



TESIS - TE142599

**PREDICTIVE MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL  
UNTUK KESALAHAN KONTUR MESIN CNC MILLING  
3-AXIS**

ABDUL HADI

NRP. 2213202010

DOSEN PEMBIMBING

Dr.Ir. Mochammad Rameli

Ir. Rusdhianto Effendie AK., MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



TESIS TE142599

**PREDICTIVE MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL  
FOR CONTOUR ERROR 3 AXIS CNC MILLING MACHINE**

ABDUL HADI

NRP. 2213202010

SUPERVISOR

Dr.Ir. Mochammad Rameli

Ir. Rusdhianto Effendie AK., MT.

MAGISTER PROGRAM  
CONTROL SYSTEM ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015

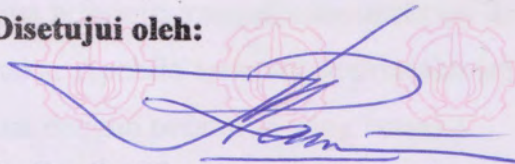
**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)**

**di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**oleh:  
Abdul hadi  
Nrp. 2213202010**

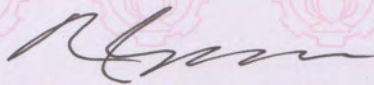
**Tanggal Ujian : 28 Juli 2015  
Periode Wisuda : September 2015**

**Disetujui oleh:**



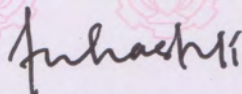
**1. Dr. Ir. Mochammad Rameli  
NIP. 1954 1227 1981 0310 02**

**(Pembimbing I)**



**2. Ir. Rusdhianto Effendie, A.K., M.T.  
NIP. 1957 0424 1985 0210 01**

**(Pembimbing II)**



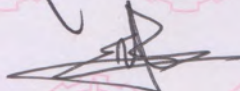
**3. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T.  
NIP. 1968 0812 1994 0320 01**

**(Penguji)**



**4. Ir. Joko Susila, M.T.  
NIP. 1966 0606 1991 0210 01**


**(Penguji)**



**5. Eka Iskandar, S.T., M.T.  
NIP. 1980 0528 2008 1210 01**

**(Penguji)**

**Direktur Program Pascasarjana,**



**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.  
NIP. 1964 0405 1990 0210 01**



# “PREDICTIVE MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL FOR CONTOUR ERROR 3-AXIS CNC MILLING MACHINE”

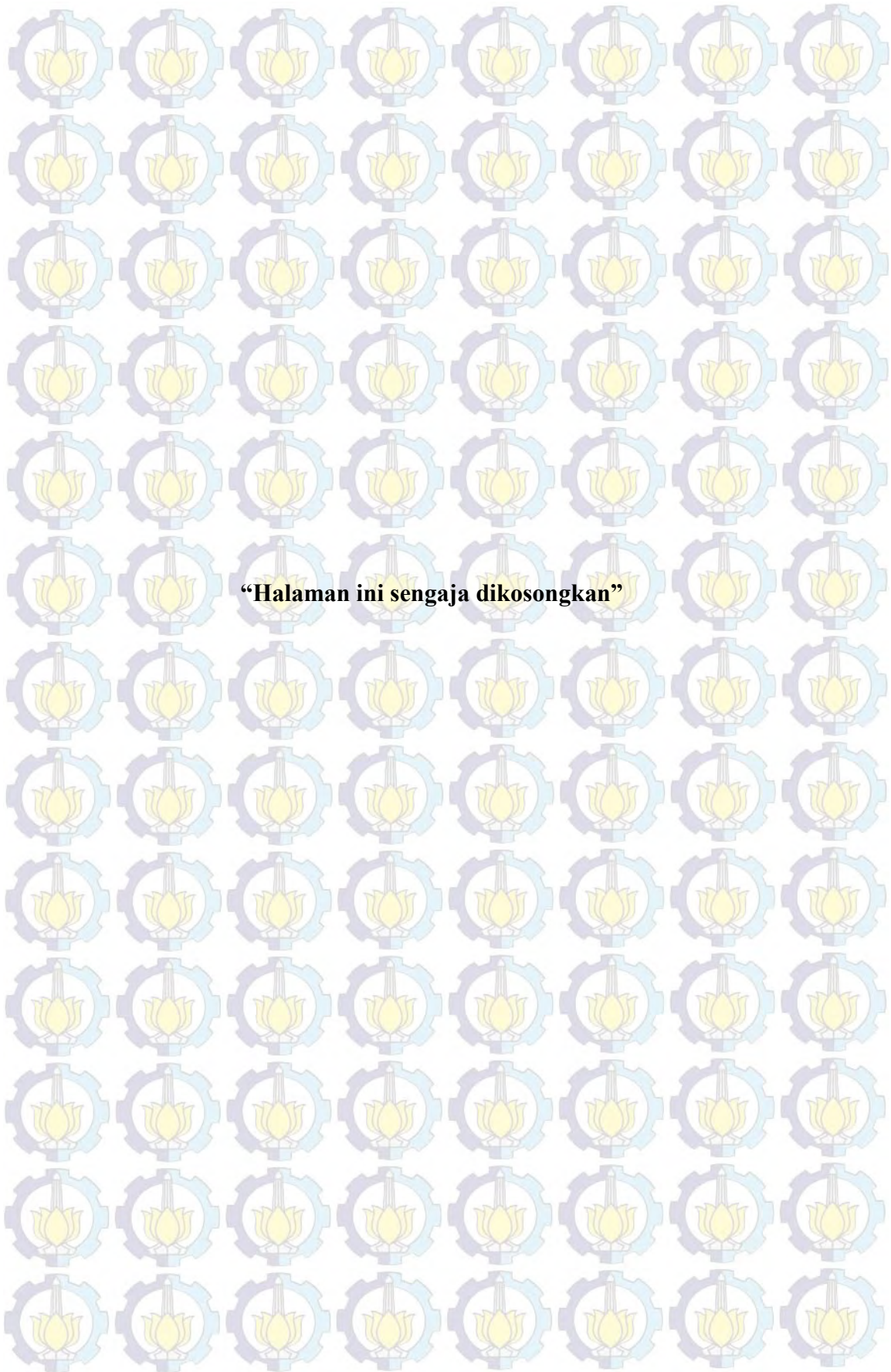
Name : Abdul Hadi  
NRP : 2213202010  
Supervisor : 1. Dr. Ir. Mochammad Rameli  
2. Ir. Rusdianto Effendie AK., MT.

## ABSTRACT

The motion of work piece that has relative slow characteristic on process of feeding 3 axis CNC Milling machine affect the synchronization of X and Y axis. The out of sync between the two axis cause contour error. The materials of manufacturing that has solid form cause the contour error cannot be fixed. This research propose Predictive control with Modified Cross-Coupled Control to predict the contour error. The Predictive Modified Cross-Coupled Control (PMCCC) method can reduce linear contour error that's compared with PI Modified Cross-Coupled Control method. However, for circular contour error, the result of proposed method cause contour error worse.

**Keyword:** *Feeding, Work Piece, Contour Error, 3 Axis CNC Milling Machine, Predictive Modified Cross-Coupled Control, Synchronization*





**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



# “PREDICTIVE MODIFIED CROSS-COUPLED CONTROL UNTUK KESALAHAN KONTUR MESIN CNC MILLING 3-AXIS”

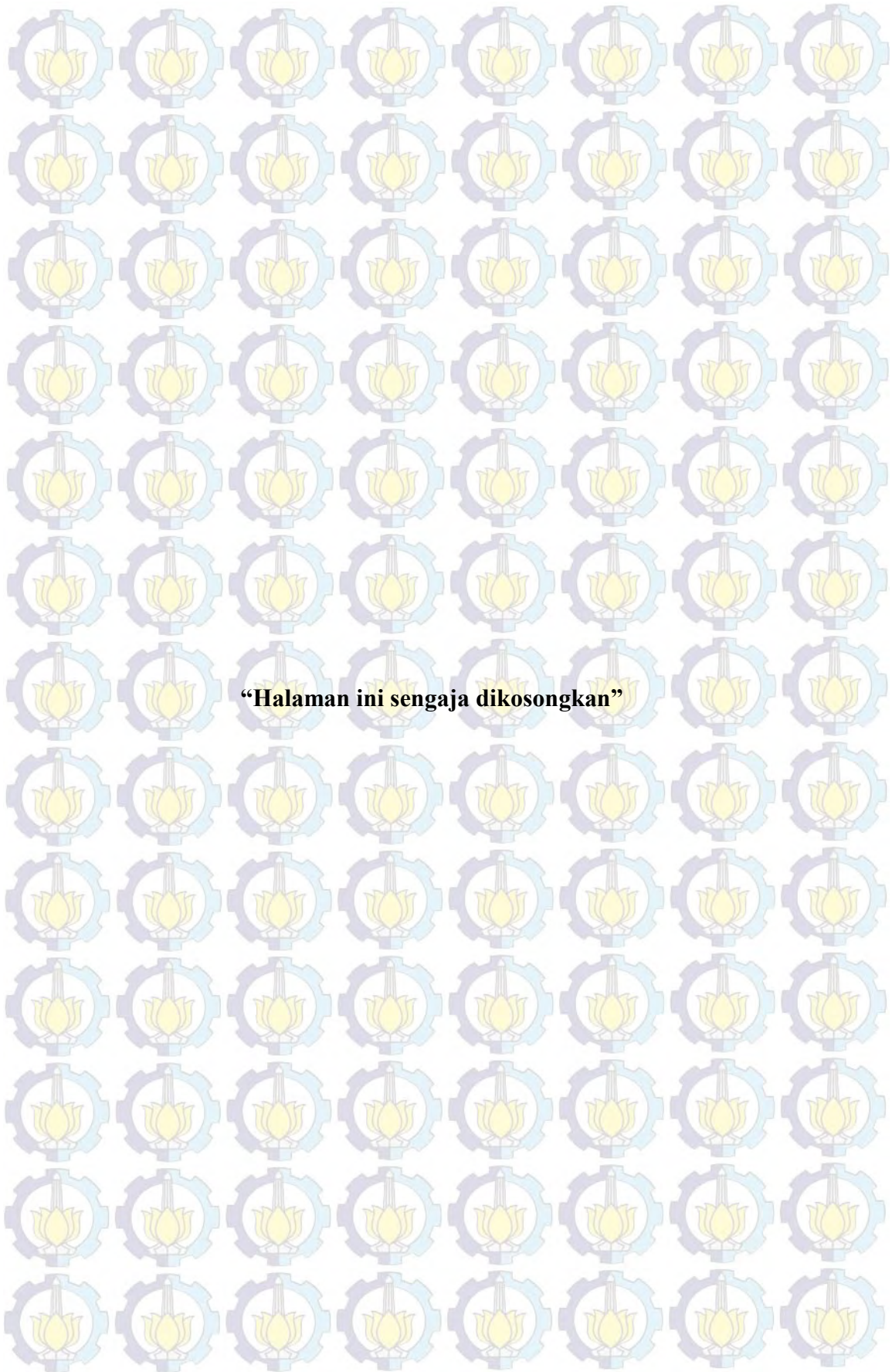
Nama Mahasiswa : Abdul Hadi  
NRP : 2213202010  
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Mochammad Rameli  
2. Ir. Rusdianto Effendie AK., MT.

## ABSTRAK

Pergerakan meja kerja (*work piece*) yang relatif lambat pada proses *feeding* mesin CNC *Milling* 3 aksis mempengaruhi sinkronisasi aksis X dan Y. Tidak sinkron antara dua aksis ini menyebabkan terjadinya kesalahan kontur. Material manufaktur berbentuk zat padat mengakibatkan kesalahan kontur tidak dapat diulang lagi. Penelitian ini mendesain kontrol *Predictive* dengan kombinasi *Modified Cross-Coupled Control* untuk memprediksi kesalahan kontur. Metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* (PMCCC) mampu mereduksi kesalahan kontur linear dibandingkan dengan menggunakan metode *PI Modified Cross-Coupled Control*. Namun, untuk kesalahan kontur *circular* metode *Predictive Modified Cross-Coupled* menghasilkan kesalahan kontur yang lebih besar.

**Kata kunci:** *Feeding, Work Piece, Kesalahan Kontur, Mesin CNC Milling 3 Aksis, Predictive Modified Cross-Coupled Control, Sinkronisasi.*





**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberi nikmat kesehatan dan nikmat kesempatan sehingga memberi kesempatan kepada Penulis untuk menyelesaikan penelitian ini dengan judul:

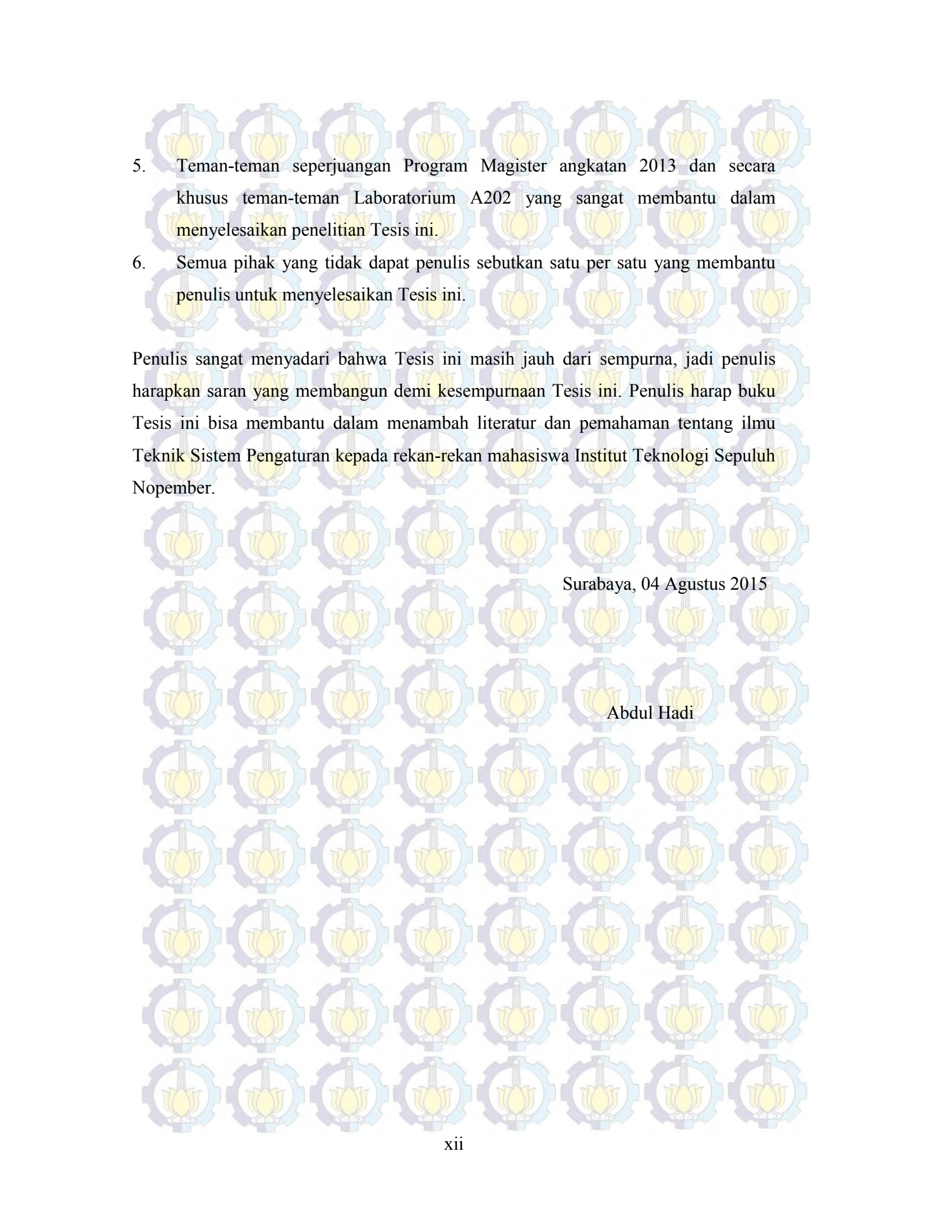
***“Predictive Modified Cross-Coupled Control Untuk Kesalahan Kontur Mesin  
CNC Milling 3-Axis”***

Shalawat dan serta salam semoga selalu penulis hadiahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, sang pembawa risalah dan pementor dalam menjalankan hidup dan kehidupan demi menggapai ridho-Nya.

Penelitian Tesis ini dibuat dengan mengacu pada teori dan hasil penelitian dari berbagai sumber yang telah penulis baca dan fahami. Hal ini juga tidak lepas dari peran para dosen pembimbing Tesis yang selalu mengarahkan dan membimbing ke arah yang seharusnya. Selain itu, ada pihak-pihak lain yang juga sangat berperan penting hingga terselesainya penelitian Tesis ini. Ucapan terima kasih yang tidak terhingga penulis haturkan kepada kedua orang tua dan keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan untuk segala urusan serta kebutuhan. Secara khusus penulis ucapkan terima kasih dan teriring doa agar Allah SWT melipat gandakan amalannya dan dibalas dengan sebaik-baiknya yaitu kepada:

1. Kepada Bapak Dr. Ir. Mochammad Rameli selaku pembimbing 1 dan Bapak Ir. Rusdhianto Effendie, Ak., MT selaku pembimbing 2, yang tidak bosan-bosannya serta penuh kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan penulis.
2. Kepada Ibu Dr. Trihastuti Agustinah., ST., MT, Bapak Joko Susila ST., MT, dan Bapak Eka Iskandar ST., MT selaku penguji dari penelitian Tesis ini.
3. Seluruh dosen Teknik Sistem Pengaturan yang telah memberikan ilmunya dengan sepenuh hati yang menjadi bekal kelak dimasa depan.
4. Staff administrasi jurusan Teknik Elektro, secara khusus Program Pasca Sarjana Teknik Elektro yang telah membantu dalam urusan administrasi.



- 
5. Teman-teman seperjuangan Program Magister angkatan 2013 dan secara khusus teman-teman Laboratorium A202 yang sangat membantu dalam menyelesaikan penelitian Tesis ini.
  6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang membantu penulis untuk menyelesaikan Tesis ini.

Penulis sangat menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari sempurna, jadi penulis harapkan saran yang membangun demi kesempurnaan Tesis ini. Penulis harap buku Tesis ini bisa membantu dalam menambah literatur dan pemahaman tentang ilmu Teknik Sistem Pengaturan kepada rekan-rekan mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 04 Agustus 2015

Abdul Hadi



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Kontribusi.....	4
1.6 Metodologi Penelitian.....	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI .....	7
2.1 Kajian Penelitian Terkait.....	7
2.2 Landasan Teori.....	8
2.2.1 Mesin CNC <i>Milling</i> 3 Aksis.....	8
2.2.2 Pemodelan Motor Servo.....	12
2.2.3 <i>Modified Cross-Coupled Control</i> .....	13
2.2.4 Pemodelan Kesalahan Kontur Linear dan <i>Circular</i> .....	17
2.2.5 Pola Penurunan Kesalahan Kontur secara Eksponensial.....	20
2.2.6 Desain Kontur Linear dan <i>Circular</i> .....	22
2.2.6.1 Kontur Linear.....	22
2.2.6.2 Kontur <i>Circular</i> .....	22
2.2.7 Desain Kontroler PD.....	23



2.2.8	Prediksi Kesalahan Kontur .....	26
BAB III PERANCANGAN SISTEM .....		29
3.1	Diagram Blok .....	29
3.2	Desain Kontur Linear dan <i>Circular</i> .....	30
3.2.1	Kontur Linear .....	30
3.2.2	Kontur <i>Circular</i> .....	30
3.3	Desain Kontroler PD .....	31
3.4	Prediksi Kesalahan Kontur .....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....		33
4.1	Pengujian dengan Sinyal Step .....	33
4.2	Simulasi Tanpa Kontroler <i>Predictive Modified Cross-Coupled Control</i> .....	34
4.3	Simulasi dengan Kontroler PI <i>Modified Cross-Coupled Control</i> .....	38
4.4	Simulasi dengan Kontroler <i>Predictive Modified Cross-Coupled Control</i> .....	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		47
5.1	Kesimpulan .....	47
5.2	Saran .....	47
DAFTAR PUSTAKA .....		49
LAMPIRAN .....		51
DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....		57



