



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM KENDALI AC SERVOMOTOR DENGAN SERVOPACK
PADA MESIN CNC**

SKRIPSI

DENI UMARYADI

0606073846

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SISTEM KENDALI AC SERVOMOTOR DENGAN SERVOPACK
PADA MESIN CNC**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana

DENI UMARYADI

0606073846

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya
nyatakan dengan benar.**

Nama : Deni Umaryadi

NPM : 0606073846

Tanda Tangan :

Tanggal : 15 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Deni Umaryadi
NPM : 0606073846
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Sistem Kendali AC Servomotor Dengan Servopack
Pada Mesin CNC

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing :
Ir. Wahidin Wahab, M.Sc, Ph.D



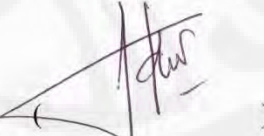
()

Penguji 1 :
Dr. Abdul Muis, S.T, M.Eng.



()

Penguji 2 :
Dr. Abdul Halim, M.Eng



()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Juli 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penulisan skripsi ini penulis bersyukur kepada Allah SWT atas karunia-Nya dan penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Wahidin Wahab dan Bapak Abdul Muis selaku pembimbing dalam skripsi ini, yang telah membimbing saya dan teman-teman selama penulisan skripsi ini
2. Kedua orangtua saya, Bapak Rohadu dan Ibu Warjiati, serta ketiga adik saya, Aji Darmadi, Rike Minati Sekti, dan Intan Septia Nugroho yang telah memberikan doa, motivasi, serta membantu saya selama ini.
3. Bapak Lie yang telah membimbing serta tempat sharing pengetahuan serta diskusi mengenai rancangan mesin CNC ini
4. Kepada teman-teman kelompok saya yang selalu membantu dalam penulisan skripsi ini, Candraditya Pradhana dan Ferdi Andika.
5. Kepada teman-teman seperjuangan dalam penyusunan dan penyelesaian skripsi ini terutama teman-teman di Lab. Kendali yang telah banyak membantu memberi motivasi dan semangat.
6. Teman-teman Elektro, Tim Robot UI, IME FTUI, dan teman-teman semua yang tidak dapat saya tulis semuanya, terimakasih untuk semuanya.

Depok, Juni 2010

Deni Umaryadi

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Deni Umaryadi
NPM : 0606073846
Program studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**SISTEM KENDALI AC SERVOMOTOR DENGAN SERVOPACK
PADA MESIN CNC**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta sebagai pemegang Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 15 Juni 2010

Yang menyatakan

Deni Umaryadi

ABSTRAK

Nama : Deni Umaryadi

Program studi : Teknik Elektro

Judul : Sistem Kendali AC Servomotor Dengan Servopack Pada Mesin CNC

Mesin CNC merupakan mesin yang memiliki tingkat ketelitian kerja yang tinggi sehingga membutuhkan sistem aktuator dan kendali yang cukup baik. Untuk dapat bekerja dengan performa terbaiknya digunakan AC servomotor dan sistem kendali cascade dengan menggunakan multiple loop. AC servomotor yang digunakan berupa motor PMSM dengan encoder sebagai sensor posisi. Sebagai sistem multiple loop digunakan servopack dengan fitur yang tersedia berupa kontrol posisi, kecepatan dan torsi. Sistem multiple loop yang digunakan adalah sistem kendali cascade dengan kontrol posisi pada bagian terluar, kemudian kontrol kecepatan dan yang terdalam kontrol torsi. Percobaan yang dilakukan dengan menggunakan pengendali kecepatan dan torsi pada servopack dengan input dari EMC2 yang terkendali secara kendali posisi pada loop terluar dan input analog. Dari hasil yang didapatkan kepresisian yang didapatkan dengan menggunakan input EMC2 hingga mencapai 99.31% pada kecepatan yang dikendalikan.

kata kunci : Mesin CNC, Multiple loop, sistem kendali cascade, AC servomotor, servopack.

ABSTRACT

Name : Deni Umaryadi

Study program : Electrical Engineering

Title : AC Servomotor Control System With Servopack On CNC Machines

CNC machine is a machine that has a high working accuracy so thus require an actuator and control system is good enough. To be able to work with the best performance used an AC servomotor and cascade control systems using multiple loops. AC servomotor is used in the form of PMSM motors with encoder as a position sensor. As a multiple-loop system is used servopack with the features available in the form of position control, speed and torque. Multiple-loop system is used cascade control system with controls the position on the outer loop, then control the speed and torque control of the deepest. Experiments carried out by using speed control and torque with the input from EMC2 servopack controlled by the control positions on the outer loop and an analog input. From the results obtained precision is obtained using EMC2 input until it reaches 99.31% at a controlled speed.

Key word : CNC Machines, Multiple-loop, cascade control systems, AC servomotor, servopack.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK	vi
ABTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 SISTEM KENDALI CNC	4
2.1 Mesin CNC	4
2.2 Motor penggerak dan Encoder.....	5
2.2.1 Motor DC.....	6
2.2.2 Motor AC.....	9
2.2.3 Encoder.....	12
2.3 Driver Motor	13
2.3.1 Motor DC.....	13
2.3.2 Motor AC.....	15
2.4 Sistem Kendali pada CNC.....	15

2.4.1 Kendali Kecepatan.	16
2.4.2 Kendali Torsi.	19
2.5 Filter.	20
2.6 Soft starter.	21
2.7 Zero Clamp.	23
BAB 3 KONFIGURASI DAN SISTEM KENDALI PADA TRADEMARK YASKAWA	24
3.1 Motor AC servomotor SGMAH-02AAA21.	25
3.2 Servopack SGDM-02ADA.	27
3.2.1 Rating servopack.	28
3.2.2 Diagram blok servopack SGDM-02ADA.	31
3.3 Pengaturan pada servopack.	34
3.3.1 Kendali kecepatan.	35
3.3.2 Kendali posisi.	39
3.3.3 Kendali torsi.	45
3.3.4 Kendali kecepatan internal.	47
3.4 Tuning pada servopack.	49
3.4.1 Automatis.	49
3.4.2 Manual.	50
3.5 Pengendalian servomotor.	51
BAB 4 HASIL DAN ANALISA PENGGUNAAN SISTEM KENDALI SERVOPACK	53
4.1 Rancang bangun sistem.	53
4.1.1 Kendali posisi.	54
4.1.2 Kendali kecepatan.	55
4.1.3 Kendali torsi.	56
4.2 Hasil respon dari kendali posisi.	56
4.2.1 Variasi kecepatan dari EMC2.	56
4.2.2 Variasi soft starting.	59
4.2.3 Variasi konstanta waktu filter.	60

4.2.4 Analisa sistem kendali inner loop kecepatan	62
4.3 Hasil respon dari kendali kecepatan	63
4.3.1 Pemberian beban dan tidak pada AC servomotor	63
4.3.2 Variasi soft starting	66
4.3.3 Variasi konstanta waktu filter	68
4.3.4 Zero Clamp	70
4.3.5 Analisa sistem kendali kecepatan	70
4.4 Hasil respon dari kendali torsi	71
4.4.1 Tanpa beban dengan variasi waktu filter	71
4.4.2 Berbeban dengan variasi tegangan	73
4.4.3 Analisa sistem kendali torsi	76
BAB 5 KESIMPULAN	77
DAFTAR REFERENSI.....	79

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi AC Servomotor SGMAH-02AAA21	26
Tabel 3.2 Spesifikasi input dan output SGDM-02ADA	28
Tabel 3.3 Rating dan spesifikasi Servopack.....	29
Tabel 3.4 Variasi Parameter terhadap referensi pulsa dari Pn200.0.....	39
Tabel 3.5 Variasi parameter dan deskripsinya dari Pn200.1.....	40
Tabel 3.6 Spesifikasi pewaktuan sinyal posisi.	42
Tabel 3.7 Input output pengaturan internal.	48
Tabel 4.1 Data variasi kecepatan kendali posisi.....	58
Tabel 4.2 Data kendali kecepatan pada kondisi tak berbeban dan berbeban.	65
Tabel 4.3 Variasi percepatan dan perlambatan.....	68
Tabel 4.4 Respon konstanta waktu filter.....	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Blok diagram pengendalian CNC.....	5
Gambar 2.2 Mesin CNC tiga sumbu.....	5
Gambar 2.3 Motor DC konvensional.....	6
Gambar 2.4 Cara kerja motor DC. (a) ilustrasi 3 dimensi kerja motor DC (b) bagian inti besi tidak ditunjukkan agar lebih detail.....	7
Gambar 2.5 Struktur motor AC servomotor.....	10
Gambar 2.6 Ilustrasi operasi dari encoder.....	12
Gambar 2.7 Bentuk sinyal encoder dalam 1 putaran.....	13
Gambar 2.8 H-Bridge motor DC.....	14
Gambar 2.9 Variasi duty cycle PWM.....	14
Gambar 2.10 Drive AC motor.....	15
Gambar 2.11 Struktur sistem servo pada mesin CNC.....	16
Gambar 2.12 Blok diagram kontrol kecepatan.....	17
Gambar 2.13 Blok diagram pengendali kecepatan PMSM.....	18
Gambar 2.14 Loop sederhana pada kontrol kecepatan.....	18
Gambar 2.15 Pengendali arus.....	19
Gambar 2.16 Rangkaian Low Pass Filter.....	20
Gambar 2.17 Grafik transient respon first order.....	21
Gambar 2.18 Soft starting respon.....	22
Gambar 2.19 Blok diagram inverter.....	22
Gambar 2.20 Grafik soft starting.....	23
Gambar 2.21 Grafik zero clamp.....	23
Gambar 3.1 Sistem Power minimum.....	24
Gambar 3.2 Blok diagram I/O servopack.....	25
Gambar 3.3 Servomotor tanpa brake.....	26
Gambar 3.4 Karakteristik Torsi-Kecepatan motor.....	27

Gambar 3.5 Servopack preview.....	28
Gambar 3.6 Internal blok diagram SGDM-02ADA.....	32
Gambar 3.7 Momen inersia beban VS Speed yang diperbolehkan.....	34
Gambar 3.8 Tampilan SigmaWin.....	34
Gambar 3.9 Tampilan Parameter yang ada pada sigmawin.....	35
Gambar 3.10 Slope speed yang dapat digunakan.....	36
Gambar 3.11 Grafik sebelum dan sesudah adjusting offset.....	36
Gambar 3.12 Proses sebelum dan sesudah soft start.....	37
Gambar 3.13 Sistem zero clamp.....	38
Gambar 3.14 Contoh Pn201 = 16.....	38
Gambar 3.15 Grafik output speed coincidence.....	38
Gambar 3.16 Deskripsi proses pengalihan input.....	40
Gambar 3.17 Model dari persamaan rasio gear elektrik.....	42
Gambar 3.18 (a). Bentuk sinyal dari input step dan parameter Pn204. (b). Bentuk sinyal dari input step dan parameter Pn208. (c). Bentuk sinyal dari input ramp dan parameter Pn208.....	43
Gambar 3.19 respon sinyal /COIN dan /NEAR.....	44
Gambar 3.20 bentuk blok diagram fungsi inhibit dengan responnya terhadap input referensi.....	45
Gambar 3.21 Slope torsi yang dapat digunakan.....	45
Gambar 3.22 Grafik sebelum dan sesudah pengaturan offset.....	46
Gambar 3.23 Grafik batas kecepatan.....	46
Gambar 3.24 Blok diagram kontrol kecepatan dengan kecepatan internal.....	47
Gambar 3.25 blok diagram kendali pada servopack.....	50
Gambar 3.26 Blok diagram pengendali dengan EMC ²	51
Gambar 3.27 Skematik pengendali kecepatan dengan input analog.....	52
Gambar 3.28 Skematik pengendali torsi dengan input analog.....	52

Gambar 4.1 Tampilan trace pada sigmawin.....	53
Gambar 4.2 Blok pengendali posisi.....	54
Gambar 4.3 Blok pengendali kecepatan.....	55
Gambar 4.4 Blok pengendali torsi.....	56
Gambar 4.5 Grafik respon kecepatan sebesar 120.....	57
Gambar 4.6 Grafik respon kecepatan sebesar 180.....	57
Gambar 4.7 Grafik respon kecepatan sebesar 240.....	58
Gambar 4.8 Grafik respon soft starting 0 ms.	59
Gambar 4.9 Grafik respon soft starting 100ms.	59
Gambar 4.10 Grafik respon soft starting 1000ms.....	60
Gambar 4.11 Grafik respon waktu filter 0.4ms.....	61
Gambar 4.12 Grafik respon waktu filter 0.8 ms.....	61
Gambar 4.13 Grafik respon waktu filter 1.2 ms.....	62
Gambar 4.14 Grafik respon waktu filter 1.6 ms.....	62
Gambar 4.15 Grafik respon kendali kecepatan tanpa beban pada waktu sampling 10 ms.....	64
Gambar 4.16 Grafik respon kendali kecepatan berbeban pada waktu sampling 10 ms.....	64
Gambar 4.17 Grafik respon kendali kecepatan berbeban pada waktu sampling 1 ms.....	65
Gambar 4.18 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu soft starting 10 ms	66
Gambar 4.19 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu soft starting 100 ms	67
Gambar 4.20 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu soft starting 1000 ms	67
Gambar 4.21 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu filter 4 ms.	68
Gambar 4.22 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu filter 40 ms.	69
Gambar 4.23 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu filter 400 ms.	69

Gambar 4.24 Grafik respon fungsi clamp sebesar 1000 rpm.	70
Gambar 4.25 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 3ms.....	71
Gambar 4.26 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 4 ms.....	72
Gambar 4.27 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 5 ms.....	72
Gambar 4.28 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 10 ms.....	73
Gambar 4.29 Grafik respon kendali dengan tegangan 1.8 V.	74
Gambar 4.30 Grafik respon kendali torsi dengan tegangan 2.1 V.....	74
Gambar 4.31 Grafik respon kendali torsi dengan tegangan 5 V.	75
Gambar 4.32 Grafik respon kendali torsi dengan tegangan 10 V.	75

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang kian pesat saat ini mendorong sektor industri untuk dapat berkembang. Produk-produk high teknologi mulai muncul demi menunjang kemajuan sektor industri. Sehingga sektor industri dituntut memiliki kinerja yang efisien, teliti, cepat dan berbagai parameter lain untuk meningkatkan hasil produksi. Salah satu cara untuk meningkatkan kinerja produksi yaitu dengan menggunakan otomatisasi dalam bidang industri. Mesin CNC (*Computer Numerical Control*) merupakan salah satu dari teknologi otomatisasi yang digunakan oleh sektor industri saat ini. Dengan menggunakan mesin CNC ini kita dapat melakukan produksi dalam waktu yang cepat dengan efisiensi kerja dan ketelitian yang tinggi. Sebagai contoh pemotongan plat dengan ukuran dan bentuk tertentu dapat dilakukan secara cepat oleh mesin ini dengan ketelitian bentuk yang tinggi.

Namun sampai saat ini mesin CNC yang ada memiliki harga yang mahal baik itu dari mahalnya harga hardware yang digunakan maupun harga software yang digunakan untuk menjalankan mesin tersebut. Oleh sebab itu mesin ini hanya digunakan oleh industri besar yang pada kenyataannya hanya sedikit jumlahnya dibandingkan dengan industri menengah dan kecil.

Maka dibutuhkan mesin CNC yang memiliki harga yang terjangkau untuk semua kalangan industri. Untuk itu dibuatlah mesin ini secara manual dengan menggabungkan konfigurasi hardware yang ada dengan software yang *open source* sehingga mengurangi biaya penyediaan mesin ini. Berdasarkan hal di atas, skripsi ini akan membahas mengenai konfigurasi hardware aktuator berupa sistem servomotor dengan trademark yaskawa.

1.2 Tujuan

Skripsi ini memiliki tujuan untuk membahas penggunaan AC servomotor dan servopack dengan trademark yaskawa, konfigurasi, dan melakukan pengujian pada pengendali kecepatan dan torsi serta mencari nilai parameter yang terbaik untuk digunakan pada servopack.

1.3 Batasan Masalah

Laporan ini terbatas pada :

1. Sistem servomotor yang digunakan adalah merek yaskawa tipe SGMAH-02AAA21.
2. AC servopack yang digunakan adalah merek yaskawa dengan tipe SGDM-02ADA.
3. Pembahasan difokuskan untuk mendukung perancangan CNC berbasis open source yang dibuat dalam penelitian di Lab. Teknik Kendali.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada skripsi ini terdiri dari beberapa tahap, yaitu :

1. Studi Literatur

Studi literatur dari artikel-artikel atau media-media lain yang berkaitan dengan masalah yang dibahas.

2. Perancangan alat

Tahap ini merupakan tahap merancang alat yang akan digunakan baik dari sistem CNC secara keseluruhan maupun sistem akuator.

3. Pengujian sistem

Berupa pengambilan data dari pengujian yang dilakukan pada sistem akuator

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan buku skripsi ini adalah sebagai berikut, pada Bab pertama, dibahas mengenai pendahuluan, yang berisi tentang latar belakang, tujuan, ruang

lingkup, metodologi serta sistematika penulisan. Pada bab kedua dibahas mengenai sistem kendali CNC, yang berisi mengenai tinjauan literatur tentang mesin CNC serta sistem servomotor. Pada bab ketiga dibahas mengenai konfigurasi dan sistem kendali pada trademark yaskawa, yang berisi mengenai hardware dan konfigurasi pada sistem AC servomotor. Pada bab keempat dibahas mengenai hasil dan analisa penggunaan sistem kendali servopack, yang berisi mengenai hasil penggunaan servopack beserta analisa. Pada bab kelima merupakan kesimpulan dari study AC servomotor dan servopack dengan trademark yaskawa.

BAB 2

SISTEM KENDALI CNC

CNC (*Computer Numerical Control*) merupakan sistem otomatisasi mesin perkakas yang dioperasikan oleh perintah yang diprogram secara abstrak dan disimpan pada media penyimpanan[1]. Mesin ini dapat digunakan untuk memotong dan mengebor secara otomatis dengan menggunakan komputer yang diberikan input. Mesin ini bekerja sesuai dengan input yang dijalankan/diberikan pada komputer pada program CNC. Ada 2 jenis daerah kerja yang dapat digunakan pada mesin CNC yaitu dengan sistem kordinat kartesius dan sistem kordinat kutub. Pada kordinat kartesius kita memberikan input dari komputer berupa sumbu x, y, z, sedangkan pada kordinat kutub kita memberikan input berupa magnitude dan sudut.

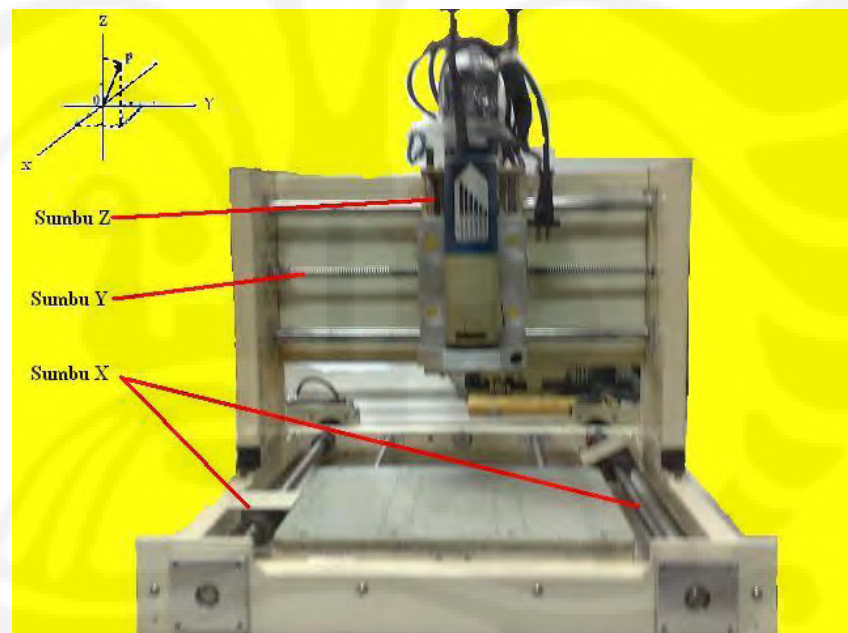
2.1 Mesin CNC

Mesin CNC dibagi menjadi tiga bagian secara umum yaitu komputer, *interface*, dan sistem aktuator. Komputer merupakan suatu perangkat yang digunakan untuk menjalankan software, dalam hal ini digunakan EMC² berbasis open source, untuk mengubah gambar vektor menjadi G-Code. G-Code yang didapat digunakan untuk membuat step referensi kendali untuk motor dan mengolah feedback dari *interface*. *Interface* yang digunakan adalah Mesa 5I20 yang merupakan FPGA (*Field Programmable Gate Array*) dan 7I33 sebagai servo-amplifier. Servo-amplifier digunakan untuk mengubah sinyal digital menjadi referensi analog untuk mengendalikan aktuator. Sedangkan sistem aktuator merupakan suatu sistem yang membuat aktuator berjalan sesuai dengan referensi analog yang menjadi sinyal referensi untuk pergerakan motor. Ketiga bagian tersebut yang membuat CNC dapat berjalan dan bekerja dengan presisi hingga mencapai tingkat keakuratan mikrometer. Blok diagram bagian dari CNC dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok diagram pengendalian CNC

Untuk dapat menggerakkan mesin CNC dengan akurat, mesin CNC harus menggunakan jenis motor yang dapat bergerak dengan presisi dan memiliki kehandalan yang cukup tinggi. Untuk menambah tingkat kepresisian dari mesin CNC dapat digunakan pengendali closed-loop yang membuat komputer dapat selalu memonitor posisi dari motor dan memperbaiki error yang terjadi pada mesin tersebut. Gambar 2.2 merupakan deskripsi mesin CNC 3 sumbu yaitu x, y, dan z dengan menggunakan 4 buah motor dan 1 motor bor.



Gambar 2.2 Mesin CNC tiga sumbu

2.2 Motor penggerak dan encoder

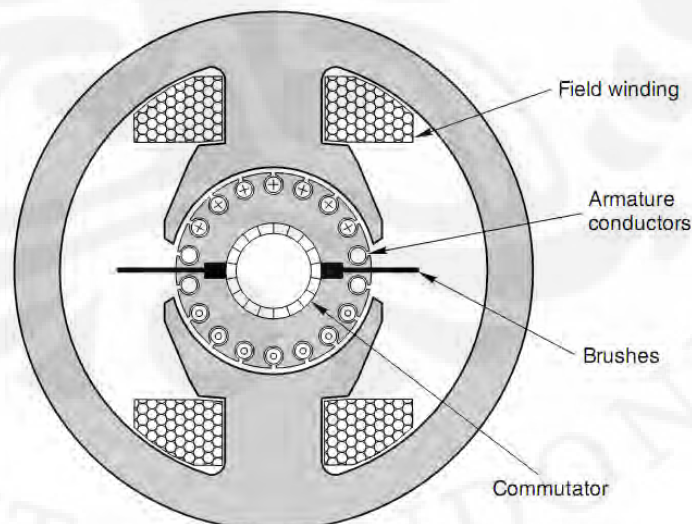
Mesin CNC menggunakan jenis motor presisi sebagai aktuator yang menggerakkan mesin sesuai kordinat yang diberikan maupun *milling* pada aktuator terakhir. Motor merupakan salah satu komponen terpenting dalam menentukan kehandalan dari mesin CNC dalam bergerak secara presisi sesuai

dengan kordinat yang diberikan. Oleh sebab itu digunakan servomotor atau steppermotor sebagai motor kordinat. Steppermotor memiliki tingkat kepresisian yang lebih tinggi dari servomotor dengan harga yang lebih mahal, sedangkan servomotor memiliki harga yang relatif lebih rendah, ketahanan yang tinggi, dan lebih fleksibel dibandingkan dengan steppermotor sehingga banyak dipilih sebagai motor penggerak.

Untuk meningkatkan kehandalan dan kepresisian dari servomotor, digunakan sensor sebagai salah satu input dari pengendali PID yang akan dibandingkan dengan referensi input yang diberikan sebelumnya. Menurut jenis arus yang digunakan servomotor dibagi menjadi 2 yaitu motor DC dan motor AC.

