beban kontur linier pada Gambar 4.38 dapat diperjelas untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.39 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.40,

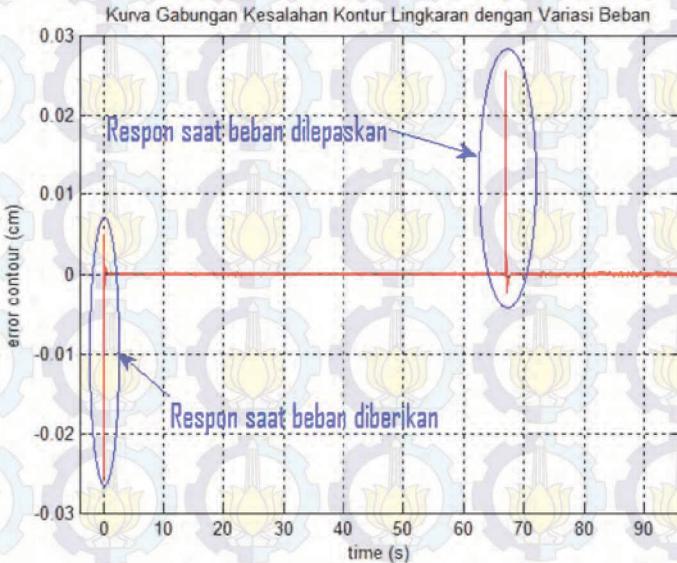


Gambar 4.39. Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban



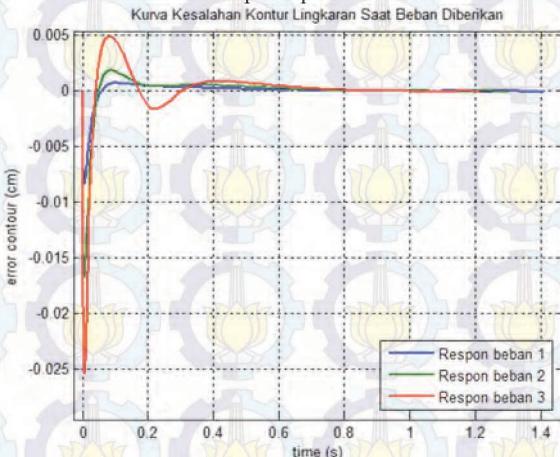
Gambar 4.40. Kurva Kesalahan Kontur Linier dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan

Selanjutnya pengujian variasi beban pada kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.41.

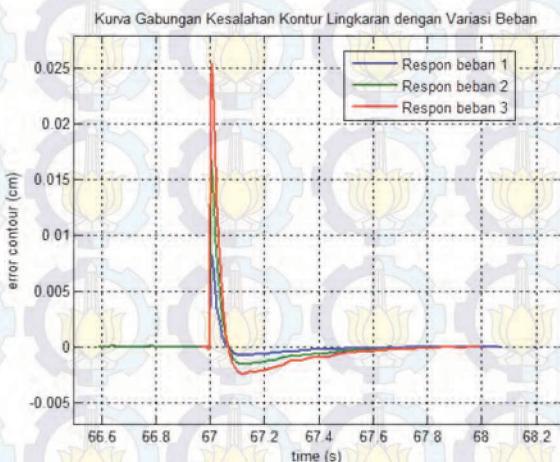


Gambar 4.41. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan Kontroler PI-MCCC Dengan Variasi Beban

Untuk respon kesalahan kontur saat ditambahkan beban dapat dilihat pada Gambar 4.42 dan saat beban dilepaskan juga terdapat perubahan pada respon kesalahan kontur seperti pada Gambar 4.43.