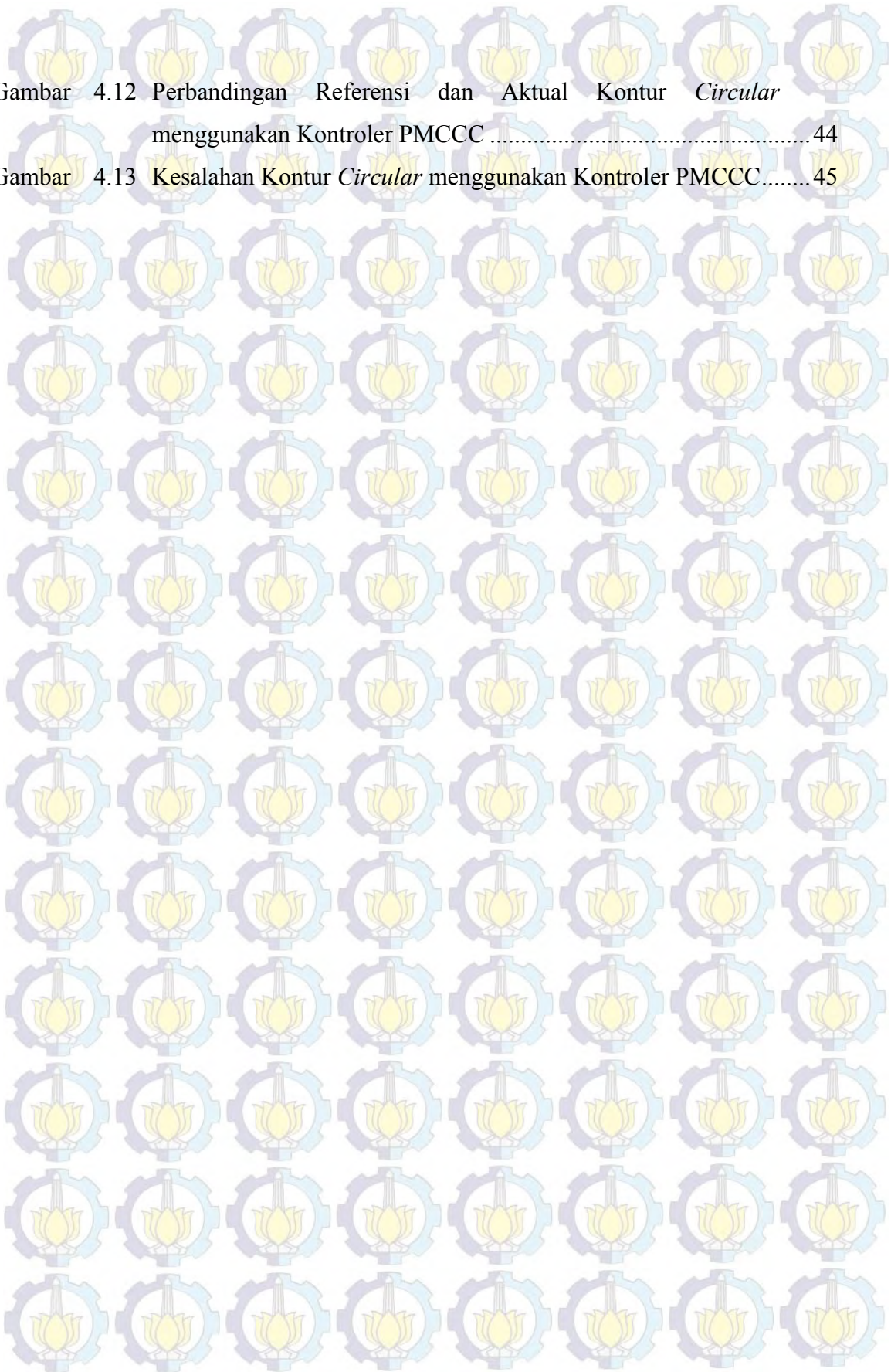
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bentuk Fisik Mesin CNC <i>Milling</i> 3 Aksis.....	10
Gambar 2.2	Tiga Jenis Lup Kontrol pada CNC.....	11
Gambar 2.3	Rangkaian Ekuivalen Motor Sinkron.....	13
Gambar 2.4	Diagram Blok <i>Modified Cross-Coupled Control</i> .....	14
Gambar 2.5	Diagram Blok Pengaturan CNC pada Sistem Tanpa <i>Couple</i> .....	15
Gambar 2.6	Pemodelan Kontur Linear.....	18
Gambar 2.7	Pemodelan Kontur <i>Circular</i> .....	19
Gambar 2.8	Kurva Eksponensial.....	21
Gambar 2.9	Kontroler PD dan Plant.....	24
Gambar 3.1	Konfigurasi <i>Predictive Modified Cross-coupled Control</i> .....	29
Gambar 3.2	Desain Kontrol Prediktif Kesalahan Kontur pada MCCC.....	32
Gambar 4.1	Respon Sistem dengan Sinyal Uji Step.....	34
Gambar 4.2	Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur Linear Tanpa Kontroler PMCCC.....	35
Gambar 4.3	Kesalahan Kontur Linear Tanpa Kontroler PMCCC.....	36
Gambar 4.4	Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur <i>Circular</i> Tanpa Kontroler PMCCC.....	37
Gambar 4.5	Kesalahan Kontur <i>Circular</i> tanpa Kontroler PMCCC.....	37
Gambar 4.6	Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur Linear menggunakan Kontroler PI-MCCC.....	39
Gambar 4.7	Kesalahan Kontur Linear menggunakan Kontroler PI-MCCC.....	39
Gambar 4.8	Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur <i>Circular</i> menggunakan Kontroler PI-MCCC.....	40
Gambar 4.9	Kesalahan Kontur <i>Circular</i> menggunakan Kontroler PI-MCCC.....	41
Gambar 4.10	Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur Linear menggunakan Kontroler PMCCC.....	43
Gambar 4.11	Kesalahan Kontur Linear menggunakan Kontroler PMCCC.....	43



Gambar 4.12 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur *Circular* menggunakan Kontroler PMCCC ..... 44

Gambar 4.13 Kesalahan Kontur *Circular* menggunakan Kontroler PMCCC ..... 45





# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Proses manufaktur sangat mengutamakan hasil produk yang berkualitas tinggi. Tingkat presisi dan akurasi merupakan indikator utama dalam menilai kualitas manufaktur. Jika terdapat produk yang tidak presisi dan akurat, maka dapat dikatakan proses manufaktur itu gagal bahkan hasilnya produk tidak dapat digunakan karena tidak sesuai dengan yang direncanakan. Kegagalan produk menyebabkan meningkatnya biaya produksi, padahal diinginkan suatu produksi harus mengeluarkan biaya seminimal mungkin. Oleh karena itu dibutuhkan performansi yang tinggi pada industri manufakturing moderen saat ini. Mesin manufaktur yang sering digunakan disebut mesin *Computer Numerical Control* (CNC) atau mesin *tool*.

Mesin CNC *Milling* 3 aksis dalam melakukan proses manufaktur sangat dipengaruhi oleh gerakan meja kerjanya (*work piece*). Dalam hal ini, meja kerja digerakkan dengan dua arah gerakan yang berbeda yang disebut arah gerakan aksis X dan Y. Untuk menghasilkan produk yang presisi, performansi masing-masing aksis harus bergerak secara sinkron sehingga *tool* dapat bergerak pada jalur yang diinginkan. *Tool* yang bergerak seperti yang direncanakan akan menghasilkan kesalahan yang minimal [1]. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem kontrol yang mampu untuk mengatasi kondisi yang seperti ini. Sistem kontrol yang diinginkan bisa jadi merupakan sistem kontrol mekanik maupun sistem kontrol elektrik, namun yang dibahas pada penelitian ini yaitu sistem kontrol elektrik.

Sistem kontrol untuk perbaikan sinkronisasi pada mesin CNC bertujuan untuk memperbaiki kesalahan kontur saat *tool path tracking*. Kesalahan kontur merupakan penyimpangan dari pola atau jalur yang didesain saat proses manufaktur. Hal ini biasanya diakibatkan oleh adanya beda posisi meja kerja karena kurangnya sinkronisasi pergerakan motor pada aksis X dan Y. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan kontrol posisi untuk sinkronisasi dua aksis.



Penelitian sistem kontrol untuk sinkronisasi dua aksis berawal dari penelitian Koren [6]. Koren mendesain konsep *Cross-Coupled Control* (CCC) yang sangat sesuai untuk sinkronisasi dua aksis. Hal ini tentu dapat diterapkan pada industri manufaktur untuk CNC dua aksis. Namun, dari konsep yang diusulkan masih banyak kekurangan terutama desainnya hanya sesuai untuk kontrol kecepatan. Ini tentu berbeda saat diterapkan pada meja kerja CNC *Milling* 3 aksis dimana membutuhkan kontrol posisi. Oleh karena itu dibutuhkan desain kontroler yang sesuai untuk sinkronisasi posisi.

Perkembangan penggunaan CCC selama ini masih berbasis pada kontrol kecepatan. Padahal pada CNC *Milling* 3 aksis, CCC difungsikan untuk kontrol posisi. Oleh karena itu, Shih mendesain novel struktur baru dari CCC yang disebut dengan *Modified Cross-Coupled Control* (MCCC), dimana hasil modifikasi ini cocok untuk kontrol *tracking*. Modifikasi CCC ini memiliki kelebihan yaitu kompensator lebih sederhana jika dibandingkan dengan CCC konvensional begitu juga analisa kestabilannya. Kontroler yang diterapkan pada konfigurasi MCCC ini yaitu kontroler PI. Menurut Shih, MCCC ini memiliki struktur yang berbeda daripada CCC konvensional. CCC konvensional hanya dapat digunakan untuk mode kontrol kecepatan, sedangkan MCCC dapat digunakan untuk tiga mode kontrol yaitu posisi, kecepatan dan torsi [4]. Ini menjadikan kelebihan tersendiri dari MCCC.

Penelitian menggunakan MCCC telah dilakukan dengan menggunakan *adaptive gain scheduling* untuk kontur linear dan nonlinear [7]. Penelitian ini melakukan penjadwalan gain yang mampu beradaptasi adanya perubahan beban saat *tool path tracking*. Selanjutnya hasil *gain scheduling* dilakukan optimasi dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Hasil yang diperoleh membuktikan *gain scheduling* yang diberikan pada kontroler adaptif dapat meminimalkan kesalahan kontur dan menghasilkan beberapa *gain* yang optimal. Selain itu, sistem memiliki kestabilan yang memenuhi syarat berdasarkan kestabilan *Routh*. Dari penelitian ini, kesalahan kontur masih relatif besar, sehingga diperlukan kontroler yang dapat memprediksi kesalahan kontur agar kontur tidak terjadi.



Dari beberapa penelitian yang telah diuraikan, hanya satu yang menggunakan MCCC dalam melakukan sinkronisasi dua aksis. Selain itu, belum ada penelitian pada MCCC menggunakan kontroler prediktif. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan kontroler prediktif.

## 1.2. Rumusan Masalah

Sinkronisasi dua aksis merupakan permasalahan tersendiri dari penggunaan mesin *tool* saat proses manufaktur. Efek dari tidak sinkronnya dua aksis yaitu akan terjadi kesalahan kontur yang didesain. Hal ini tentu akan menjadi hal serius karena menyangkut dengan tingkat presisi hasil manufaktur.

Penyebab dari tidak sinkronnya setiap aksis yaitu adanya gaya gesek saat proses *feeding*. Pergerakan masing-masing aksis saat proses ini berlangsung relatif lambat, sesuai dengan tingkat *feeding* dan kecepatan *spindle* (mata pahat) yang dibutuhkan. Dengan lambatnya pergerakan aksis ditambah dengan terhambat oleh kerasnya benda yang disayat, akan mempengaruhi gerakan motor untuk mencapai target posisi yang diinginkan. Jika posisi yang diinginkan tidak tercapai, maka kesalahan ini akan berakibat ketidaksesuaian hasil *tracking* kontur yang didesain.

Dengan semakin tinggi tingkat kekerasan material manufaktur, akan semakin kelihatan pengaruh dari gaya gesek terhadap sinkronisasi. Gaya gesek antara *spindle* dengan material yang diproses menyebabkan ketidaklinearan sistem. Dengan adanya sifat dari ketidaklinearan ini, diperlukan suatu sistem kontrol yang mampu melakukan sinkronisasi posisi aksis X dan Y pada meja kerja CNC *Milling* 3 aksis. Ini bertujuan agar kesalahan kontur dapat direduksi.

Pembentukan kontur saat *cutting* dan *feeding* akan ada kemungkinan terjadinya kesalahan. Kesalahan kontur yang sudah terjadi tidak dapat di ulang lagi karena sifat material untuk manufakturing yaitu zat padat. Dengan rusaknya kontur akan mengurangi kualitas material yang didesain bahkan bisa merusaknya.

Jika benda yang dihasilkan rusak maka akan menambah biaya produksi. Sehingga, akan lebih baik memprediksi kesalahan kontur yang terjadi.

Besarnya kesalahan kontur dapat diperhitungkan berdasarkan besarnya sinyal kontrol *Cross-Coupled* yang diberikan. Oleh karena itu, disini akan mendesain kontroler prediktif yang akan memperkirakan kesalahan kontur dari



manipulasi fungsi transfer masing-masing aksis. Diinginkan perilaku kesalahan kontur berkurang secara eksponensial, dimana dengan semakin bertambahnya waktu akan semakin menuju nol.

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Desain *Predictive Modified Cross-coupled Control* diharapkan mampu memprediksi kesalahan yang akan datang sehingga kesalahan kontur yang sudah diprediksi dapat direduksi. Dengan menghilangkan kesalahan kontur akan meningkatkan hasil dan kualitas produk serta meminimalkan biaya manufaktur.

### **1.4. Batasan Masalah**

Penelitian ini menggunakan konfigurasi MCCC dan mengabaikan pengaruh kecepatan putaran *spindle* untuk kesalahan kontur pada mesin CNC *Milling* 3 aksis. Fungsi transfer *plant* dari dua aksis dianggap identik. Benda kerja hasil manufaktur bersifat dua dimensi. Tingkat kelunakan benda kerja yang akan disayat bernilai tetap.

### **1.5. Kontribusi**

Penelitian ini mengembangkan konfigurasi MCCC untuk sinkronisasi posisi dua aksis yaitu dengan menggunakan kontroler *Predictive* agar kesalahan kontur yang akan datang dapat diprediksi. Kesalahan kontur yang sudah diprediksi akan dapat direduksi.

### **1.6. Metodologi Penelitian**

Pelaksanaan penelitian ini terbagi atas empat tahapan. Setiap tahapan pengerjaan akan dijelaskan lebih detail pada sub pembahasan berikut.

#### **a. Studi Literatur**

Tahap ini diperlukan sebagai langkah awal sebelum mengerjakan penelitian. Hal-hal yang dipelajari antara lain mempelajari prinsip kerja, cara menggunakan, dan cara mengontrol *plant* melalui buku, jurnal, media *online*, dan lain-lain.



b. Perancangan Kontroler

Perancangan kontroler dilakukan untuk mendapatkan sebuah kontroler yang mampu memprediksi kesalahan kontur yang akan datang. Tahap ini dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1) Menentukan karakteristik kontroler

Desain kontroler dibuat berdasarkan permasalahan yang ada dan tujuan yang seperti apa.

2) Melakukan simulasi

Simulasi dilakukan untuk menguji kontroler yang sudah didesain dan melihat bagaimana performansinya.

c. Pengumpulan Data

Setelah melakukan simulasi, data dikumpulkan untuk dilihat bagaimana perbedaan saat dengan adanya CCC dan tidak.

d. Penyusunan Tesis

Penyusunan buku Tesis dimulai dari awal mulai penelitian sampai tahap akhir. Buku Tesis ditulis secara intensif apabila proses pengumpulan data dan pengujian telah selesai.





## BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

### 2.1. Kajian Penelitian Terkait

Keakuratan dan kepresisian kontur dari proses manufaktur merupakan syarat utama untuk menghasilkan produk yang berkualitas. Produk yang tidak akurat dan presisi didefinisikan dengan produk rusak atau gagal. Pada penelitian Tsao dan Tomikuza, kontrol untuk akurasi kontur dilakukan hanya pada masing-masing aksis [8]. Penelitian ini memiliki tingkat sinkronisasi yang sangat lemah. Lemahnya sinkronisasi sangat berpengaruh karena dalam sistem manufaktur dibutuhkan gerakan multi aksis, dan gerakan tersebut saling mempengaruhi satu sama lainnya.

Koren menyelesaikan permasalahan ini dengan mengembangkan konfigurasi kontroler yang disebut *Cross-Coupled Control* [6]. Kontroler ini sangat sesuai diterapkan pada industri manufaktur, karena dapat diterapkan untuk kontrol sinkronisasi dua aksis. Namun, dari konfigurasi yang didesain hanya sesuai diterapkan untuk sinkronisasi kecepatan. Pada dasarnya, untuk mesin CNC *Milling* yang dibutuhkan yaitu untuk sinkronisasi posisi dari pergerakan multi aksis.

Dengan dibutuhkannya sinkronisasi posisi dari dua aksis Shih mendesain struktur terbaru dari CCC yang disebut dengan *Modified Cross-Coupled Control* (MCCC). Menurut Shih, struktur MCCC ini dapat diterapkan untuk tiga mode kontrol yaitu mode kecepatan, torsi dan posisi, sehingga hasil modifikasi CCC ini cocok untuk kontrol *tracking*. Kontroler yang diterapkan pada konfigurasi MCCC ini yaitu kontroler PI. MCCC memiliki kelebihan lainnya yaitu kompensator lebih sederhana jika dibandingkan dengan CCC konvensional begitu juga analisa kestabilannya [4].

Pengembangan dari penggunaan MCCC telah dilakukan penelitiannya oleh Hady dengan menggunakan *adaptive gain scheduling* untuk kontur nonlinear. Selanjutnya hasil *gain scheduling* dilakukan optimasi dengan



menggunakan metode *Particle Swarm Oprimization* (PSO). Sistem didesain memiliki kestabilan yang memenuhi syarat berdasarkan kestabilan *Routh* [7].

Penelitian yang berbasis implementasi pada bidang manufaktur dengan sinkronisasi posisi telah melatar belakangi penelitian Sun, dkk [2]. Sinkronisasi posisi yang diterapkan untuk pergerakan multi aksis menggunakan kontroler PD sinkronisasi. Kesalahan posisi sinkronisasi didefinisikan sebagai kesalahan posisi secara diferensial antara aksis yang diukur dengan dua aksis yang berdekatan. Dengan strategi yang sederhana ini sangat mudah diterapkan dan hasilnya terbukti kesalahan sinkronisasi posisi konvergensi menuju ke nol. Penelitian ini hanya diterapkan satu jenis kontur tanpa melakukan variasi kontur yang bisa diterapkan. Oleh karena itu, dengan asumsi banyaknya variasi kontur yang dibutuhkan pada mesin CNC, Huo tertarik melakukan penelitian untuk kontur bebas bentuk [3]. Untuk mendeteksi kesalahan pada kontur dilakukan pendekatan yang dinamakan *Generalize Cross-Coupled Control*. Metode ini yaitu membandingkan antara koordinat referensi dengan koordinat keluaran masing-masing aksis. Prinsip yang dilakukan yaitu dengan mencari jarak terpendek antara koordinat aktual dengan koordinat referensi secara linear. Dari penelitian ini akan memiliki kesulitan dalam mendesain titik koordinat yang benar-benar mendekati koordinat aktual.

Desain kesalahan kontur secara analisa dapat diamati dengan menggunakan pemodelan Hu, dkk [10]. Pemodelan ini digunakan untuk menganalisa kesalahan kontur yang mungkin terjadi. Analisa dilakukan pada kontur linear dan *circular* sehingga menghasilkan *gain* yang dapat memperbaiki akurasi dari aksis X dan Y mesin CNC *Milling* 3 aksis. Pada penelitian ini menggunakan pemodelan Hu ini untuk mendesain *gain* akurasi aksis X dan Y. Untuk pengujian metode *Predictive Modified Cross-coupled Control* yang diusulkan menggunakan *plant* linear motor servo AC [9]. *Plant* untuk masing-masing aksis dianggap identik dan mengabaikan kecepatan gerak *spindle*.

## **2.2. Landasan Teori**

### **2.2.1 Mesin CNC *Milling* 3 Aksis [11][12]**

Mesin *Numerical Control* (NC), menjadi produk mekatronik yang khusus, terdiri dari mesin *tool* yang memiliki komponen mekanik dan sistem kontrol

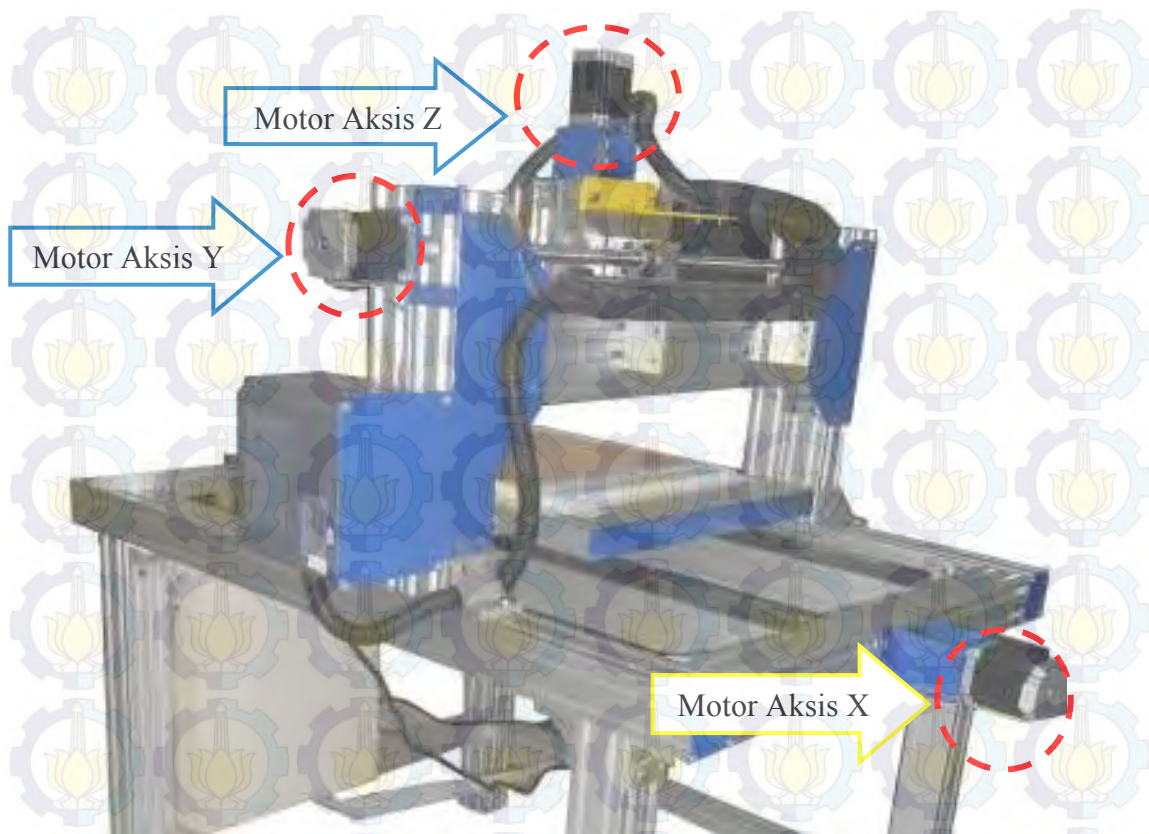


numerik yang merupakan komponen listrik. Mesin *tool* disebut juga “*mother machine*” dalam arti bahwa mesin itu dapat membuat mesin. Secara khusus, sebagai mesin *tool* telah menjadi sempurna dalam perannya menjadi *mother machine* dengan peningkatan akurasi dan kecepatan mesin.