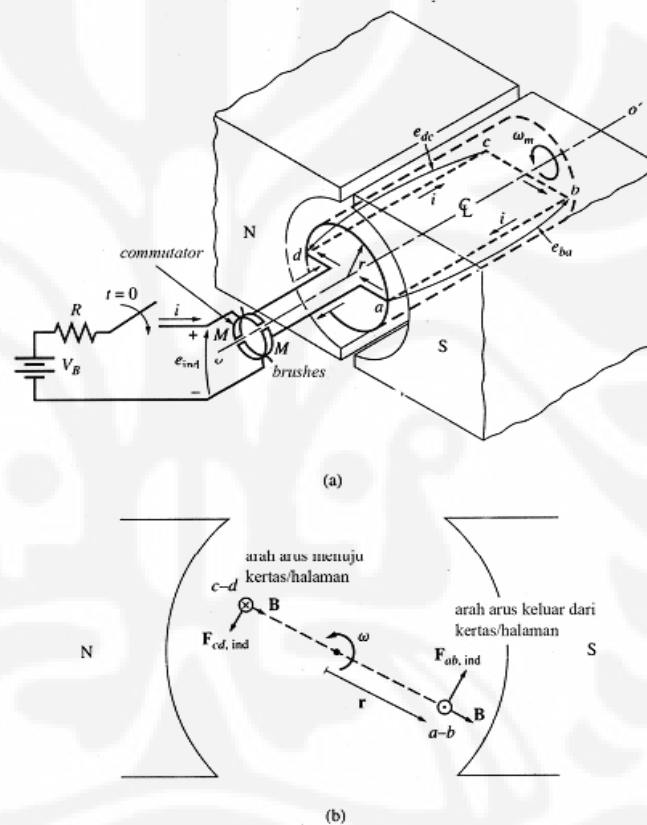
2.2.1 Motor DC

Motor DC adalah jenis motor yang bergerak dengan sumber DC sesuai dengan besar tegangan yang diberikan. Jenis motor ini memiliki starting torsi yang tinggi dan kendali kecepatan yang halus serta respon yang cepat terhadap percepatan dan perlambatan [2]. Kelemahan dari motor DC adalah pada brush motor yang membutuhkan perawatan yang lebih dan pembangkitan sumber DC yang sulit. Bagian dari motor DC dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Motor DC konvensional[2]

DC motor memiliki 2 komponen dasar yaitu armature (komponen yang berputar yaitu rotor) dan field (bagian yang diam yaitu stator)[2]. Pada bagian armature terdapat 2 bagian penting yaitu komutator dan brushes. Komutator bekerja seperti switch elektrik yang polaritasnya selalu berubah searah dengan putaran armature. Sedangkan brushes adalah bagian yang menghubungkan tegangan dengan bagian armature yang selalu terhubung dengan komutator.



Gambar 2.4 Cara kerja motor DC. (a) ilustrasi 3 dimensi kerja motor DC (b) bagian inti besi tidak ditunjukkan agar lebih detail [3]

Pada Gambar 2.4 (a), menunjukkan ada 4 bagian rotor, besarnya gaya yang dihasilkan pada setiap bagian adalah

1. Segmen a-b. Arus keluar menuju komutator dan medan magnet menuju kutub selatan sehingga dengan menggunakan aturan

tangan kanan, gaya akan menuju ke atas seperti pada Gambar 2.4 (b) yang besarnya

$$\mathbf{F}_{ab} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) = ilB \quad (2.1)$$

Dan torsi yang dihasilkan besarnya

$$\tau_{ab} = rF \sin \theta = r(ilB) \sin 90^\circ = rilB \quad (2.2)$$

Berlawanan dengan arah jarum jam

2. Segmen b-c. Arus yang mengalir sejajar dengan arah medan magnet, maka tidak ada gaya yang timbul pada bagian ini.
3. Segmen c-d. Arus yang mengalir masuk menuju rotor dan medan magnet menuju kutub selatan sehingga dengan menggunakan aturan tangan kanan, gaya akan menuju ke bawah seperti pada Gambar 2.4 (b) bagian kiri yang besarnya sama dengan segmen a-b dengan arah yang berlawanan jarum jam.
4. Segmen d-a. Pada bagian ini juga tidak ada gaya yang timbul karena kawat sejajar dengan arah medan magnet.

Dari keempat bagian di atas, torsi total yang dimiliki oleh motor DC adalah

$$\tau_{ind} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da} \quad (2.3)$$

$$\tau_{ind} = \begin{cases} 2rilB & \text{under the pole edge} \\ 0 & \text{beyond the pole edge} \end{cases}$$

Dengan mensubstitusikan $A_p \approx \pi rl$ dan $\phi = A_p B$ sehingga persamaan di atas dapat diganti dengan persamaan di bawah ini:

$$\tau_{ind} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi i & \text{under the pole edge} \\ 0 & \text{beyond the pole edge} \end{cases}$$

Dari persamaan di atas, torsi yang dihasilkan oleh motor DC tergantung pada 3 faktor di bawah ini:

1. Fluks magnet yang dihasilkan (ϕ)
2. Arus yang mengalir pada kumparan rotor (i)
3. Konstanta mekanik

Penampang kawat yang berputar akan menghasilkan ggl induksi sebesar $e = blv$. Dalam motor yang memiliki banyak penampang, v diganti dengan kecepatan tangensial dari konduktor rotor yang setara dengan kecepatan rotasi (n), kerapatan fluks rata-rata pada masing-masing konduktor yang berhubungan langsung dengan fluks total, dan faktor lain yang mempengaruhi, dimasukkan ke dalam konstanta (K_E). Maka magnitude dari resultan ggl adalah $E = K_E \phi n$. (2.4)

Tegangan yang disuplai ke armature berhubungan dengan kecepatan yang akan ditimbulkan, semakin besar tegangan yang diberikan maka akan semakin cepat putaran motor sesuai dengan persamaan di bawah ini[2]

$$S = \frac{V_a - I_a \times R_a}{K_2 \phi} \quad (2.5)$$

Dimana : S = Kecepatan putar motor dalam RPM

V_a = Tegangan armature

I_a = Arus armature

R_a = Tahanan armature

K_2 = Konstanta motor

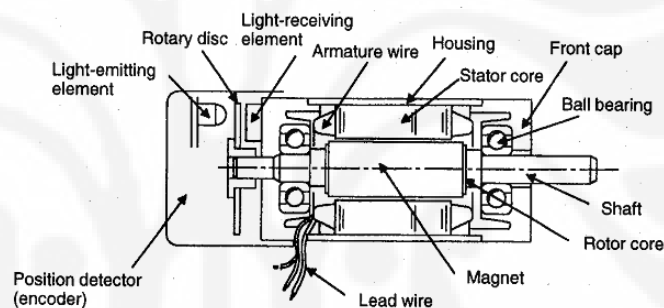
ϕ = Besarnya medan fluks

2.2.2 Motor AC

Motor AC adalah jenis motor yang menggunakan sumber AC sebagai power untuk menggerakkan motor. Motor ini umumnya sulit untuk dikendalikan sehingga jarang digunakan pada aplikasi industri yang membutuhkan ketelitian yang tinggi. Namun dengan perkembangan bidang kendali saat ini, hal itu bukan menjadi masalah lagi. Telah ada berbagai tipe struktur, sensor dan metode kendali yang digunakan untuk menambah ketelitian dari motor tersebut sehingga saat ini motor AC mulai banyak digunakan. Pada pembuatan mesin CNC yang

membutuhkan tingkat ketelitian yang cukup tinggi, dibutuhkan jenis motor AC yang memiliki ketelitian kerja yang tinggi serta sensor untuk dapat mengendalikan mesin secara closed loop.

Salah satu jenis motor yang digunakan adalah PMSM (Permanent magnet synchronous motor). Jenis motor ini digunakan karena memiliki efisiensi yang tinggi, kecepatan yang tinggi, faktor daya yang tinggi, dan ketahanan kerja yang cukup tinggi serta torsi yang cukup besar. Karena kelebihan jenis motor ini banyak digunakan untuk berbagai aplikasi yang menuntut kecepatan yang tinggi dengan ketelitian yang tinggi pula. Gambar 2.5 menunjukkan gambar struktur dalam AC servomotor.



Gambar 2.5 Struktur motor AC servomotor[4]

Motor ini dapat bergerak karena arus medan pada motor menghasilkan medan magnet steady-state B_R dan tegangan tiga fasa pada stator menghasilkan aliran arus tiga fasa dalam kumparan. Arus tiga fasa tersebut pada kumparan armature menghasilkan medan magnet putar yang seragam B_S . Karena medan magnet stator berputar maka medan magnet rotor akan mengikuti medan magnet putar yang dihasilkan sehingga motor dapat berputar. Torsi induksi yang dihasilkan $\tau_{ind} = k B_R \times B_{net}$ dengan $B_{net} = B_R + B_S$. B_R akan menghasilkan E_A , B_{net} akan menghasilkan V_ϕ , dan B_S akan menghasilkan $E_{stat}(-jX_S I_A)$ (pada generator). Persamaan torsi induksi maksimum [3] adalah

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_S}, \text{ saat nilai } \delta = 90^\circ \quad (2.6)$$

Kecepatan yang dihasilkan oleh motor AC ini sebesar [2] :

$$N = \frac{120 \times F}{P} \quad (2.7)$$

Dimana : N = Kecepatan sinkron (rpm)

F = Frekuensi power suplai (Hz)

P = Jumlah pole stator

Model dari AC servomotor yang digunakan adalah PMSM dengan model persamaan motor tersebut sebagai berikut [9]:

Persamaan stator flux linkage (DQ)

$$v_{qs}^r = R_q i_{qs}^r + p \lambda_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (2.8)$$

$$v_{ds}^r = R_d i_{ds}^r + p \lambda_{ds}^r + \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (2.9)$$

Dimana R_q dan R_d adalah tahanan kumparan axis direct dan quadrature yang sama dan axis d dan q flux stator linkage pada frame referensi rotor adalah

$$\lambda_{qs}^r = L_s i_{qs}^r + L_m i_{qr}^r \quad (2.10)$$

$$\lambda_{ds}^r = L_s i_{ds}^r + L_m i_{dr}^r \quad (2.11)$$

Dengan eksitasi permanen magnet dapat dimodelkan dengan konstanta arus i_{fr} . Dan arus pada axis q pada rotor adalah nol maka fluks linkage yang baru dapat ditulis menjadi

$$\lambda_{qs}^r = L_q i_{qs}^r \quad (2.12)$$

$$\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + L_m i_{fr}^r \quad (2.13)$$

Dengan L_m adalah mutual induktansi antara stator dan rotor. Dengan mensubstitusi persamaan flux linkage yang baru ke persamaan 2.8 dan 2.9 didapatkan persamaan tegangan stator

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^r \\ v_{ds}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_q + L_q p & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_d + L_d p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r L_m i_{fr}^r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Torsi elektromagnetik adalah

$$T_e = \frac{3P}{2} \{ \lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r \} \quad (2.15)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \{ \lambda_{af} i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r \} \quad (2.16)$$

Dimana fluks rotor linkage yang menghubungkan stator adalah

$$\lambda_{af} = L_m i_{fr}^r \quad (2.17)$$

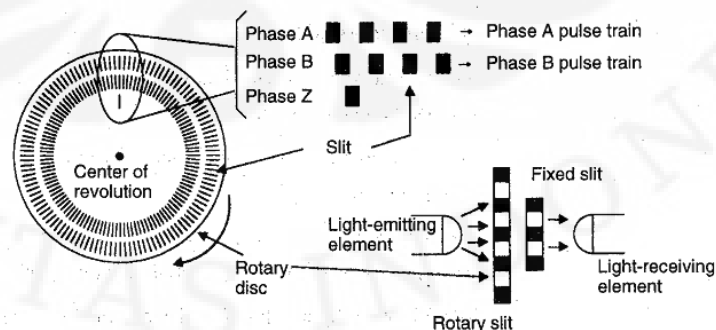
Kekurangan motor sinkron adalah tidak dapat starting sendiri, sehingga perlu dibantu dengan tiga cara [4], yaitu:

1. Mengurangi frekuensi stator untuk level starting yang aman
2. Menggunakan penggerak dari luar
3. Menggunakan kumparan peredam pada motor untuk mempercepat hingga mendekati kecepatan sinkron sebelum arus direct masuk ke kumparan medan.

2.2.3 Encoder

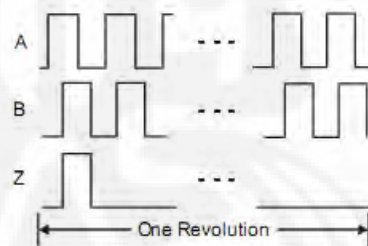
Sensor merupakan sesuatu yang digunakan untuk mendeteksi adanya perubahan lingkungan fisik atau kimia[5]. Sensor bisa disebut sebagai transduser yang menghasilkan variabel output sensor berupa besaran listrik. Ada tiga sensor umum dalam mendeteksi feedback dari motor yaitu tachometer untuk mendeteksi kecepatan serta encoder dan resolver untuk mendeteksi posisi dari motor. Umumnya sensor yang digunakan dalam aplikasi motor adalah encoder.

Encoder merupakan salah satu sensor yang dapat digunakan untuk memonitor posisi putaran dari motor dengan menghasilkan pulsa putaran. Dengan memanipulasi pulsa putaran yang dihasilkan, encoder dapat pula berfungsi sebagai sensor kecepatan atau tachometer. Bentuk fisik dari encoder dan ilustrasi kerja dari encoder dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Ilustrasi operasi dari encoder[4]

Dari Gambar 2.6, encoder akan menghasilkan pulsa dalam bentuk 3 fasa, dengan fasa A dan fasa B berbeda fase 90^0 serta fasa Z berjumlah 1 pulsa tiap putaran bentuk ketiga fasa sinyal encoder dapat dilihat pada Gambar 2.7. Fasa A dan B digunakan untuk mengetahui maju dan mundur motor sedangkan fasa Z sebagai indeks 1 putaran dari motor yang dapat digunakan pula sebagai posisi nol pada satu putaran motor. Ada dua jenis tipe dari encoder yaitu *incremental* dan *absolute*. Perbedaan kedua jenis encoder ini yaitu pada *incremental*, terdiri dari 2 jenis deretan lubang yang disusun berupa dua cincin seperti terlihat pada Gambar 2.6, sedangkan encoder *absolute* menggunakan piringan yang memiliki 8-12 deretan lubang yang membentuk kode-kode posisi sudut yang membuat jenis encoder *incremental* tidak mendeteksi posisi *absolute*/awal dan hanya mendeteksi pulsa sehingga harus dibuat *zero return*, sedangkan encoder *absolute* dapat mendeteksi posisi *absolute*. Jadi encoder *absolute* dapat menjaga jalur dari posisi shaft motor jika sistem power mati sedangkan encoder *incremental* tidak bisa.



Gambar 2.7 Bentuk sinyal encoder dalam 1 putaran[4]

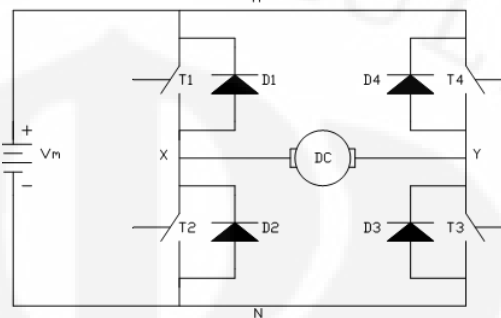
2.3 Driver Motor

Driver motor adalah suatu device yang digunakan untuk menggerakkan motor maju dan mundur baik untuk motor AC maupun motor DC. Pada driver motor terdapat transistor yang berfungsi sebagai switching yang mengatur pergerakan dari jenis motor yang dikendalikan.

2.3.1 Motor DC

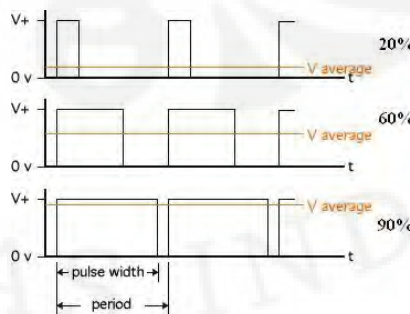
Untuk menggerakkan motor DC dibutuhkan konverter untuk mengubah sumber AC menjadi DC. Setelah itu untuk dapat

menjalankan motor maju dan mundur dibutuhkan rangkaian H-bridge. Rangkaian ini berfungsi sebagai switching tegangan yang dapat mengubah polaritas tegangan yang masuk ke motor DC.



Gambar 2.8 H-Bridge motor DC[6]

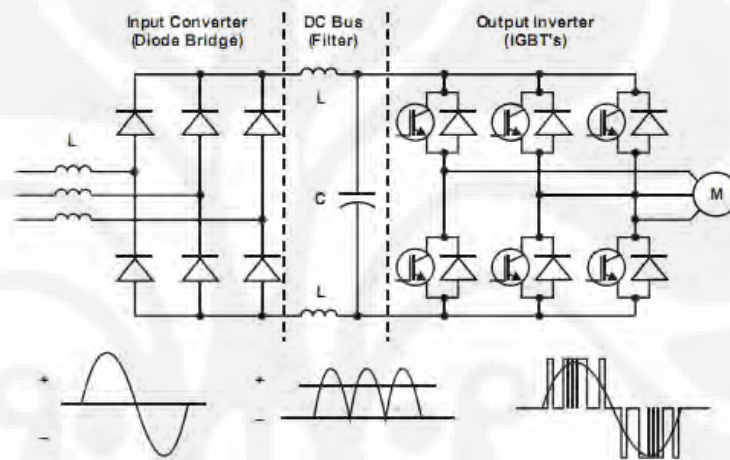
Pada Gambar 2.8 merupakan ilustrasi rangkaian H-bridge dengan menggunakan switch T1-T4. Umumnya switch pada rangkaian di atas akan diganti dengan komponen transistor sebagai switching elektrik. Seperti yang dijelaskan bahwa kecepatan dari motor DC bergantung pada tegangan yang masuk ke kumparan armature. Salah satu teknik yang dapat digunakan untuk mengubah-ubah tegangan adalah dengan menggunakan PWM (Pulse Width Modulation). Teknik ini memanfaatkan lama waktu (lebar pulsa) high (On) dan low (Off). Dengan mengatur perbandingan dari lebar pulsa tersebut (duty cycle), akan didapatkan perbedaan nilai tegangan rata-rata yang dihasilkan. Semakin lebar pulsa high maka akan semakin tinggi tegangan rata-rata yang didapatkan. Ilustrasi bentuk pulsa PWM dan besarnya tegangan rata-rata yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Variasi duty cycle PWM

2.3.2 Motor AC

Motor AC yang dikendalikan dengan menggunakan 3 pasang inverter dengan menggunakan IGBT's. IGBT merupakan jenis transistor insulated gate bipolar yang mengkombinasikan antara kelebihan yang dimiliki MOSFET dengan BJT. Dengan menggunakan IGBT, switching dapat dilakukan dengan sinyal yang memiliki arus kecil miliampere. Bentuk skema rangkaian driver motor AC dapat dilihat pada Gambar 2.10.

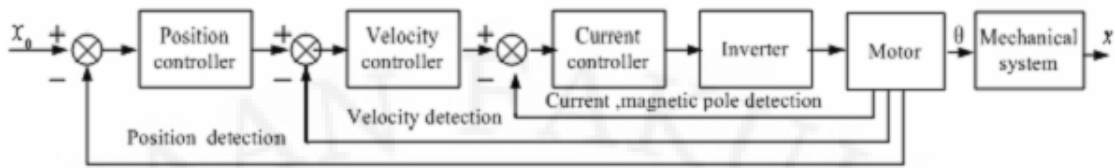


Gambar 2.10 Drive AC motor[2]

Bagian konverter mengubah tegangan AC menjadi DC lalu tegangan DC yang distabilkan dengan menggunakan filter. Inverter akan mengatur gerakan dan kecepatan dari AC motor. Prinsip kerja inverter sama dengan H-bridge pada motor DC. Pada motor AC, frekuensi switching dan letak switching diatur dengan menggunakan algoritma tertentu.

2.4 Sistem Kendali pada CNC

Secara umum CNC dikendalikan secara closed-loop untuk meningkatkan tingkat ketelitian dari mesin tersebut. Closed-loop yang digunakan umumnya berupa multiple loop dengan cascade control yang terlihat pada Gambar 2.11.



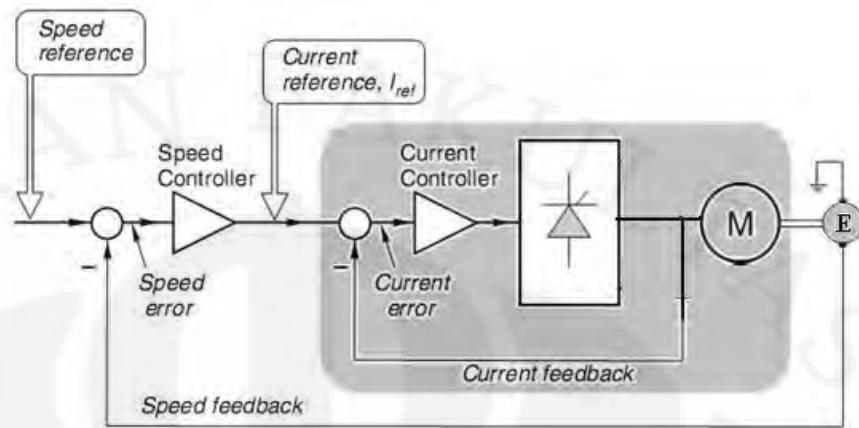
Gambar 2.11 Struktur sistem servo pada mesin CNC [7]

Dari Gambar 2.11, terdapat tiga kendali loop yang membantu memperbaiki error yang terjadi pada sistem. Pada loop terdalam terdapat feedback arus untuk memperbaiki kinerja motor dan beban inersia. Pada loop selanjutnya terdapat feedback kecepatan untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam menghilangkan gangguan akibat pengaruh beban dan mengecilkan variasi dari kecepatan. Pada loop terluar terdapat feedback posisi untuk memastikan ketelitian dalam bekerja dengan performa yang baik dan membuat sistem berjalan steady dan efektif.

Dengan adanya multiple loop, gangguan yang terjadi pada loop dalam akan segera diperbaiki oleh pengendali pada loop tersebut sebelum mempengaruhi nilai output pada loop terluarnya dengan kata lain loop dalam harus lebih cepat dari loop terluarnya. Pada loop dalam (loop arus dan kecepatan), digunakan pengendali proporsional, tapi dapat juga digunakan pengendali PI dengan nilai integral yang kecil. Offset yang ditimbulkan pada loop dalam tidak penting karena yang dikendalikan bukan output dari loop tersebut, melainkan output dari loop terluar. Ada 2 tipe pengendali yang akan dibahas yaitu kendali kecepatan dan torsi.