Gambar 4.42. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Ditambah Beban



Gambar 4.43. Kurva Kesalahan Kontur Lingkaran dengan PI-MCCC Saat Beban Dilepaskan

Untuk melakukan perbandingan performansi antara metode kontrol *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI dan metode kontrol terpisah dengan kontroler PD, digunakan perhitungan RMSE yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai RMSE Pengujian dengan Variasi Beban Dan Metode Kontrol

Kontur	Beban	Kontrol PD	Kontrol PI-MCCC
Linier	1 (1 cm)	0,0293	0,0008
	2 (2 cm)	0,0586	0,0019
	3 (3 cm)	0,0879	0,0028
Lingkar	1 (1 cm)	0,0976	0,0004
	2 (2 cm)	0,2333	0,0007
	3 (3 cm)	0,4358	0,0011

Dari tabel 4.1 tersebut, dapat terlihat bahwa metode *Modified Cross-Coupled Control* dengan kontroler PI memiliki nilai RMSE yang paling kecil dalam berbagai kondisi pengujian dengan variasi pembebanan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Koren, Y, “*Cross Coupled Biaxal Computer Control for Manufacturing Systems*”, *Trans ASME J. Dynamic Syst., Meas., Contr.* Vol 102 pp. 265-272, 1980.
- [2] Koren, Y, “*Variable-gain cross-coupling controller for contouring*”, *Proc, Ann. CIRP.* vol. 40. pp. 371–374, 1991.
- [3] Y.T.Shih, dkk, “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-axis Motion. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42*”, pp 1539-1548, 2002.
- [4] M.Vijayarathick dan P.K.Bhaba, “*Position Tracking Performance of AC Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*”, *IJRRAS* Vol 10. pp 119-128, 2014.
- [5] Jianren SUN dan Chibing HU, “*Research on Modeling of Contour Error for Motion Control Sstem of CNC Machine*”, pp 1553 – 1556, 2011.
- [6] Ogata, K., “*Modern Control Engineering 8th ed*”, Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 1997.
- [7] HSMWorks, “*CNC Handbook*” [Online Handbook]. <<http://www.hsmworks.com/docs/cncbook/en/>>, 2012.



BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

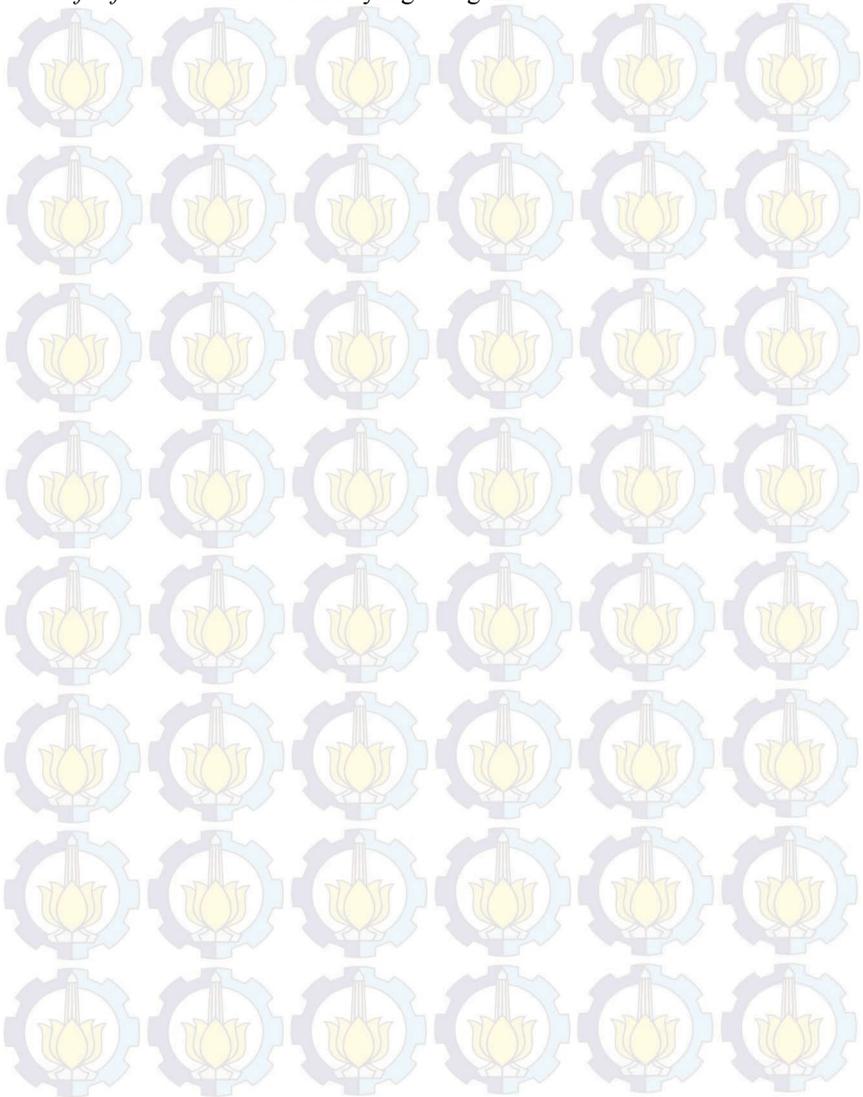
Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Kesalahan kontur yang dipengaruhi perubahan beban pada tiap aksis mesin CNC dalam melakukan *tracking* kontur dan sinkronisasi kontrol antar aksis dapat dikompensasi dengan menggunakan metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller*.
2. Pada pengujian dengan variasi nilai beban, metode *Modified Cross Coupled Control* mampu melakukan *tracking* dengan baik pada saat diberikan gangguan dengan variasi beban berupa perubahan posisi sebesar 1 cm, 2 cm, dan 3 cm dengan nilai RMSE yang dihasilkan lebih kecil dari toleransi kesalahan sebesar 0,3 cm.
3. Untuk pembentukan kontur linier dengan penambahan beban, dengan menggunakan kontrol aksis secara terpisah didapat nilai RMSE sebesar 0.0879, sistem dengan PI-MCCC menghasilkan nilai RMSE sebesar 0.0028, hal ini membuktikan bahwa terjadi peningkatan performa sistem terhadap beban.
4. Metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* mampu melakukan *tracking* kontur dengan lebih baik jika dibandingkan dengan metode kontrol aksis secara terpisah.