Mesin CNC dapat diklasifikasikan sebagai “mesin potong (*cutting machine*)” dan “bukan mesin potong (*non-cutting machine*)”. Mesin *cutting* berarti mesin yang melakukan proses membuang suatu bagian untuk membuat bagian yang ingin tampak diselesaikan: mesin *milling*, mesin berputar dan mesin EDM (*Electrical Discharge Machining*) menjadi contoh yang baik. Mesin *tool non-cutting* merubah bentuk material yang “kosong (*blank*)” dengan menerapkan gaya dan tekanan mesin yang menjadi contoh yang baik dari ini. Sebagai tambahan, sistem robotik untuk *welding*, *cutting* dan pengecatan dapat termasuk dalam arti yang lebih luas lagi.

Mesin CNC merupakan salah satu mesin yang beroperasi dengan cara dikontrol menggunakan data kode *alphanumeric*. Penerapan kontroler pada mesin CNC *Milling* 3 aksis yaitu untuk mengatur kesesuaian gerak pada aksis X, Y dan Z seperti yang diinginkan. CNC *Milling* 3 aksis ini memiliki aksis dari X dan Y yang digunakan untuk menggerakkan meja kerja dari mesin CNC, sedangkan untuk aksis Z untuk menggerakkan *spindle*. Jika kita ingin melakukan *feeding* pada titik-titik tertentu, maka kita dapat mengatur pergerakan meja kerja sesuai dengan koordinat yang kita inginkan. Misalnya, *feeding* pada koordinat X +200, +500, -300, maka meja kerja CNC akan bergerak maju sejauh 200, selanjutnya ditambahkan lagi pergerakan maju sejauh 500 dan kembali dari posisi akhir (mundur) sejauh 300. Pergerakan posisi dari masing-masing aksis sangat menentukan kualitas hasil yang akan diperoleh saat manufaktur. Gambar fisik mesin CNC *Milling* 3 aksis dapat dilihat pada Gambar 2.1.





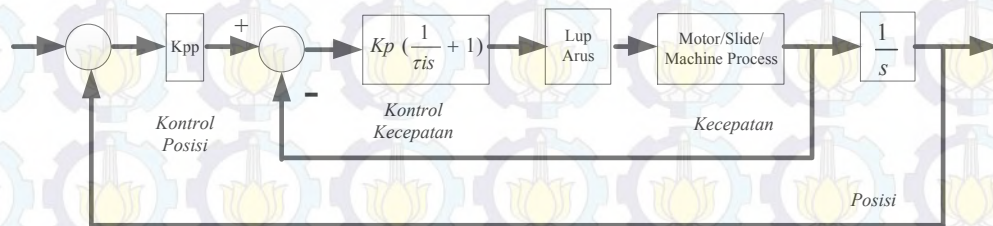
Gambar 2.1 Bentuk Fisik Mesin CNC *Milling* 3 Aksis.

Masing-masing aksis XYZ digerakkan dengan menggunakan motor servo ataupun *stepper*. Motor servo adalah motor yang memiliki konfigurasi rangkaian *encoder* yang digunakan untuk membaca posisi dari motor sehingga kita dapat mengetahui posisinya secara akurat. Adanya *encoder* inilah yang menjadi salah satu kelebihan motor servo dibandingkan dengan motor lainnya. Prinsip kerja motor servo yaitu bergerak berdasarkan jumlah sinyal pulsa masukan. Setiap radian putaran motor digerakkan oleh satu atau lebih sinyal pulsa. Selain itu, kelebihan motor servo yaitu memiliki torsi yang besar sehingga banyak digunakan untuk manufaktur skala besar dengan benda kerja yang tergolong keras. Kekurangan dari motor servo yaitu harganya relatif mahal. Motor servo ini biasanya terdiri dari motor servo DC dan servo AC. Selain motor servo, pada CNC *Milling* biasanya juga menggunakan motor *stepper*. Prinsip kerja motor *stepper* pada mirip dengan motor servo yaitu berdasarkan jumlah masukan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM). Kelebihan motor *stepper* yaitu tergolong relatif murah dibandingkan dengan motor servo. Namun, motor *stepper* ini tidak



memiliki *encoder* sebagai umpan balik posisinya. Sehingga, kita sebagai *user* tidak mengetahui posisi secara pasti. Selain itu, motor *stepper* memiliki torsi yang kecil jika dibandingkan dengan motor servo.

Kecepatan aktual dan posisi motor servo dideteksi dari sebuah sensor diumpanbalik ke rangkaian kontroler, motor servo yang digunakan pada Mesin CNC dikontrol secara kontinu untuk meminimalisasi kesalahan kecepatan atau kesalahan posisi. Sistem kontrol umpanbalik terdiri dari tiga *loop* kontrol independen untuk setiap aksis dari mesin *tool*. *Loop* terluar merupakan kontrol posisi, *loop* ditengah merupakan kontrol kecepatan dan *loop* yang paling dalam merupakan loop kontrol arus. Secara umum, loop kontrol posisi berada didalam NC (Numerical Control) dan yang lainnya berada pada peralatan driver motor servo. Namun, tidak ada standar baku (absolut) dalam meletakkan kontroler, semuanya bergantung pada yang mendesain. Gambar 2.2. menunjukkan jenis-jenis loop pengaturan pada CNC.



Gambar 2.2 Tiga Jenis Lup Kontrol pada CNC

Dalam sistem spindle dari mesin tool, kontrol umpanbalik kecepatan diterapkan untuk mempertahankan kecepatan rotasi regular. Signal umpan balik secara umum dihasilkan dari dua jalan yaitu tacho generator dimana menghasilkan tegangan induksi (sinyal analog) sebagai sinyal umpanbalik, dan optical encoder dimana menghasilkan sinyal pulsa (sinyal digital). Saat ini, khusus kontrol umpanbalik menggunakan sinyal optical encoder dari sinyal tachometer.

Pengaturan setiap aksis dilakukan yaitu dengan memberi sinyal kontrol ke motor yang berbentuk sinyal pulsa. Sebelum menjadi sinyal kontrol, data masukan berbentuk kode numerik harus dirubah menjadi sinyal yang mampu diterima Driver. Hal ini membutuhkan suatu kontroler yang disebut *Numerical Controller*



(NC). Didalam NC ini terdapat algoritma kontrol yang digunakan untuk posisi dan kecepatan *spindle*. Pengaturan kecepatan motor *spindle* bertujuan untuk menyesuaikan antara material dan mata pisau (*tool*) yang digunakan. Untuk mengukur berapa kecepatannya, pada motor *spindle* dapat diletakkan sensor *encoder* yang dihubungkan pada poros *spindle*.

### 2.2.2 Pemodelan Motor Servo [9]

Motor servo merupakan motor yang sering digunakan sebagai penggerak tiap aksis dari mesin CNC *Milling* 3 aksis karena memiliki torsi yang cukup besar dibandingkan dengan motor *stepper*. Motor servo yang digunakan pada penelitian ini yaitu model linear motor sinkron dengan parameter dari penelitian Erista [9]. Motor sinkron merupakan motor yang memiliki kecepatan rotor sama dengan kecepatan medan putar stator. Model linear motor sinkron pada Gambar 2.2 ini diperoleh melalui identifikasi sistem dengan koordinat aksis X dan Y pada mesin CNC.

Pemodelan motor servo AC oleh Erista dimodelkan dengan seperti pada Persamaan (2.1) dan (2.2). Persamaan (2.1) dan (2.2) merupakan pemodelan yang menghubungkan torsi motor terhadap persamaan listrik dan mekanik. Notasi  $\theta$  dan  $\omega$  merupakan posisi sudut dan kecepatan sudut motor servo AC,  $T$  torsi motor,  $J$  dan  $f$  momen inersia dan koefisien gaya gesek motor dan  $E_c$  tegangan masukan (*Volt*) yang diatur.

$$T_c = -K_n \dot{\theta} + K_c E_c \quad (2.1)$$

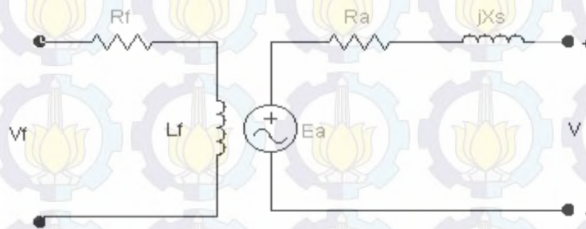
$$T_c = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_L \quad (2.2)$$

Dari Persamaan (2.1) dan (2.2) tersebut diketahui  $K_n$  dan  $K_c$  merupakan parameter konstanta motor hasil eksperimen dengan cara identifikasi, sedangkan  $B$  merupakan koefisien gaya gesek. Dengan asumsi bahwa  $T_L$  sama dengan nol, diperoleh fungsi transfer dengan menyetarakan Persamaan (2.1) ke (2.2) seperti pada Persamaan (2.3) dan ditransformasikan ke domain  $s$  atau transformasi *Laplace* dengan semua kondisi awalnya nol (Persamaan (2.4)).

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_L = -K_n \dot{\theta} + K_c E_c \quad (2.3)$$



$$\frac{\theta(s)}{E_c(s)} = \frac{K_c}{Js^2 + (f + K_n)s} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (2.4)$$



Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor Sinkron

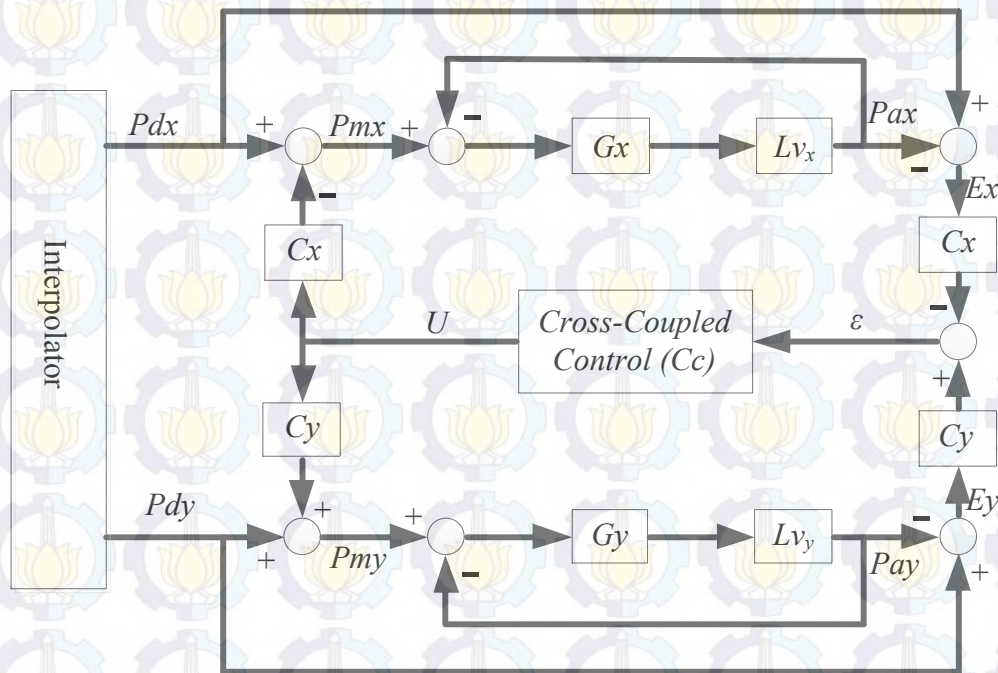
Model matematis motor Servo AC yang digunakan pada penelitian ini yaitu seperti pada Persamaan (2.4). Parameter  $K_c$  dan  $K_n$  merupakan konstanta motor sedangkan  $K_m$  dan  $T_m$  konstanta penguatan motor dan konstanta waktu motor. Parameter untuk  $K_m$  dan  $T_m$  sudah diketahui melalui identifikasi oleh peneliti sebelumnya dengan nilai  $K_m = 0,899$  dan  $T_m = 0,294$ .

### 2.2.3 Modified Cross-Coupled Control [4]

*Cross-Coupled Control* (CCC) merupakan konfigurasi kontrol yang digunakan untuk mensinkronisasi pergerakan motor pada dua aksis. Sinkronisasi dua aksis ini bertujuan untuk memperbaiki kesalahan kontur pada proses manufaktur. Kesalahan kontur dari dua aksis dapat dihitung melalui analisa struktur *Cross-Coupled*.

CCC konvensional hanya sesuai untuk sinkronisasi kecepatan, padahal yang dibutuhkan pada industri manufaktur yaitu sinkronisasi posisi. Oleh karena itu, melatarbelakangi penelitian Shih untuk mendesain *Modified Cross-Coupled Control* (MCCC). MCCC ini memiliki struktur yang berbeda daripada CCC konvensional. MCCC dapat digunakan untuk tiga mode kontrol yaitu posisi, kecepatan dan torsi, sehingga menjadi alasan penelitian ini menggunakan MCCC. Ide MCCC ini berdasarkan konsep kontrol *cascade* yang didesain untuk keaslian sistem yang tidak mempengaruhi dua lup luarnya. Diagram blok MCCC dapat dilihat melalui Gambar 2.4.





Gambar 2.4 Diagram Blok *Modified Cross-Coupled Control*

Konfigurasi MCCC mendeteksi sinyal kesalahan dari masing-masing aksis kemudian diestimasi oleh CCC. Kesalahan dari aksis  $X$  dan  $Y$  masing-masing dinotasikan  $E_x$  dan  $E_y$  yang merupakan beda dari posisi aktual dengan posisi yang diinginkan.  $C_x$  dan  $C_y$  merupakan variabel *gain* yang bergantung dengan jenis konturnya.  $G_x$  dan  $G_y$  merupakan *gain* dari lup masing masing aksis sedangkan  $Lv_x$  dan  $Lv_y$  merupakan *velocity loop*.  $Pd_x$  dan  $Pd_y$  posisi aksis yang diinginkan,  $Pa_x$  dan  $Pa_y$  merupakan posisi aktual,  $Pm_x$  dan  $Pm_y$  posisi modifikasi dari *Cross-coupled Control* dan  $\epsilon$  merupakan kesalahan kontur.

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). Tahapan penentuan CETF dengan dilakukan dengan sistem tanpa *couple* dan sistem yang di *coupled*. CETF diturunkan berdasarkan pada perbandingan kesalahan kontur pada sistem tanpa *couple* antar aksis dengan kesalahan kontur pada sistem dengan *couple* antar aksis yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.

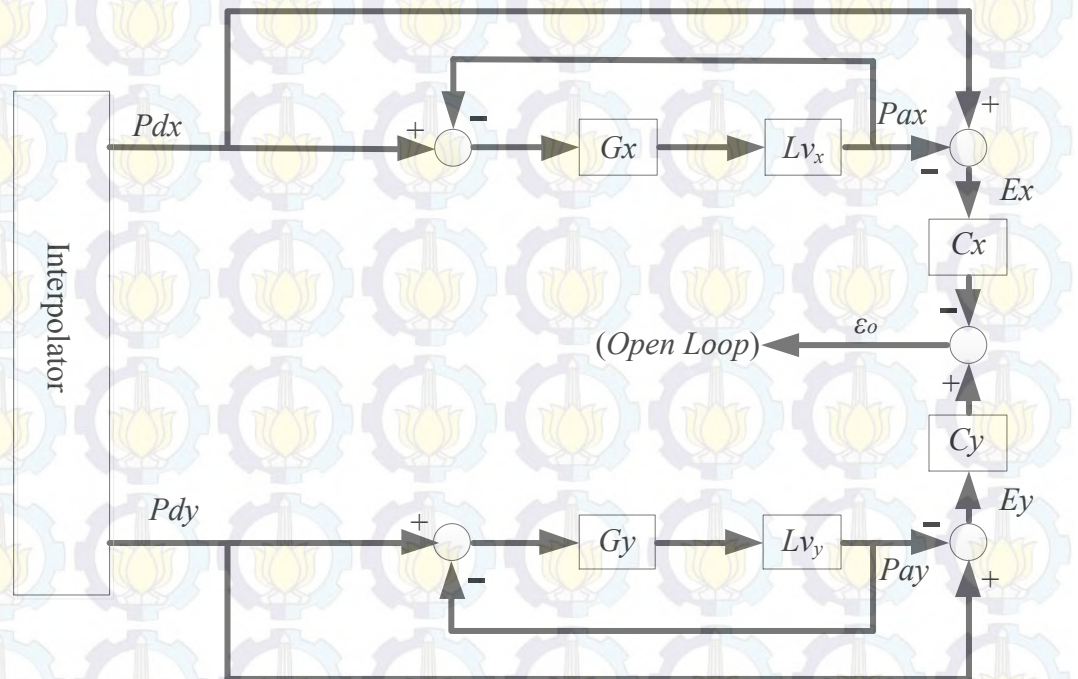


Perhitungan dilakukan pada kondisi sistem tanpa *couple* untuk mendapatkan  $\varepsilon_0$  yaitu kesalahan kontur *open loop* atau tanpa *couple*. Kemudian, perhitungan dilakukan pada kondisi sistem dengan *couple* untuk mendapatkan  $\varepsilon$ .

Kesalahan kontur sistem tanpa *couple* didefinisikan seperti pada Persamaan (2.5).

$$\varepsilon_0 = -E_x C_x + E_y C_y \quad (2.5)$$

Diagram blok pengaturan CNC pada sistem tanpa *couple* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Gambar ini sama dengan Gambar 2.4 hanya saja tanpa ada *Cross-Coupled Gain* yang disebut juga kontrol *Cross-Coupled open loop*.



Gambar 2.5 Diagram Blok Pengaturan CNC pada Sistem Tanpa *Couple*

Dari Gambar 2.5 menunjukkan tidak adanya *Cross-Coupled Gain* sebagai CCC, sehingga dapat dilakukan perhitungan dan mendapatkan Persamaan (2.6) dan (2.7) :

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= P_{dx} - \frac{G_x L_{vx}}{1 + G_x L_{vx}} P_{dx} \end{aligned}$$



$$= \frac{P_{dx}}{1+G_xLv_x} \quad (2.6)$$

$$E_y = P_{dy} - P_{ay} \\ = \frac{P_{dy}}{1+G_yLv_y} \quad (2.7)$$

Substitusi Persamaan (2.6) dan (2.7) ke Persamaan (2.5), maka akan didapat persamaan kesalahan kontur pada sistem tanpa *couple* yang ditunjukkan pada Persamaan (2.8).

$$\varepsilon_0 = -E_x C_x + E_y C_y = -\frac{C_x P_{dx}}{1+G_xLv_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1+G_yLv_y} \quad (2.8)$$

Setelah mendapatkan persamaan kesalahan kontur sistem tanpa *Couple* pada Persamaan (2.8), selanjutnya kesalahan kontur sistem dengan *Couple* didefinisikan sama pada Persamaan (2.5). Kesalahan dari masing-masing aksis X dan Y didefinisikan pada Persamaan (2.9).

$$E_x = P_{dx} - P_{ax} \\ = \frac{P_{dx} + \varepsilon C_c C_x G_x Lv_x}{1+G_xLv_x} \quad (2.9a)$$

$$E_y = P_{dy} - P_{ay} \\ = \frac{P_{dy} + \varepsilon C_c C_y G_y Lv_y}{1+G_yLv_y} \quad (2.9b)$$

Dilakukan substitusi Persamaan (2.9) ke Persamaan (2.8) sehingga diperoleh Persamaan (2.10)

$$\varepsilon = -\frac{[C_x P_{dx} + \varepsilon C_c C_x^2 G_x Lv_x]}{1+G_xLv_x} + \frac{C_y P_{dy} - \varepsilon C_c C_y^2 G_y Lv_y}{1+G_yLv_y} \\ \varepsilon = \frac{-C_x P_{dx}}{1+G_xLv_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1+G_yLv_y} - \frac{\varepsilon C_c C_x^2 G_x Lv_x}{1+G_xLv_x} - \frac{\varepsilon C_c C_y^2 G_y Lv_y}{1+G_yLv_y} \\ \varepsilon \left[ 1 + \frac{C_c C_x^2 G_x Lv_x}{1+G_xLv_x} + \frac{C_c C_y^2 G_y Lv_y}{1+G_yLv_y} \right] = \frac{-C_x P_{dx}}{1+G_xLv_x} + \frac{C_y P_{dy}}{1+G_yLv_y} \\ \varepsilon = \frac{-(1+G_yLv_y)C_x}{\Delta} P_{dx} + \frac{(1+G_xLv_x)C_y}{\Delta} P_{dy} \quad (2.10)$$

dimana,



$$\Delta = (1 + G_xLv_x)(1 + G_yLv_y) + C_c C_x^2 G_xLv_x(1 + G_yLv_y) + C_c C_y^2 G_yLv_y(1 + G_xLv_x)$$

Substitusi Persamaan (2.10) ke Persamaan (2.9) maka didapatkan kesalahan masing-masing aksis dengan sistem di *Couple* seperti pada Persamaan (2.11)

$$E_x = \frac{P_{dx}}{1 + G_xLv_x} - \frac{C_c C_x^2 G_xLv_x(1 + G_yLv_y)}{(1 + G_xLv_x)\Delta} P_{dx} + \frac{C_c C_x C_y G_xLv_x}{\Delta} P_{dy} \quad (2.11a)$$

$$E_y = \frac{P_{dy}}{1 + G_yLv_y} - \frac{C_c C_y^2 G_yLv_y(1 + G_xLv_x)}{(1 + G_yLv_y)\Delta} P_{dy} + \frac{C_c C_x C_y G_yLv_y}{\Delta} P_{dx} \quad (2.11b)$$

CETF didapatkan dengan menyatakan hubungan antara  $\varepsilon$  dan  $\varepsilon_0$ . Hubungan tersebut didapatkan dengan melihat Persamaan (2.8) dan (2.10) sehingga didapatkanlah Persamaan (2.12).