2.4.1 Kendali kecepatan

Kendali kecepatan merupakan metode pengendalian yang dilakukan untuk mengendalikan kecepatan putar dari motor. Blok diagram kendali kecepatan dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Blok diagram kendali kecepatan[8]

Pada kendali kecepatan, kecepatan referensi akan dibandingkan dengan kecepatan feedback yang didapat dari kalkulasi perubahan encoder terhadap waktu. Outputnya akan berupa referensi arus untuk dibandingkan dengan feedback arus yang kemudian mengendalikan inverter untuk menggerakkan motor. Adanya feedback arus akan mengantisipasi jika beban pada motor bertambah sehingga motor melakukan percepatan. Persamaan tegangan pada axis-q dengan arus axis-d nol, menjadi[9]

$$v_{qs}^r = (R_q + L_q p) i_{qs}^r + \omega_r \lambda_{af} \quad (2.18)$$

Dan persamaan elektromekanikal

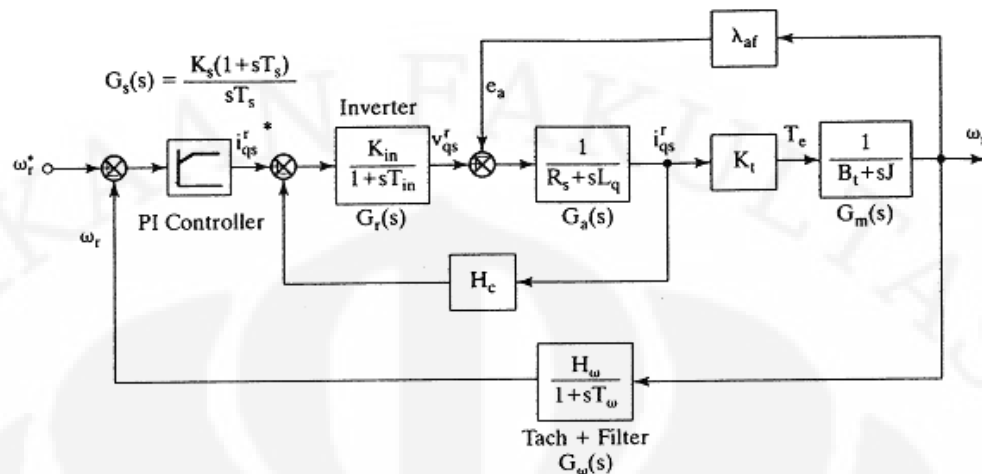
$$\frac{P}{2} (T_e - T_l) = J p \omega_r + B_l \omega_r \quad (2.19)$$

Dimana torsi elektromekanik

$$T_e = \frac{3P}{2} \lambda_{af} i_{qs}^r \quad (2.20)$$

Dan bila beban diasumsikan gesekan maka $T_l = B_l \omega_m$

Maka $(Jp + B_t) \omega_r = \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \lambda_{af} \right\} i_{qs}^r = K_t \cdot i_{qs}^r$ dimana $B_t = \frac{P}{2} B_l + B_l$



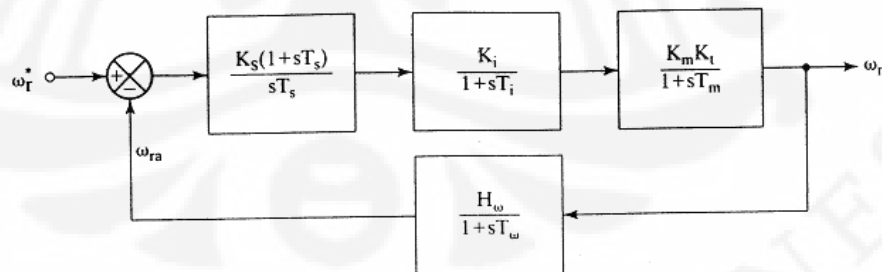
Gambar 2.13 Blok diagram pengendali kecepatan PMSM[9]

Gambar 2.13 merupakan blok diagram pengendali beserta persamaan model dari masing-masing komponen. Inverter dimodelkan dengan gain dengan waktu lag

$$G_r(s) = \frac{K_{in}}{1 + sT_{in}} \quad (2.21)$$

Dimana : $K_{in} = 0.65 \frac{V_{DC}}{V_{cm}}$ dan $T_{in} = 1/2f_c$

Dengan V_{DC} adalah tegangan input DC ke inverter, V_{cm} adalah tegangan maksimum pengendali, dan f_c adalah frekuensi switching (carier). Tegangan induksi untuk fluks motor linkage adalah $e_a = \lambda_{af}\omega_r$



Gambar 2.14 Loop sederhana pada kendali kecepatan[9]

Pada Gambar 2.14, menggunakan feedback arus sebagai feedback kecepatan. Didekat frekuensi crossover perkiraan di bawah ini valid:

$$(1 + sT_m) \cong sT_m \quad (2.22)$$

$$(1 + sT_i)(1 + sT_\omega) \cong 1 + sT_{\omega i} \quad (2.23)$$

$$1 + sT_\omega \cong 1 \quad (2.24)$$

Dimana : $T_{\omega i} = T_\omega + T_i$

Sehingga perkiraan transfer fungsi kendali kecepatan adalah

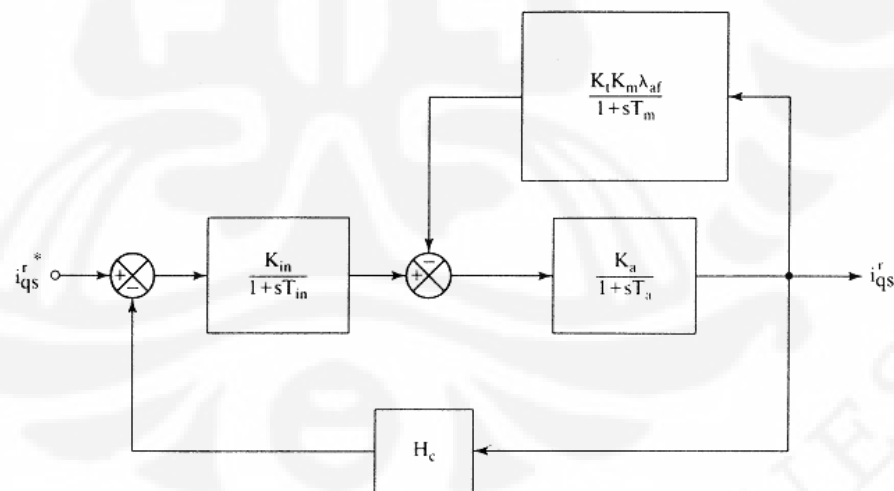
$$GH(s) \cong \frac{K_i K_m K_t H_\omega}{T_m} \cdot \frac{K_s}{T_s} \cdot \frac{(1 + sT_s)}{S^2(1 + sT_{\omega i})} \quad (2.25)$$

Closed loop transfer fungsi dengan $K_g = \frac{K_i K_m K_t H_\omega}{T_m}$ maka

$$\frac{\omega_r(s)}{\omega_r^*(s)} \cong \frac{1}{H_\omega} \left\{ \frac{K_g \frac{K_s}{T_s} (1 + sT_s)}{S^3 T_{\omega i} + S^2 + K_g \frac{K_s}{T_s} (1 + sT_s)} \right\} \quad (2.26)$$

2.4.2 Kendali torsi

Kendali torsi dapat menggunakan kendali arus sesuai dengan persamaan 2.16 sehingga referensi torsi proportional dengan referensi arus. Hal ini dikarenakan nilai torsi berbanding lurus dengan arus, jadi kendali arus merupakan efek dari kendali torsi. Berikut merupakan blok diagram pengendali arus.



Gambar 2.15 Pengendali arus[9]

$$\frac{i_{qs}^r(s)}{i_{qs}^{*r}(s)} = \frac{K_{in} K_a (1 + sT_m)}{H_c K_a K_{in} (1 + sT_m) + (1 + sT_{in}) \{K_a K_b + (1 + sT_a)(1 + sT_m)\}} \quad (2.27)$$

$$\text{Dengan } K_a = \frac{1}{R_s}; T_a = \frac{L_q}{R_s}; K_m = \frac{1}{B_t}; T_m = \frac{J}{B_t}; K_b = K_t K_m \lambda_{af}$$

Menggunakan perkiraan yang valid mendekati frekuensi crossover

$$(1 + sT_r) \cong 1 \quad (2.28)$$

$$(1 + sT_m) \cong sT_m \quad (2.29)$$

$$(1 + sT_a)(1 + sT_{in}) \cong 1 + s(T_a + T_{in}) \cong 1 + sT_{ar} \quad (2.30)$$

Dimana : $T_{ar} = T_a + T_{in}$

Maka transfer fungsi dari loop arus adalah

$$\begin{aligned} \frac{i_{qs}^r(s)}{i_{qs}^r * (s)} &\cong \frac{s(K_{in}K_aT_m)}{K_aK_b + (T_m + K_{in}K_aT_mH_c)s + (T_mT_{ar})S^2} \\ &\cong \left(\frac{T_mK_{in}}{K_b}\right) \frac{s}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Ditemukan bahwa $T_1 < T_2 < T_m$ dan memperkirakan $(1+sT_2) \cong sT_2$

Transfer fungsi loop arus adalah

$$\frac{i_{qs}^r(s)}{i_{qs}^r * (s)} \cong \frac{K_i}{(1 + sT_i)} \quad (2.32)$$

2.5 Filter

Filter merupakan suatu rangkaian elektronik yang digunakan untuk menyaring sinyal sesuai dengan referensi yang diinginkan. Selain itu rangkaian ini dapat digunakan sebagai rangkaian diferensiator atau integrator sesuai dengan jenis rangkaian filter yang digunakan. Rangkaian filter yang umumnya digunakan adalah *Low Pass Filter* (LPF) sebagai penyaring frekuensi tinggi dan juga sebagai integrator, rangkaian LPF dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Rangkaian Low Pass Filter[11]

Rangkaian filter first order di atas terdiri dari komponen resistor dan kapasitor yang menentukan frekuensi cut off seperti persamaan di bawah ini[12]

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \text{ dengan } \tau = RC \quad 2.33$$

Sedangkan untuk transient respon yang dihasilkan dari rangkaian ini sesuai dengan persamaan[13]

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad 2.34$$

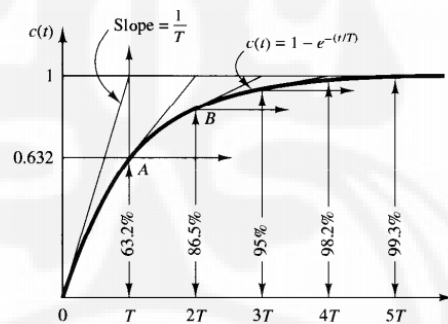
Dengan menggunakan input berupa fungsi step

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + (1/T)} \quad 2.35$$

Inverse laplace dari persamaan 2.35 menjadi

$$C(t) = 1 - e^{-t/\tau} \text{ untuk } t \geq 0 \quad 2.36$$

Pada kurva fungsi eksponensial saat $t = T$ maka $C(t)$ bernilai 0.632 dengan grafik transient respon seperti Gambar 2.17



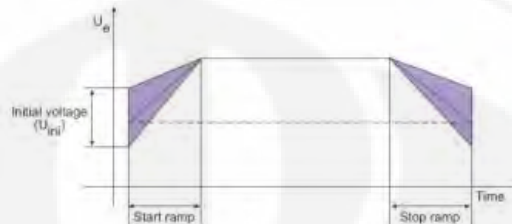
Gambar 2.17 Grafik transient respon first order[13]

Dari Gambar 2.17 terlihat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai $t = T$ akan setara dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 63.2% dari nilai *steady state* yang diberikan.

2.6 Soft starter

Soft starter adalah suatu device yang menggunakan thyristor sebagai komponen untuk mengatur tegangan yang masuk ke motor sehingga akan

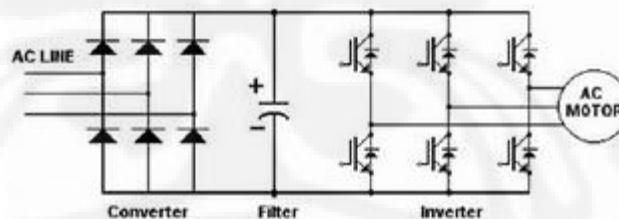
mempengaruhi arus serta torsi yang masuk ke dalam motor. Tegangan yang diberikan pada start, rendah yang hanya cukup untuk menggerakkan beban yang kemudian akan ditingkatkan secara perlahan sehingga motor akan mengalami percepatan yang tetap.



Gambar 2.18 Soft starting respon[14]

Gambar 2.18 merupakan respon dari soft starter sehingga motor tidak mengalami hentakan saat start akibat torsi yang besar. Dengan menggunakan soft starter ini, starting motor dalam bentuk fungsi step akan diubah menjadi fungsi step bertingkat dengan percepatan/perlambatan yang konstan.

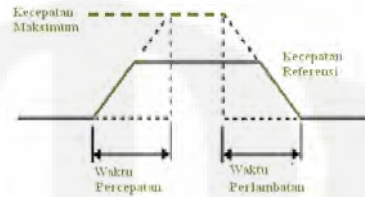
Selain menggunakan thyristor, dengan menggunakan IGBT juga dapat dilakukan hal serupa dengan menggunakan teknik VFD (*Variable frequency drives*). VFD menggunakan PWM untuk menciptakan output gelombang sinusoidal.



Gambar 2.19 Blok diagram inverter[15]

Pada Gambar 2.19 tegangan AC akan diubah menjadi tegangan DC dengan menggunakan konverter yang merupakan SCR full-wave bridge lalu tegangan DC yang dihasilkan di filter dengan menggunakan kapasitor untuk suplai *inverter bridge* dengan sumber DC yang stabil. Bagian terakhir IGBT bridge, menghasilkan PWM tegangan DC yang nantinya akan berupa tegangan efektif rms yang bergantung pada frekuensi keluaran yang diberikan pada *inverter*

bridge. Inverter akan dikendalikan dengan menggunakan logic yang diberikan oleh program sehingga dapat mengatur frekuensi keluaran inverter. Dengan bervariasikan frekuensi saat start, dapat menghasilkan percepatan dengan menggunakan algoritma seperti *linier ramp* atau *s-curve*.

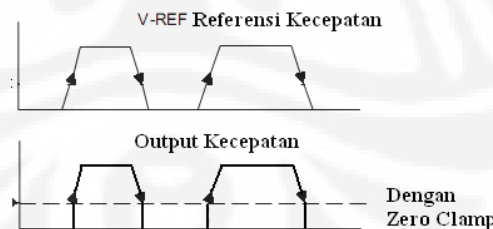


Gambar 2.20 Grafik soft starting

Dari Gambar 2.20 didapatkan waktu percepatan dan perlambatan adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk menaikkan kecepatan dari kecepatan nol sampai kecepatan maksimum dan sebaliknya.

2.7 Zero clamping

Zero clamp merupakan fungsi yang digunakan untuk menggeser nilai referensi menjadi nol. Nilai zero clamp digunakan sebagai nilai referensi maksimum pergeseran. Dengan menggunakan fungsi ini, output dari sistem akan bernilai nol jika input yang diberikan tidak lebih besar dari nilai zero clamp. Pada aplikasi motor fungsi ini dapat digunakan untuk menahan motor pada saat diam atau kecepatannya mendekati nol sehingga motor dapat berhenti dengan tepat.



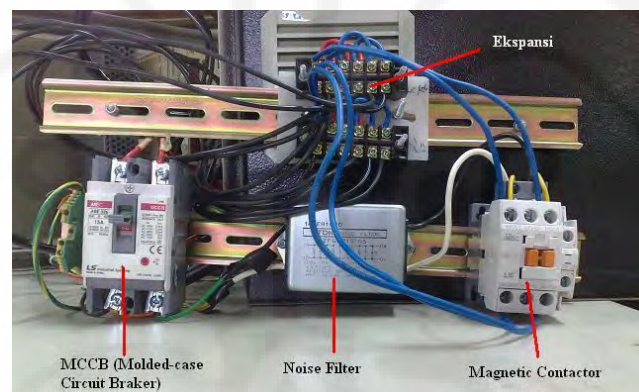
Gambar 2.21 Grafik zero clamp

Gambar 2.21 terlihat output kecepatan akan mulai bergerak ketika referensi kecepatan yang diberikan melewati nilai zero clamp.

BAB 3

KONFIGURASI DAN SISTEM KENDALI PADA TRADEMARK YASKAWA

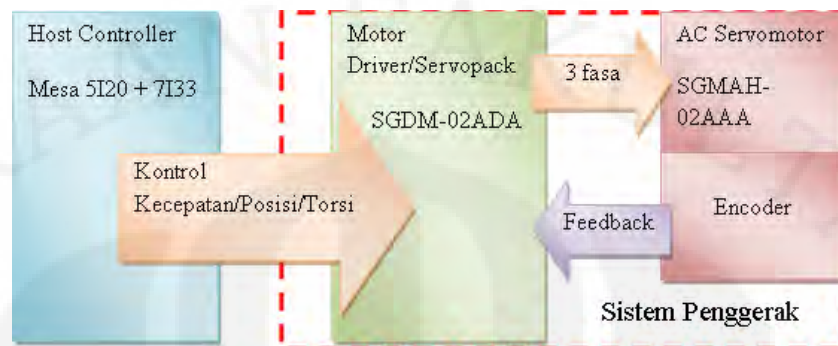
Mesin CNC pada konfigurasi ini digerakkan dengan motor AC yang terkendali (AC servomotor). Mesin CNC ini menggunakan Motor AC servomotor dan servopack yang merupakan motor driver yang prinsip kerjanya telah dijelaskan pada 2.32. Untuk dapat menggerakkan motor dibutuhkan sistem power yang aman. Oleh sebab itu digunakan berbagai komponen sebagai proteksi sehingga power suplai yang digunakan oleh sistem lebih stabil dan dapat mencegah gangguan akibat arus berlebih.



Gambar 3.1 Sistem Power minimum

Gambar 3.1 merupakan sistem power minimum yang dapat digunakan sebagai sumber power untuk menjalankan AC servomotor dan servopack. Berbagai komponen yang digunakan adalah MCCB sebagai circuit breaker jika arus berlebih mengalir ke dalam rangkaian yang dapat membuat sistem trip, noise filter digunakan untuk filtering terhadap noise pada sumber listrik AC, dan *magnetic contactor* berupa relay untuk menghomogenkan frekuensi listrik yang berasal dari power suplai dan memisahkan motor dengan power suplai sehingga motor aman.

Blok diagram interface yang menghubungkan servopack dengan rangkaian luar dapat dilihat pada Gambar 3.2.



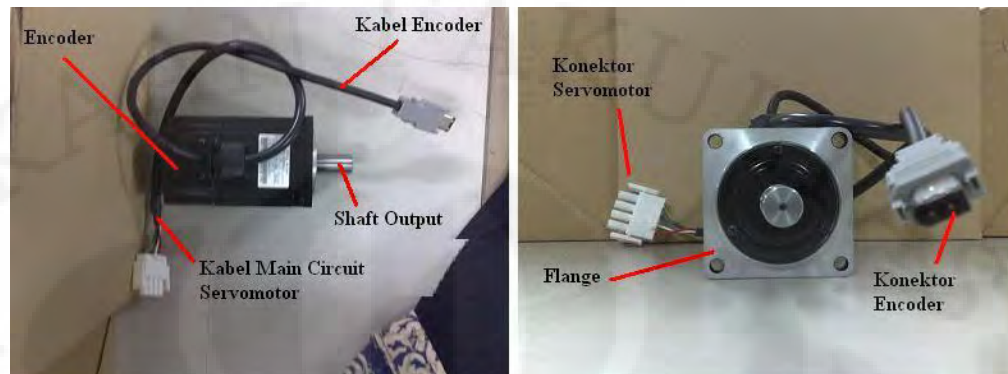
Gambar 3.2 Blok diagram I/O servopack

Pada Gambar 3.2 terlihat servopack secara umum dapat mengendalikan kecepatan, posisi, atau torsi. Servopack membutuhkan pin I/O untuk berhubungan dengan host controller, baik itu untuk menerima sinyal input dari *host controller* maupun mengirimkan output ke *host controller*. Pada servopack terdapat 50 pin I/O (CN1) yang memiliki fungsi masing-masing yang berbeda sesuai dengan metode pengendalian yang digunakan.

Untuk melakukan pengaturan parameter dan monitoring pada servopack digunakan software sigmawin. Dengan menggunakan software ini dapat dilihat hasil grafik respon dari servopack dan juga melakukan berbagai konfigurasi. Untuk menghubungkan software pada PC dengan servopack dibutuhkan konektor khusus yaitu D-sub, 9-pin berupa kabel dengan konektor 14 pin pada servopack dan 9 pin pada PC. Jika ingin menghubungkannya dengan laptop dapat menggunakan konverter *USB to Serial*.

3.1 Motor AC servomotor SGMAH-02AAA21

Pada pembuatan cnc ini, menggunakan AC servomotor dengan tipe SGMAH-02AAA21 buatan yaskawa. Tipe ini memiliki putaran hingga 3000 RPM dengan daya sebesar 200 watt dan tegangan 200 V. Motor ini dilengkapi dengan encoder yang merupakan incremental serial encoder 13 bit dengan resolusi sebesar 2048 P/rev. Bentuk dari luar dari AC servomotor dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Servomotor tanpa brake

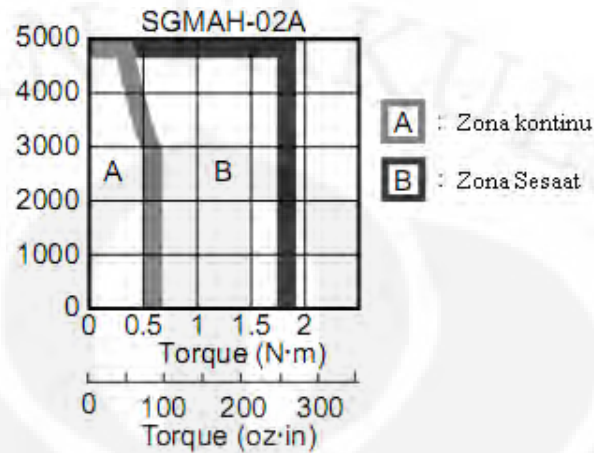
Hal yang perlu diperhatikan saat pemasangan dan penggunaan servomotor ini :

1. Suhu ruangan antara -20° sampai 60°
2. Berada di dalam ruangan dengan kelembapan 20-80%
3. Pemasangan shaft dan peletakan servomotor
4. Beban pada shaft
5. Getaran yang dihasilkan
6. Ketegangan kabel

Jenis motor ini memiliki time rating continous, *insulation resistance* sebesar $10\text{M}\Omega(500\text{VDC})$ getaran kurang dari $15\mu\text{m}$, eksitasi stator dengan menggunakan magnet permanen dan merupakan motor sinkron. Untuk spesifikasi motor ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi AC Servomotor SGMAH-02AAA21[10]

Output Rated (kW)	0.2	Speed Maks (min^{-1})	5000
Torsi Rated (N.m)	0.637	Torsi Konstan ($\text{N.m}/A_{\text{rms}}$)	0.327
Torsi peak instantaneous (N.m)	1.91	Momen Inersia Rotor $J(\times 10^{-4} \text{kgm}^2)$	0.106
Arus Rated (A_{rms})	2.1	Daya Rated (kW/s)	38.2
Arus Instantaneous Maks (A_{rms})	6.5	Percepatan Sudut Rated (rad/s^2)	60100
Speed Rated (min^{-1})	3000		

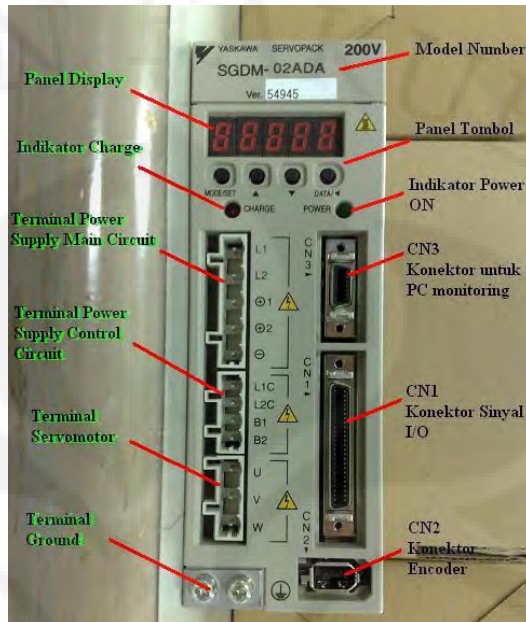


Gambar 3.4 Karakteristik Torsi-Kecepatan motor[10]

Pada Gambar 3.4, karakteristik motor dibagi menjadi dua yaitu zona kontinu merupakan zona karakteristik kerja motor saat berjalan dalam waktu yang cukup lama dan zona sesaat merupakan zona karakteristik kerja motor pada waktu berjalan sesaat. Pada zona kontinu saat kecepatan lebih besar dari 3000 rpm maka torsi akan berkurang sedangkan pada zona sesaat torsi tetap walaupun kecepatan yang digunakan lebih dari 3000 rpm.