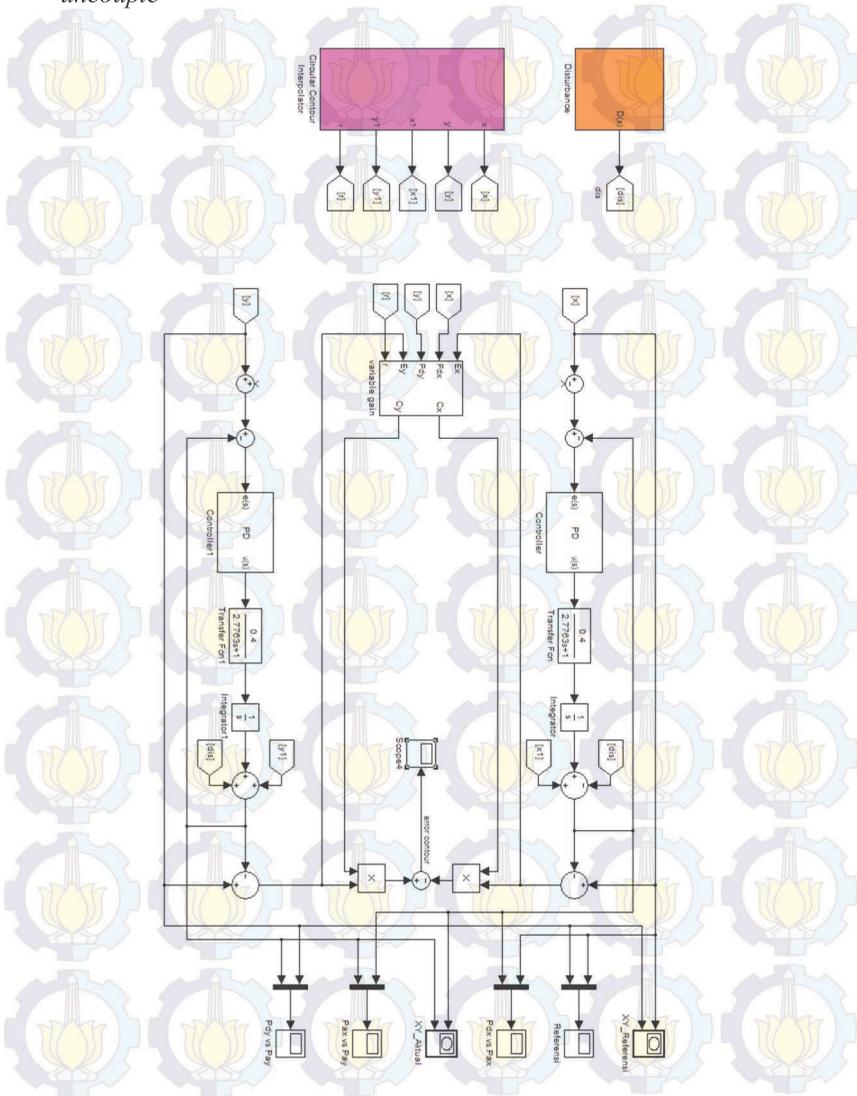
5.2. Saran

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian dari tugas akhir pengaturan mesin CNC *Milling* dengan menggunakan *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* ini dapat dirumuskan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya. Rekomendasinya yaitu saat pengujian, dilakukan dengan