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + C_c P} \varepsilon_0 \quad (2.12)$$

dimana P adalah

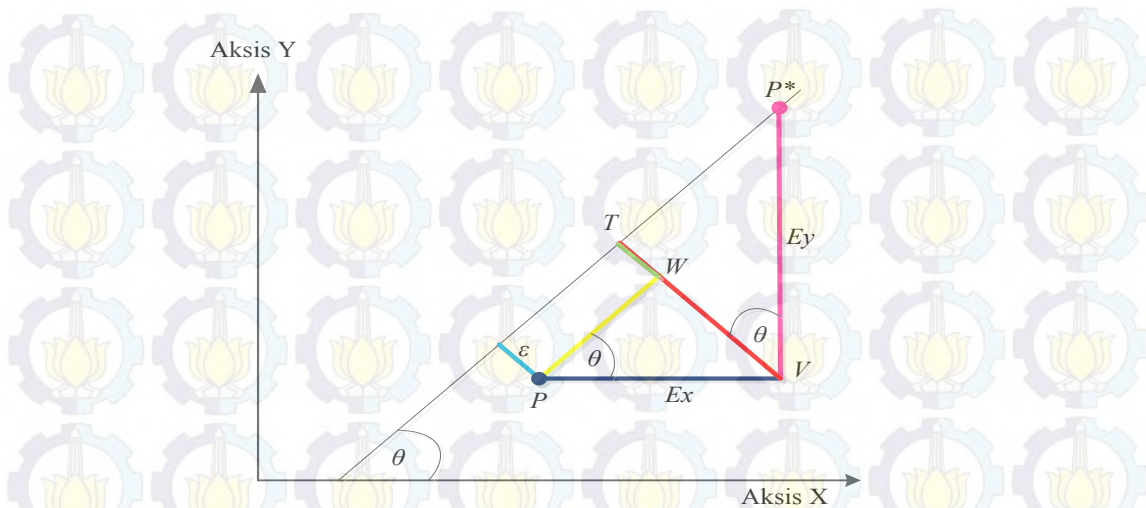
$$P = \frac{C_x^2 G_xLv_x(1 + G_yLv_y) + C_y^2 G_yLv_y(1 + G_xLv_x)}{(1 + G_xLv_x)(1 + G_yLv_y)} = \frac{C_x^2 G_xLv_x}{(1 + G_xLv_x)} + \frac{C_y^2 G_yLv_y}{(1 + G_yLv_y)}$$

Masing-masing aksis dihitung kesalahan posisinya dan diperoleh kesalahan kontur dari masing-masing aksis. Kesalahan kontur dijadikan sinyal kesalahan dan diestimasi menggunakan *Cross-Coupled Control*. Selanjutnya sinyal kontrol dari *Cross-Coupled* dibandingkan dengan posisi yang diinginkan dan menjadi sinyal kesalahan untuk kontroler masing-masing aksis.

#### 2.2.4 Pemodelan Kesalahan Kontur Linear dan *Circular* [5],[10]

Pemodelan digunakan untuk menganalisis kontur dan kemungkinan jenis-jenis kesalahan kontur yang mungkin terjadi. Dari hasil analisa kesalahan kontur akan menghasilkan *gain* akurasi yang dapat diterapkan pada masing-masing aksis. Pemodelan kontur linear dapat dilihat pada Gambar 2.5.





Gambar 2.5 Pemodelan Kontur Linear

Gambar 2.5 menggambarkan gerak linear dari aksis X dan Y dimana pergerakan ini berada pada bidang garis lurus. Sudut yang dibentuk dari aksis X searah positif yaitu  $\theta$ . Posisi aktual dinotasikan P sedangkan posisi yang diinginkan pada  $P^*$ . Kesalahan posisi yang terjadi pada aksis X sebesar  $E_x$  dan pada aksis Y sebesar  $E_y$ . Sehingga dapat diperoleh Persamaan (2.13) yaitu hubungan sudut yang dibentuk terhadap kesalahan dari masing-masing aksis.

$$\sin \theta = \frac{E_x}{VW} \quad (2.13a)$$

$$\cos \theta = \frac{E_y}{VT} \quad (2.13b)$$

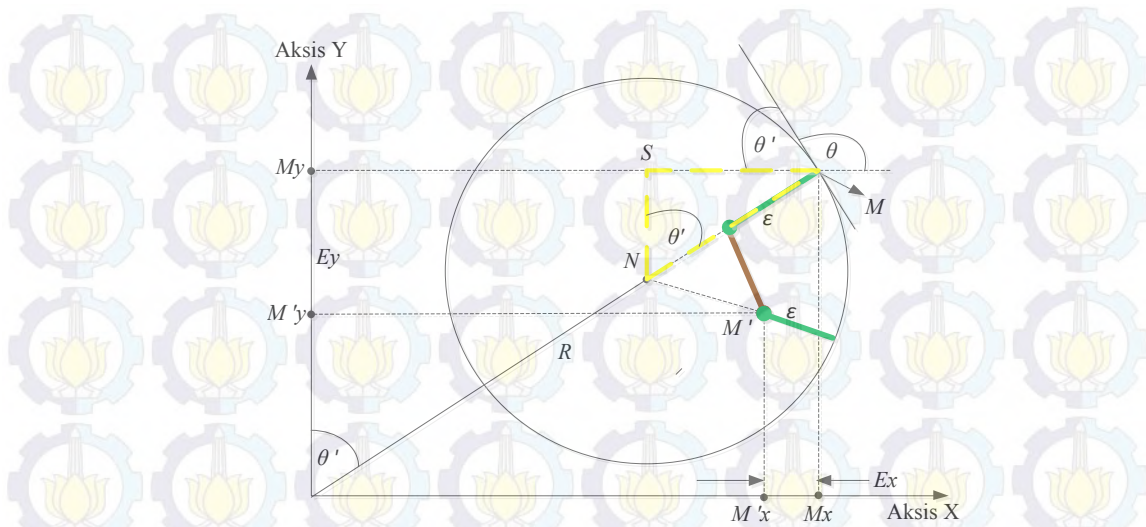
Tujuan agar posisi aktual mengikuti kontur yang didesain, maka diperlukan pergeseran dari aksis X sebesar  $VW$  dan pada aksis Y sebesar  $VT$ . Sehingga selisih untuk pergeseran dari kedua aksis tersebut disebut dengan persamaan kesalahan kontur. Persamaan (2.14) menggambarkan kesalahan kontur ( $\varepsilon$ ) linear dari aksis X dan Y.

$$\varepsilon = (E_y \times \cos \theta) - (E_x \times \sin \theta) = E_y C_y - E_x C_x \quad (2.14)$$

dimana  $C_x = \sin \theta$  dan  $C_y = \cos \theta$ .

Selain kontur linear, penelitian ini juga menggunakan kontur *circular* sebagai pengujian dari kontur nonlinear. Pemodelan kontur *circular* dapat dilihat pada Gambar 2.6.





Gambar 2.6 Pemodelan Kontur *Circular*

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat  $R$  sebagai jari-jari dari lingkaran dan  $N$  sebagai titik pusat lingkaran. Posisi aktual dinotasikan dengan  $M'$  dan posisi yang diinginkan yaitu  $M$ . Persamaan (2.15) menggambarkan kesalahan kontur untuk masing-masing aksis X dan Y.

$$\varepsilon = R - \sqrt{(M'_x - N_x)^2 + (M'_y - N_y)^2} \quad (2.15)$$

Titik pusat lingkaran memiliki koordinat  $(N_x, N_y)$  dan posisi aktual pada koordinat  $(M'_x, M'_y)$ . Rumus ini berlaku untuk error lebih kecil daripada besarnya jari-jari atau *error* berada didalam lingkaran. Posisi aktual ( $M'_x$  dan  $M'_y$ ) dapat diketahui melalui Persamaan (2.16).

$$M'_x = Mx - Ex \quad (2.16a)$$

$$M'_y = My - Ey \quad (2.16b)$$

Untuk melihat besar sudut yang dibentuk dari posisi aktual terhadap posisi yang diinginkan, diperlukan gambar garis kuning putus-putus untuk mendapatkannya. Hubungan sudut yang dibentuk oleh posisi aktual dengan besarnya jari-jari posisi aktual dapat dilihat melalui Persamaan (2.17).

$$SM = \sin \theta' \times R \quad (2.17a)$$

$$NS = \cos \theta' \times R \quad (2.17b)$$



Substitusi Persamaan (2.17) ke Persamaan (2.16) untuk melihat besarnya pergeseran yang harus dilewati posisi aksis X dan Y yaitu pada Persamaan (2.18) dan (2.19)

$$\begin{aligned} M'_x &= Nx + SM - Ex \\ M'_x - Nx &= R \sin \theta - Ex \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} M'_y &= Ny + NS - Ey \\ M'_y - Ny &= -R \cos \theta - Ey \end{aligned} \quad (2.19)$$

Substitusi Persamaan (2.18) dan (2.19) ke Persamaan (2.15) diperoleh Persamaan (2.20) untuk melihat besarnya kesalahan kontur terhadap posisi aktual.

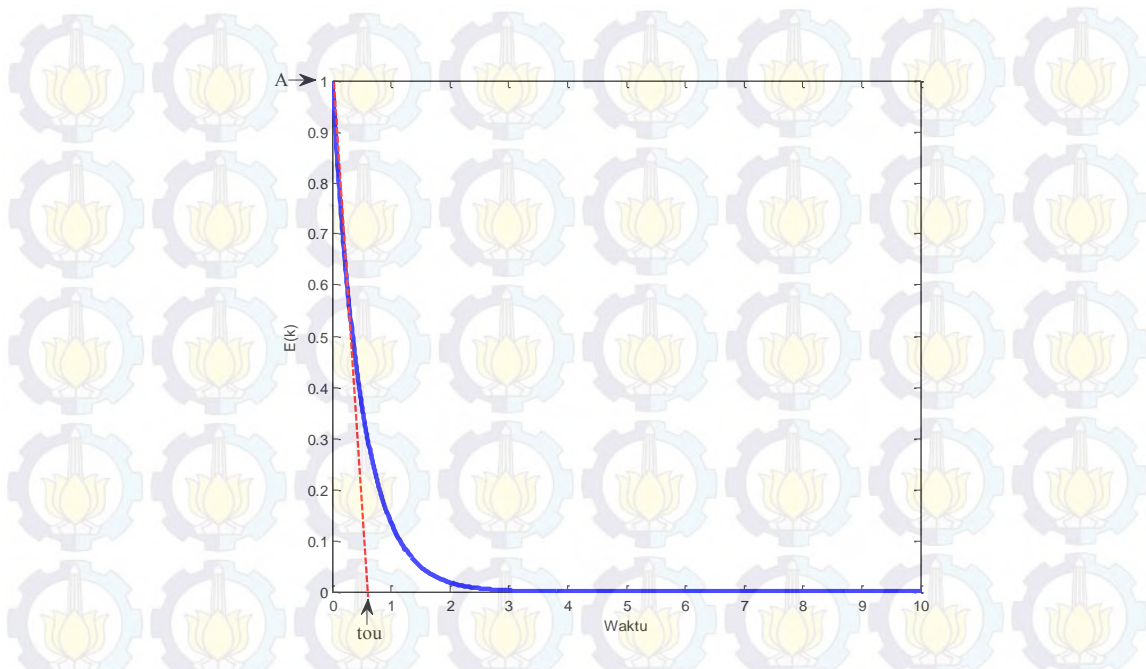
$$\begin{aligned} \varepsilon &= R - \sqrt{(R \sin \theta - Ex)^2 + (-R \cos \theta - Ey)^2} \\ \varepsilon &= R - \sqrt{R^2 - 2R(Ex \sin \theta + Ey \cos \theta) + (Ex^2 + Ey^2)} \\ \varepsilon &= R - R^2 \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{2(Ex \sin \theta + Ey \cos \theta)}{R} + \frac{(Ex^2 + Ey^2)}{R^2} \right)} \\ \varepsilon &= R - R^2 \sqrt{1 - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Ex^2 + Ey^2 + 2R Ex \sin \theta + 2R Ey \cos \theta}{R^2} \right)} \\ \varepsilon &= R - R \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Ex^2 + Ey^2 + 2R Ex \sin \theta + 2R Ey \cos \theta}{R^2} \right) \right] \\ \varepsilon &= \left( \sin \theta - \frac{Ex}{2R} \right) Ex - \left( \cos \theta + \frac{Ey}{2R} \right) Ey \\ \varepsilon &= C_x Ex - C_y Ey \end{aligned} \quad (2.20)$$

dimana  $C_x = \left( \sin \theta - \frac{Ex}{2R} \right)$  dan  $C_y = \left( \cos \theta + \frac{Ey}{2R} \right)$

### 2.2.5 Pola Penurunan Kesalahan Kontur secara Eksponensial

Penelitian ini memprediksi kesalahan kontur pada yang diakibatkan oleh aksis X dan Y. Kesalahan kontur yang telah diprediksi didesain agar berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Berkurangnya kesalahan kontur ini memiliki pola eksponensial seperti yang terlihat pada Gambar 2.7.





Gambar 2.7 Kurva Eksponensial

Kesalahan kontur pada waktu  $t=0$  sebesar  $A$  dan akan berkurang secara eksponensial seperti pada Persamaan (2.21). Penelitian ini akan dianalisa dalam bentuk diskrit, sehingga bentuk diskrit dari Persamaan (2.21) diperoleh dengan mengganti  $t=kTs$  yang terlihat pada Persamaan (2.22).  $Ts$  merupakan *sampling time* kesalahan kontur yang didesain dan  $e(kTs)$  sama dengan kesalahan kontur saat ini ( $e(k)$ ).

$$e(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.21)$$

$$e(kTs) = A \cdot \exp\left(-\frac{Ts}{\tau} k\right) \quad (2.22)$$

Dari Persamaan (2.22) dapat dilakukan prediksi kesalahan kontur satu langkah kedepan atau horizon prediksi ke- $N$  seperti terlihat pada Persamaan (2.23).

$$e(k+1) = \exp\left(-\frac{Ts}{\tau}\right) \cdot e(k) \quad (2.23a)$$

⋮

$$e(k+N) = \exp\left(-N \frac{Ts}{\tau}\right) \cdot e(k) \quad (2.23b)$$



## 2.2.6 Desain Kontur Linear dan *Circular*

### 2.2.6.1 Kontur Linear

Untuk kontur linear menggunakan persamaan garis lurus dengan titik awal pada koordinat tertentu dengan menuju kesuatu titik koordinat tertentu. Dari titik koordinat awal menuju ke titik koordinat tertentu akan membentuk sudut kearah aksis X positif yang disebut dengan  $\theta$ . Persamaan garis lurus untuk referensi dapat dilihat pada Persamaan (2.24).

$$Pdx = x_0 + (vx \times t) \quad (2.24a)$$

$$Pdy = y_0 + (vy \times t) \quad (2.24b)$$

dimana  $x(0)$  dan  $y(0)$  merupakan koordinat awal dan  $t$  merupakan waktu yang diperlukan. Untuk  $vx$  dan  $vy$  merupakan kecepatan pada masing-masing aksis X dan Y seperti pada Persamaan (2.25).

$$vx = v \times \cos \theta \quad (2.25a)$$

$$vy = v \times \sin \theta \quad (2.25b)$$

dengan  $v$  merupakan tingkat penyayatan (*feedrate*) yang diterapkan pada CNC dimana satuannya *mm/sec*.

Berdasarkan analisa pemodelan kontur pada Subbab 2.2.4, untuk jenis kontur linear *gain* akurasi pada Persamaan (2.14) dapat langsung diperoleh dari masukan. *Circular* untuk masing-masing aksis menggunakan besar sudut  $\theta$  yang diperoleh dari Persamaan (2.26).

$$\theta = \frac{y_t - y_0}{x_t - x_0} \quad (2.26)$$

dengan  $y_t$  dan  $x_t$  merupakan koordinat target dari kontur yang didesain.

### 2.2.6.2 Kontur *Circular*

Untuk kontur *circular* ini,  $\theta$  dibentuk dari sudut awal ( $\theta_0$ ) dijumlahkan dengan sudut yang dibentuk. Sudut awal ini biasanya diketahui terlebih dahulu sedangkan sudut yang dibentuk dengan menggunakan Persamaan (2.27).

$$\theta = \left( \frac{v}{R} \times t \right) + \theta_0 \quad (2.27)$$



dengan  $v$  merupakan tingkat penyayatan (*feedrate*) dengan satuan  $mm/sec$ . Jari-jari yang dibentuk dan waktu yang digunakan masing-masing dinotasikan dengan  $R$  dan  $t$ .

Untuk masukan masing-masing aksis, koordinat dibentuk dengan persamaan (2.28) berikut:

$$Pdx = (x_c + R) \times \cos \theta \quad (2.28a)$$

$$Pdy = (y_c + R) \times \sin \theta \quad (2.28b)$$

$h$  akurasi Cx dan Cy seperti Persamaan (2.20) yang juga dapat dihitung menggunakan masukan yang didesain.

### 2.2.7 Desain Kontroler PD

*Plant* yang dikontrol menggunakan kontroler PD pada masing-masing aksis merupakan model linear motor servo, ini dikarenakan motor servo banyak digunakan pada mesin CNC *Milling*. Model linear motor servo yang digunakan identik dengan penelitian Erista [9]. Parameter *plant* diperoleh menggunakan identifikasi sistem dengan fungsi transfer berupa sistem orde satu seperti pada Persamaan (2.29).

$$Lvx = Lvy = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.29)$$

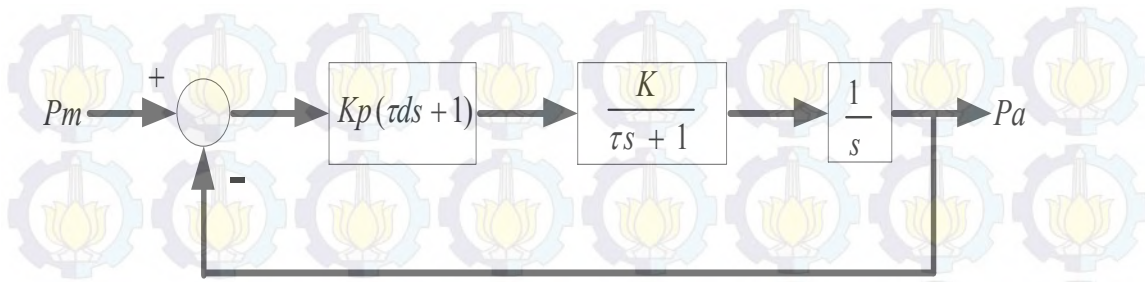
Kontroler PD difungsikan untuk mengontrol masing-masing aksis X dan Y. Persamaan kontroler PD dapat diamati seperti pada Persamaan (2.30).

$$Kp(\tau ds + 1) \quad (2.30)$$

Menggunakan kontroler PD berarti harus menentukan besar *gain* yang sesuai. Untuk menentukan besar *gain* kontroler PD, dianalisa berdasarkan spesifikasi desain yang diinginkan. Spesifikasi respon sistem hasil desain yang diamati yaitu *time settling* ( $T_s$ ) dan persentase *error steady state* ( $e_{ss}$ ).

Dengan mengetahui *plant* dan kontroler yang digunakan, berdasarkan Gambar 2.4 untuk satu aksis dapat kita gambarkan seperti Gambar 2.8. Fungsi transfer *plant* yang dimiliki merupakan fungsi transfer kecepatan, sehingga ditambahkan integral untuk mendapatkan fungsi transfer posisi.