3.2 Servopack SGDM-02ADA

Untuk mendukung performa dari AC servomotor di atas, digunakan servopack SGDM-02ADA yang juga merupakan buatan yaskawa seperti pada Gambar 3.5. Servopack ini dapat menghasilkan output sebesar 200 watt dengan supply input sebesar 200V. Jenis servopack ini dapat digunakan untuk mengendalikan posisi, kecepatan, dan torsi pada AC servomotor 3 fasa. Bentuk dari servopack dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Servopack preview

Hal yang perlu diperhatikan pada saat pemasangan servopack adalah :

1. Kondisi ruangan -20° sampai 85°
2. Pendinginan
3. Kelembapan kurang dari 90%
4. Getaran

3.2.1 Rating servopack

Servopack memiliki spesifikasi input dan output yang dapat terlihat pada Tabel 3.2. Tabel 3.2 menjelaskan mengenai input dan output dari SGDM-02ADA.

Tabel 3.2. Spesifikasi input dan output SGDM-02ADA[10]

Kapasitas Servomotor (kW)		0.2	Arus Output Kontinu (A_{rms})	2.1
Arus Output Maks (A_{rms})		6.5		
Input Suply Power	Main Circuit	Single fasa 200-230VAC +10% -15% 50/60 Hz		
	Control Circuit	Single fasa 200-230VAC +10% -15% 50/60 Hz		

Pada Tabel 3.3 menjelaskan mengenai rating kerja dari servopack beserta fitur yang tersedia pada servopack.

Tabel 3.3 Rating dan spesifikasi Servopack[10]

Basic	Metode kendali		Satu fasa penyearah penuh IGBT-PWM	
	Feedback		13-bit serial encoder incremental	
Spesifikasi	Kondisi	Suhu Ambient/storage	$0^{\circ} - +55^{\circ}\text{C} / -20^{\circ} - +85^{\circ}\text{C}$	
		Kelembapan Ambient/storage	$\leq 90 \text{ RH}$	
		Tahanan getaran/shock	$4.9 \text{ m/s}^2 / 19.6\text{m/s}^2$	
Mode kendali speed dan torsi	Performansi	Range kendali speed	1:5000	
		Regulasi speed	Regulasi beban	0 – 100% beban
			Regulasi tegangan	Tegangan rated $\pm 10\%$
			Regulasi suhu	$25 \pm 25^{\circ}\text{C}$
	Karakteristik Frekuensi		400 Hz (saat $J_L=J_M$)	
	Toleransi kendali torsi		$\pm 2\%$	
	Setting waktu starting		0 – 20s	
	Referensi speed	Referensi speed	Tegangan referensi	$\pm 6\text{VDC}$ (setting range $\pm 2\text{V} - \pm 10\text{V}$)
			Tahanan input	14 k Ω
			Konstanta waktu	47 μs
Referensi torsi		Referensi tegangan	$\pm 3\text{VDC}$ (setting range $\pm 1\text{V} - \pm 10\text{V}$)	
		Tahanan input	14 k Ω	
		Konstanta waktu	47 μs	
Referensi kontak	Seleksi arah rotasi	Seleksi arah rotasi	Dengan sinyal P-control	
		Seleksi speed	Dengan sinyal forward/reverse limit	
Mode kendali posisi	Performansi	Setting bias	0 – 450 min^{-1}	
		Kompensasi feed forward	0 – 100%	
		Setting lebar posisi complete	0 – 250 referensi unit	
	Si-Puls	Tipe	Tanda + pulsa train, perbedaan fasa 90°	

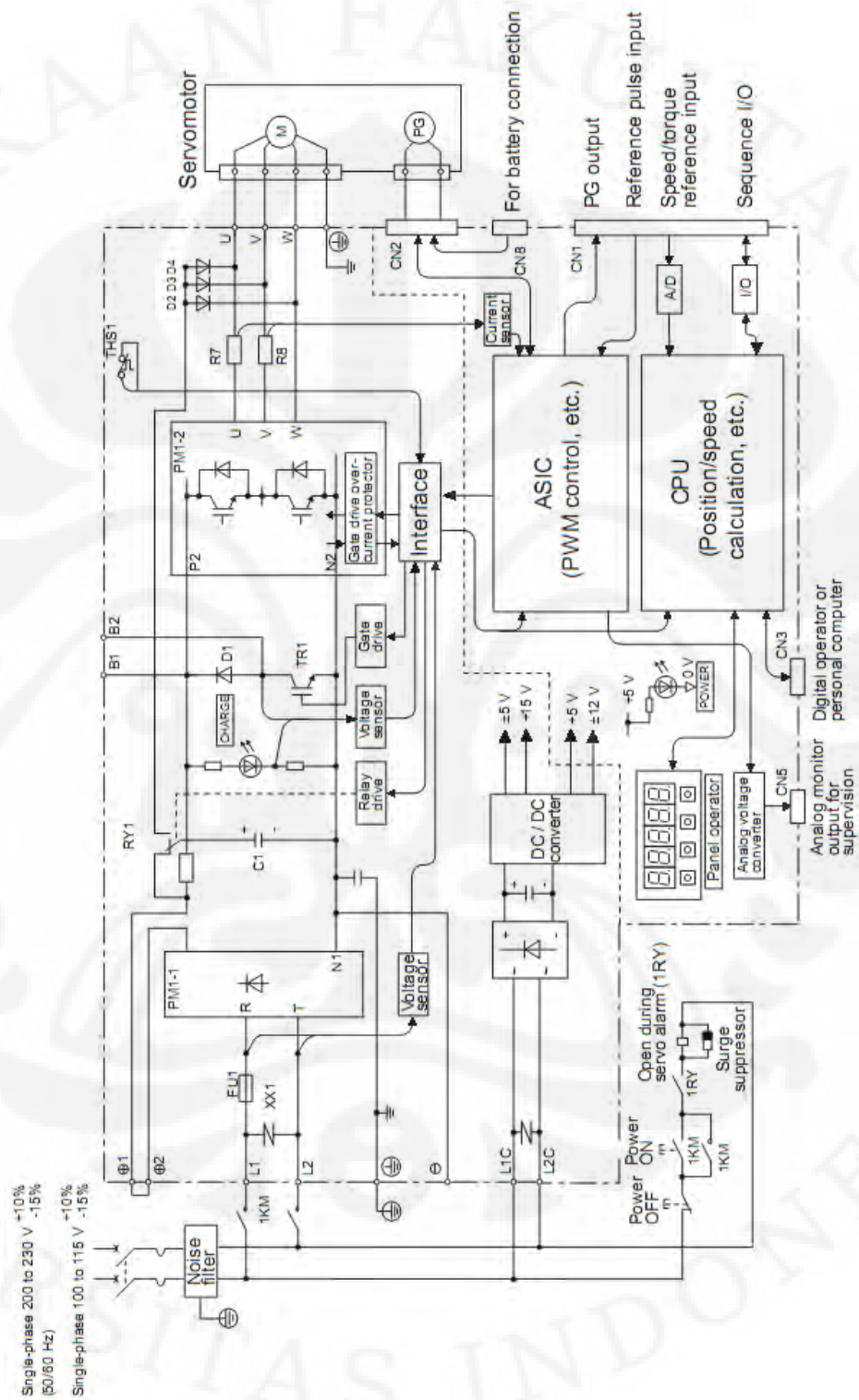
	nyala input referensi		dua fasa pulsa atau pulsa CW + CCW	
		Bentuk	Line driver (+5V), open collector (+5V atau +12V)	
		Frekuensi	Maksimum 500/200 kpps (line/kolektor)	
	Sinyal kendali		Sinyal bersih	
	Open kolektor power supply		+12V	
Sinyal I/O	Output posisi	Bentuk	Fasa A, B, dan C line driver Fasa S line driver (absolute encoder)	
		Rasio pembagi frek.	Any	
	Input sequence	Alokasi sinyal	Servo-On, P control, Forward run prohibited, Reverse run prohibited, Alarm reset, forward dan reverse current limit	
	Output sequence	Output fix	Servo alarm, 3-bit kode alarm	
		Sinyal alokasi	Positioning complete, during servo rotation, servo ready, during current limit, during speed limit, brake released, warning, selecting three of Near signal	
Fungsi internal	Dynamic brake		Beroperasi saat main power off, servo alarm, servo off atau overtravel	
	Overtravel stop		Dynamic brake stop saat P-OT/ N-OT	
	Electronic gear		$0.01 \leq B/A \leq 100$	
	Proteksi		Arus berlebih, tegangan berlebih, tegangan rendah, beban berlebih, error regenerasi, main circuit error, terlalu panas, tidak ada power supply, overflow, terlalu cepat, error encoder, overrun, error CPU, error parameter	
	LED display		Charge, Power, lima 7-segment	
	CN5 analog monitoring		Monitor speed, torsi, dan referensi sinyal	
	Komunikasi	Divais yang terhubung		Digital operator, RS-422A untuk PC
		1:N komunikasi		N=14 untuk RS-422A
Setting alamat axis		Set dengan parameter		

	Fungsi	Display status, setting parameter, monitor display, display alarm trace-back, JOG and autotuning display, speed, torsi sinyal referensi, fungsi yang lainnya
	Yang lainnya	Koneksi reverse rotasi, mencari titik nol, otomatis servomotor ID, koneksi terminal DC reaktor

Dari beberapa mode kendali yang tersedia, mode kendali speed yang akan digunakan untuk mengendalikan AC servomotor pada mesin CNC. Hal ini dikarenakan pada software open source EMC2, terkendali secara posisi.

3.2.2 Diagram blok servopack SGDM-02ADA

Diagram blok SGDM-02ADA dapat dilihat pada Gambar 3.6. Pada Gambar 3.6 terdapat Power suplai satu fasa terhubung pada L1 dan L2 (*main circuit*) melewati *magnetic contactor* serta L1C dan L2C (*control circuit*). L1C dan L2C terhubung dengan penyearah untuk menghasilkan sumber DC yang kemudian terhubung dengan DC to DC konverter untuk menghasilkan variasi tegangan DC sebagai suplai untuk rangkaian pengendali.



Gambar 3.6 Internal blok diagram SGDM-02ADA[10]

Pada main circuit, berisi rangkaian yang digunakan untuk menggerakkan motor berupa IGBT-PWM inverter, rangkaian proteksi arus berlebih, sensor tegangan, sensor arus, dan lain lain. Sedangkan pada *control circuit* berisi CPU untuk melakukan perhitungan pada berbagai tipe kendali serta ASIC untuk mengendalikan PWM. Output dari inverter IGBT akan membentuk keluaran pada tiap fasa U, V, dan W. Untuk output encoder akan diolah pada ASIC sebagai salah satu referensi membentuk sinyal PWM. Sinyal encoder yang masuk ke ASIC berupa data serial, data ini kemudian diolah menjadi bentuk fasa A, B, dan Z yang akan dikeluarkan pada pin CN1. Pada CN1 juga terdapat referensi pulsa input yang dimasukkan ke dalam ASIC, referensi input kecepatan dan torsi akan diolah terlebih dahulu oleh A/D konverter lalu diolah pada CPU, dan sequence input juga dimasukkan dan diolah pada CPU. CPU terhubung dengan panel operator sebagai display dan CN3 sebagai konektor penghubung ke digital operator atau PC.

Waktu starting dan stopping dari respon servopack dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

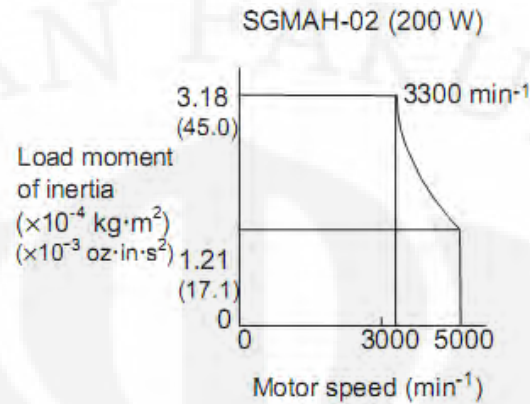
$$\text{waktu starting} : tr = \frac{2\pi \cdot N_M (J_M + J_L)}{60 \cdot (T_{PM} \cdot T_L)} \quad (3.1)$$

$$\text{waktu stopping} : tf = \frac{2\pi \cdot N_M (J_M + J_L)}{60 \cdot (T_{PM} \cdot T_L)} \quad (3.2)$$

Dengan :

- N_M = kecepatan motor (min^{-1})
- J_M = momen inersia rotor motor (kg.m^2)
- J_L = momen inersia beban pada shaft (kg.m^2)
- T_{PM} = torsi motor instantaneous peak (N.m)
- T_L = torsi beban (N.m)

Momen inersia beban yang dibolehkan pada jenis motor ini dapat dilihat pada Gambar 3.7.

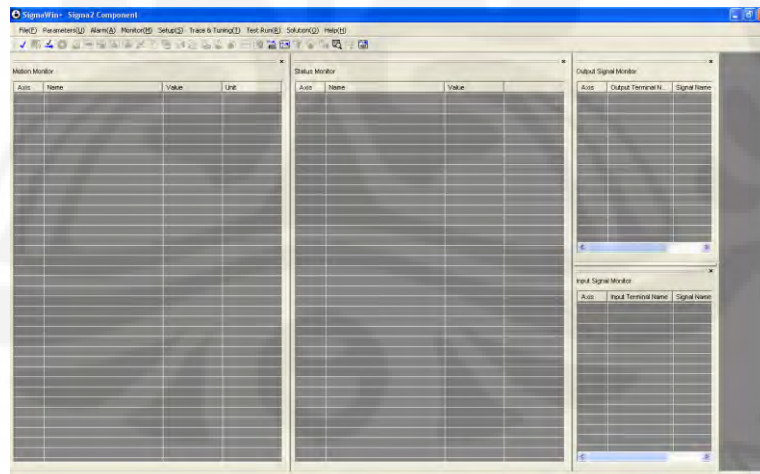


Gambar 3.7 Momen inersia beban VS Speed yang diperbolehkan[10]

Terlihat pada Gambar 3.7, momen inersia beban yang diperbolehkan maksimal sebesar 30x momen inersia rotor ($0.106 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$).

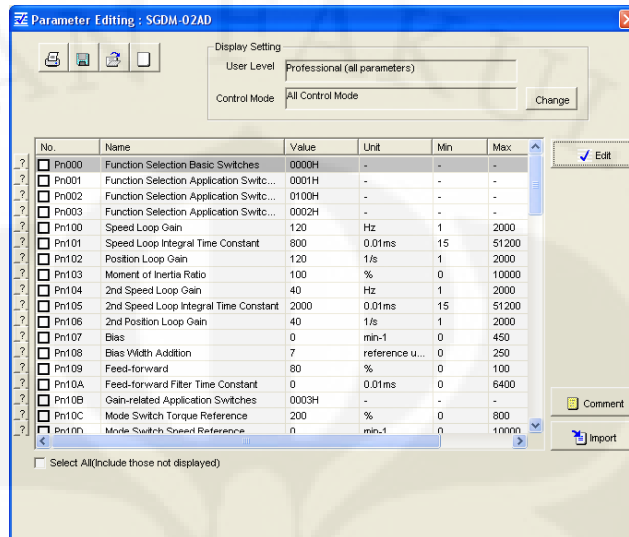
3.3 Pengaturan pada servopack

Pengaturan yang dilakukan pada servopack menggunakan software sigmawin yang merupakan software bawaan dari servopack yaskawa. Bentuk tampilan dari software sigmawin dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Tampilan SigmaWin.

Dengan menggunakan sigmawin pengaturan parameter dapat dilakukan dengan menekan tombol Parameter sehingga akan muncul tampilan seperti Gambar 3.9.



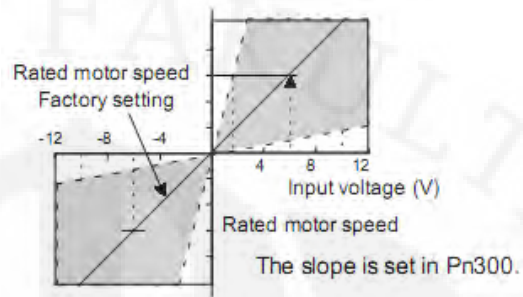
Gambar 3.9 Tampilan Parameter yang ada pada sigmawin

Parameter yang diatur pada sigmawin sesuai jenis pengendali yang akan digunakan pada servopack. Untuk dapat menggerakkan motor dengan menggunakan pengendali, dapat digunakan *host controller* dengan output yang sesuai dengan mode kendali yang akan digunakan pada servopack. Masing-masing mode kendali memiliki parameter yang berbeda untuk diatur sehingga menghasilkan performa yang maksimal. Secara umum akan dijelaskan mengenai pengaturan pada kendali kecepatan, posisi, dan torsi.

3.3.1 Kendali kecepatan

Pada kendali kecepatan ada beberapa parameter yang perlu diatur, yaitu:

1. Pengaturan parameter
 - a. Pn000 diatur menjadi 0 (untuk memilih kendali kecepatan)
 - b. Pn300 diatur menjadi 1000 (maks 10V) dengan skala 0.01mV. Pn300 dapat diatur sesuai dengan slope speed pada Gambar 3.10 dari range $\pm 2V$ sampai yang $\pm 10V$.

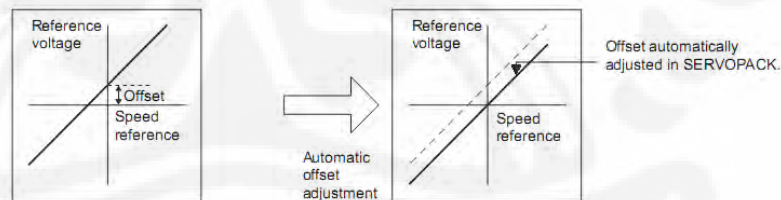


Gambar 3.10 Slope speed yang dapat digunakan[10]

c. Sinyal input V-REF (CN1-5), SG (CN1-6), dan untuk mengatur referensi kendali /P-CON (CN1-41) berupa control PI atau P.

2. Pengaturan offset

Walaupun menggunakan speed control, servomotor mungkin akan berputar secara perlahan walaupun tegangannya 0V. Hal ini terjadi jika *host controller* atau rangkaian luar memiliki offset dalam mV. Maka untuk mengatasi hal ini dilakukan adjustment secara otomatis pada offset referensi analog (Fn009) atau dapat pula menggunakan sigma win pada *tuning section*. Pada Gambar 3.11 terlihat pergeseran ofset secara otomatis pada servopack.



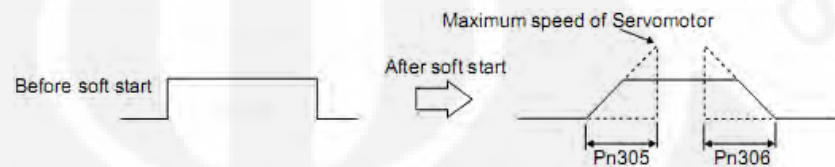
Gambar 3.11 Grafik sebelum dan sesudah adjusting offset[10]

Jika motor masih berputar, maka dapat dilakukan adjusting offset secara manual dengan menggunakan Fn00A. Fn009 dan Fn00A dapat pula diakses dengan panel tombol pada servopack.

3. Soft start

Pada fungsi ini akan mengatur waktu percepatan dan perlambatan dari suatu input. Parameter yang digunakan untuk mengatur

percepatan dan perlambatan adalah Pn305 dan Pn306. fungsi ini akan mengatur waktu interval saat motor akan mulai dan berhenti. Pn305 dan Pn306 memiliki nilai range pengaturan dari 0 - 10000 dengan satuan unit 1ms. Bentuk soft start dapat dilihat pada Gambar 3.12.



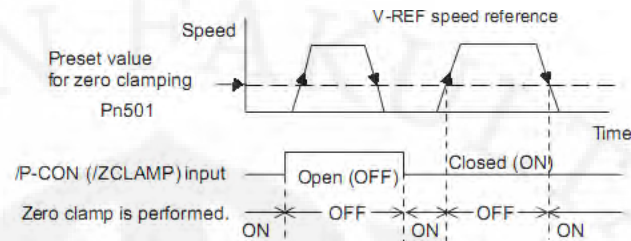
Gambar 3.12 Proses sebelum dan sesudah soft start[10]

4. Filter referensi kecepatan

Fungsi ini mengatur time konstan untuk memperhalus referensi kecepatan dengan menggunakan filter delay orde-1 pada parameter Pn307. Pn307 memiliki nilai range pengaturan dari 0 - 65535 dengan satuan unit 0.01ms dan nilai default 40. Semakin besar time konstan yang diberikan maka respon dari sistem akan semakin lambat.

5. Menggunakan fungsi zero clamp

Fungsi ini digunakan pada sistem yang tidak terdapat loop posisi untuk input referensi kecepatan. Umumnya fungsi zero clamp ini akan mengabaikan kecepatan rendah di bawah nilai yang telah diatur sehingga akan menahan putaran motor. Fungsi ini dipilih modusnya pada Pn000.1 = A dan diatur nilainya pada parameter Pn501 yang memiliki nilai range pengaturan dari 0-10000 dengan satuan unit 1 min^{-1} . Selain mengatur parameter Pn501, perlu ada input eksternal yaitu /P-CON (CN1-41) atau /ZCLAMP yang pinnya harus dialokasikan terlebih dahulu pada Pn50A dan Pn50D.

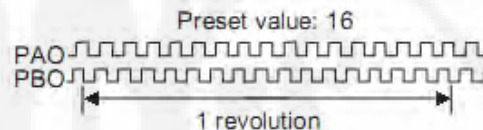


Gambar 3.13 Sistem zero clamp[10]

Pada Gambar 3.13, ketika fungsi ON maka nilai kecepatan yang di bawah nilai clamping akan ditahan/berhenti.

6. Output sinyal encoder

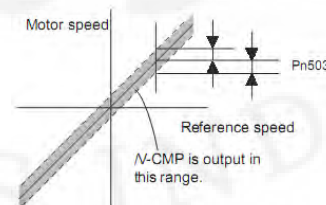
Output sinyal encoder diatur pada rasio pembagi pulsa pada encoder. Pada parameter Pn201, pulsa sinyal dari encoder dapat dirasionalkan dalam range 16-2048 P/R dengan setting unit 1 P/R. Gambar 3.14 merupakan bentuk dan jumlah pulsa dalam satu putaran.



Gambar 3.14 Contoh Pn201 = 16[10]

7. Output speed coincidence

Fungsi ini akan menghasilkan output jika kecepatan actual sama dengan kecepatan referensi. Pengendali akan menggunakan sinyal ini sebagai interlock. *Output speed coincidence* diatur pada Pn503 dengan setting nilai range pengaturan 0 - 100 dalam satuan unit min^{-1} . Pengaturan Pn503 akan membuat output akan berputar antara range yang diatur sesuai dengan referensi kecepatan yang diberikan.



Gambar 3.15 Grafik output speed coincidence[10]

3.3.2 Kendali posisi

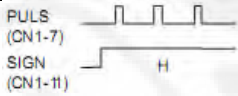
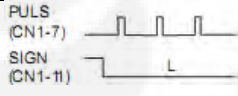
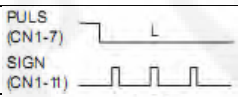
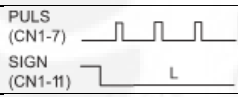
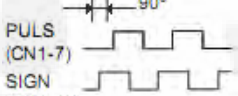
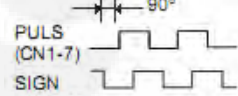
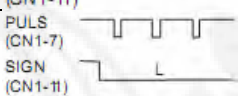
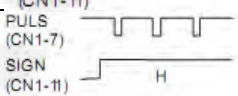
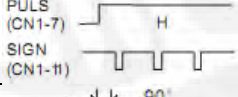
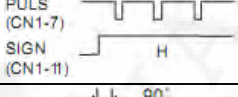

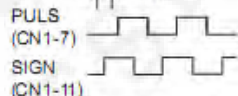
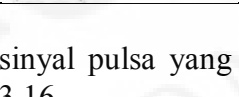
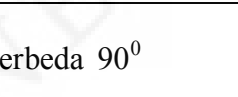






Pada kendali posisi beberapa pengaturan perlu dilakukan, yaitu :

1. Setting parameter

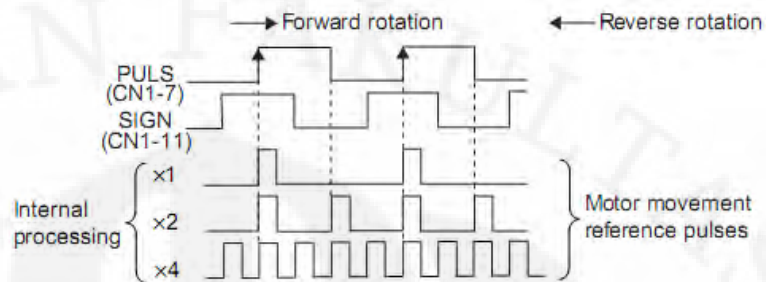
- a. Pn000 di-set menjadi 1 (untuk memilih kendali posisi).
- b. Setting pulsa referensi Pn200.0 dan sinyal input PULS,/PULS(CN1-7,CN1-8) SIGN,/SIGN (CN1-11,CN1-12).