beberapa fungsi alih motor servo ac yang berbeda. Sehingga akan mampu dianalisa dan dikembangkan metode *Modified Cross Coupled Control* dengan kontroler PI sebagai *Cross-Couple Controller* untuk

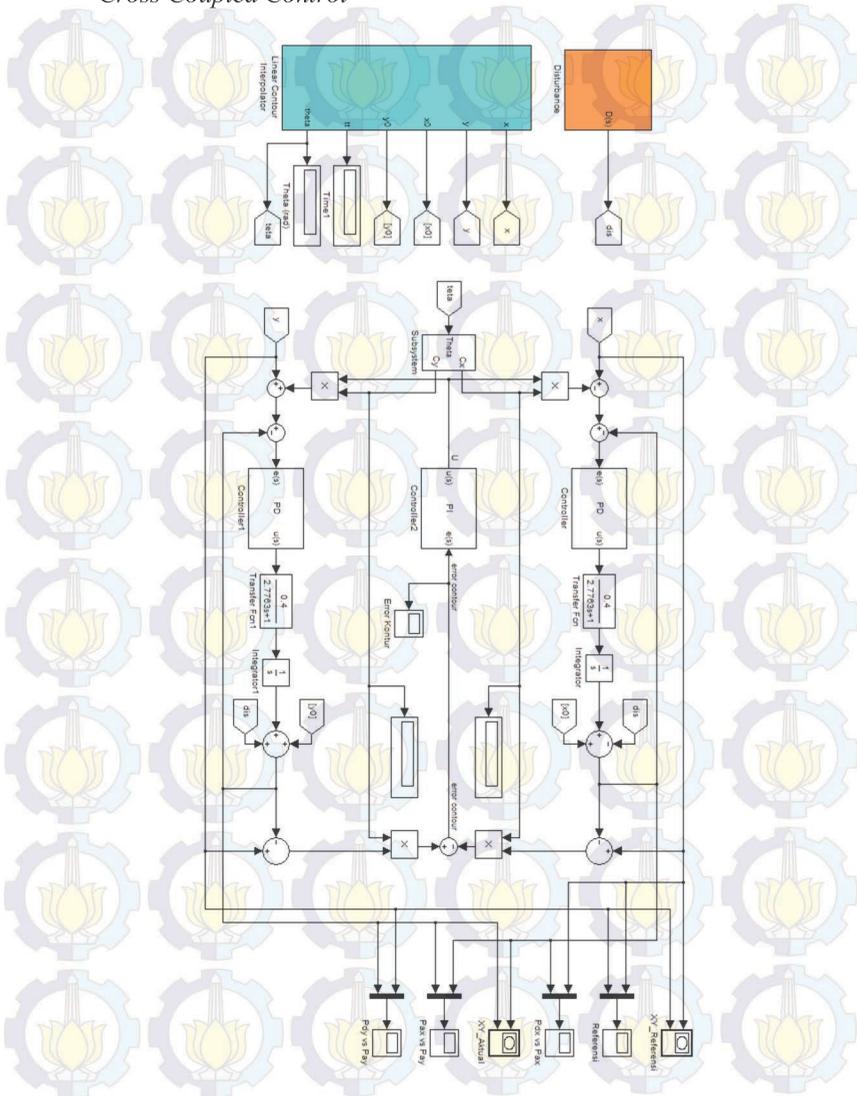
meningkatkan akurasi kontur pada berbagai mesin CNC *Milling* dengan *transfer function* aktuator aksis yang beragam.