Gambar 2.8 Kontroler PD dan *Plant*

Gambar 2.8 menjelaskan hubungan antara *Path manipulation* ( $P_m$ ) dengan *Path actual* ( $P_a$ ) dimana fungsi transfer dibentuk seperti pada Persamaan (2.31).

$$\frac{P_a}{P_m} = \frac{Kp(\tau ds + 1) \left( \frac{K}{s(\tau s + 1)} \right)}{1 + Kp(\tau ds + 1) \left( \frac{K}{s(\tau s + 1)} \right)} \quad (2.31)$$

dengan dipilih (di-tuning)  $\tau d = \tau$  dimana  $\tau = \text{time constant}$  dari *plant*, diperoleh Persamaan (2.32) yang identik dengan persamaan orde satu. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa suatu fungsi transfer orde dua dengan satu akar-akar persamaan karakteristiknya berada di *origin*, jika dikontrol dengan PD menjadi persamaan orde satu.

$$\frac{P_{ax}}{P_{mx}} = \frac{1}{\frac{1}{KpK} s + 1} = \frac{1}{\tau^* s + 1} \quad (2.32)$$

Persamaan (2.32) menggambarkan cara mencari *gain*  $K_p$  dengan merujuk  $\tau^*$  (*time constant*) hasil desain. Desain  $\tau^*$  menggambarkan besarnya *error steady state* ( $e_{ss}$ ), *time sampling* ( $T_s$ ) dan *settling time* ( $t_s$ ) yang diinginkan. Beberapa kriteria  $e_{ss}$  yang biasanya digunakan dalam mendesain yaitu 5%, 2% dan 0,5% dari *setpoint*. Untuk jenis-jenis  $e_{ss}$  pada  $t_s$  dan hubungannya dengan  $\tau^*$  hasil desain dapat dilihat melalui Persamaan (2.33).

$$\begin{aligned} t_s(5\%) &\cong 3 \tau^* \\ t_s(2\%) &\cong 4 \tau^* \\ t_s(0,5\%) &\cong 5 \tau^* \end{aligned} \quad (2.33)$$

Pada penelitian ini  $\tau^*$  hasil desain yaitu memiliki spesifikasi  $e_{ss}$  0,5% sehingga  $\tau^*$  diperoleh dengan waktu yang diperlukan ketika *tool path* bergerak sejauh 1 mm dibagi dengan 5. Ts yang digunakan pada kontroler masing-masing aksis didesain 10 kali lebih cepat dari  $\tau^*$ , hal ini bertujuan untuk mendapatkan data yang valid saat dikontrol. Selain itu, desain *feedrate* dari CNC direncanakan dengan dua jenis *feedrate* yaitu 2mm/detik dan 40mm/detik.

Dari Gambar 2.4 dapat diperoleh Persamaan (2.34) tentang hubungan Pm dengan sinyal kontrol *Cross-Coupled U*.

$$Pmx = Pdx - CxU \quad (2.34a)$$

$$Pmy = Pdy - CyU \quad (2.34b)$$

Selanjutnya dari Gambar (2.4) dimana plant dan kontroler telah tergabung menjadi satu persamaan orde satu seperti Persamaan (2.32), sehingga diperoleh persamaan yang menggambarkan hubungan antara keluaran aktual terhadap sinyal Pm. Persamaan yang diperoleh disubstitusikan kedalam Persamaan (2.34) sehingga menghasilkan Persamaan (2.35) yaitu persamaan yang menggambarkan hubungan antara keluaran aktual terhadap sinyal kontrol *Cross-Coupled*.

$$Pax = \frac{1}{\tau^*s + 1} Pmx = \frac{1}{\tau^*s + 1} (Pdx - CxU) \quad (2.35a)$$

$$Pay = \frac{1}{\tau^*s + 1} Pmy = \frac{1}{\tau^*s + 1} (Pdy - CyU) \quad (2.35b)$$

Persamaan (2.35) disubstitusikan ke Persamaan (2.36) sehingga menghasilkan Persamaan (2.37) yaitu persamaan tentang kesalahan kontur dari desain MCCC.

$$\varepsilon = Cy(Pdy - Pay) - Cx(Pdx - Pax) \quad (2.36)$$

$$\varepsilon = \frac{Cy \tau^*s}{\tau^*s + 1} Pdy - \frac{Cx \tau^*s}{\tau^*s + 1} Pdx + \frac{Cy^2 + Cx^2}{\tau^*s + 1} U \quad (2.37)$$



Persamaan (2.37) menggambarkan persamaan kesalahan kontur secara keseluruhan dari struktur MCCC dimana masing-masing aksis dikontrol dengan kontroler PD dan dengan analisa struktur yang lebih sederhana.

### 2.2.8 Prediksi Kesalahan Kontur

Kesalahan kontur akan diprediksi dengan horizon prediksi tertentu dengan menggunakan Persamaan (2.37). Hasil prediksi diharapkan kesalahan kontur akan berkurang secara eksponensial yaitu menuju ke nol dalam skala waktu yang tidak ditentukan. Hasil analisa untuk mendapatkan kontrol prediksi kesalahan kontur dapat ditulis ulang seperti pada Persamaan (2.38).

$$\varepsilon(s) = \frac{\tau^*}{\tau^*s + 1} \left( C_y s P_{dy} - C_x s P_{dx} + \frac{C_y^2 + C_x^2}{\tau^*} U \right) \quad (2.38)$$

Dimisalkan komponen pada Persamaan (2.38) ditulis seperti pada Persamaan (2.39).

$$C_y s P_{dy} - C_x s P_{dx} + \frac{C_y^2 + C_x^2}{\tau^*} U = W(s) \quad (2.39)$$

Sehingga  $W(s)$  dari Persamaan (2.39) menggambarkan hubungan terhadap sinyal kontrol *Cross-Coupled* ( $U$ ). Sinyal kontrol  $U$  ini merupakan sinyal kontrol prediksi untuk sinkronisasi dari dua aksis X dan Y. Sinyal kontrol prediksi yang memiliki hubungan terhadap  $W$  dapat dilihat pada Persamaan (2.40).

$$U = \frac{(W - C_y s P_{dy} + C_x s P_{dx}) \tau^*}{C_y^2 + C_x^2} \quad (2.40)$$

Untuk melakukan prediksi kesalahan kontur, Persamaan (2.38) akan digunakan untuk mendapatkan hubungan kesalahan kontur terhadap sinyal kontrol. Persamaan (2.28) dapat ditulis ulang seperti yang terlihat pada Persamaan (2.41).

$$\varepsilon(s) = \frac{\tau^*}{\tau^*s + 1} W(s) \quad (2.41)$$

Persamaan (2.41) ditransformasikan kedalam bentuk persamaan diferensial seperti pada Persamaan (2.42). Persamaan diferensial tersebut ditransformasi lagi ke bentuk persamaan diskrit seperti yang terlihat pada Persamaan (2.43).

$$\tau * \dot{\varepsilon} + \varepsilon = \tau * W(s) \quad (2.42)$$

$$\tau * \frac{\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)}{T_s} + \varepsilon(k) = \tau * W(k) \quad (2.43)$$

Persamaan diskrit pada Persamaan (2.43) jika dilakukan prediksi satu langkah kedepan akan menghasilkan Persamaan (2.44).

$$\left( \frac{\tau * + T_s}{T_s} \right) \varepsilon(k+1) - \frac{\tau *}{T_s} \varepsilon(k) = \tau * W(k+1) \quad (2.44)$$

Dengan Persamaan (2.23a) disubstitusikan ke Persamaan (2.44) pada dapat diperoleh Persamaan (2.45).

$$\left[ \left( \frac{\tau * + T_s}{T_s} \right) \exp\left(-\frac{T_s}{\tau}\right) - \frac{\tau *}{T_s} \right] \varepsilon(k) = \tau * W(k+1) \quad (2.45)$$

Jika diasumsikan  $\left[ \left( \frac{\tau * + T_s}{T_s} \right) \exp\left(-\frac{T_s}{\tau}\right) - \frac{\tau *}{T_s} \right] = A$  maka dapat diperoleh

Persamaan (2.46) yaitu prediksi satu langkah dan dua langkah kedepan dari  $W(k)$ .  $W(k)$  merupakan hasil manipulasi matematis prediksi kesalahan kontur pada Persamaan (2.40).

$$W(k+1) = \frac{A}{\tau * } \varepsilon(k) = \beta \varepsilon(k) \quad (2.46a)$$

$$W(k+2) = \beta \varepsilon(k+1) = \beta \times \exp\left(-\frac{T_s}{\tau}\right) \times \varepsilon(k) \quad (2.46b)$$

dimana  $\beta = \frac{A}{\tau * }$

Dengan melakukan substitusi Persamaan (2.23a) ke Persamaan (2.46b) maka diperoleh prediksi  $W(k)$  dengan horizon prediksi ke  $N$  seperti Persamaan (2.47).



$$W(k + N) = \beta \times \exp\left(-N \frac{T_s}{\tau}\right) \times \varepsilon(k) \quad (2.47)$$

Jika telah terukur besarnya kesalahan kontur saat ini ( $\varepsilon(k)$ ), maka untuk prediksi  $W(k)$  diperoleh dengan dikalikan dengan suatu *gain*  $\alpha$ . *Gain*  $\alpha$  tersebut yaitu seperti pada Persamaan (2.48).

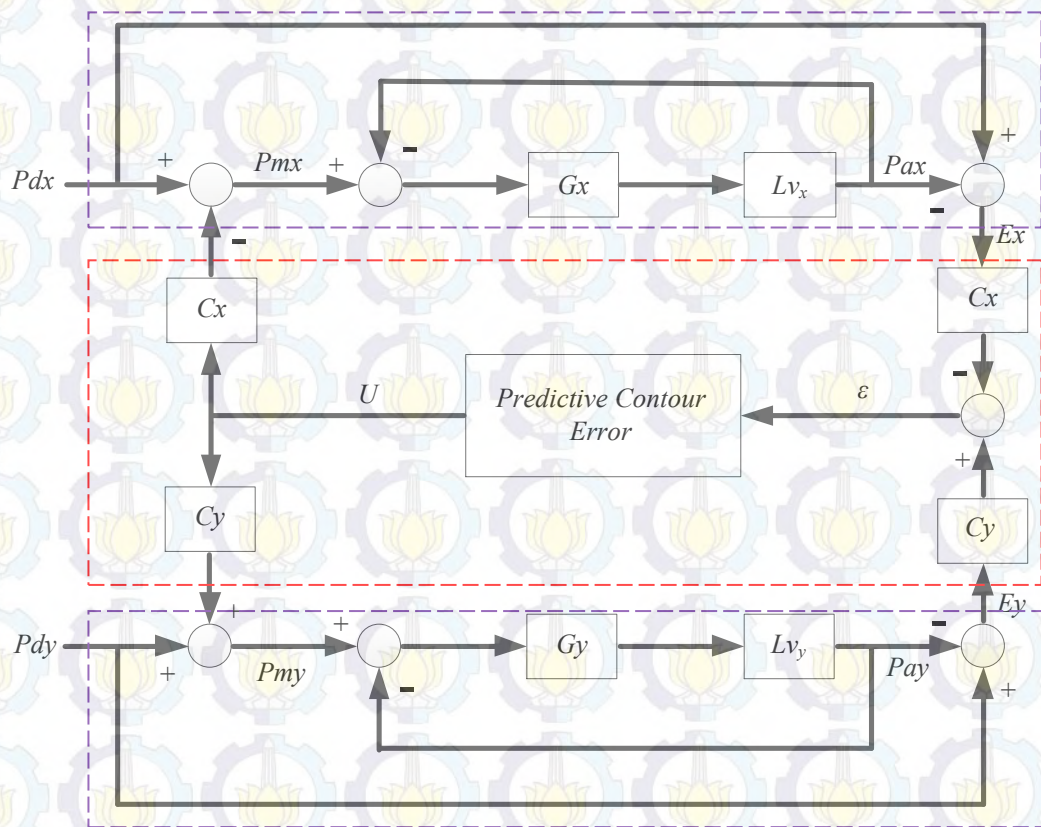
$$\alpha = \beta \times \exp\left(-N \frac{T_s}{\tau}\right) \quad (2.48)$$

Dari hasil desain ini dapat diberi kesimpulan bahwa desain prediktif yang diterapkan pada penelitian ini adalah gabungan antara manipulasi sinyal kontrol ke masing-masing aksis dengan sebuah *gain* prediksi  $\alpha$ . Hasil yang diperoleh ini merupakan kontribusi matematis dalam penelitian ini.

## BAB III PERANCANGAN SISTEM

### 3.1. Diagram Blok

Penelitian ini akan menggunakan struktur *Modified Cross-coupled Control* (MCCC) seperti pada Gambar 2.3 dari Shih [4]. Pada CCC dirubah menjadi *Predictive Contour Error* seperti yang terlihat pada Gambar 3.1. Analisa *Predictive Contour Error* sudah dijelaskan pada Subbab 2.2.8 sebelumnya.



Gambar 3.1 Konfigurasi *Predictive Modified Cross-coupled Control*

Fungsi transfer *plant* pada masing-masing aksis merupakan motor servo AC, dimana menggunakan dari penelitian Arista [9]. *Plant* yang digunakan untuk aksis X dan Y dianggap identik. Diperoleh fungsi transfer *plant* orde dua yaitu setelah dikalikan dengan integral seperti pada Persamaan (3.1).

$$L_{vx} = L_{vy} = \frac{0,899}{s(0,294s + 1)} \quad (3.1)$$



Parameter motor servo AC pada Persamaan (2.4) yang digunakan yaitu  $K_m = 0,899$  dan  $T_m = 0,294$ .

## 3.2. Desain Kontur Linear dan *Circular*

### 3.2.1 Kontur Linear

Kontur linear dibentuk berdasarkan titik koordinat awal ( $X_0$  dan  $Y_0$ ) menuju ke titik koordinat target ( $X_t$  dan  $Y_t$ ). Koordinat awal yang digunakan pada penelitian ini pada aksis  $X_0 = 5$  dan  $Y_0 = 2$  sedangkan untuk koordinat target yaitu aksis  $X_t = 100$  dan  $Y_t = 100$ . *Feedrate* yang diterapkan sebesar  $2 \text{ mm/sec}$  dan simulasi dijalankan dalam waktu 70 detik dengan tujuan agar posisi koordinat target dapat tercapai.

Dari koordinat awal dan target dari kontur linear ini akan diperoleh *gain* akurasi ( $C_x$  dan  $C_y$ ) seperti pada Persamaan (2.6). Oleh karena kontur linear yang dibentuk hanya satu kali *tracking*, sehingga hanya menghasilkan satu sudut  $\theta$ . Hal ini mengakibatkan *gain* akurasi  $C_x$  dan  $C_y$  bernilai tetap. Dari perhitungan Persamaan (2.18) maka diperoleh nilai  $\theta = 0,7699$  radian atau sama dengan 44,13 derajat. Nilai  $C_x$  dan  $C_y$  dapat dilihat pada Persamaan (3.2).

$$C_x = 0,696 \quad (3.2a)$$

$$C_y = 0,718 \quad (3.2b)$$

### 3.2.2 Kontur *Circular*

Untuk kontur *circular* dibentuk dengan menentukan titik pusat dan besarnya jari-jari yang akan didesain. Posisi sudut awal dimulainya pembentukan kontur juga ditentukan. Simulasi kontur *circular* ini dengan koordinat pusat lingkaran pada aksis  $X = 50$  dan  $Y = 50$ . Besar lingkaran yang dibentuk memiliki jari-jari 100 dan sudut awalnya pembentukan sebesar 0,52 radian (30 derajat).

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *feedrate*  $2 \text{ mm/sec}$  dengan waktu 320 detik agar kontur *circular* dapat dibentuk sempurna. Kontur *circular* ini memiliki *gain* akurasi bersifat variabel karena sudut yang dibentuk seperti Persamaan (2.19) selalu berubah terhadap waktu.



### 3.3. Desain Kontroler PD

Dalam memberikan tuning parameter pada kontroler PD maka respon sistem didesain dengan kriteria tertentu. Pada penelitian ini, didesain *gain*  $K_d$  sama dengan *time constant* dari fungsi transfer *plant* yang dikontrol. Sedangkan *gain*  $K_p$  didesain berdasarkan *time constant* dari spesifikasi *feedrate* yang diterapkan. Pada penelitian ini didesain *feedrate* memiliki kecepatan 2 mm/sec, sehingga untuk mencapai 1 mm membutuhkan waktu 0,5 detik. Untuk menentukan  $\tau^*$  digunakan analisa *settling time* pada Persamaan (2.25). Didesain  $e_{ss}$  sebesar 0,5% sehingga diperoleh  $t_s(0,5\%) = 5\tau^*$ . *Time constant* ( $\tau^*$ ) yang diperoleh dapat dilihat pada Persamaan (3.3) dan *gain*  $K_p$  hasil desain pada Persamaan (3.4)

Sehingga:

$$\tau^* = \frac{0,5}{5} = 0,1 \quad (3.3)$$

$$K_p = \frac{1}{\tau^* K} = \frac{1}{0,1 \times 0,899} = \frac{1}{0,0899} = 11,124 \quad (3.4)$$

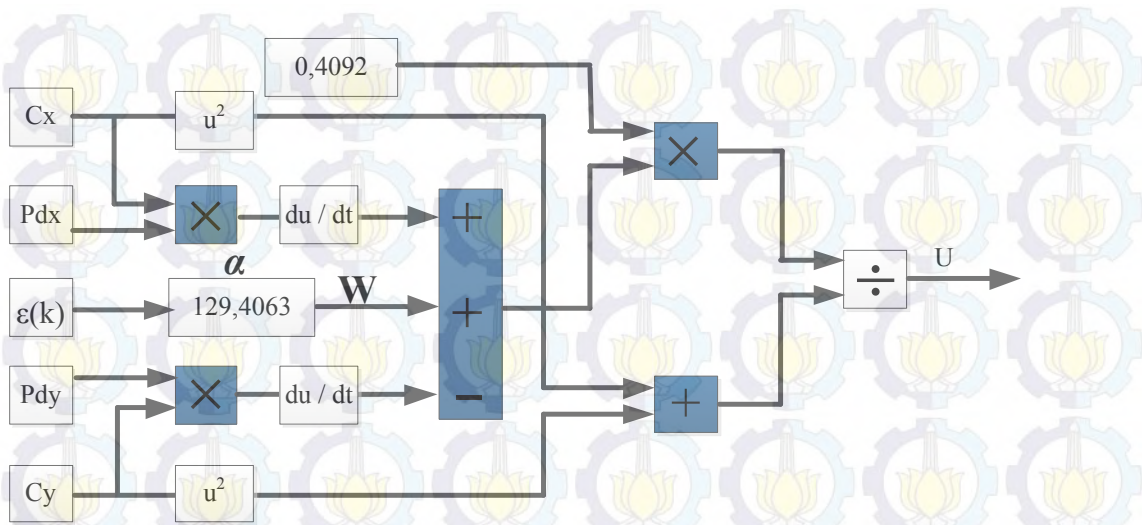
Selain itu didesain juga untuk *feedrate* 40 mm/sec maka 1 mm membutuhkan waktu 0,025 detik. Dengan cara yang sama diperoleh besar *time constant*  $\tau^*=0,005$  dan *gain*  $K_p = 222,47$ .

### 3.4. Prediksi Kesalahan Kontur

Untuk memprediksi kesalahan kontur pada desain PMCCC ini diperoleh dalam bentuk *gain*  $\alpha$  seperti yang terlihat pada Persamaan (2.37). Setelah dihitung dengan asumsi horizon prediksi sebesar 5 langkah kedepan, maka diperoleh *gain* PMCCC yaitu 129.4063.

Diagram blok hasil desain kontrol prediksi kesalahan secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.2.





Gambar 3.2 Desain Kontrol Prediktif Kesalahan Kontur pada MCCC

Dari Gambar 3.2 ini telah menggambarkan hubungan kesalahan kontur  $\epsilon(k)$  terhadap sinyal kontrol prediktif  $U$  dimana prediksi diperoleh dalam bentuk gain prediksi  $\alpha$ .

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian mesin CNC Milling 3 aksis ini, penggerak untuk masing-masing aksis menggunakan motor Servo AC. Oleh karena itu, simulasi yang dilakukan menggunakan model motor servo AC dari penelitian sebelumnya [9]. Kontrol posisi pada penelitian ini yaitu gerakan meja kerja (*work piece*) mesin CNC Milling 3 aksis pada aksis X dan Y. Parameter motor servo AC yang digunakan yaitu  $K_m = 0,899$  dan  $T_m = 0,294$ .

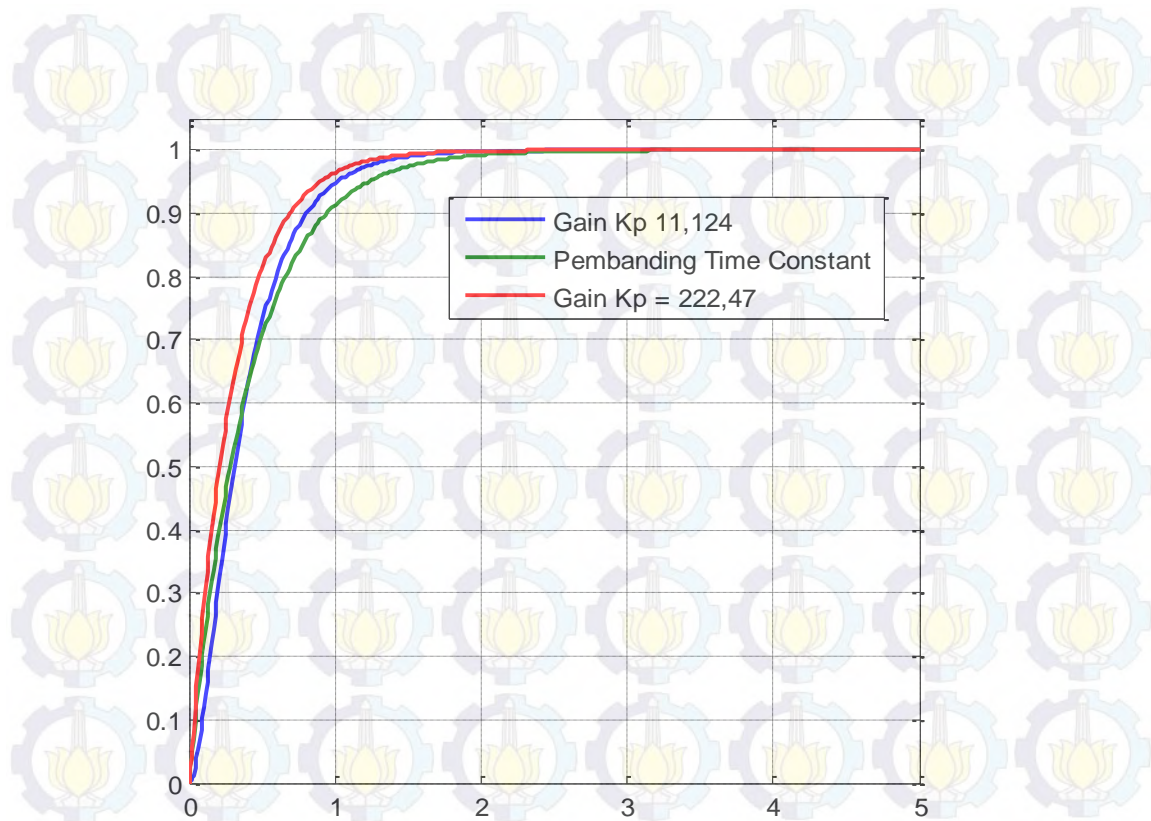
Untuk melihat hasil dari metode kontrol yang didesain, dilakukan pengujian dengan membentuk kontur linear dan *circular*. Desain kontur linear dan *circular* ini telah dijelaskan pada Subbab 2.2.6.