Tabel 3.4 menunjukkan berbagai variasi inputan yang dapat diberikan pada PULS dan SIGN untuk membuat motor dapat berjalan maju dan mundur.

Tabel 3.4. Variasi Parameter terhadap referensi pulsa dari Pn200.0[10]

Parameter		Referensi Pulsa	Pengali input	Referensi Maju	Referensi Mundur	
Pn200.0	n.□ □□0	Sign+Pulsa train (logika positif) (default)	-			
	n.□ □□1	Pulsa CW + CCW (logika positif)	-			
	n.□ □□2	2 fasa pulsa dengan beda fasa 90° (logika positif)	X1			
	n.□ □□3			X2		
	n.□ □□4			X4		
	n.□ □□5	Sign+Pulsa train (logika negatif)	-			
	n.□ □□6	Pulsa CW + CCW	-			
	n.□ □□7	2 fasa pulsa dengan beda fasa 90° (logika positif)	X1			
	n.□ □□8			X2		
n.□ □□9	X4					

Pengali input diatur dari 2 fasa sinyal pulsa yang berbeda 90° seperti ditunjukkan pada Gambar 3.16.



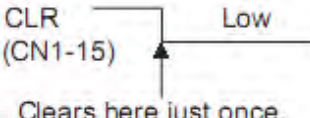
Gambar 3.16 Deskripsi proses pengalihan input[10]

Dari Gambar 3.16 merupakan bentuk sinyal dari masing-masing pengali. Pada pengali 2, pulsa akan dibentuk saat PULS rising dan falling, sedangkan untuk pengali 4, pulsa akan dibentuk saat SIGN rising dan falling serta saat PULS rising dan falling.

- c. Setting sinyal *clear* Pn200.1 dan sinyal input CLR,/CLR (CN1-15,CN1-14) untuk menghilangkan pulsa error posisi. Jika operasi clear diaktifkan maka counter error diatur menjadi 0 dan loop posisi dinon-aktifkan. Dengan menahan status clear(kondisi 1 dan 3), clamp servo berhenti berfungsi dan motor berputar pelan akibat drift dari loop kecepatan. Pada kondisi 3, jika sinyal CLR tidak dihubungkan maka pulsa error posisi selalu dihilangkan. Jadi jika menggunakan pulsa train sebagai referensi input, motor tidak akan beroperasi. Variasi parameter dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Variasi parameter dan deskripsinya dari Pn200.1[10]

Parameter	Deskripsi	Waktu
Pn200.1 n. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/>	Clear saat level tinggi. Pulsa error posisi tidak diakumulasi ketika sinyal pada level tinggi (default)	CLR (CN1-15) Clears at high level
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/>	Clear saat pulsa naik	CLR (CN1-15) High Clears here just once.
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/>	Clear saat level rendah.	CLR (CN1-15) Clears at low level

	n. <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/>	Clear saat pulsa turun/jatuh	
--	--	------------------------------	---

d. Setting operasi *clear* Pn200.2 terdapat 3 kondisi. Kondisi pertama pulsa error akan dihilangkan saat sinyal CLR selama baseblock. Kondisi kedua, pulsa error jangan dihilangkan kecuali dengan sinyal CLR. Dan kondisi ketiga, pulsa error dihilangkan saat terjadi alarm atau sinyal input CLR.

2. Setting gear elektrik

Dengan menggunakan gear elektrik motor dapat digerakkan pada bidang kerja dengan pulsa referensi input dari host controller. Gear elektrik dapat diatur dengan ratio sesuai persamaan:

$$\text{rasio gear elektrik: } \frac{B}{A} = \frac{Pn202}{Pn203} = \frac{\text{pulsa encoder} \times 4}{\text{referensi unit}} \times \frac{m}{n} \quad (3.3)$$

Dimana : perlambatan = n/m

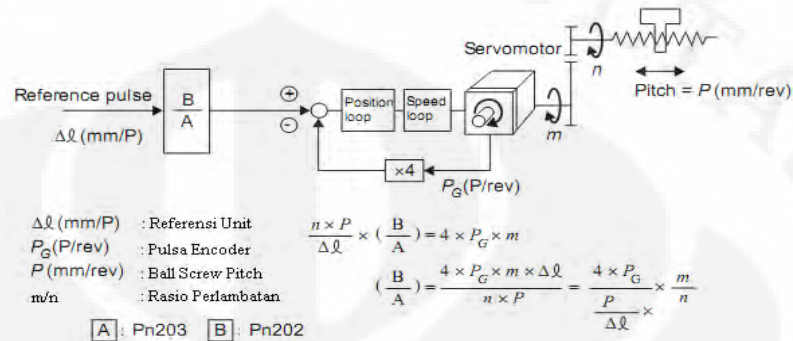
n = rotasi shaft berbeban

m = rotasi servomotor

Pn202(numerator) dan Pn203(denominator) dapat diatur dari nilai range pengaturan 1 - 65535 dengan masing-masing memiliki nilai default 4 dan 1. Setting rasio gear elektrik ada 6 prosedur yaitu:

- Cek spesifikasi mesin (rasio perlambatan, ball screw pitch, dan diameter pulley)
- Cek jumlah pulsa encoder
- Tentukan referensi unit yang ditentukan
- Hitung jarak tempuh per putaran shaft berbeban
- Hitung rasio gear elektrik
- Set parameter Pn202 dan Pn203

Persamaan rasio gear elektrik dapat dimodelkan seperti Gambar 3.17.



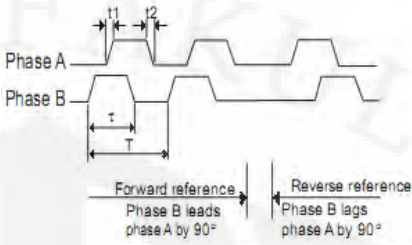
Gambar 3.17 Model dari persamaan rasio gear elektrik[10]

3. Referensi posisi

Posisi dari servomotor dikendalikan oleh pulsa input referensi pulsa train. Bentuk pulsa train output dari host controller bergantung pada line driver output, +24V Open-collector output, +12V Open-collector output, dan +5V Open-collector output. Ketika menggunakan output open-collector, sinyal input noise margin menjadi kecil maka perlu diganti parameter pada Pn200.3. Pewaktuan referensi input dapat dilihat pada Tabel 3.6.

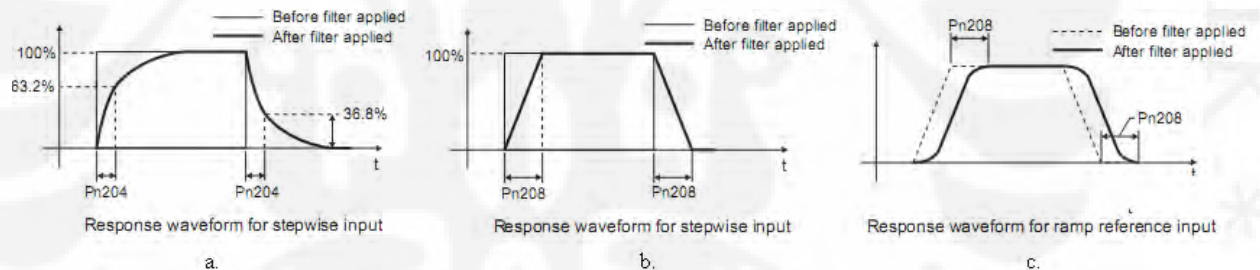
Tabel 3.6. Spesifikasi pewaktuan sinyal posisi[10]

Bentuk sinyal pulsa referensi	Spesifikasi elektrik	Keterangan	
(sinyal PULS dan SIGN) maksimum frekuensi referensi: 500kpps (untuk output open-collector: 200kpps)		$t_1, t_2 \leq 0,1 \text{ ms}$ $t_3, t_7 \leq 0,1 \text{ ms}$ $t_4, t_5, t_6 > 3 \mu\text{s}$ $\tau \geq 1,0 \mu\text{s}$ $(\tau/T) \times 100 \leq 50\%$	SIGN: H=forward L=reverse
Pulsa CW dan CCW maksimum frekuensi referensi : 500kpps (untuk output open-collector : 200kpps)		$t_1, t_2 \leq 0,1 \text{ ms}$ $t_3 > 3 \mu\text{s}$ $\tau \geq 1,0 \mu\text{s}$ $(\tau/T) \times 100 \leq 50\%$	-

<p>Dua pulsa train dengan beda fasa sebesar 90° dengan maksimum frekuensi :</p> <p>X1 = 500kpps X2 = 400kpps X3 = 200kpps</p>		<p>$t_1, t_2 \leq 0.1 \text{ ms}$ $\tau \geq 1.0 \mu\text{s}$ $(\tau/T) \times 100 = 50\%$</p>	<p>Pengali diatur pada Pn200.0</p>
---	--	---	------------------------------------

4. Smoothing

Untuk mengatur *smoothing* dari sinyal dipilih mode filter referensi posisi (Pn207) yang diganti parameternya pada Pn204 (waktu konstan percepatan dan perlambatan) atau Pn208 (waktu pergerakan rata-rata) dengan nilai range pengaturan masing-masing 0 - 6400 dan satuan unit 0.01ms. Bentuk sinyal dari masing masing parameter dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18 (a). Bentuk sinyal dari input step dan parameter Pn204. (b). Bentuk sinyal dari input step dan parameter Pn208. (c). Bentuk sinyal dari input ramp dan parameter Pn208[10]

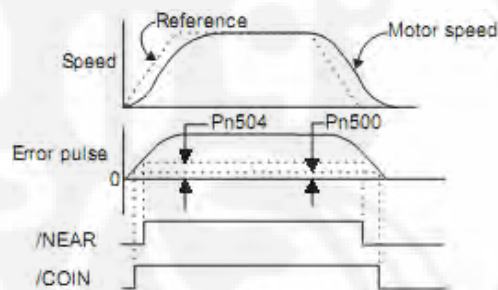
5. Sinyal output *position complete*

Sinyal output ini menandakan pergerakan servomotor telah selesai sesuai dengan kendali posisi. Sinyal ini digunakan sebagai interlock untuk memberitahu *host controller* bahwa posisi yang diinginkan telah tercapai. Sinyal output ini (/COIN) berada pada pin CN1-25,26 yang memiliki rentang yang dapat diatur pada Pn500 dengan input range antara 0-250 dengan setting unit 1 unit referensi. Sinyal ini akan bernilai ON saat pulsa error posisi antara jumlah pulsa

referensi output *host controller* dengan jarak tempuh servomotor kurang dari nilai yang diatur pada Pn500.

6. Sinyal *near positioning*

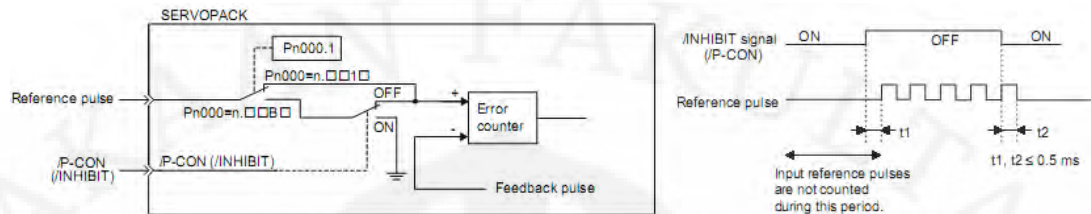
Sinyal ini menandakan posisi servomotor sudah dekat dengan posisi yang diinginkan, yang umumnya dikombinasikan dengan sinyal /COIN. Pin sinyal output ini (/NEAR) harus dialokasikan terlebih dulu pada Pn510.0 dan diatur rentang sinyal pada Pn504 dalam nilai range pengaturan input antara 1 - 250 dengan satuan unit 1 unit referensi. Gambar 3.19 mendeskripsikan respon sinyal /COIN dan /NEAR dimana /NEAR akan lebih dahulu merespon ketika pulsa error yang terjadi semakin kecil di bawah nilai parameter Pn504 lalu setelah itu baru ketika pulsa error berada di bawah nilai parameter Pn500 yang menandakan servomotor telah mencapai posisi yang diinginkan, sehingga motor berhenti.



Gambar 3.19 respon sinyal /COIN dan /NEAR[10]

7. Fungsi pulsa inhibit referensi

Fungsi ini membuat servopack tidak menghitung pulsa input selama kendali posisi. Servomotor terkunci ketika pulsa dihalangi. Untuk menggunakan pulsa inhibit, parameter yang perlu diatur pada Pn000 dengan memilih kendali posisi \leftrightarrow inhibit. Gambar 3.20 menunjukkan bentuk blok diagram inhibit beserta responnya.



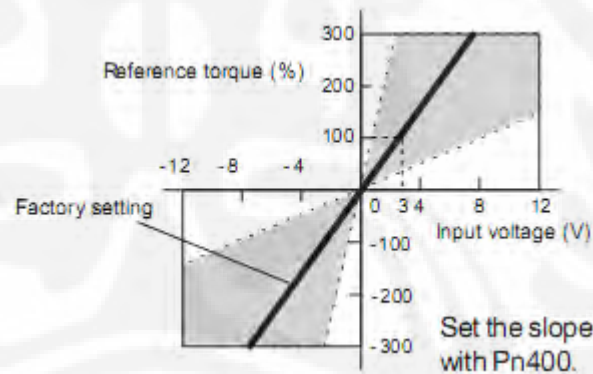
Gambar 3.20 Bentuk blok diagram fungsi inhibit dengan responnya terhadap input referensi[10]

3.3.3 Kendali torsi

Pada kendali torsi ada hal-hal yang membutuhkan pengaturan, yaitu:

1. Setting Parameter

- a. Pn000 diatur menjadi 2 (memilih mode kendali torsi)
- b. Pn400 diatur menjadi 100 (maks 10V) dengan setting unit 0.1V. Pn400 dapat diatur sesuai dengan slope torsi pada Gambar 3.21. dari range $\pm 2V$ sampai $\pm 10V$.



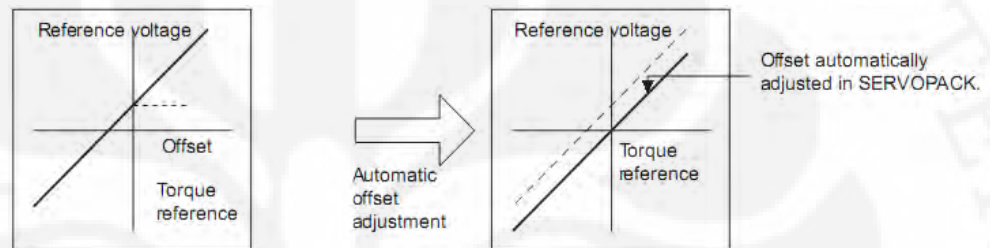
Gambar 3.21 Slope torsi yang dapat digunakan[10]

- c. Setting sinyal input T-REF (CN1-9), SG (CN1-10) untuk mengatur nilai tegangan yang akan dikonversi ke nilai torsi

2. Adjusting the reference offset

Sama seperti pada kendali kecepatan, servomotor juga dapat berputar perlahan pada kendali torsi, yang disebabkan karena rangkaian luar memiliki nilai offset tegangan. Sehingga perlu

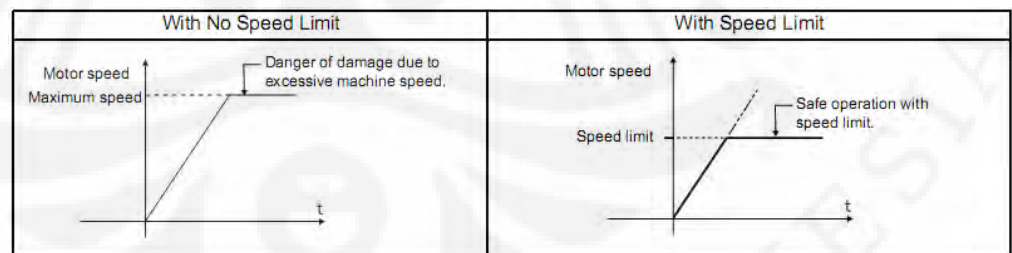
pengaturan pada referensi analog yang dapat dilakukan secara otomatis pada Fn009 dan Fn00B secara manual. Fn00B dilakukan jika menggunakan loop posisi dan menghasilkan pulsa error bernilai nol saat servomotor berhenti akibat *servolock*, serta untuk melihat hasil pengaturan. Pengaturan offset pada kendali torsi dapat dilihat pada Gambar 3.22.



Gambar 3.22 Grafik sebelum dan sesudah pengaturan offset[10]

3. Membatasi kecepatan servomotor saat kendali torsi

Saat menggunakan kendali torsi, servomotor akan dikendalikan sesuai dengan torsi yang diinginkan yang berarti kecepatan tidak dikendalikan. Ketika torsi referensi akibat beban mekanik berlebih maka akan menyebabkan kecepatan motor meningkat. Fungsi ini akan membatasi kecepatan servomotor saat kendali torsi untuk melindungi mesin seperti pada Gambar 3.23.



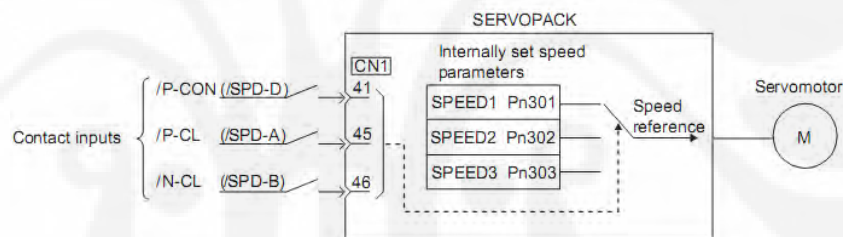
Gambar 3.23 Grafik batas kecepatan

Memilih mode batas kecepatan pada Pn002.1. Jika bernilai 0, menggunakan kecepatan internal dengan nilai yang diatur pada Pn407 pada range 0-10000 per min^{-1} . Sedangkan jika bernilai 1,

menggunakan kecepatan eksternal dengan menggunakan V-REF (CN1-5,6) dan Pn300. Sinyal output pada /VLT yang harus dialokasikan dengan menggunakan Pn50F sehingga akan memberikan tanda jika nilainya mencapai batas kecepatan.

3.3.4 Kendali kecepatan internal

Operasi menggunakan kendali kecepatan dengan kecepatan internal yang diatur seperti terlihat pada Gambar 3.24. Pada mode ini kita mengatur kecepatan dengan menggunakan 3 input dari luar untuk memilih pengaturan servomotor yang telah dibuat. Tidak dibutuhkan kecepatan dari luar atau generator pulsa.



Gambar 3.24 Blok diagram kendali kecepatan dengan kecepatan internal

Hal yang perlu diatur untuk mode ini adalah:

1. Pengaturan parameter

Parameter yang perlu diatur adalah :

- a. Pn000 diberi nilai 3 (kendali kecepatan yang diatur internal)
- b. Pn301 diberi nilai antara 0-10000 per min^{-1} (misalnya 100)
- c. Pn302 diberi nilai antara 0-10000 per min^{-1} (misalnya 200)
- d. Pn303 diberi nilai antara 0-10000 per min^{-1} (misalnya 300)

Maksimum kecepatan dari servomotor yang digunakan sesuai dengan pengaturan pada masing-masing parameter.

2. Pengaturan sinyal input

Ada dua tipe operasi yang dapat digunakan untuk mengatur kecepatan internal, yaitu:

- a. /P-CON, /P-CL, dan /N-CL sesuai default
 - b. /SPD-D, /SPD-A, dan /SPD-B yang perlu dialokasikan dengan parameter Pn50C
3. Operasi menggunakan kecepatan pengaturan internal dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7. Input output pengaturan internal

Sinyal input			Arah rotasi motor	Kecepatan
/P-CON (/SPD-D)	/P-CL (/SPD-A)	/N-CL (/SPD-B)		
OFF (high)	OFF(high)	OFF(high)	Maju	Berhenti saat 0
	OFF(high)	ON(low)		Pn301 : Kecepatan 1
	ON(low)	ON(low)		Pn302 : Kecepatan 2
	ON(low)	OFF(high)		Pn303 : Kecepatan 3
ON(high)	OFF(high)	OFF(high)	Mundur	Berhenti saat 0
	OFF(high)	ON(low)		Pn301 : Kecepatan 1
	ON(low)	ON(low)		Pn302 : Kecepatan 2
	ON(low)	OFF(high)		Pn303 : Kecepatan 3

4. Untuk mode kendali pada parameter Pn000.1=4, 5, atau 6, dan /P-CL(/SPD-A) atau /N-CL (/SPD-B) adalah OFF (high), maka mode kendali akan berubah dari mode internal speed ke mode kendali yang dipilih.

Ada 4 metode untuk membatasi torsi dari motor yaitu:

1. Pembatasan torsi internal dengan menggunakan parameter Pn402(batas torsi maju) dan Pn403 (batas torsi mundur) yang diatur dari range 0-800 dengan setting unit 1%.

2. Pembatasan torsi eksternal dengan input /P-CL (batas torsi maju) dan/N-CL (batas torsi mundur) serta parameter Pn404 (batas torsi maju) dan Pn405 (batas torsi mundur) yang umumnya nilainya lebih kecil dari Pn402 dan Pn403 serta diatur dari range 0-800 dengan setting unit 1%.
3. Pembatasan torsi dengan referensi tegangan analog
Hal ini dilakukan dengan memberikan tegangan referensi pada T-REF (CN1-9,10). Pembatasan ini hanya dapat dilakukan pada mode kendali kecepatan dan kendali posisi. Untuk menggunakan pembatasan torsi dengan T-REF, Pn002.0 diatur bernilai 1 dan memberikan input tegangan pada T-REF.
4. Pembatasan torsi dengan menggabungkan metode 2 dan 3
Pembatasan torsi ini menggunakan gabungan metode 2 dan 3 yaitu dengan mengatur mode pada parameter Pn002.0 bernilai 3 dan melakukan pengaturan yang dilakukan pada metode 2.

Sebagai indikator pembatasan torsi digunakan output /CLT yang perlu terlebih dahulu dialokasikan dengan Pn50F.0

3.4 Tuning pada servopack

Tuning adalah proses yang dilakukan untuk menghasilkan performa yang maksimal pada pengendali dengan mendapatkan nilai masing-masing parameter. Pada servopack, terdapat 2 cara tuning yaitu secara otomatis dan secara manual.