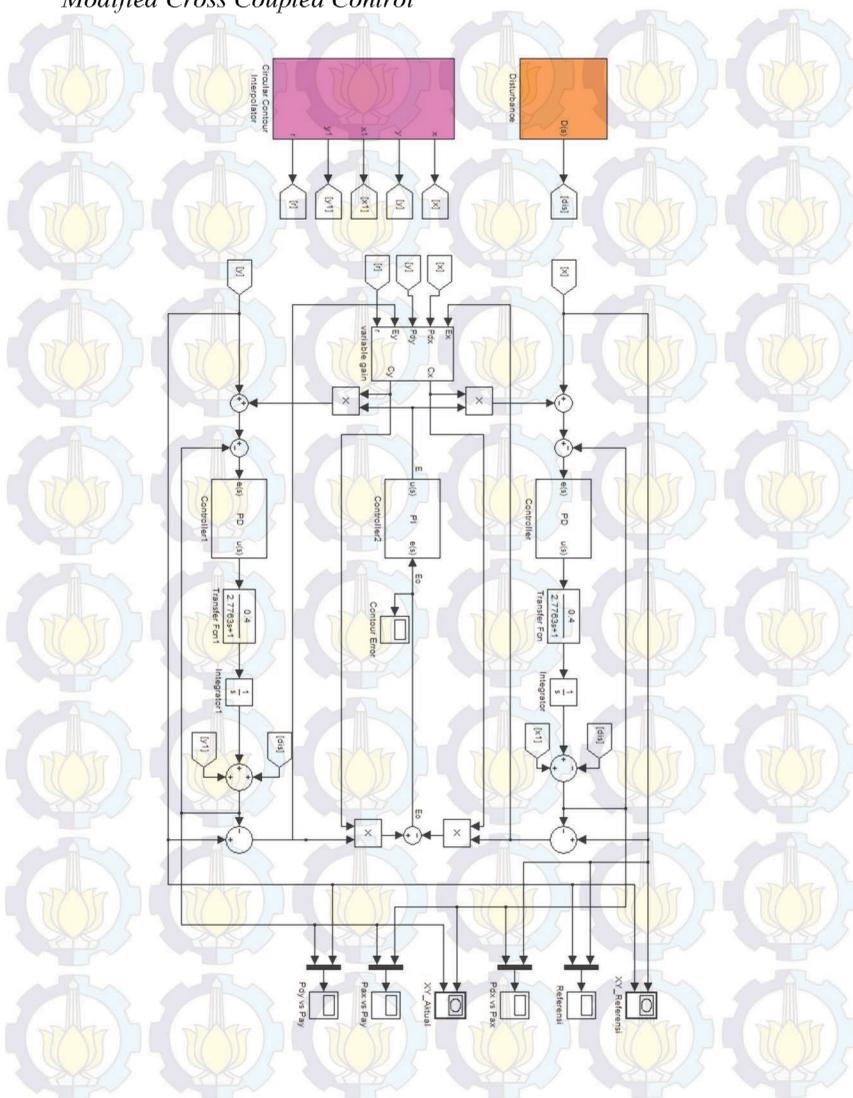
2. Diagram blok pengujian kontur lingkaran dengan kontroler PD *uncouple*