#### 4.1 Pengujian dengan Sinyal Step

Sebelum menerapkan desain kontroler *Predictive Modified Cross-Coupled Control* (PMCCC) ini, terlebih dahulu *plant* motor servo AC dilakukan pengujian berbentuk sinyal step. Gambar untuk pengujian step ini dapat dilihat pada Lampiran A.1. Pengujian yang dilakukan merupakan simulasi untuk pengujian fungsi transfer motor servo AC menggunakan kontroler PD. Selain itu, keluaran *plant* akan disinkronisasikan dengan fungsi transfer orde satu untuk menyesuaikan *time constant* yang diperoleh dari keluaran *plant*.

Sinyal uji step yang masuk diberikan *setpoint* sebesar 1. Parameter kontroler PD didesain dengan  $K_d$  yang sama dengan *time constant plant* yaitu 0,294. Pada pengujian ini *plant* motor servo AC di uji dengan perbedaan *gain*  $K_p$  yaitu 11,124 dan 222,47. Respon pengujian dengan menggunakan sinyal step ini dapat dilihat pada Gambar 4.1. Pengujian ini menggunakan dua jenis *gain*  $K_p$  berdasarkan *feedrate* yang didesain.





Gambar 4.1 Respon Sistem dengan Sinyal Uji Step

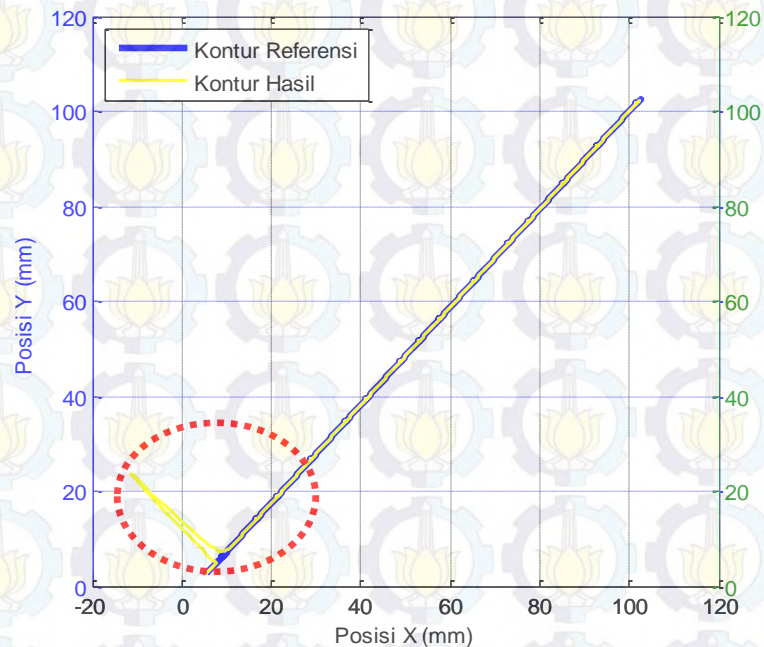
Respon keluaran *plant* dengan menggunakan dua jenis *gain*  $K_p$  yang berbeda dan *gain*  $K_d$  yang sama dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dari respon tersebut menunjukkan dengan menggunakan *gain*  $K_p = 222,47$  memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan *gain*  $K_p = 11,124$ . Namun, dari respon kedua jenis *gain*  $K_p$  tersebut, tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Dengan perbedaan *gain* yang besar tidak merubah *time constant* respon sistem, bahkan untuk *gain*  $K_p = 222,47$  berbeda dari desain yang diharapkan. Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan *gain*  $K_p$  yang hampir mendekati *time constant* desain yaitu *feedrate* 2 mm/sec dengan *gain*  $K_p$  bernilai 11,124 dan *gain*  $K_d$  sama dengan *time constant* fungsi transfer *plant* yaitu 0,294.

#### 4.2 Simulasi Tanpa Kontroler *Predictive Modified Cross-Coupled Control*

Simulasi kontur linear tanpa PMCCC ini yaitu masing-masing aksis dikontrol dengan hanya menggunakan kontroler PD tanpa menggunakan *Cross-Coupled Gain*

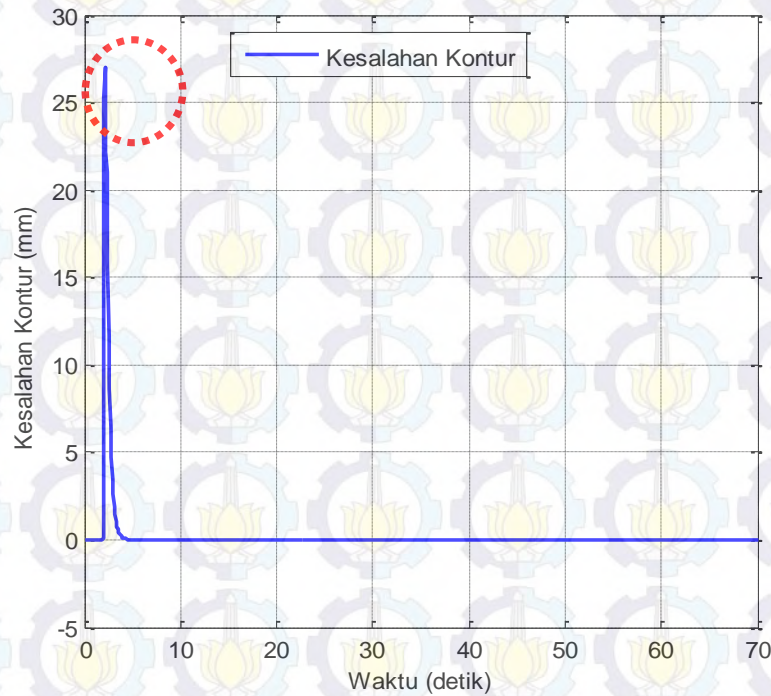
seperti terlihat pada Lampiran A.2. Kontroler PD masing-masing aksis dengan menggunakan parameter yang sama besar sama seperti pengujian satu aksis. Parameter dan blok simulink untuk kontroler PD dapat dilihat pada Lampiran A.5. Fungsi transfer model matematis motor servo AC yang digunakan seperti pada Persamaan (3.1).

Dari hasil simulasi perbandingan referensi dengan keluaran aktual *plant* dapat dilihat pada Gambar 4.2. Dari gambar perbandingan kontur, terlihat penyimpangan dari kontur referensi yang didesain. Kesalahan kontur yang terjadi pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan menunjukkan kesalahan kontur yang terjadi sangat besar sekali mencapai 25 mm. Hal ini akan sangat merusak kontur yang didesain jika kesalahan kontur sebesar itu.



Gambar 4.2 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur Linear Tanpa Kontroler PMCCC



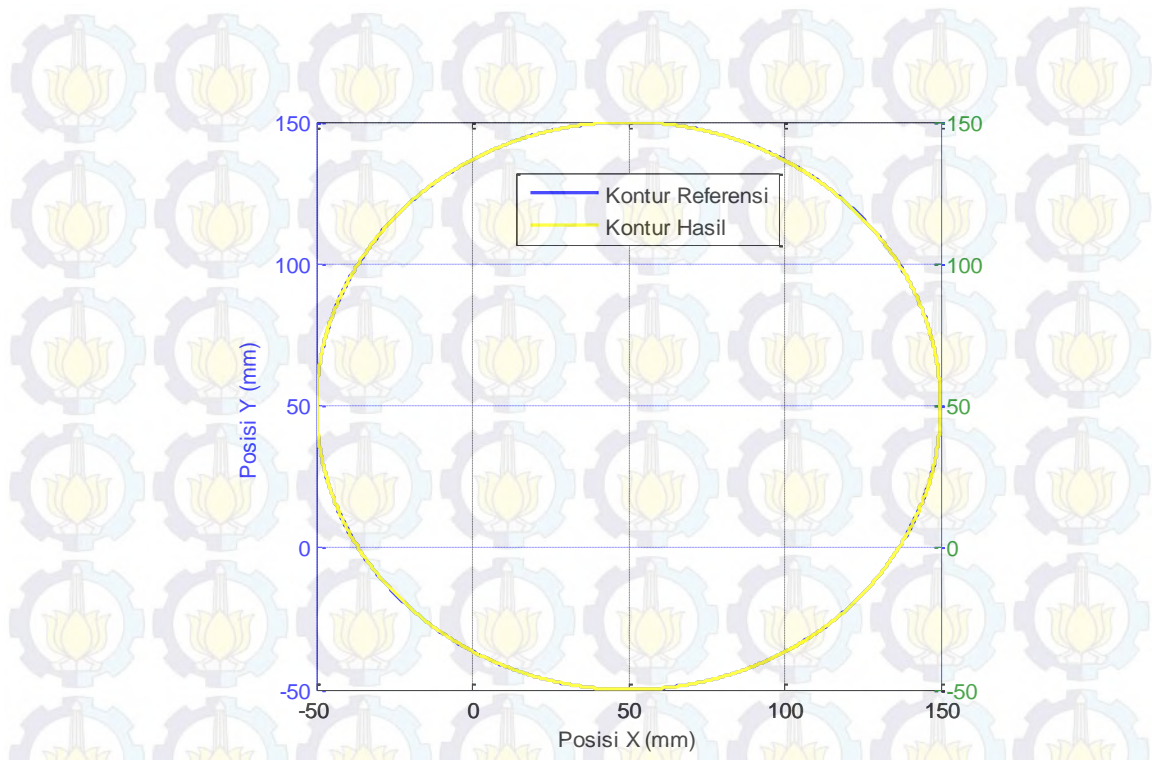


Gambar 4.3 Kesalahan Kontur Linear Tanpa Kontroler PMCCC

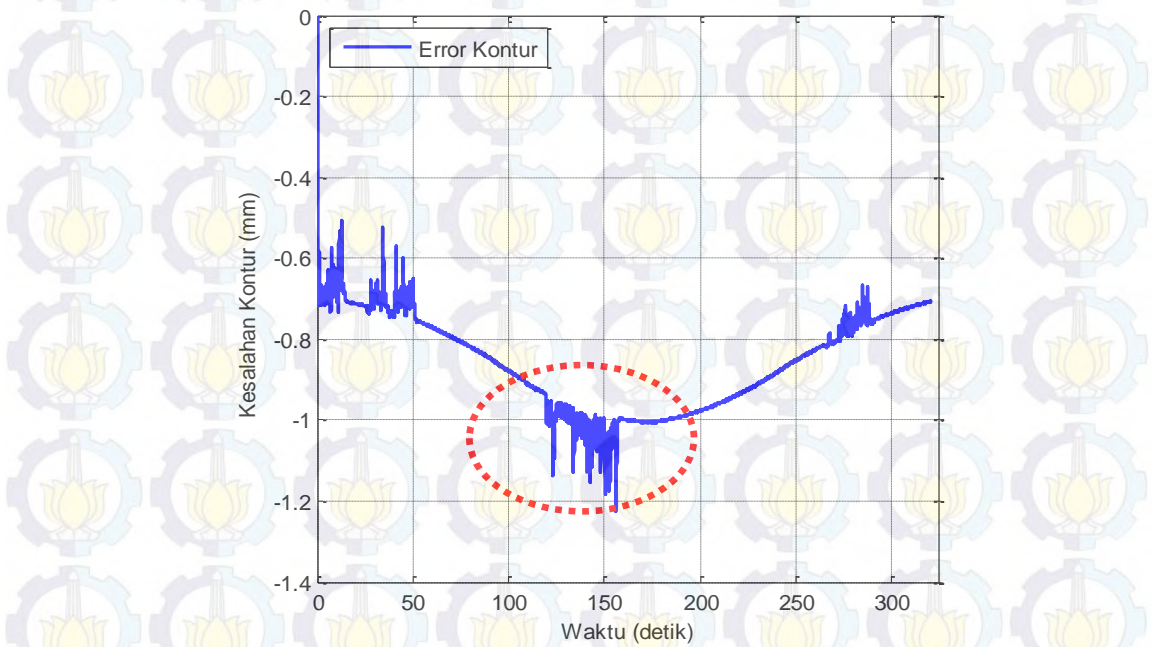
Dari kesalahan kontur yang terjadi, dihitung *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengukur performansi kesalahan. RMSE dari kesalahan kontur linear tanpa dikontrol dengan PMCCC bernilai 2.2993. Kesalahan kontur menuju ke nol membutuhkan waktu sekitar 5 detik.

Selain pengujian kontur linear, dilakukan juga untuk kontur *circular* tanpa menggunakan PMCCC. Pengujian ini menggunakan struktur seperti terlihat pada Lampiran A.3. Jenis dan parameter kontroler sama dengan pengujian pada kontur linear sebelumnya.

Setelah melakukan simulasi diperoleh perbandingan referensi dan aktual kontur *circular* pada Gambar 4.4. Dari gambar tersebut tidak terlihat penyimpangan antara kontur referensi terhadap kontur aktualnya. Tidak terlihat perbedaan ini karena kesalahan kontur yang terjadi relatif kecil. Besarnya kesalahan kontur dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur *Circular* Tanpa Kontroler PMCCC



Gambar 4.5 Kesalahan Kontur *Circular* tanpa Kontroler PMCCC

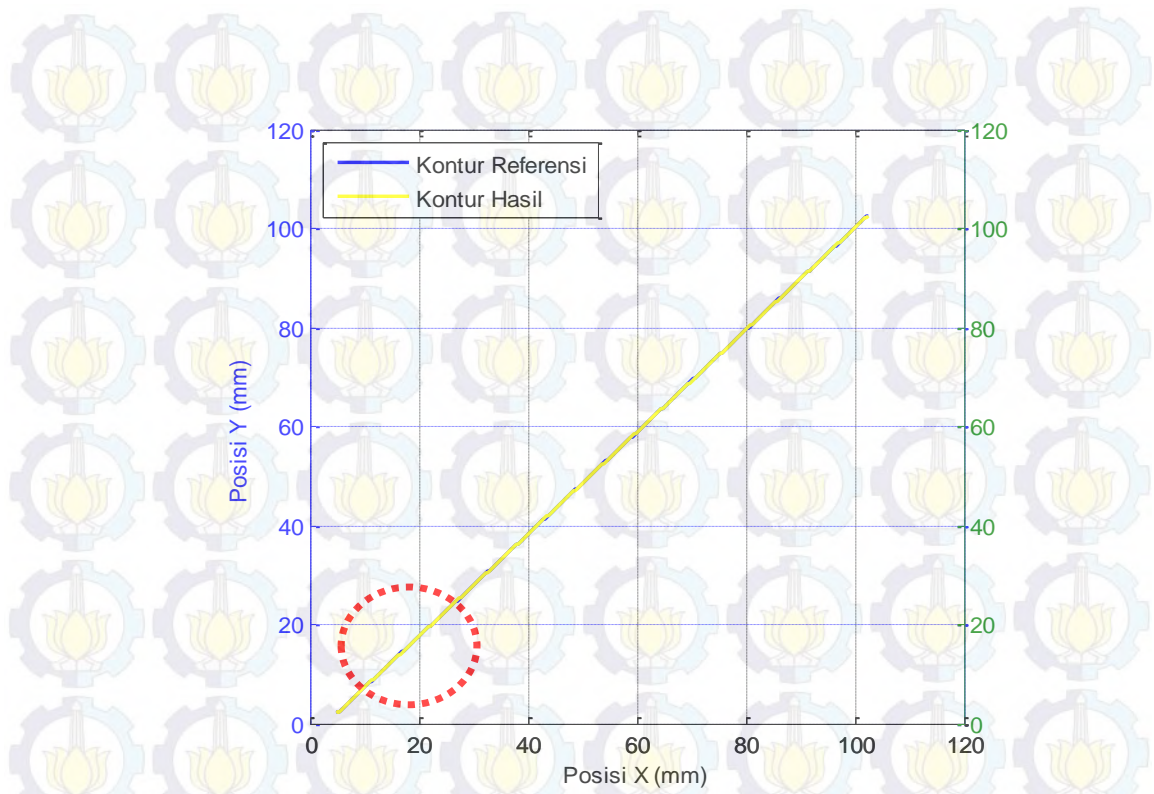


Gambar 4.5 menunjukkan kesalahan kontur *circular* saat hanya dikontrol pada masing-masing aksis. Kesalahan kontur yang terjadi memiliki nilai maksimal sebesar 1,2 mm pada waktu sekitar detik ke 150. Nilai kesalahan kontur yang terukur tidak pernah berada pada nilai nol. Ini menjadikan saat dikontrol hanya pada masing-masing aksis kesalahan kontur selalu saja terjadi. Dari kesalahan kontur *circular* dimana hanya dikontrol masing-masing aksis ini yang diperoleh nilai RMSE yaitu 0.8611.

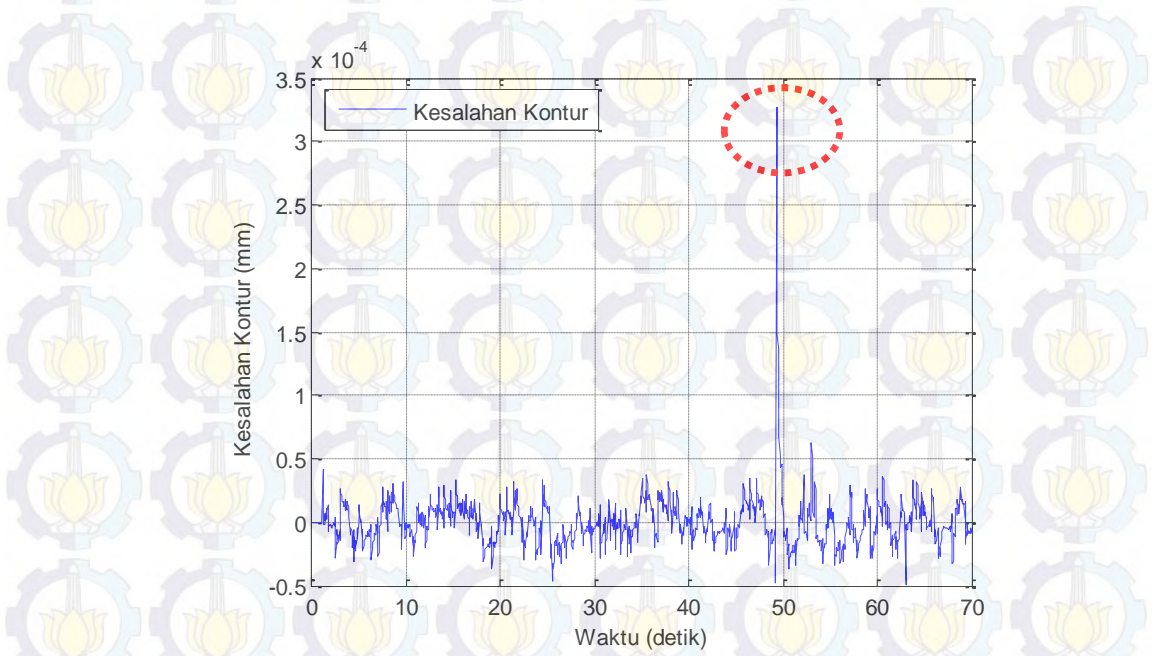
#### 4.3 Simulasi dengan Kontroler PI *Modified Cross-Coupled Control*

Pengujian MCCC ini menggunakan *Cross-Coupled Gain* yaitu kontroler PI. Pengujian ini juga dilakukan pada kontur linear dan *circular* seperti pada pembahasan sebelumnya. Untuk menunjukkan konfigurasi kontroler PI sebagai *Cross-Coupled Gain* pada MCCC pada pengujian kontur linear dapat dilihat pada Lampiran A.4. *Gain* kontroler PI yang diterapkan pada pengujian ini dengan  $K_p = 11,124$  dan  $K_i = 0,294$  seperti pada Lampiran A.6. Pemilihan parameter kontroler ini menyerupai parameter kontroler PD sebelumnya.

Setelah melakukan simulasi dengan konfigurasi PI-MCCC ini menghasilkan perbandingan kontur referensi dan hasil seperti yang terlihat pada Gambar 4.6. Hasil kontur aktual terlihat sempurna dalam menghasilkan kontur linear ini. Kesalahan kontur yang terjadi sudah sangat kecil sekali seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai kesalahan kontur maksimal dari gambar tersebut hanya bernilai  $3 \times 10^{-4}$  mm. Kesalahan kontur mencapai nilai tertinggi pada sekitar detik ke 50. Namun, sebelum dan setelah detik ke 50 itu nilai kesalahan kontur relatif stabil dan berkisar pada nilai nol.