3.4.1 Automatis

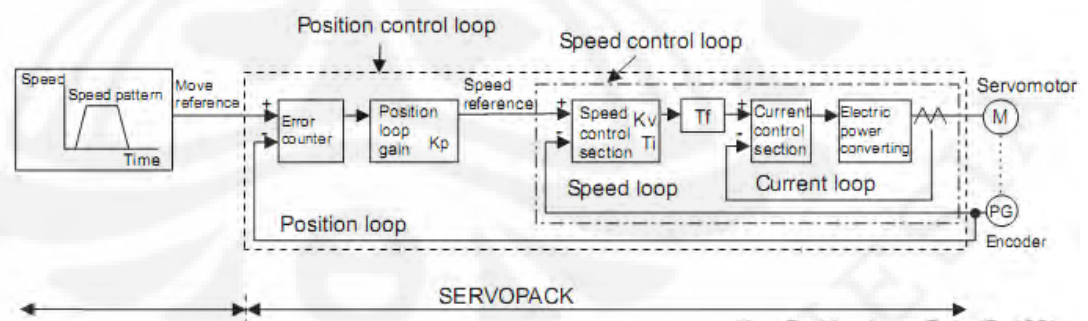
Dengan tuning secara otomatis, momen inersia beban saat servopack berjalan dan parameter dihitung sehingga didapatkan nilai ketahanan mesin. Tuning otomatis yang dapat dilakukan pada servopack ini secara online, sehingga tidak efektif pada kasus:

- a. Variasi momen inersia beban kurang dari 200ms
- b. Kecepatan motor kurang dari 100min⁻¹

- c. Beban ketahanan rendah dan getaran mekanik mudah terjadi dan gesekan tinggi
- d. Referensi kecepatan adalah fungsi step

Dengan menggunakan software sigmawin, dapat dideteksi nilai dari momen inersia beban yang kemudian dapat diatur nilainya pada Pn103 dan melakukan pengaturan secara manual. Dengan menggunakan Fn007 kita dapat memindahkan nilai dari Pn103 ke EEPROM sehingga nilai tersebut dapat digunakan lagi pada perhitungan selanjutnya. Untuk mengatur autotuning digunakan parameter Pn110.0, yang dapat bernilai 0 untuk autotuning pada awal, bernilai 1 untuk autotuning terus-menerus, dan bernilai 2 untuk tidak melakukan autotuning. Dengan mengatur nilai ketahanan mesin maka parameter gain loop kecepatan (Pn100), time konstan integral loop kecepatan (Pn101), gain loop posisi (Pn102), dan time konstan filter referensi torsi (Pn401) akan secara otomatis teratur. Loop kecepatan dapat diatur dengan kendali PI dan I-P pada parameter Pn10B dengan nilai 0 atau 1.

3.4.2 Manual



Gambar 3.25 blok diagram kendali pada servopack[10]

Dalam melakukan tuning perlu diperhatikan mengenai pengendali yang digunakan baik itu kendali posisi, kecepatan, dan torsi. Gambar 3.25 merupakan blok diagram feedback loop yang terdapat pada servopack,

terlihat terdapat loop posisi, loop kecepatan dan loop arus. Dalam sistem kendali cascade, umumnya loop terdalam harus memiliki respon yang lebih cepat dari loop terluarnya agar sistem lebih responsif. Pada kendali kecepatan yang diatur pada gain loop kecepatan dan time konstan integral loop kecepatan serta time konstan filter referensi torsi agar tidak terjadi getaran. Untuk kendali posisi parameter tambahan yang perlu diatur adalah gain loop posisi.

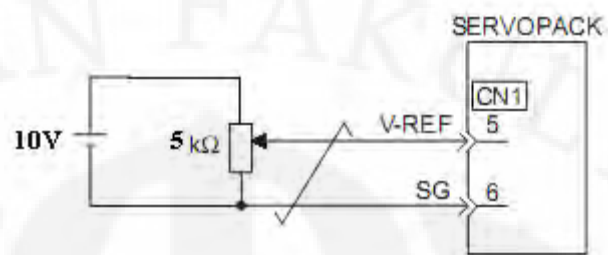
3.5 Pengendalian servomotor

Untuk mengedalikan servomotor digunakan servopack untuk mengendalikan kecepatan, posisi, dan torsi yang dapat dikendalikan dengan kendali PI atau P. Untuk memilih kendali yang digunakan dapat menggunakan input dari luar yaitu pin /P-CON (CN1-41). Selain itu dapat digunakan mode switching secara otomatis dengan berbagai referensi pembanding seperti torsi, kecepatan, percepatan dan posisi.

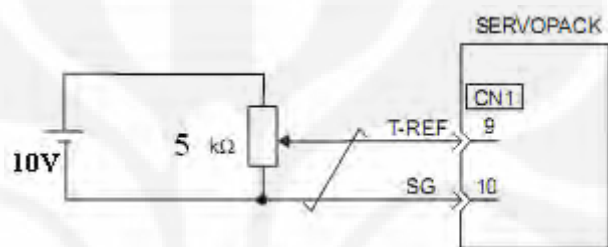
Pengendalian servomotor kali ini menggunakan kendali kecepatan dan kendali torsi. Kendali kecepatan akan menggunakan dua macam jenis input, yaitu dari EMC² dengan blok diagramnya sesuai dengan Gambar 3.26 dan input analog sesuai pada skematik pada Gambar 3.27. Sedangkan dengan kendali torsi akan menggunakan input analog sesuai dengan skematik pada Gambar 3.28.



Gambar 3.26 Blok diagram pengendali dengan EMC²



Gambar 3.27 Skematik pengendali kecepatan dengan input analog



Gambar 3.28 Skematik pengendali torsi dengan input analog

BAB 4

HASIL DAN ANALISA PENGGUNAAN SISTEM KENDALI SERVOPACK

Pada skripsi ini, ada 3 jenis sistem pengendali yang digunakan pada sebuah mesin CNC. Ketiga jenis pengendali itu yaitu kendali posisi dengan menggunakan komputer, kendali kecepatan, dan kendali torsi dengan menggunakan servopack. Dari ketiga pengendali tersebut yang dilihat adalah respon dari kecepatan real terhadap referensi kecepatan. Jadi pada kendali posisi, walaupun mengendalikan dengan menggunakan komputer tetapi pada bab ini yang akan dianalisa adalah pada bagian input dan output servopack yang berupa inner loop kecepatan.

4.1 Rancang bangun sistem

Perancangan ketiga sistem kendali di atas, menggunakan konfigurasi yang berbeda sesuai dengan input output yang digunakan. Sedangkan Pengendali PI pada servopack bernilai tetap dan di-tuning dengan menggunakan fitur online autotuning pada software sigmawinplus dengan nilai tiap parameter $k_v = 120$, dan $T_i = 800$ serta waktu filter torsi sebesar 30. Sigmawinplus adalah software yang digunakan untuk monitoring dan pengaturan parameter pada servopack. Data hasil pengujian didapatkan langsung dengan menggunakan software sigmawin dengan bentuk tampilan sigmawin seperti Gambar 4.1.



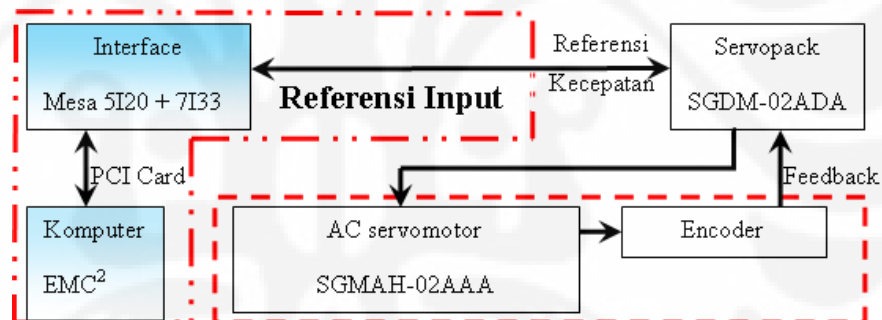
Gambar 4.1 Tampilan trace pada sigmawin.

Rancang bangun dari ketiga sistem kendali servopack tersebut adalah :

4.1.1. Kendali posisi

Pada kendali posisi menggunakan sistem operasi Linux Ubuntu dengan program EMC 2 sebagai software pengendali posisi mesin CNC. Selain itu hardware yang digunakan antara lain:

- AC servomotor, yang berfungsi sebagai penggerak mesin CNC yang sudah dilengkapi dengan encoder di dalamnya.
- Servopack, yang berfungsi sebagai pengatur gerakan motor serta inner loop kecepatan dan torsi pada kendali posisi.
- Catu daya, yang berfungsi untuk mencatu servopack dan komputer
- Interface, yang berfungsi untuk menghubungkan komputer dengan servopack, yaitu FPGA dengan tipe mesa 5i20 dan servo amplifier mesa 7i33



Gambar 4.2 Blok pengendali posisi

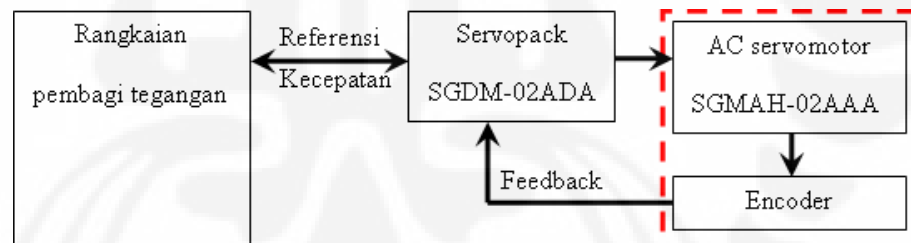
Pada Gambar 4.2, menggunakan sistem kendali cascade dimana terdapat multiple loop kendali dalam satu sistem yaitu kendali posisi pada komputer dan FPGA dan kendali kecepatan dan torsi pada servopack. Pada pengujian ini yang akan dianalisa adalah inner loop kecepatan berupa input referensi kecepatan dan output berupa kecepatan real terhadap variasi waktu soft starting dan konstanta waktu filter kecepatan referensi yang diberikan pada servopack. Kecepatan referensi berasal dari input komputer yang diproses oleh FPGA. Sedangkan kecepatan

real berasal dari encoder pada AC servomotor yang terhubung pada servopack.

Dengan menggunakan fitur trace pada sigmawinplus maka kita dapat memonitor respon dari AC servomotor. Sedangkan parameter servopack diatur sesuai dengan pengaturan pada subbab 3.3.1 dengan sigmawinplus. Sedangkan pada EMC2 dilakukan pengaturan jarak tempuh sebesar 8 inchi dengan nilai yang tetap. Lalu untuk kecepatan dilakukan pembatasan sebesar 2032 dengan skala maksimum 240.

4.1.2. Kendali kecepatan

Pada kendali kecepatan tidak menggunakan EMC2 sebagai sumber input referensi kecepatan. Referensi kecepatan berasal dari tegangan DC analog yang besarnya diatur menggunakan rangkaian pembagi tegangan dengan potensiometer. Untuk hardware yang digunakan sama dengan kendali posisi kecuali interface dan komputer yang diganti dengan rangkaian pembagi tegangan dengan sumber dari baterai 12VDC.

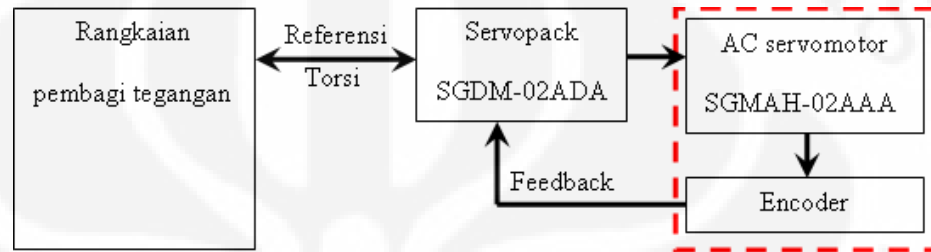


Gambar 4.3 Blok pengendali kecepatan

Pada Gambar 4.3, hal yang dianalisa adalah respon kecepatan real terhadap referensi kecepatan yang diberikan oleh tegangan DC analog terhadap variasi waktu starting soft, konstanta waktu filter referensi kecepatan, dan penggunaan fungsi clamping. Untuk melihat respon dari sistem kendali kecepatan, digunakan software sigmawinplus dengan variasi tiap parameter yang sesuai pengaturan pada subbab 3.3.1 yaitu kendali kecepatan.

4.1.3. Kendali torsi

Kendali torsi sama dengan kendali kecepatan yaitu menggunakan jenis hardware yang sama berupa rangkaian pembagi tegangan, servopack, AC servomotor, dan catu daya. Yang membedakan adalah fungsi dari rangkaian pembagi tegangan sebagai input referensi torsi untuk servopack.



Gambar 4.4 Blok pengendali torsi

Pada Gambar 4.4, hal yang dianalisa adalah kecepatan real terhadap referensi torsi yang diberikan terhadap variasi konstanta waktu filter referensi torsi dan tegangan input. Pada pengendali kali ini juga digunakan sigmawinplus untuk melihat respon sistem kendali terhadap variasi yang dilakukan. Pengaturan parameter yang dilakukan sesuai dengan pengaturan pada subbab 3.3.3 yaitu kendali torsi.

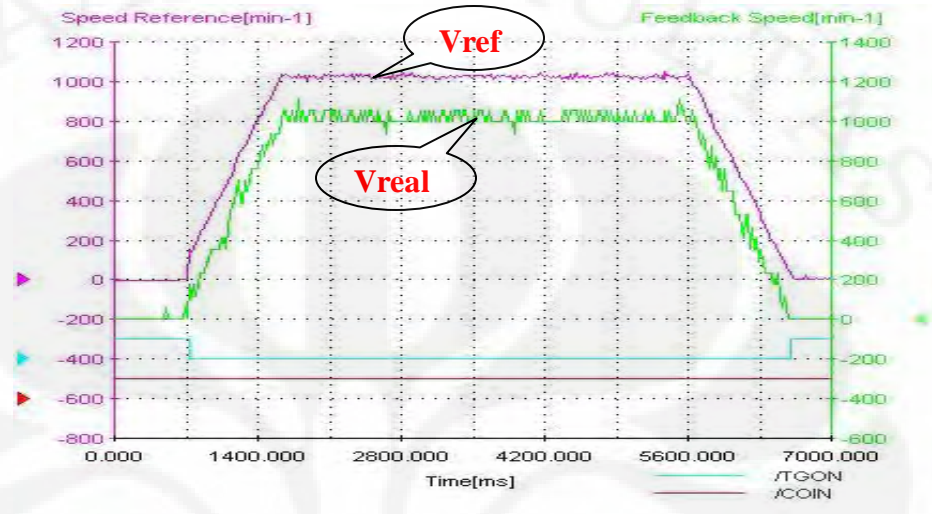
4.2 Hasil respon dari kendali posisi

Pada sistem kendali posisi dengan menggunakan input dari EMC2, diambil data berupa kecepatan referensi yang menjadi input dari servopack dan dibandingkan dengan kecepatan real yang berasal dari encoder. Ada tiga jenis variasi data yang dicobakan beserta analisa hasil yang didapatkan.

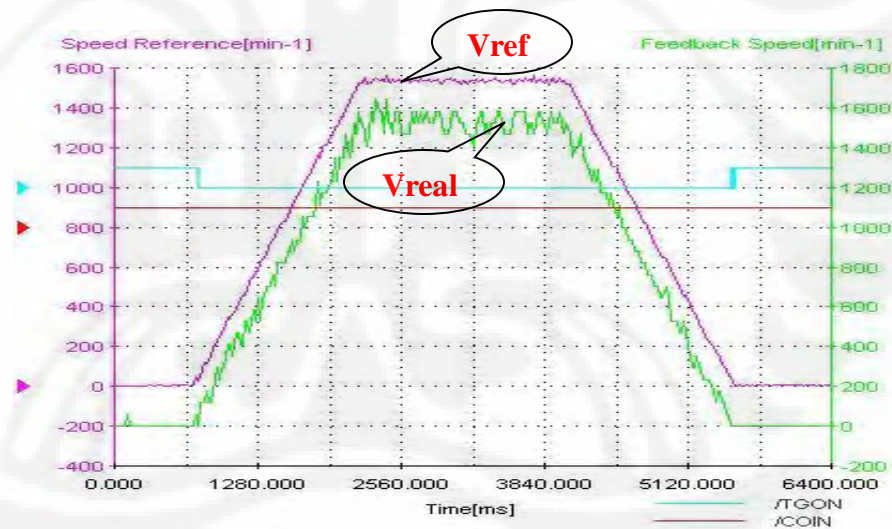
4.2.1. Variasi kecepatan dari EMC2

Untuk mengoperasikan EMC2 dibutuhkan 2 jenis input yaitu kecepatan dari motor dan jarak tempuh motor yang diberikan pada komputer. Pengujian ini dilakukan dengan mengatur jarak tempuh yang sama sebesar 8 inchi dengan kecepatan yang bervariasi sebesar 120, 180, dan 240. Pada EMC2 telah dilakukan pengaturan terlebih dulu dengan

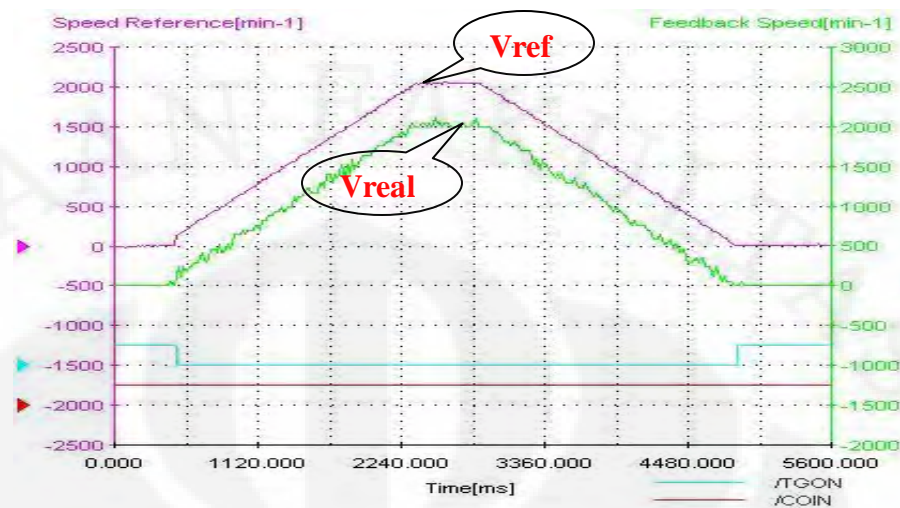
mengatur skala kecepatan maksimum sehingga kecepatan 240 akan sama dengan 2032 rpm dan percepatan serta perlambatan sebesar 4. Hasil dari respon ketiga variasi dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 4.5 Grafik respon kecepatan sebesar 120



Gambar 4.6 Grafik respon kecepatan sebesar 180



Gambar 4.7 Grafik respon kecepatan sebesar 240

Tabel 4.1 Data variasi kecepatan kendali posisi

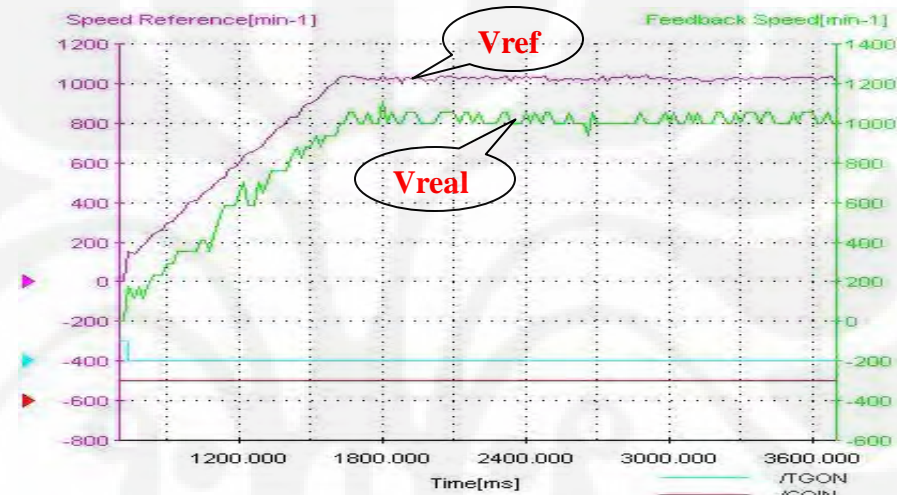
Variasi	Kecepatan referensi rata-rata(rpm)	Error Kecepatan (%)	Kecepatan Real rata-rata (rpm)	Waktu Percepatan - Perlambatan output(ms)
120	1028.135	1.19	1025.38	905.67-1030.45
180	1537.615	0.89	1523.31	1523.34-1542.69
240	2045.995	0.69	2050.76	1899.1-2039.64

Dari Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 terlihat bahwa kecepatan real dapat mengikuti perubahan kecepatan referensi dengan cukup baik. Hal ini dapat terlihat juga pada Tabel 4.1, nilai dari kecepatan real rata-rata dengan kecepatan referensi rata-rata tidak terlalu berbeda jauh. Error kecepatan yang terjadi antara kecepatan referensi dengan kecepatan yang diberikan oleh EMC2 cukup kecil di bawah 1.5% yang berarti sistem dapat dengan baik mengikuti perintah yang diberikan. Selain itu, pada grafik terlihat semakin besar kecepatan yang diberikan maka akan semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kecepatan yang diinginkan. Hal ini dikarenakan nilai dari percepatan dan perlambatan maksimum yang diberikan oleh EMC2. Nilai dari waktu percepatan dan

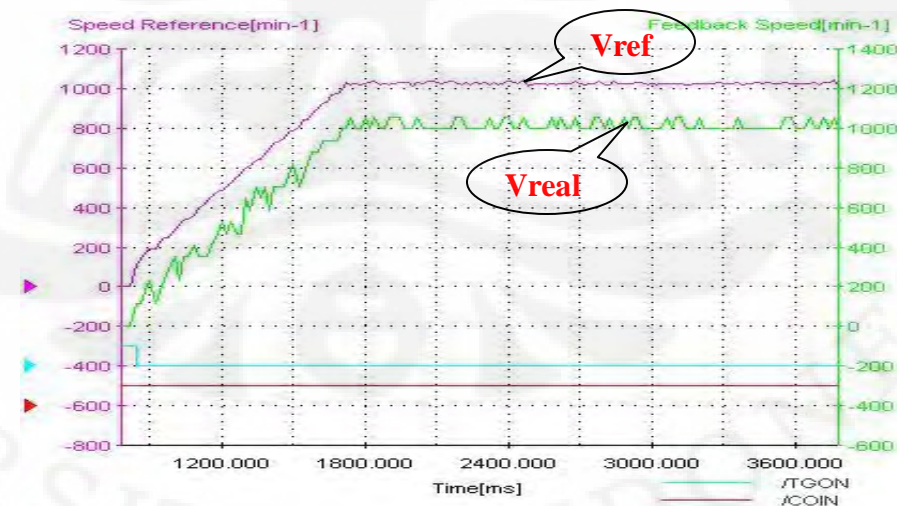
perlambatan berbeda dengan input yang diberikan, karena pengaruh osilasi saat kecepatan naik dan turun sehingga menimbulkan kesalahan pembacaan pada grafik di atas.

4.2.2. Variasi soft starting

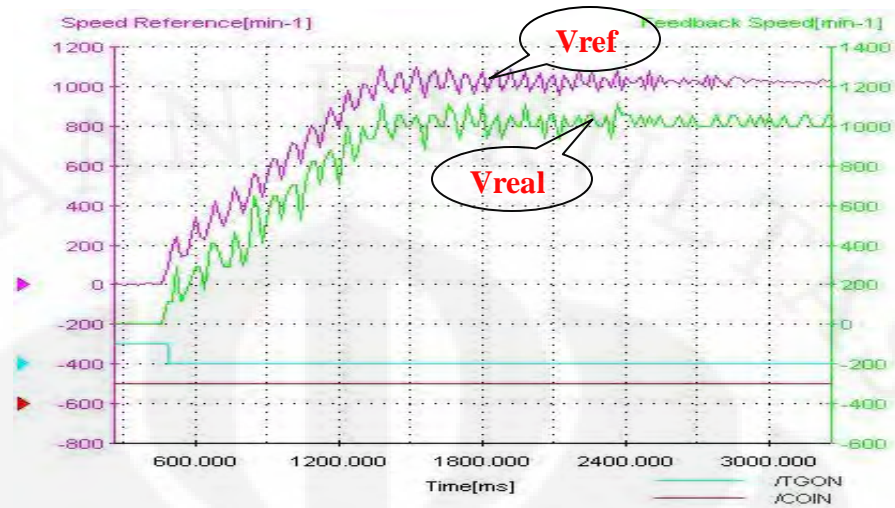
Variasi soft starting dilakukan dengan mengubah parameter pada servopack pada Pn 305 dan 306. Pada pengujian ini diambil tiga buah variasi soft starting pada kecepatan tetap 1016 rpm.