3. Diagram blok pengujian kontur linier dengan kontroler PI-Modified Cross Coupled Control



4. Diagram blok pengujian kontur lingkaran dengan kontroler PI-
Modified Cross Coupled Control



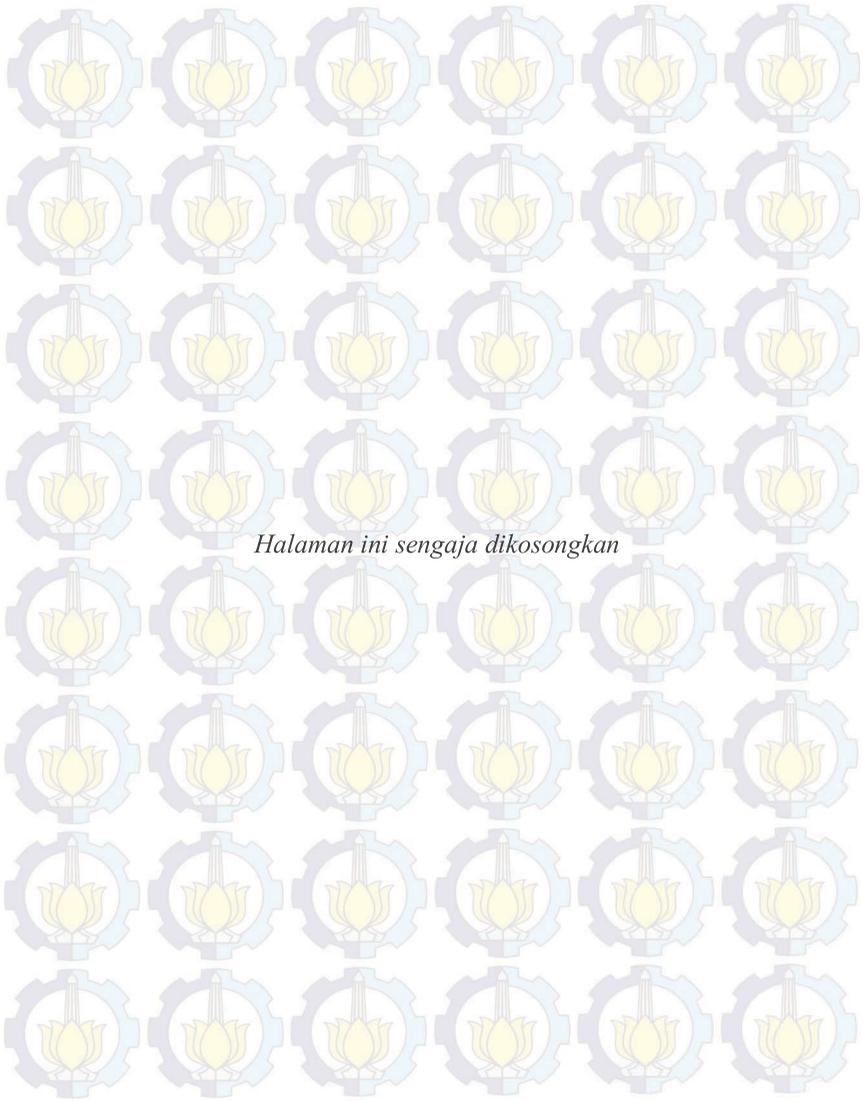
5. Source program interpolator kontur linier

```
function out=lurus(xx)
global theta sudut;
x0=xx(1);
y0=xx(2);
xt=xx(3);
yt=xx(4);
v=xx(5);
tt=xx(6);

if tt==0;
    theta=atan((yt-y0)/(xt-x0));
end
vx=v*cos(theta);
vy=v*sin(theta);
x=x0+vx*tt;
y=y0+vy*tt;
sudut=rad2deg(theta);
out=[x;y;x0;y0;tt;theta];
```

6. Source program interpolator kontur lingkaran

```
function out=lingkaran(xx)
global r x1 y1;
xc=xx(1);
yc=xx(2);
r=xx(3);
omega=xx(4);
theta0=xx(5);
tt=xx(6);
if tt==0
    x1=xc+r*cos((omega*tt)+theta0);
    y1=yc+r*sin((omega*tt)+theta0);
end
x=xc+r*cos((omega*tt)+theta0);
y=yc+r*sin((omega*tt)+theta0);
out=[x;y;x1;y1;r];
```



Halaman ini sengaja dikosongkan