Gambar 4.6 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur Linear menggunakan Kontroler PI-MCCC

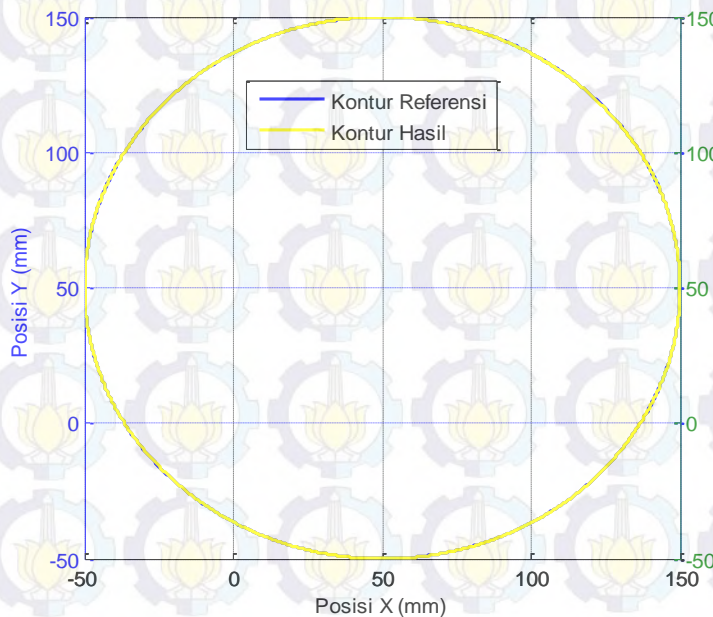


Gambar 4.7 Kesalahan Kontur Linear menggunakan Kontroler PI-MCCC

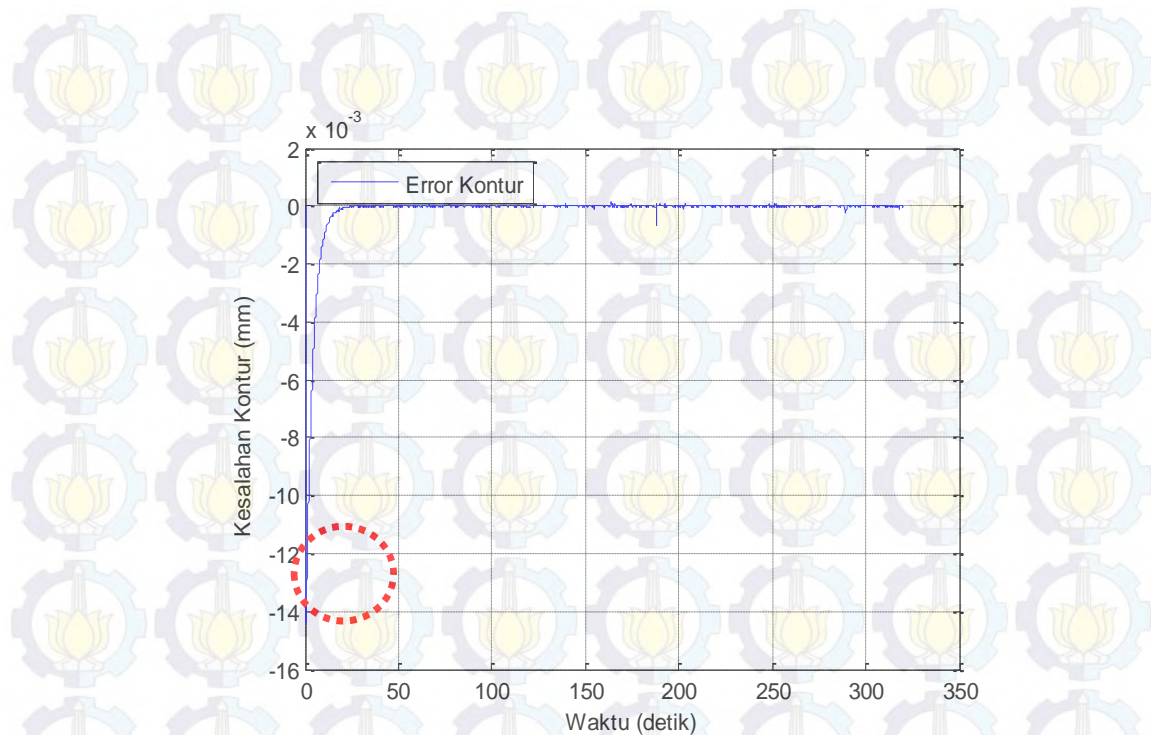


Dengan melihat kesalahan kontur linear pada Gambar 4.7 tersebut dapat diketahui bahwa kontur yang dihasilkan sangat sempurna dan akurat. Walaupun ada fluktuasi kesalahan pada detik ke 50 tersebut, namun nilainya masih sangat kecil sekali. Penggunaan PI-MCCC ini pada pembentukan kontur linear sangat membantu mengurangi kesalahan kontur. Dari pengukuran kesalahan kontur yang terjadi, diperoleh nilai RMSE-nya 0.1348. Dibandingkan dengan tanpa adanya CCC, nilai RMSE dengan kontroler PI-MCCC untuk kontur linear jauh lebih kecil.

Pengujian selanjutnya untuk kontur *circular* menggunakan kontroler PI-MCCC ini konfigurasi dapat dilihat pada Lampiran A.5. *Gain* kontrol PI-MCCC ini sama dengan yang diterapkan pada kontur linear. Hasil kontur aktual dari *plant* dibandingkan dengan kontur referensi dapat dilihat pada Gambar 4.8. Tidak ada perbedaan antara referensi dengan keluaran aktual dari *plant* setelah menggunakan PI-MCCC ini. Namun, kesalahan kontur tetap terjadi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur *Circular* menggunakan Kontroler PI-MCCC



Gambar 4.9 Kesalahan Kontur *Circular* menggunakan Kontroler PI-MCCC

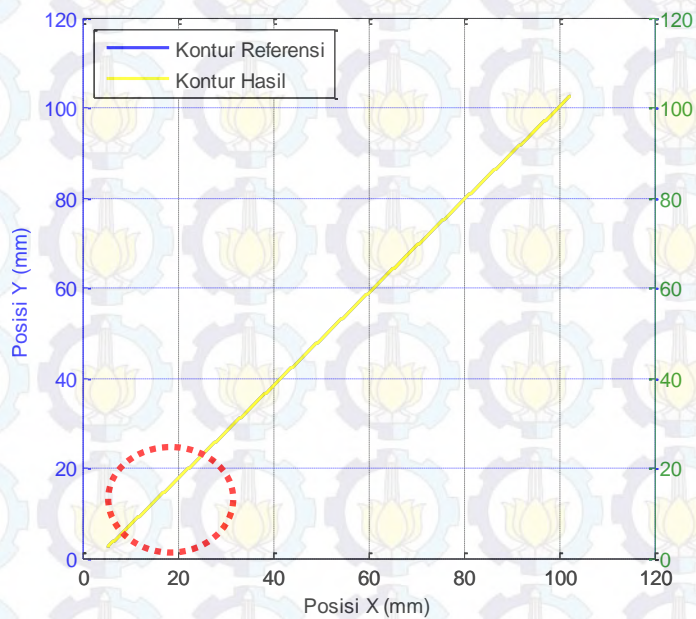
Pada Gambar 4.9 menunjukkan kesalahan kontur yang terjadi dari kontur *circular* ini mencapai nilai maksimum  $12 \times 10^{-3}$ . Nilai maksimum ini merupakan bentuk *overshoot* dari kesalahan kontur. Ini diakibatkan oleh aksi kontrol PI yang diterapkan pada MCCC. Dari simulasi yang berjalan selama 320 detik, kesalahan kontur baru stabil dinilai minimum sekitar pada detik ke 20. Dapat diketahui selama proses 20 detik pertama terjadi kesalahan kontur saat diterapkannya PI-MCCC ini. Walaupun terjadi kesalahan kontur pada 20 detik pertama, namun kesalahan tersebut bernilai sangat kecil sekali. Sehingga dapat di katakan bahwa kesalahan kontur yang terjadi dapat diabaikan. Dari besar kesalahan kontur pada Gambar 4.9 ini diperoleh nilai RMSE yaitu 0,0013. Nilai ini jauh lebih kecil dari RMSE saat dikontrol hanya pada masing-masing aksis.



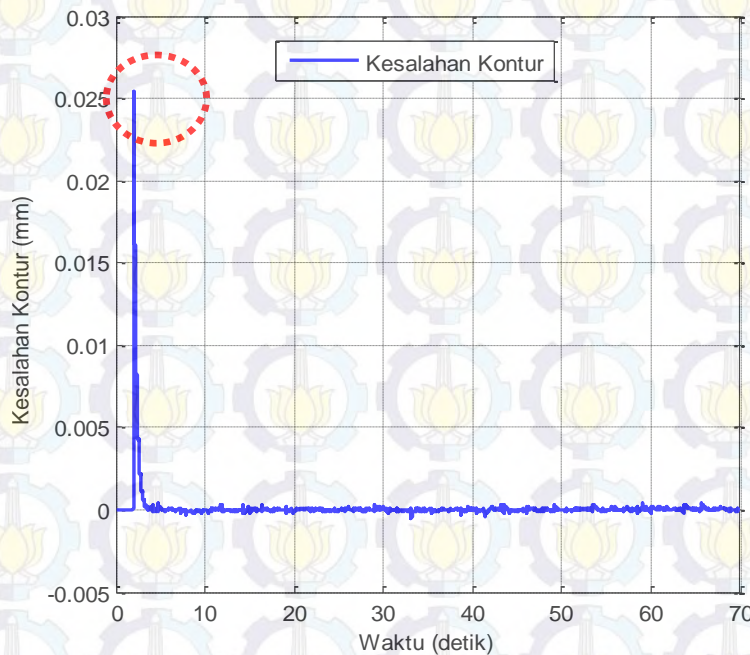
#### 4.4 Simulasi dengan Kontroler *Predictive Modified Cross-Coupled Control*

Metode yang diusulkan pada penelitian ini yaitu kontrol *Predictive* pada konfigurasi *Modified Cross-Coupled Control*. Kegunaan prediktif pada metode ini yaitu untuk memprediksi kesalahan kontur yang akan terjadi sehingga dapat direduksi. Metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* (PMCCC) ini diterapkan dengan horison prediksi sejauh 5 langkah kedepan. Pengujian metode PMCCC untuk kontur linear konfigurasinya dapat dilihat pada Lampiran A.9. Parameter untuk kontroler masing-masing aksis sama dengan parameter pada pengujian tanpa *Cross-Coupled Gain* dan juga sama pada konfigurasi PI-MCCC. Untuk konfigurasi prediktif kesalahan kontur dapat dilihat pada Lampiran A.7. Desain konfigurasi prediktif ini sama dengan diagram blok Gambar 3.2 bab sebelumnya.

Setelah melakukan simulasi untuk pengujian metode ini, diperoleh perbandingan kontur referensi dan aktual seperti terlihat pada Gambar 4.10. Kontur linear aktual yang dihasilkan sangat sempurna dan akurat tanpa ada penyimpangan kontur. Bahkan, untuk kontur yang ditandai lingkaran merah dimana pada posisi kontur yang sama dengan tanpa *Cross-Coupled Gain* tidak menunjukkan adanya penyimpangan. Ini menunjukkan metode yang diusulkan sangat baik untuk menghasilkan kontur linear. Walaupun terlihat sempurna, namun kesalahan kontur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 masih tetap ada.



Gambar 4.10 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur Linear menggunakan Kontroler PMCCC

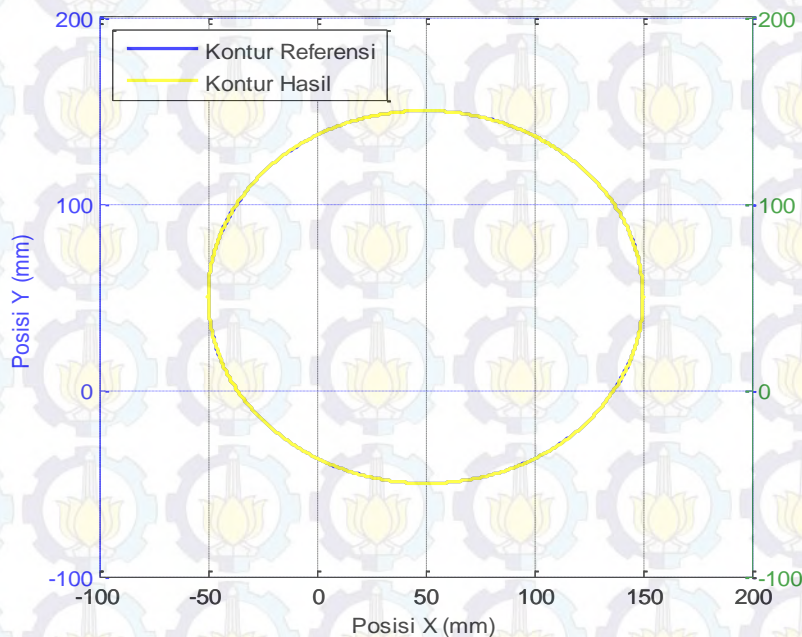


Gambar 4.11 Kesalahan Kontur Linear menggunakan Kontroler PMCCC

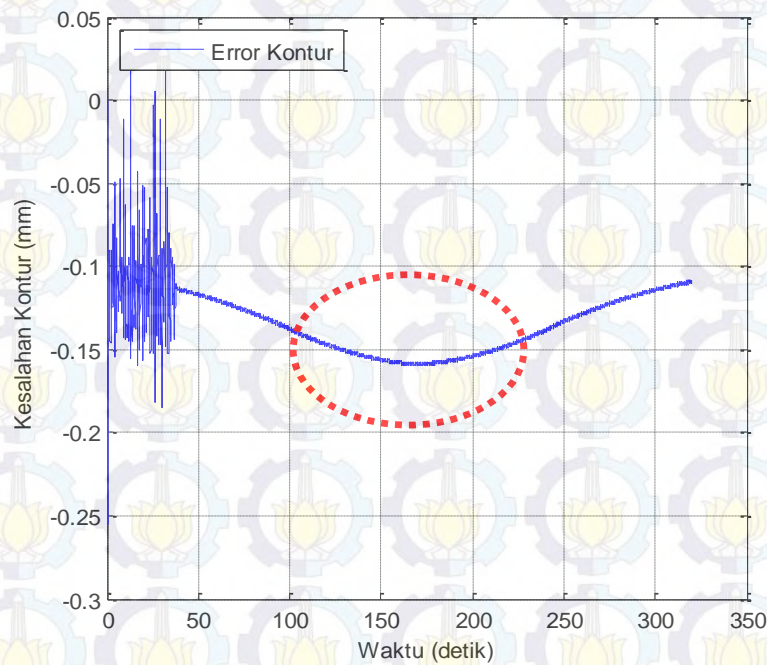


Gambar 4.11 menunjukkan kesalahan kontur pada pengujian kontur linear dengan metode PMCCC ini. Nilai maksimum kesalahan kontur yang terjadi sebesar 0,025 mm. Kesalahan kontur tersebut dimulai sekitar pada detik ke 3 sampai detik ke 5. Dari kesalahan kontur dilakukan perhitungan RMSE dari kontur linear ini yaitu 0,0012. Jika dibandingkan dengan dikontrol masing-masing aksis juga terlihat RMSE dengan PMCCC ini lebih kecil.

Pengujian selanjutnya yaitu pada kontur *circular* menggunakan kontroler PMCCC. Desain untuk konfigurasi kontroler PMCCC dapat dilihat pada Lampian A.10. Kontroler serta parameter untuk masing-masing aksis sama dengan yang diterapkan pada pengujian tanpa PMCCC sebelumnya. Hasil simulasi yang diperoleh tentang perbandingan kontur referensi dan aktual dapat dilihat pada Gambar 4.12. Kontur aktual secara tepat mengikuti bentuk referensi yang diberikan. Hal ini menunjukkan dalam membentuk kontur *circular* menggunakan kontroler PMCCC sangat akurat dan presisi. Gambar kesalahan kontur untuk kontur *circular* ini dapat diamati pada Gambar 4.13.



Gambar 4.12 Perbandingan Referensi dan Aktual Kontur *Circular* menggunakan Kontroler PMCCC



Gambar 4.13 Kesalahan Kontur *Circular* menggunakan Kontroler PMCCC

Dengan mengamati kesalahan untuk kontur *circular* pada Gambar 4.13 menunjukkan kesalahan kontur terjadi *chattering* sampai sekitar pada detik ke 35. Namun, setelah itu kesalahan kontur bersifat stabil dengan nilai maksimal sekitar 0,16 mm. Dapat diamati kembali bahwa kesalahan kontur *circular* ini tidak *steady state* pada nilai nol. Hal ini berarti untuk kontur *circular* ini masih tetap mengalami kesalahan kontur. Dengan menggunakan nilai-nilai kesalahan kontur ini, dihitung besar RMSE yang terjadi pada kontur *circular* ini yaitu 0.1348.





**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Dari pembahasan pada Bab IV dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* pada mesin CNC *Milling* 3 aksis dapat mereduksi kesalahan kontur linear secara signifikan dibandingkan dengan metode *PI Modified Cross-Coupled Control*. Namun, untuk kontur *circular* nilai RMSE lebih besar dibandingkan menggunakan metode *PI Modified Cross-Coupled Control*.

Nilai RMSE menggunakan *Predictive Modified Cross-Coupled Control* pada kontur linear yaitu 0,0012. Selisih nilai RMSE menggunakan metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* dengan menggunakan metode *PI Modified Cross-Coupled Control* dengan selisih 0,1336. Sedangkan kesalahan kontur *circular* menggunakan metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* nilai RMSE-nya 0,1348. Selisih nilai RMSE antara menggunakan metode *Predictive Modified Cross-Coupled Control* dengan menggunakan metode *PI Modified Cross-Coupled Control* dengan nilai 0,1335.

### 5.2. Saran

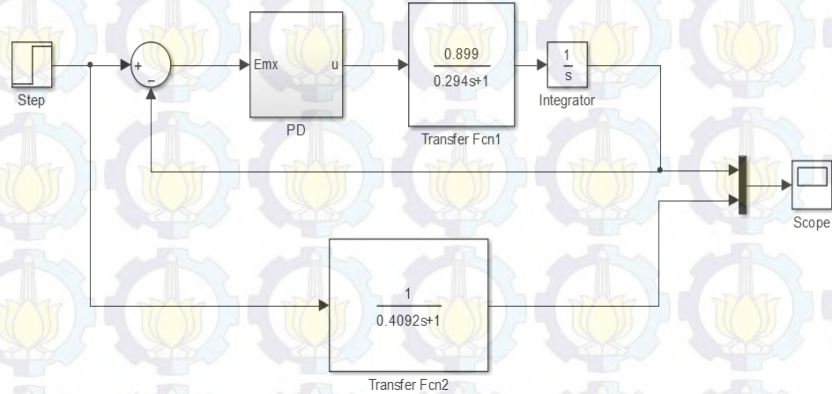
Berdasarkan kesimpulan diatas dapat diberikan saran untuk semakin menguji performansi kontroler yang didesain, perlu di uji coba menggunakan kontur bebas bentuk (*free form contour*). Selain itu, pengaruh kecepatan *spindle* tidak diabaikan karena proses *feeding* sangat erat kaitannya dengan *feedrate*. Untuk penelitian selanjutnya agar dapat diimplementasikan pada sistem *real* yang sebenarnya.