Gambar 4.8 Grafik respon soft starting 0 ms



Gambar 4.9 Grafik respon soft starting 100ms

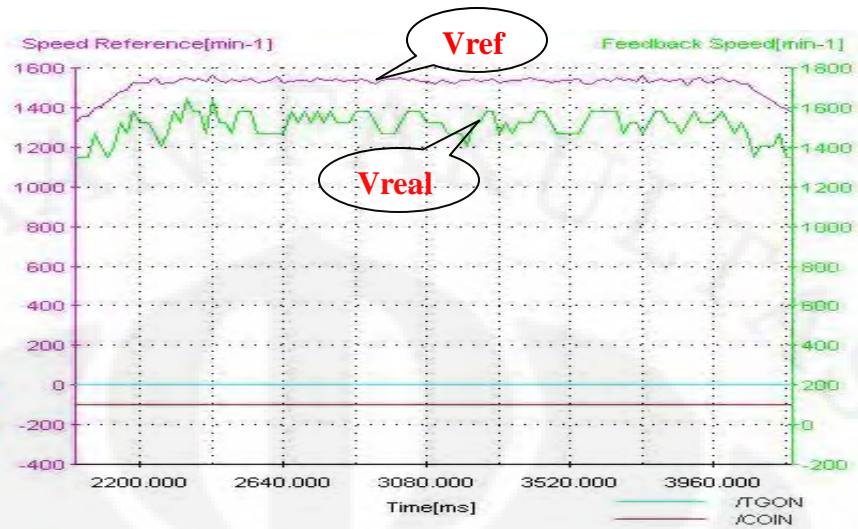


Gambar 4.10 Grafik respon soft starting 1000ms

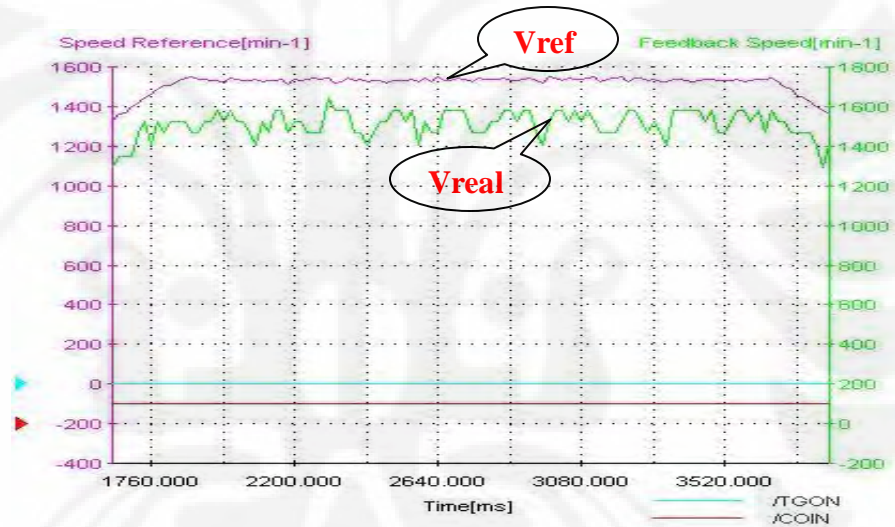
Dari Gambar 4.8, 4.9, dan 4.10 terlihat bahwa semakin besar waktu soft starting yang diberikan maka akan terjadi osilasi dalam selang waktu tertentu. Hal ini dikarenakan semakin besar waktu soft starting maka sistem akan semakin lambat dalam merespon perubahan kecepatan referensi. Pada Gambar 4.9 terlihat waktu soft starting dapat membuat osilasi yang terjadi pada saat sistem steady state lebih sedikit dan lebih rendah, tetapi pada saat mengalami percepatan terdapat osilasi yang cukup besar dikarenakan terjadi perubahan kecepatan. Pengaruh dari waktu soft starting ini dapat dilihat lebih detail pada kendali kecepatan dengan input dari tegangan DC analog.

4.2.3. Variasi konstanta waktu filter

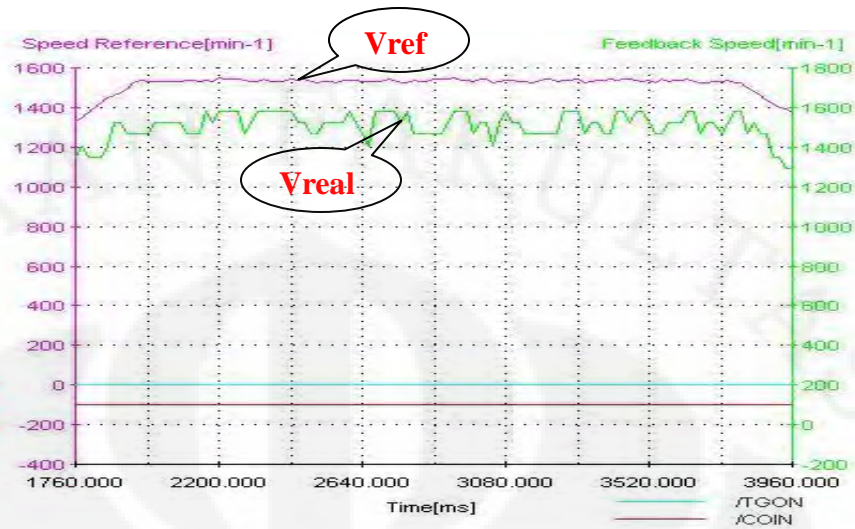
Variasi konstanta waktu filter yang dilakukan pada kecepatan referensi dilakukan dengan mengubah parameter servopack pada Pn 307. Pada pengujian ini dilakukan 4 buah variasi konstanta waktu filter sebesar 0.4 ms, 0.8 ms, 1.2 ms, dan 1.6 ms dengan kecepatan tetap sebesar 1524 rpm.



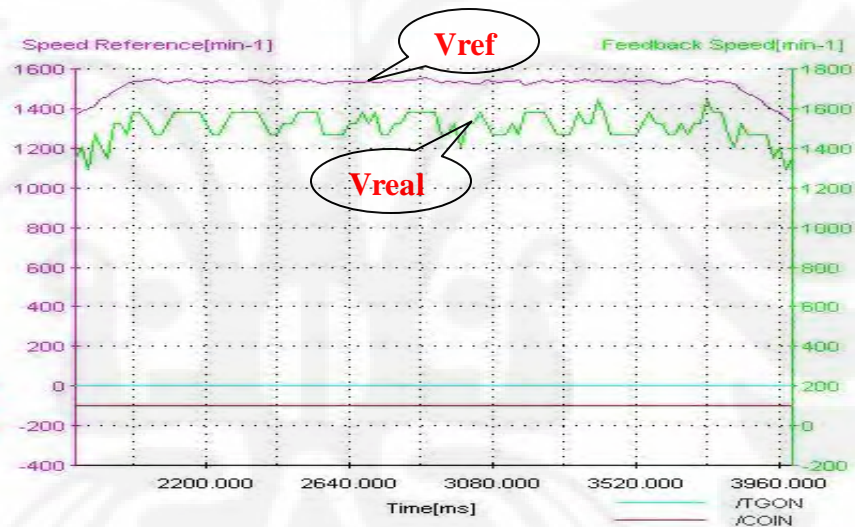
Gambar 4.11 Grafik respon waktu filter 0.4ms



Gambar 4.12 Grafik respon waktu filter 0.8 ms



Gambar 4.13 Grafik respon waktu filter 1.2 ms



Gambar 4.14 Grafik respon waktu filter 1.6 ms

Dari Gambar 4.11, 4.12, 4.13, dan 4.14 terlihat semakin besar waktu filter yang diberikan maka respon sistem akan semakin halus dengan jumlah osilasi yang semakin berkurang.

4.2.4. Analisa sistem kendali inner loop kecepatan

Sistem kendali yang digunakan pada kendali posisi mesin CNC menggunakan sistem cascade. Penggunaan sistem cascade ini akan menimbulkan osilasi kecil pada referensi input yang diberikan pada servopack yang dapat dilihat pada setiap gambar grafik di atas.

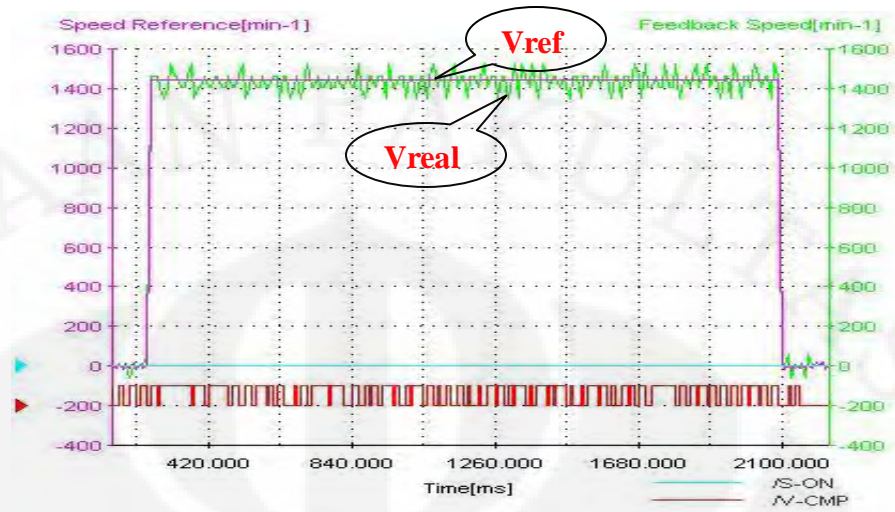
Perubahan nilai pada referensi kecepatan akan direspon oleh sistem kendali PI di dalam servopack sehingga akan menimbulkan osilasi pada kecepatan real. Perubahan waktu soft starting tidak akan mempengaruhi waktu percepatan dan perlambatan dari sistem dikarenakan pengaruh sistem cascade yang dilakukan pada mesin CNC ini. Dari berbagai pengujian di atas, terlihat dengan menggunakan input yang berasal dari EMC2 menghasilkan keakuratan yang baik pada kecepatan yang dikeluarkan hingga mencapai 99.31% pada kecepatan yang tinggi dengan error 0.69%.

4.3 Hasil respon dari kendali kecepatan

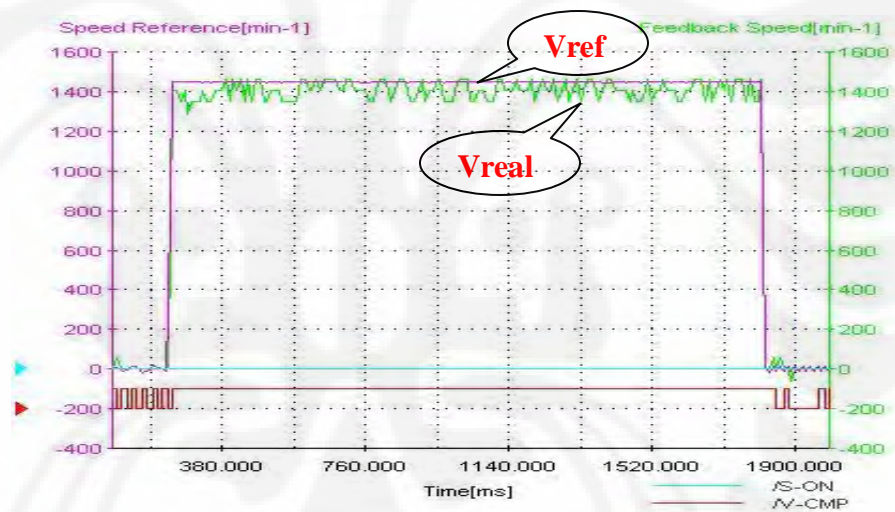
Pada sistem kendali kecepatan digunakan input berupa tegangan DC analog dengan menjalankan motor tanpa beban dan berbeban yang bervariasi terhadap waktu softstarting dan waktu filter kecepatan referensi. Pengujian ini juga membandingkan kecepatan referensi yang diberikan oleh tegangan analog dengan kecepatan real yang diberikan oleh encoder motor. Variasi respon dari ketiga pengujian kendali kecepatan dapat dilihat pada Gambar 4.15-4.24.

4.3.1. Pemberian beban dan tidak pada AC servomotor

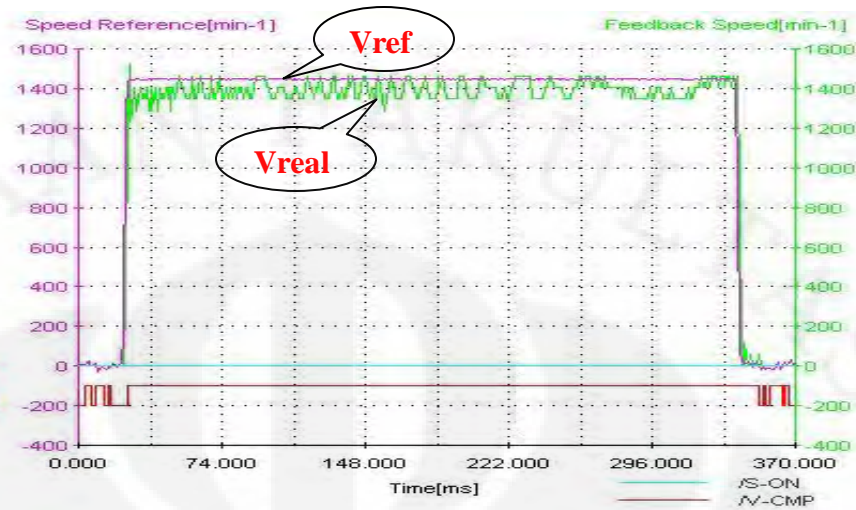
Pada pengujian ini dilakukan variasi data dengan pemberian beban dan tidak pada AC servomotor. Kecepatan yang diberikan pada servopack sebesar 1500 rpm dengan rating tegangan sebesar 5 V dengan waktu sampling yang berbeda pada kondisi berbeban sebesar 10 ms dan 1 ms.



Gambar 4.15 Grafik respon kendali kecepatan tanpa beban pada waktu sampling 10 ms



Gambar 4.16 Grafik respon kendali kecepatan berbeban pada waktu sampling 10 ms



Gambar 4.17 Grafik respon kendali kecepatan berbeban pada waktu sampling 1 ms

Tabel 4.2 Data kendali kecepatan pada kondisi tak berbeban dan berbeban

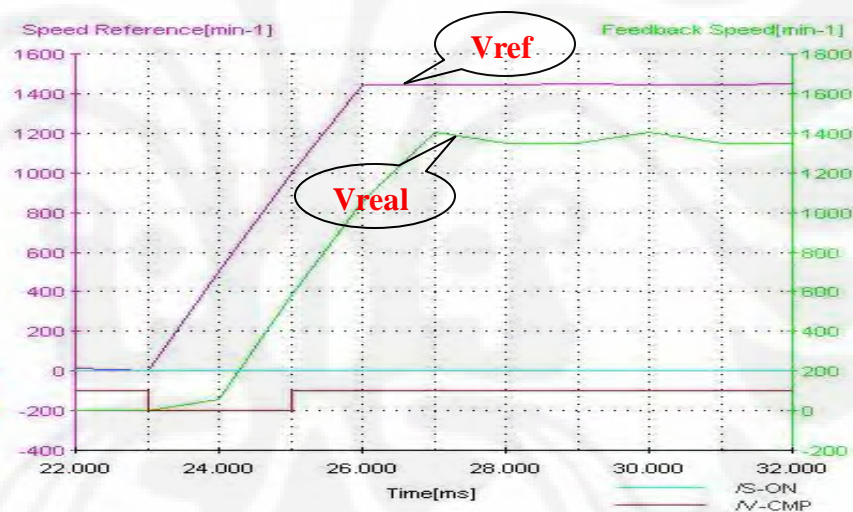
Variasi	Kecepatan referensi rata-rata (rpm)	Error Kecepatan (%)	Kecepatan Real rata-rata (rpm)	Waktu Percepatan - Perlambatan output (ms)
Tak berbeban 10 ms	1445.03	3.664667	1435.5	10 - 10
Berbeban 10 ms	1447.045	3.530333	1377.015	20 - 10
Berbeban 1 ms	1446.865	3.542333	1377.015	3 - 3

Dari Gambar 4.15, 4.16, dan 4.17 terlihat bahwa kecepatan real kurang dapat mengikuti perubahan kecepatan referensi. Terlihat ada perbedaan 10 rpm pada kondisi tak berbeban dan 70 rpm pada kondisi berbeban. Salah satu penyebab perbedaan ini adalah kurang baiknya parameter PI yang diberikan pada sistem melalui proses online autotuning dengan menggunakan sigmawinplus. Untuk error yang terjadi juga besar

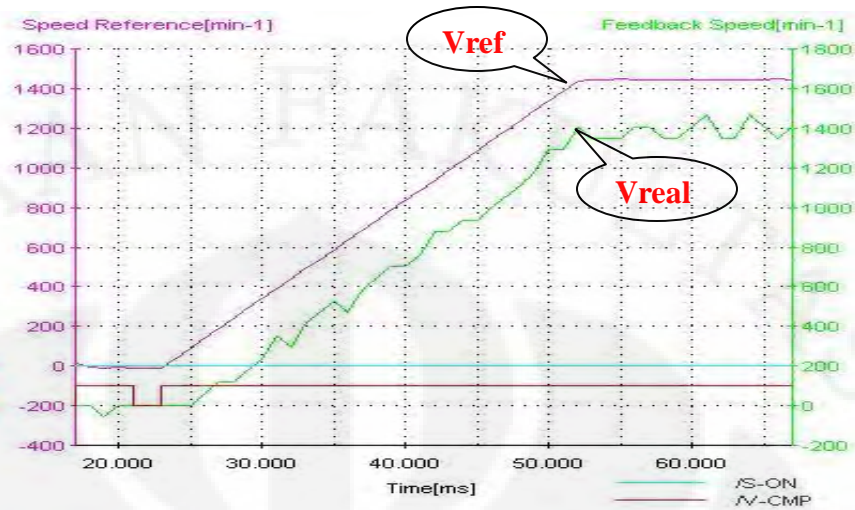
mendekati 4 % dikarenakan faktor internal resistansi pada servopack dan disipasi pada potensiometer. Dengan tidak mengatur waktu soft starting didapatkan waktu percepatan dan perlambatan yang sama dan sebesar waktu sampling yang digunakan. Pada kondisi berbeban dengan waktu sampling 10 ms terdapat perbedaan antara waktu percepatan dan perlambatan dikarenakan faktor switching yang tidak sempurna. Dari ketiga grafik, grafik dengan kondisi berbeban dengan waktu sampling 1 ms terdapat overshoot sebesar 1523 rpm.

4.3.2. Variasi soft starting

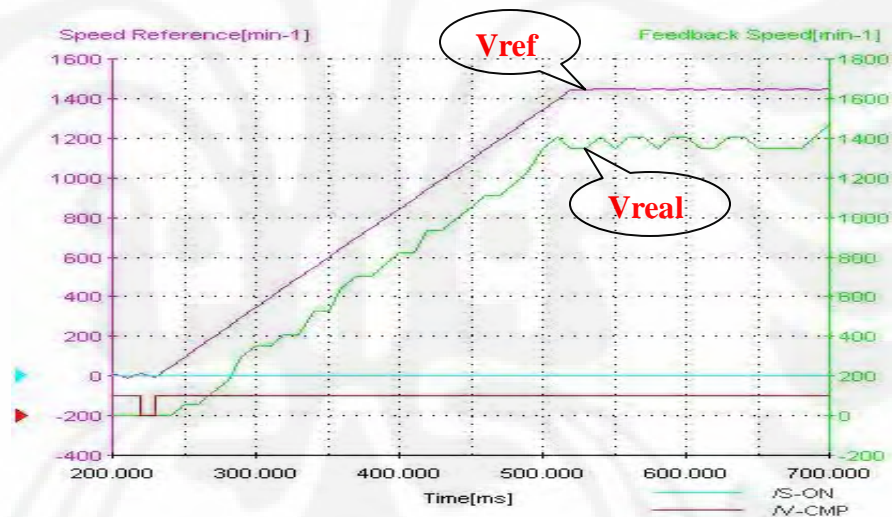
Variasi soft starting yang dilakukan pada percobaan ini sebesar 10 ms, 100 ms, dan 1000 ms dengan kecepatan referensi sebesar 1500 rpm.



Gambar 4.18 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu soft starting 10 ms



Gambar 4.19 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu soft starting
100 ms



Gambar 4.20 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu soft starting
1000 ms

Dengan menggunakan fungsi soft starting maka dapat terlihat overshoot berkurang dibandingkan dengan kendali kecepatan tanpa soft starting. Waktu percepatan dan perlambatan pada kecepatan tertentu dapat dicari dengan persamaan di bawah ini

$$\text{waktu percepatan} = \frac{\text{kecepatan referensi}}{\text{kecepatan maksimum}} \times \text{waktu soft starting}$$

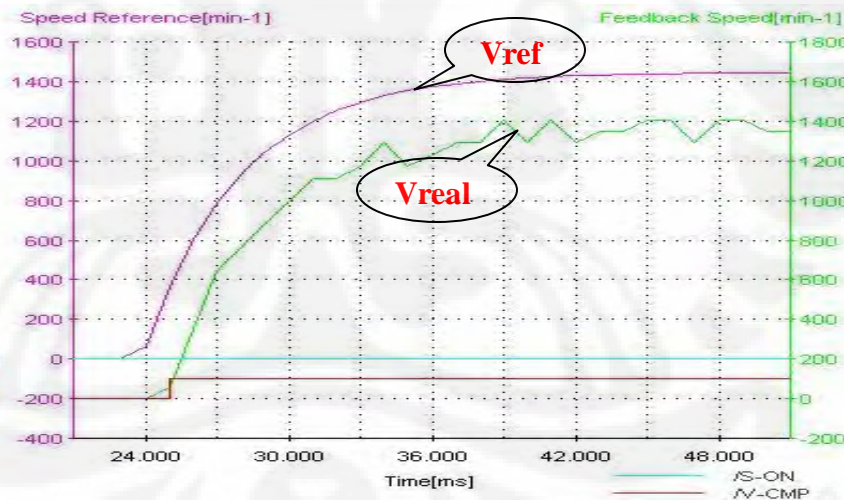
Tabel 4.3 Variasi percepatan dan perlambatan

Variasi	Percepatan	Perlambatan	Error percepatan	Error perlambatan
10 ms	3 ms	3 ms	0%	0%
100 ms	29.52 ms	29.68 ms	1.6%	1.06%
1000 ms	290 ms	303.88 ms	3.33%	1.29%

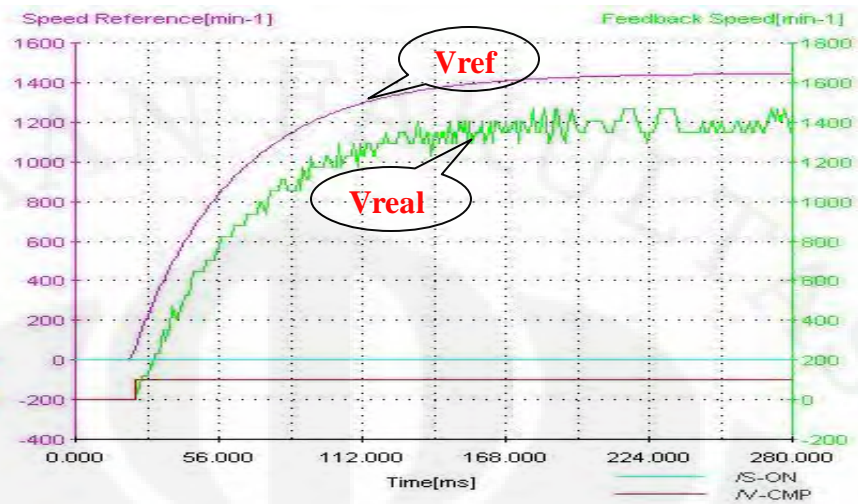
Dari data di atas dapat dilihat bahwa terjadi error pada soft starting baik itu saat percepatan maupun perlambatan. Error yang terjadi akibat switching yang tidak sempurna serta osilasi pada respon feedback sehingga menyebabkan kesalahan dalam pembacaan.

4.3.3. Variasi konstanta waktu filter

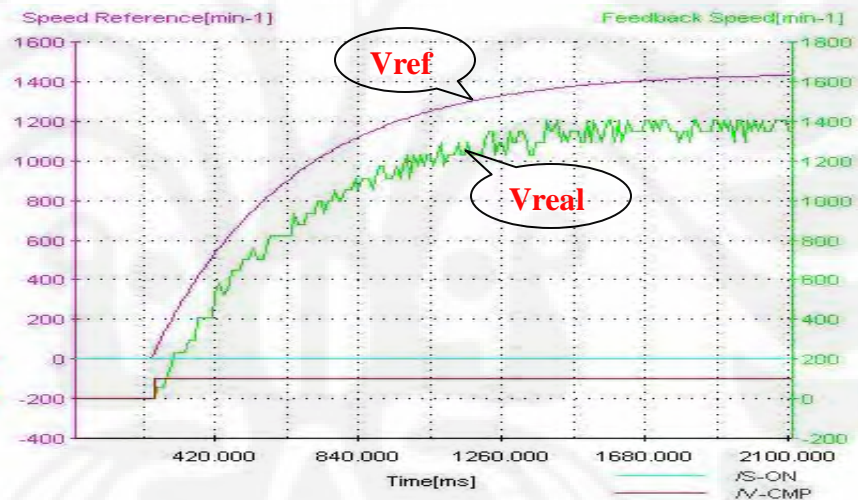
Variasi konstanta waktu filter sebesar 4 ms, 40 ms, dan 400 ms dengan kecepatan referensi sebesar 1500 rpm.



Gambar 4.21 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu filter 4 ms



Gambar 4.22 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu filter 40 ms



Gambar 4.23 Grafik respon kendali kecepatan dengan waktu filter 400 ms

Tabel 4.4 Respon konstanta waktu filter

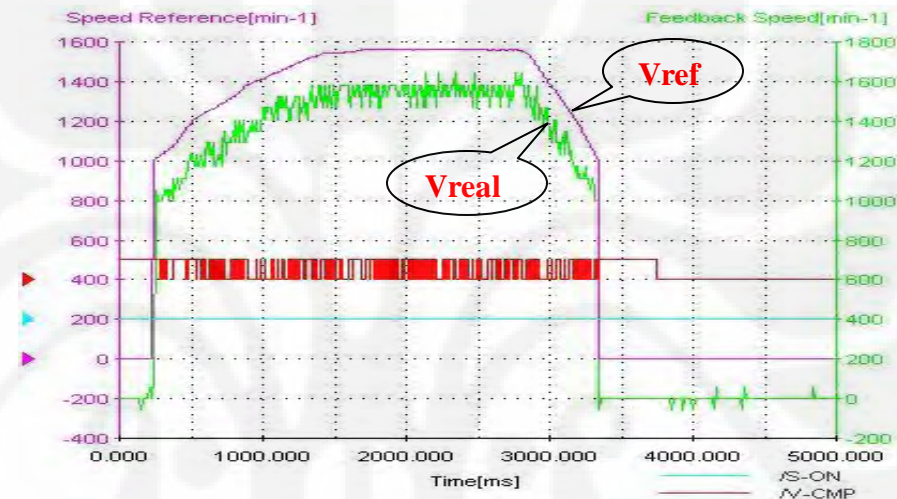
Variasi	Kecepatan rata-rata (rpm)	Konstanta waktu grafik	error
4 ms	1445.945	4.66	16.5
40 ms	1444.115	40.53	1.32
400 ms	1443.3	405.68	1.42

Dari Gambar 4.21, 4.22, dan 4.23 dan Tabel 4.4 terlihat bahwa konstanta waktu pada grafik memiliki error yang cukup besar. Hal ini diakibat

waktu sampling yang dilakukan kurang kecil sehingga menimbulkan kesalahan dalam pembacaan.

4.3.4. Zero Clamp

Fungsi zero clamp dapat digunakan untuk memotong kecepatan minimum sehingga motor tidak bergerak pada kecepatan tersebut. Untuk menggunakan fungsi clamping diperlukan input P-CON dalam mode low sehingga dapat membuat clamping seperti pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Grafik respon fungsi clamp sebesar 1000 rpm

Fungsi clamping berjalan dengan baik terlihat pada Gambar 4.24 dengan menggunakan clamp sebesar 1000 rpm, motor akan mulai bergerak setelah diberi input lebih besar dari nilai kecepatan clamp. Pada Gambar 4.24 terlihat juga tidak ada referensi kecepatan saat kecepatan yang diberikan \leq kecepatan clamping.

4.3.5. Analisa sistem kendali kecepatan

Pada kendali kecepatan dengan menggunakan input analog tegangan DC dari luar didapatkan kecepatan referensi yang didapatkan oleh servopack berkurang sehingga menimbulkan error pada kecepatan referensi. Hal ini dikarenakan faktor disipasi potensiometer dengan internal resistansi pada servopack. Dibandingkan dengan kendali posisi dengan menggunakan

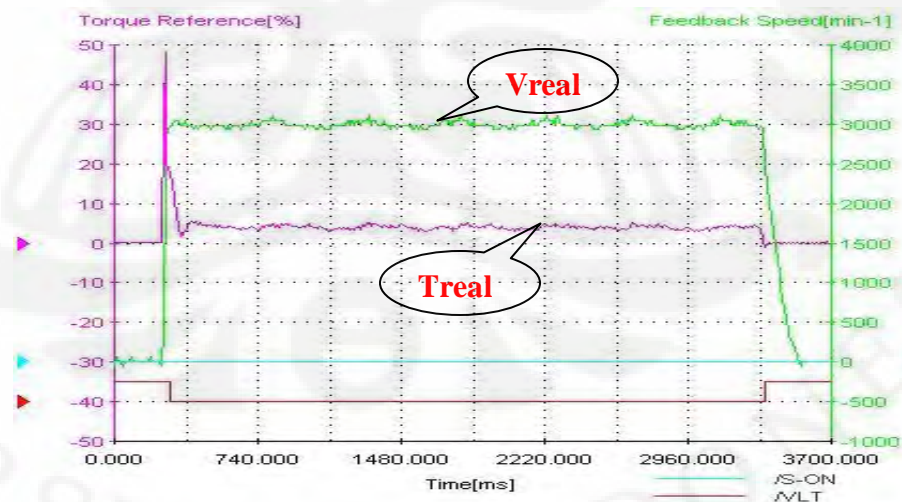
input berasal dari EMC2 didapatkan hasil yang lebih buruk karena tidak ada outer loop yang mengkoreksi lagi kesalahan dari kendali kecepatan. Penggunaan soft starting dan filter dapat mempengaruhi respon sistem terhadap nilai referensi yang diberikan. Semakin besar nilai dari soft starting dan filter akan membuat sistem akan semakin lambat dalam merespon perubahan yang terjadi pada nilai referensi.

4.4 Hasil respon dari kendali torsi

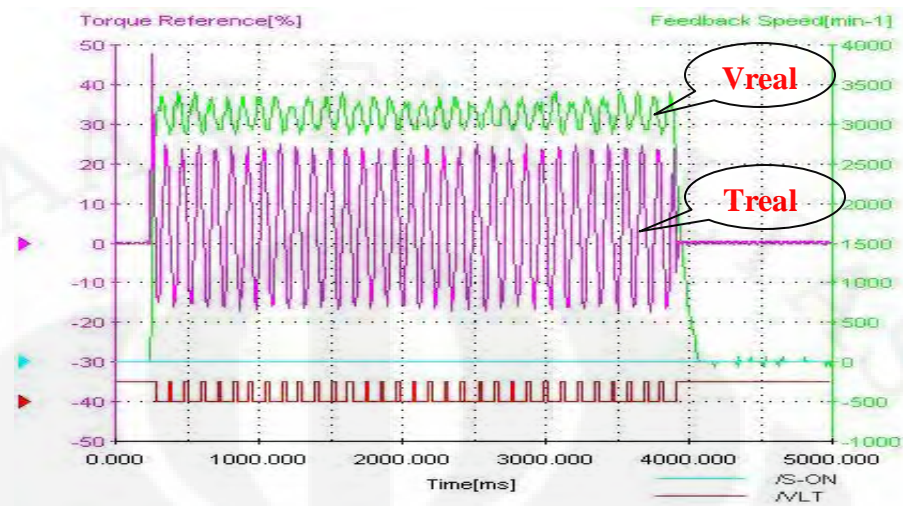
Pada kendali torsi digunakan input berupa tegangan DC analog yang dihubungkan dengan potensiometer sebagai pembagi tegangan. Untuk membatasi kecepatan dari motor digunakan internal kecepatan yang berasal dari servopack. Ada 2 variasi data yang diambil pada pengujian kali ini yaitu dari kondisi tanpa beban dengan memvariasikan waktu filter dan berbeban dengan variasi tegangan.

4.4.1. Tanpa beban dengan variasi waktu filter

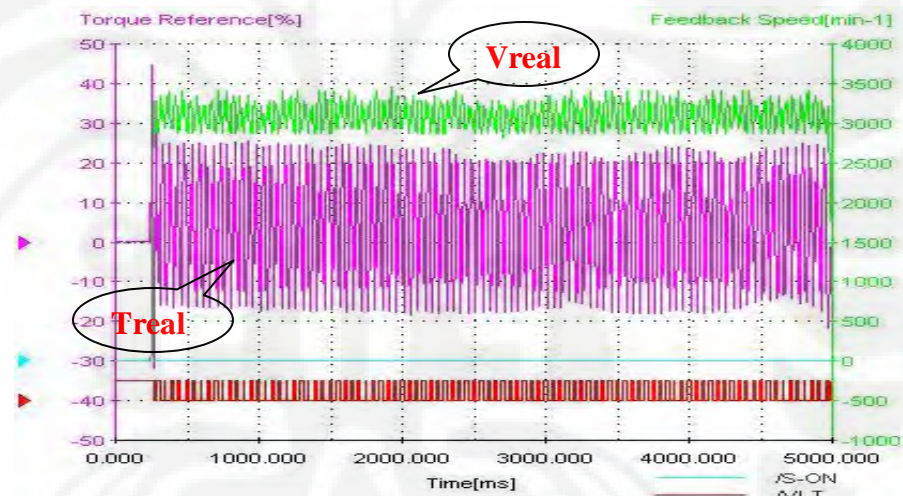
Variasi yang dilakukan adalah dengan menaikkan waktu filter dari referensi torsi sebesar 3 ms, 4 ms, 5 ms, dan 10 ms dengan input tegangan referensi tetap sebesar 5 V.



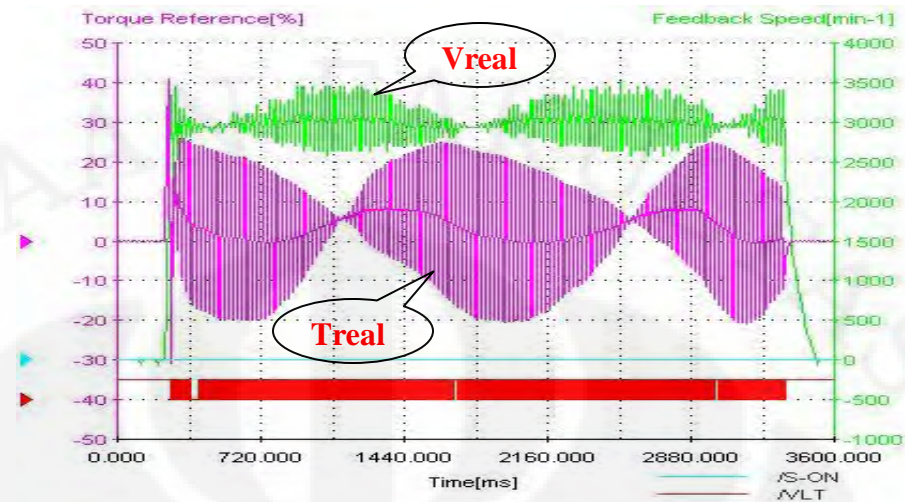
Gambar 4.25 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 3ms



Gambar 4.26 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 4 ms



Gambar 4.27 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 5 ms

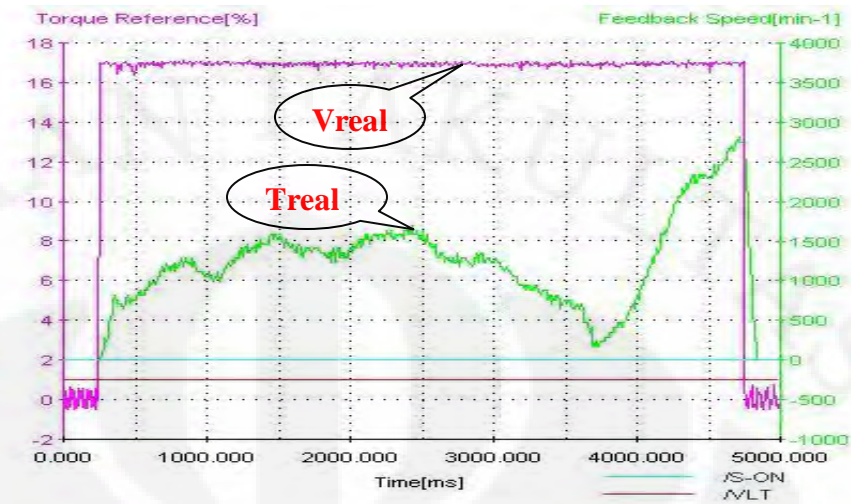


Gambar 4.28 Grafik respon kendali torsi dengan waktu filter 10 ms

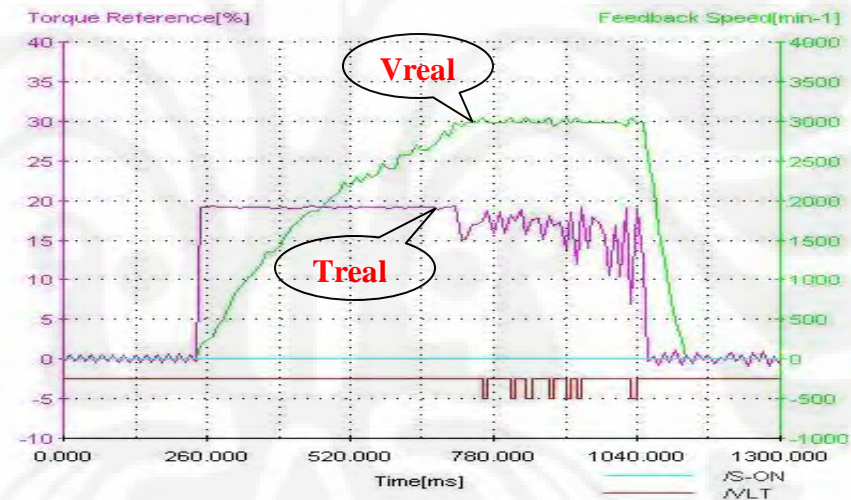
Dari Gambar 4.25, 4.26, 4.27, dan 4.28 terlihat semakin besar nilai waktu filter torsi referensi maka akan semakin tidak stabil pengendalian yang terjadi. Pada waktu starting akan membutuhkan torsi yang besar maka akan menimbulkan overshoot seperti terlihat pada semua grafik yang bergantung pada besarnya torsi referensi yang diberikan. Dengan menggunakan pembatasan kecepatan maka secara tidak langsung juga akan membatasi torsi yang dikendalikan.

4.4.2. Berbeban dengan variasi tegangan

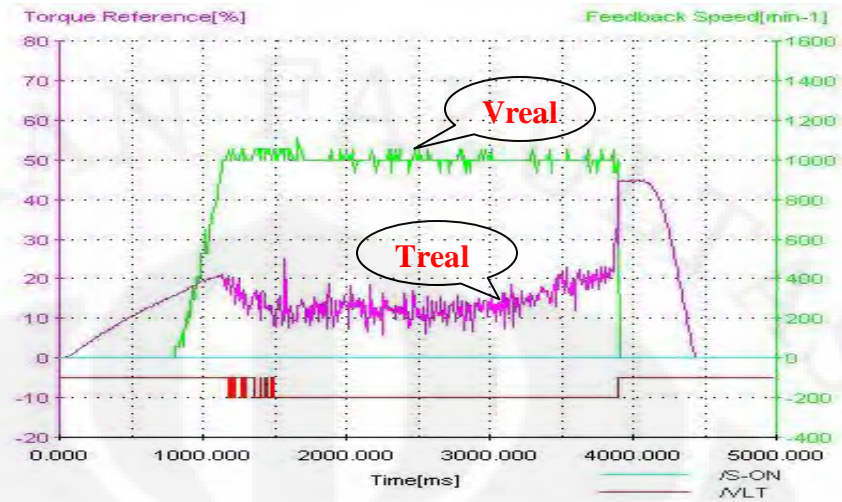
Variasi yang dilakukan dengan mengatur tegangan yang menjadi torsi referensi bagi sistem kendali torsi. Tegangan yang diberikan sebesar 1.8 V, 2.1 V, 5 V dan 10 V dengan waktu filter sebesar 0.3 ms.



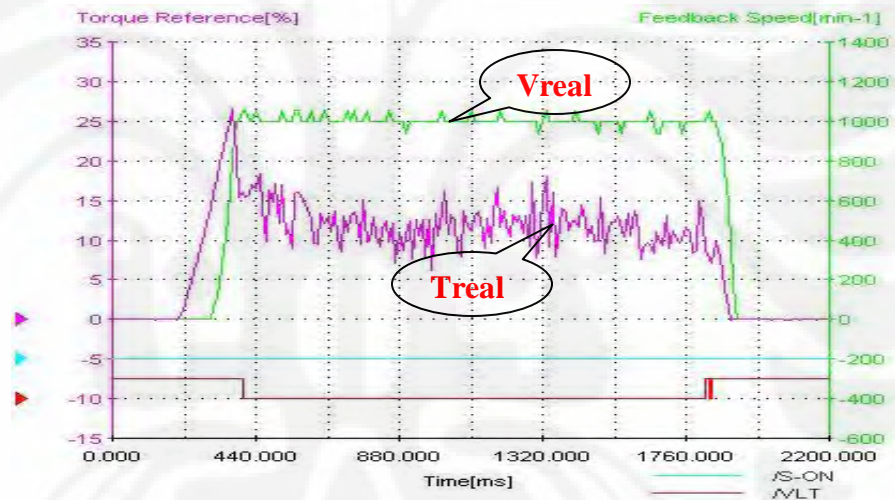
Gambar 4.29 Grafik respon kendali dengan tegangan 1.8 V



Gambar 4.30 Grafik respon kendali torsi dengan tegangan 2.1 V



Gambar 4.31 Grafik respon kendali torsi dengan tegangan 5 V



Gambar 4.32 Grafik respon kendali torsi dengan tegangan 10 V

Pada Gambar 4.29 terlihat dengan torsi referensi rata-rata 16.73% terdapat kenaikan dan penurunan kecepatan. Hal ini terjadi untuk mempertahankan torsi pada referensi yang diberikan. Dengan input tegangan yang diberikan sebesar 1.8 V maka terjadi error sebesar 7.05% terhadap referensi torsi rata-rata. Gambar 4.30 pada saat kecepatan tetap bernilai 3000 rpm, torsi mulai berosilasi untuk mengurangi kecepatan yang menjadi batas maksimum. Gambar 4.31 terjadi osilasi saat kecepatan mencapai batas yang ditetapkan, di akhir saat tegangan

dimatikan terjadi lonjakan torsi. Hal ini disebabkan perbedaan teknik pengambilan data yaitu dengan memutar potensiometer pada tegangan 0V. Gambar 4.32 terjadi osilasi torsi referensi saat mencapai kecepatan limit, akibat kendali torsi untuk mempertahankan nilai torsi referensi yang diberikan terhadap kecepatan yang dihasilkan oleh servopack.

4.4.3. Analisa sistem kendali torsi

Sistem kendali torsi adalah sistem kendali yang mempertahankan torsi pada nilai referensi yang diberikan. Pada grafik terlihat terjadi osilasi pada sistem kendali torsi akibat batas limitasi kecepatan yang diberikan. Pembatasan kecepatan akan berakibat sistem terus berosilasi karena torsi yang diberikan menghasilkan kecepatan yang melebihi batas kecepatan yang diberikan. Dari respon yang dihasilkan, sistem kendali torsi ini cepat merespon perubahan yang terjadi pada referensi yang diberikan dan pengaruh batas kecepatan. Hal ini menyatakan bahwa sistem kendali ini lebih baik digunakan sebagai inner loop dengan penggunaan loop kecepatan dan loop posisi pada outer loop.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengambilan data serta analisa, maka dapat ditarik kesimpulan, yaitu :

1. Servopack dapat digunakan untuk mengendalikan AC servomotor dalam 3 mode kendali yaitu posisi, kecepatan dan torsi. Adapun dalam implementasinya hanya digunakan kecepatan dan torsi karena pada aplikasinya digunakan outer loop berupa kendali posisi pada EMC2.
2. Servopack memiliki parameter PI, dimana pada pengujian ini ditetapkan sebesar $k_v = 120$ dan $T_i = 800$ yang didapat dari proses online autotuning dengan menggunakan sigmawin. Hasil yang didapatkan dengan menggunakan nilai parameter tersebut, cukup baik.
3. Dari ketiga pengujian yang dilakukan dengan menggunakan 2 mode kendali pada servopack didapatkan bahwa penggunaan mode kendali kecepatan dengan menggunakan input yang berasal dari output kendali posisi EMC2, menghasilkan error yang paling kecil.
4. Servopack menyediakan konfigurasi soft starting, filter, clamping yang dapat digunakan untuk mengatur kinerja motor.
5. Konfigurasi soft starting dapat menyebabkan percepatan dan perlambatan saat start dan stop dengan nilai yang terbaik sebesar 0 agar didapatkan respon kecepatan yang tercepat.
6. Konfigurasi filter kecepatan dapat menyebabkan referensi kecepatan yang halus dengan nilai yang terbaik sebesar 40.
7. Konfigurasi filter torsi dapat menyebabkan referensi torsi yang halus dengan nilai yang terbaik sebesar 300 atau 3 ms.
8. Konfigurasi fitur clamping berhasil digunakan pada pengendali kecepatan tanpa loop posisi di loop terluar.

9. Sistem aktuator yang terdiri dari servopack dan AC servomotor dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan dan torsi dengan baik sehingga diharapkan dapat diimplementasikan pada mesin CNC.



DAFTAR REFERENSI

- [1] "CNC". <http://id.wikipedia.org/wiki/CNC>. terakhir diakses tanggal 13 Juni 2010
- [2] Polka, Dave. *Motors and Drives A Pratical Technology Guide*. The Instrumentation, Systems, and Automation Society. United State of America. 2003
- [3] Chapman, S. J. *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. McGraw Hill. 2002
- [4] YASKAWA Σ Series SGM \square /SGDB- $\square\square$ AM USER'S MANUAL
- [5] "SENSOR". <http://id.wikipedia.org/wiki/Sensor>. terakhir diakses tanggal 13 Juni 2010
- [6] "CHAPTER 7 DC MOTOR DRIVE". www2.ece.ohio-state.edu/ems/ee647/Lab_Manuals/Lab6.pdf. terakhir diakses tanggal 7 Juli 2010
- [7] Xiaodiao Huang and Liting Shi. *Simulation on a Fuzzy-PID Position Controller of the CNC Servo System*. Mechatronics Institute, Nanjing University of Technology. China.
- [8] Hughes, Austin. *Electric Motors and Drives, Fundamentals, Types and Applications Third edition*. Elsevier Ltd. Great Britain. 2006
- [9] Krishnan, R. *ELECTRIC MOTOR DRIVES Modeling, Analysis, and Control*. Prentice Hall. New Jersey. 2001
- [10] YASKAWA Σ -II Series SGM \square H/SGDM USER'S MANUAL

- [11] <http://www.streetbass.org/forum/showthread.php?t=4135>. Terakhir diakses tanggal 7 Juli 2010
- [12]” Low-pass filter”. http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter. Terakhir diakses tanggal 7 Juli 2010
- [13]Ogata, Katsuhiko. *Modern Control Engineering Third Edition*. Prentice Hall. United State of America. 1997
- [14]”Softstarter (1)”. <http://bayupancoro.wordpress.com/2008/04/16/softstarter-1/>. Terakhir diakses tanggal 8 Juli 2010
- [15]”AC Drives and Soft Starter (1)”.
<http://anekalistrik.wordpress.com/category/soft-starter/>. Terakhir diakses tanggal 8 Juli 2010