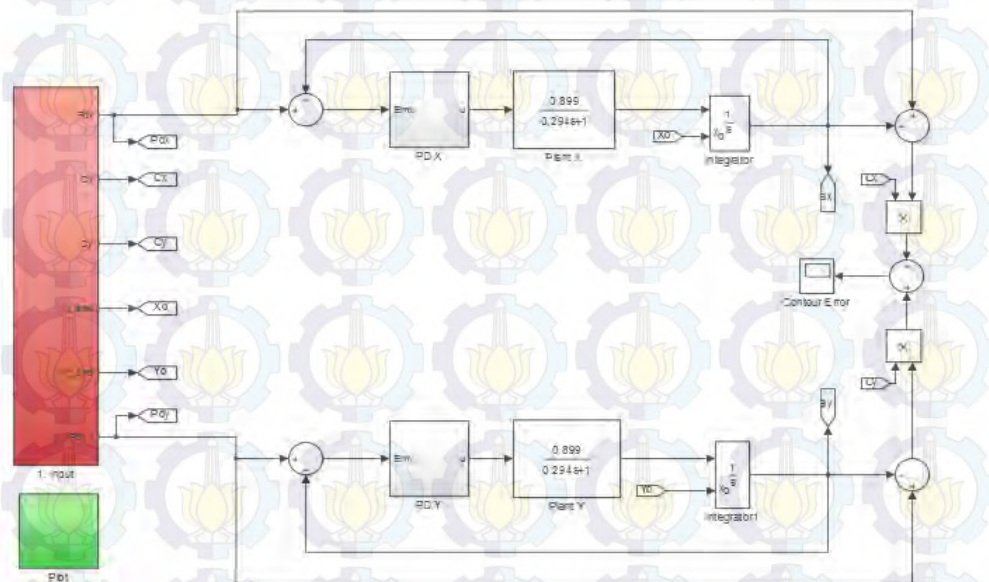


## LAMPIRAN

A.1 Simulink Pengujian dengan Sinyal Step



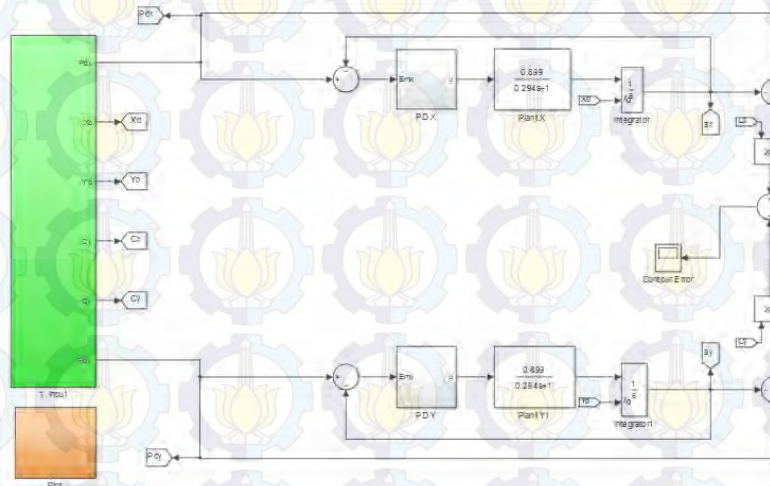
A.2 Desain Blok Simulink dikontrol hanya dengan masing-masing aksis untuk Kontur Linear



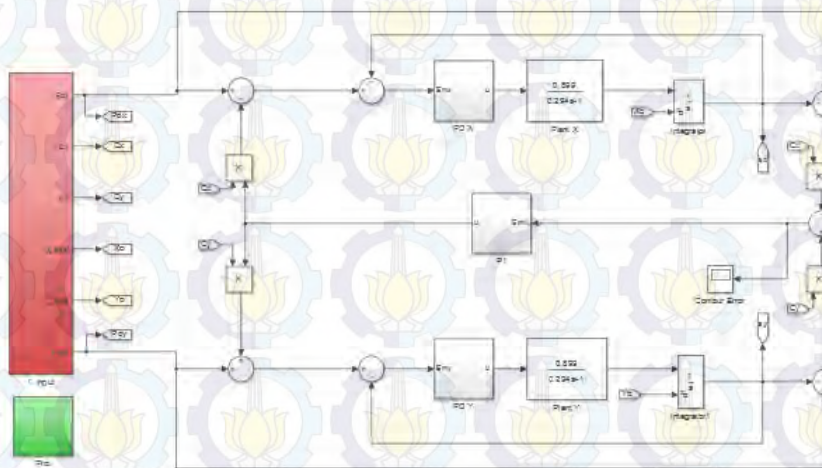


A.3 Desain Blok Simulink dikontrol hanya dengan masing-masing aksis untuk

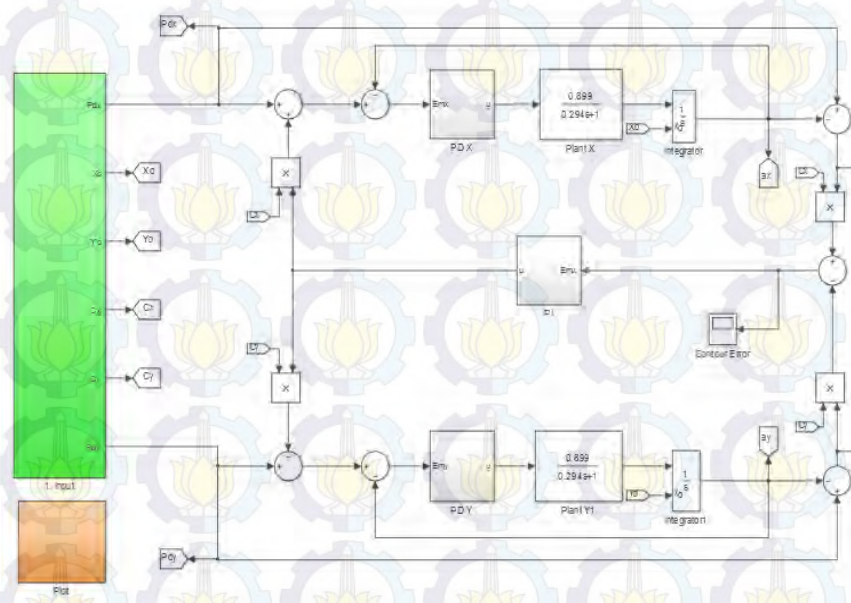
Kontur Circular



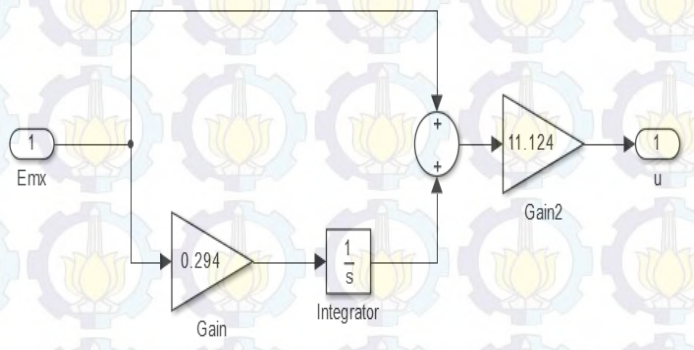
A.4 Konfigurasi PI-Modified Cross-Coupled Control untuk Kontur Linear



A.5 Konfigurasi PI Modified Cross-Coupled Control untuk Kontur Circular

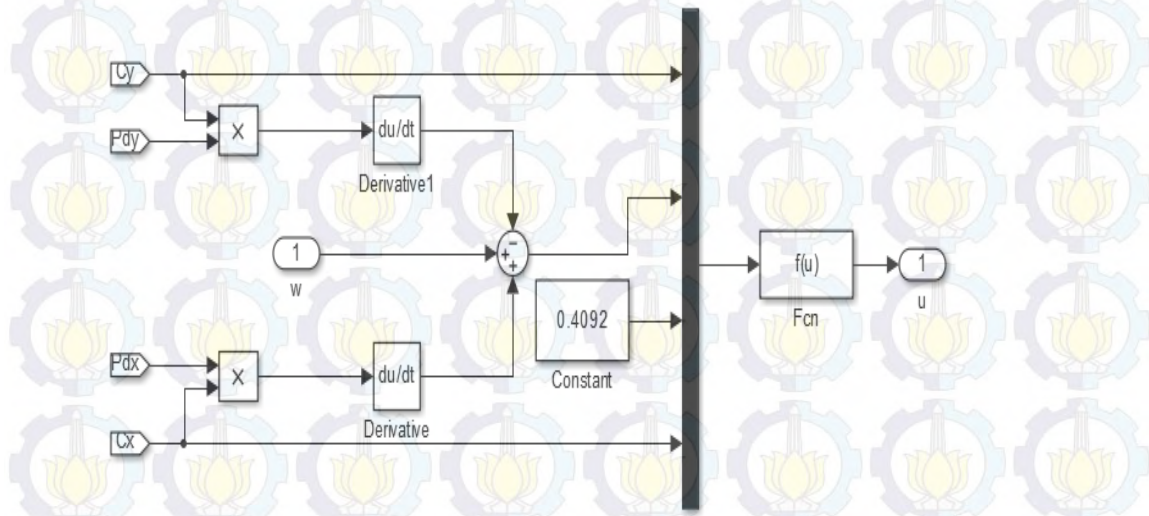


A.6 Kontroler PI pada Cross-Coupled Gain

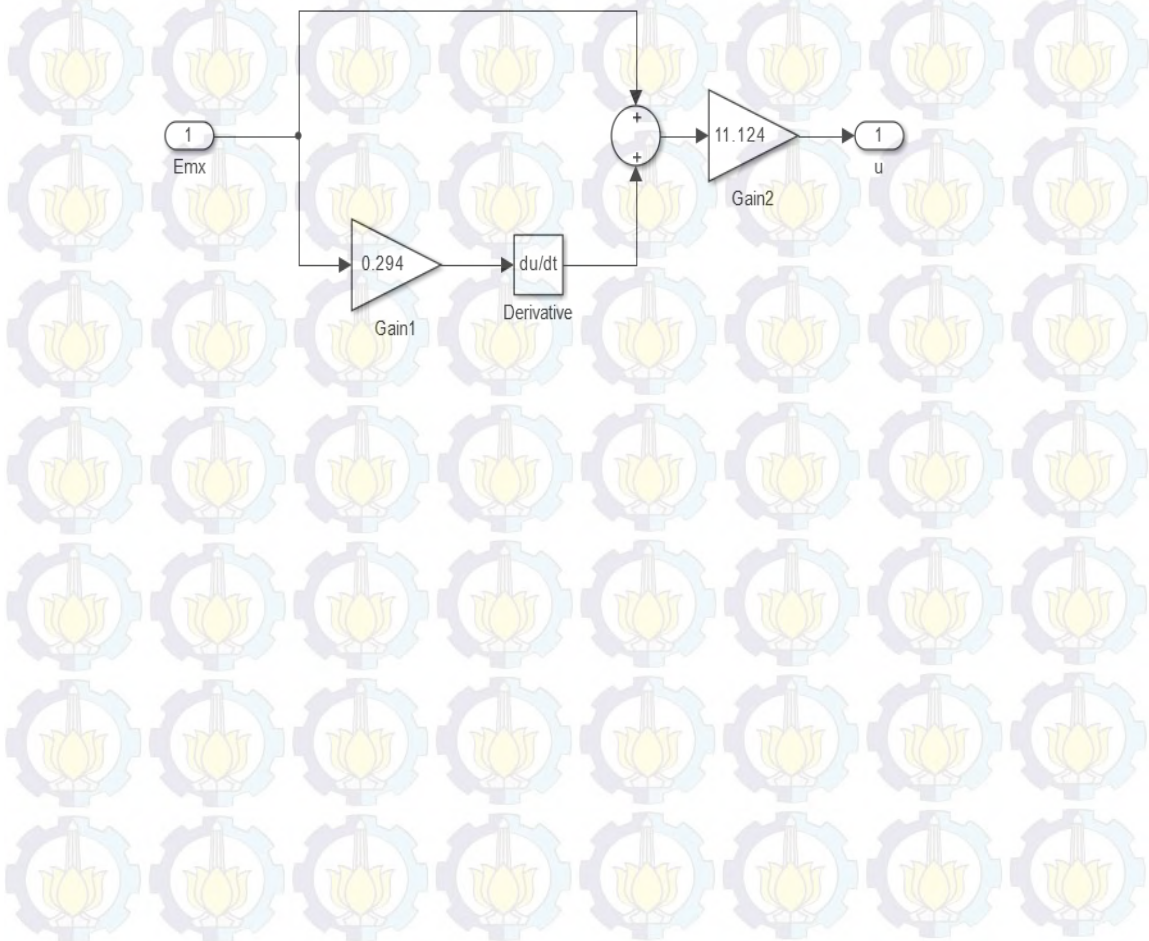




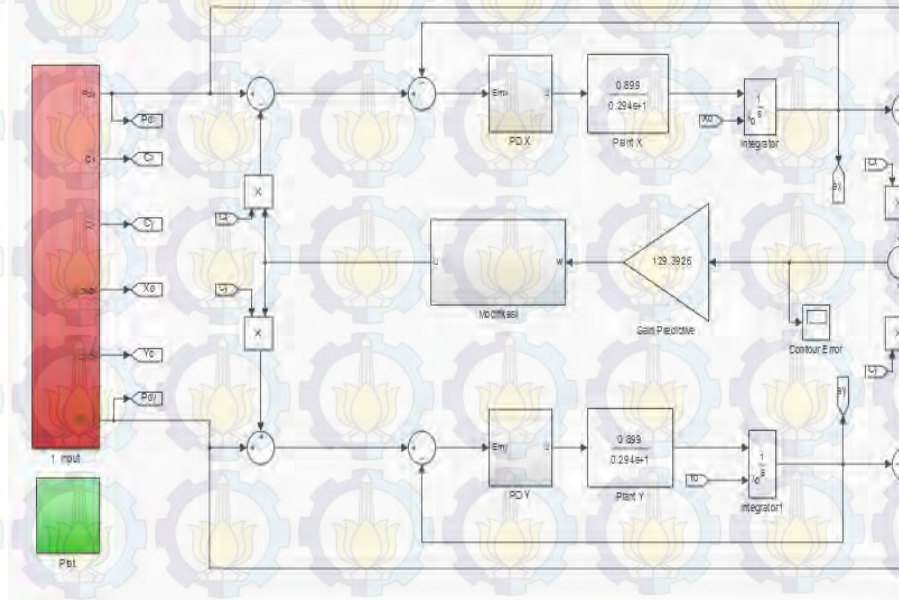
A.7 Konfigurasi Prediktif Kesalahan Kontur



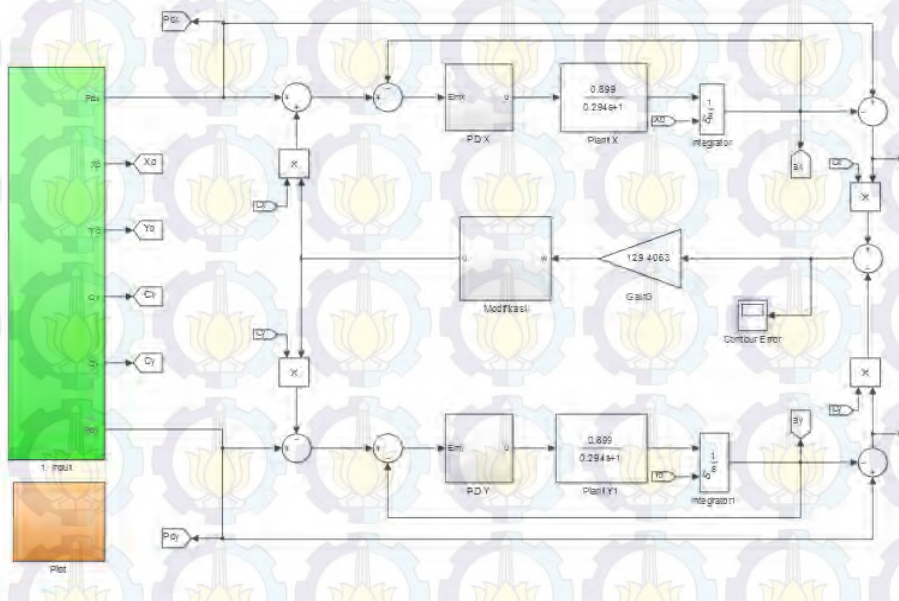
A.8 Kontroler PD untuk aksis X dan Y



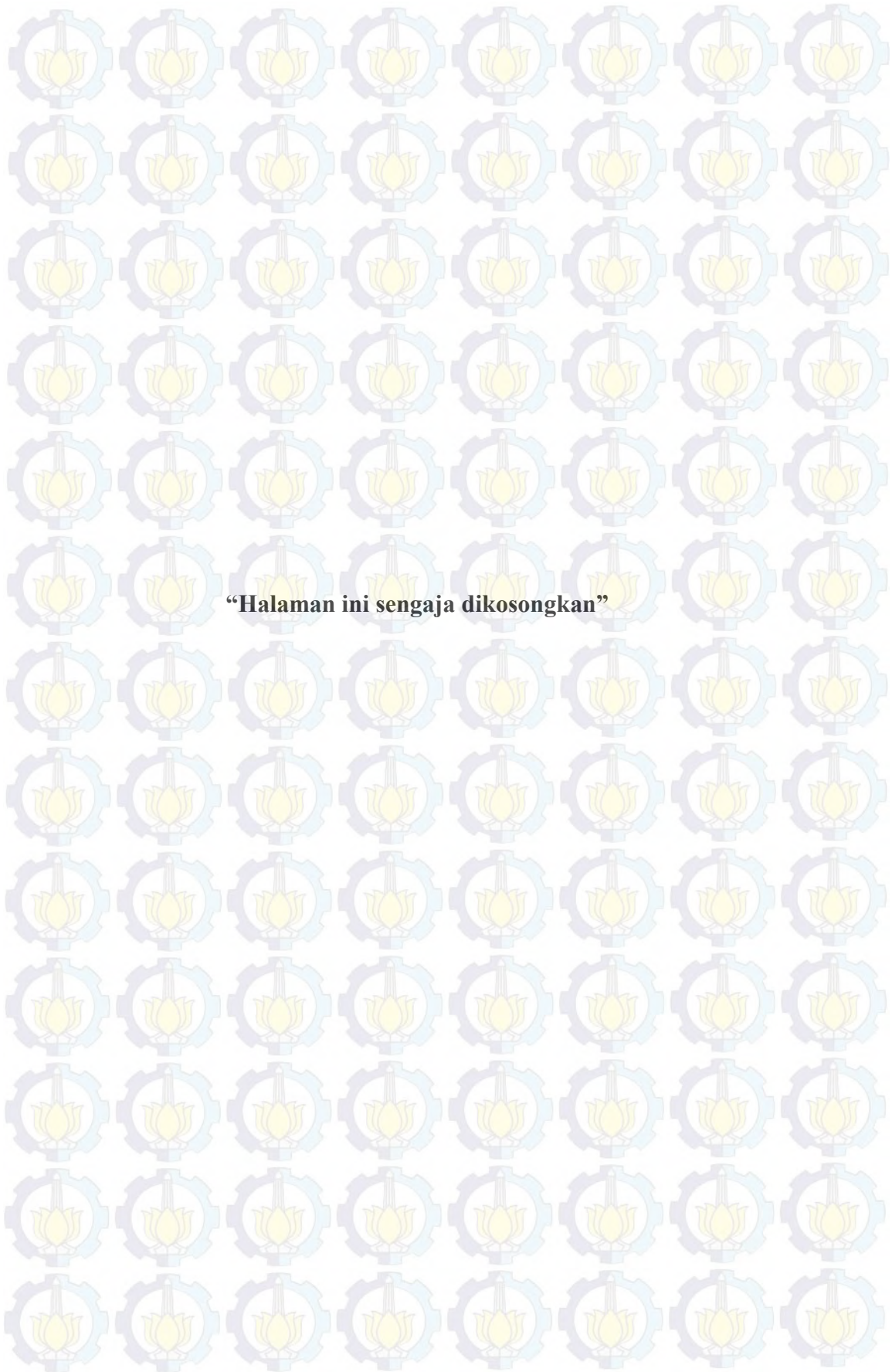
A.9 Desain Blok Simulink Predictive Modified Cross-Coupled Control untuk Kontur Linear



A.10 Desain Blok Simulink Predictive Modified Cross-Coupled Control untuk Kontur Circular







**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sun, D., 2002, "Position Synchronization of Multiple Motion Axes With Adaptive Coupling Control". *IFAC*.
- [2] Sun, D, dkk., 2005, "A Model-Free Cross-Coupled Control for Position Synchronzation of Multi-Axis Motion Theory and Experiment". *IFAC*.
- [3] Huo, F., dkk, 2012, "Improving contouring accuracy by using generalized cross-coupled control". *International Journal of Machine Tools & Manufacturing* 63, 49–57.
- [4] Shih, Y., dkk., 2002, "A novel cross-coupling control design for Bi-axis motion". *International Journal of Machine Tool & Manufacture* 42, 1539-1548.
- [5] Koren, Y dan Lo, Ch-Ch., 1991, "Variable-Gain Cross-coupling Control for Contouring". *Annals of The CIRP*. 371-374
- [6] Koren, Y., 1980. "Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems". *ASME Journal Of Dynamic System, Measurement, and Control VOL. 102*. 265–272.
- [7] Hady, M, A., 2014. "Optimisasi Multi-Objektif Untuk *Adaptive Cross-Coupled Control* Pada Tool Path Tracking Mesin Cnc Milling 3-Axis". *Thesis Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya*.
- [8] Tsao dan Tomikuza., 1987, "Zero phase error tracking algorithm for digital control". *ASME Journal Of Dynamic System, Measurement, and Control VOL. 109*. 65– 68.
- [9] Safitri, E, B, dkk., 2012, "Implementasi Kontroler P-PI Kaskade untuk Meningkatkan Keakuratan Mesin Bubut CNC ". *JURNAL TEKNIK ITS Vol 1*. F75-F80.
- [10] Sun, J dan Hu, J., 2011. "Research on Modeling of Contour Error for Motion Control System of CNC Machine". *Science Foundation of Gansu Province Education Office of China (0914-01)*. 1553-1556.
- [11] Suh, S, dkk., 2008., "Theory and Design of CNC Systems". *Springer*.





**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Abdul Hadi dengan sapaan akrab Hadi lahir pada tanggal 10 Januari 1990 di Desa Pangkalan Nyirih Kecamatan Rupert yaitu tempat yang terkenal akan pesona pantainya yang masih natural setara Kuta, Bali. Penulis merupakan anak ke empat dari lima bersaudara dimana putra satu-satunya dari pasangan Bapak Ahmad Bukhori dan Ibu Kasminar yang beralamat di Jl. Dusun I Sei Yap Tengah Desa Pangkalan Nyirih. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail [abdulhadi.bkhr@gmail.com](mailto:abdulhadi.bkhr@gmail.com).

Penulis memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar Negeri 5 Desa Pangkalan Nyirih pada tahun 1995 dan lulus pada tahun 2001. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Rupert dan lulus pada tahun 2004 dan melanjutkan ke SMAS Kurnia Jaya Pangkalan Nyirih sampai lulus pada tahun 2007. Ditahun 2007 penulis berkesempatan melanjutkan ke perguruan tinggi pada jenjang Strata Satu (S1) di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim (UIN SUSKA) di Jurusan Teknik Elektro dan lulus pada tahun 2012. Setelah lulus penulis memulai bekerja pada CV. Karya Nofa sampai pada tahun Juni 2013 Penulis mengundurkan diri karena berkesempatan melanjutkan studi ke jenjang Strata Dua (S2) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro dan lulus pada Tahun 2015 dengan terselesainya penulisan Tesis ini.





**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**