



TUGAS AKHIR - TE091399

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGATURAN
KECEPATAN MOTOR TIGA FASA PADA MESIN
SENTRIFUGAL MENGGUNAKAN KONTROLER
LOGIKA *FUZZY***

Marendra Kurniawan
NRP 2212105039

Dosen Pembimbing
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.
Eka Iskandar, ST. MT.

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

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGATURAN
KECEPATAN MOTOR TIGA FASA PADA MESIN
SENTRIFUGAL MENGGUNAKAN
KONTROLER LOGIKA FUZZY**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Ir. Josephat Pramudijanto, M.Eng.
NIP. 1962 10 05 1990 03 1003

Dosen Pembimbing II



Eka Iskandar, ST. MT.
NIP. 1980 05 28 2008 12 1001



**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGATURAN
KECEPATAN MOTOR TIGA FASA PADA MESIN
SENTRIFUGAL MENGGUNAKAN
KONTROLER LOGIKA *FUZZY***

Nama : Marendra Kurniawan
Pembimbing 1 : Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.
Pembimbing 2 : Eka Iskandar, ST. MT.

ABSTRAK

Motor induksi 3 fasa banyak digunakan di industri, salah satunya pada industri pabrik gula. Di industri pabrik gula motor industri 3 fasa banyak digunakan pada mesin sentrifugal. Mesin ini digunakan pada proses pemisahan cairan *massacuite* dan *strup* hingga didapat kristal gula. Pada proses tersebut terjadi perubahan beban oleh karena itu pada siklus kecepatannya mengalami proses *Charging*, *Spinning* dan *Discharging*. Pengaturan kecepatan motor induksi masih dilakukan secara manual yaitu dengan merubah posisi puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal. Pengaturan dengan metode ini mengakibatkan kecepatan motor akan sulit dikendalikan sesuai dengan yang diharapkan. Pengaturan kecepatan yang tidak tepat juga dapat mengakibatkan hasil produksi gula yang kurang maksimal. Oleh karena itu dibutuhkan metode kontrol untuk mempertahankan kecepatan motor bila terjadi penambahan beban saat mengalami proses *charging*, *spinning* dan *discharging*. Kontroler yang digunakan adalah Kontroler Logika *Fuzzy* (KLF). Pada simulasi menggunakan KLF dan kontroler PID serta implementasi menggunakan kontroler PID memiliki rata-rata *error* saat proses *charging*, *spinning* dan *discharging* sebesar $\pm 0,1\%$ dan $\pm 1,14\%$. Sehingga Tugas Akhir ini dapat membantu meningkatkan efisiensi mesin sentrifugal pada pabrik gula.

Kata kunci : Motor Induksi 3 Fasa, Mesin Sentrifugal, *Fuzzy* , PLC Mitsubishi *Q-series*.

DESIGN AND IMPLEMENTATION SPEED CONTROL OF THREE PHASE MOTOR CENTRIFUGAL MACHINE USING FUZZY LOGIC CONTROLLER

Name : Marendra Kurniawan
Supervisor 1 : Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.
Supervisor 2 : Eka Iskandar, ST. MT.

ABSTRACT

3-phase induction motors are widely used in the industry, one on industrial sugar factory. Industrial sugar factory in industrial motor 3 phase used in centrifugal machine. This engine was used in the process of separation of the liquid massacuite and sugar crystals up to gained strup. In the process of changing the burden is therefore on its velocity undergoes a process of Charging cycles, the Spinning and Discharging. Induction motor speed settings are still done manually by changing the position of the shaft or the size of the puli engine centrifugal. This method resulted in an arrangement with the speed of the motor will be difficult to control as expected. Inappropriate speed settings can also lead to less sugar production results. It is therefore necessary to maintain the control method of motor speed when load is added while experiencing the process of charging and discharging, spinning. The controller that is used is the Fuzzy Logic Controller. In a simulation using logic controller and controller PID as well as the implementation of using controller pid having the averages error when processing charging, and of spinning a discharging about 0,1 % and about 1,14 %. So this final project can help increase the efficiency of the centrifugal on sugar factory machine.

Keywords: 3 Phase Induction Motor, Centrifugal Machine, Fuzzy, PLC Mitsubishi Q-series

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang selalu memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Pada Kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan petunjuk, kemudahan, dan kemurahan-Nya serta tidak lupa ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada beberapa pihak yang telah memberikan dukungan selama proses pengerjaan tugas akhir ini, antara lain:

1. Ibu tercinta yang selalu memberi semangat, doa dan kasih sayangnya.
2. Bapak Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng. sebagai pembimbing 1 dan Bapak Eka Iskandar, ST. MT. sebagai pembimbing 2 yang telah membantu dan membimbing hingga laporan ini terselesaikan.
3. Bapak dan Ibu penguji Tugas Akhir yang telah memberi masukan kepada penulis untuk menyusun buku ini menjadi lebih baik.
4. Teman-teman Teknik Sistem Pengaturan yang telah berbagi suka dan duka selama ini.
5. Semua pihak yang turut membantu pengerjaan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini dikarenakan keterbatasan kemampuan penulis. Penulis mengharapkan berbagai masukan dan kritik dari berbagai pihak agar lebih baik di masa yang akan datang. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan demi kemajuan Indonesia menuju negeri berteknologi mandiri.

Surabaya, Juli 2014

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iii
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
1.6 Relevansi	3
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Mesin Sentrifugal	5
2.2 Motor Induksi Tiga Fasa.....	7
2.2.1 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa.....	7
2.2.1 Hubungan Antara Beban, Kecepatan dan Torsi.....	8
2.3 <i>Incremental Rotary Encoder</i>	9
2.4 PLC Mitsubishi Seri Q	10
2.4.1 <i>GT Works 2</i>	11
2.4.2 <i>GT Designer 3</i>	12
2.5 Inverter 3 Fasa (<i>Variable Frequency Drive</i>).....	13
2.6 Identifikasi Sistem	13
2.6.1 Identifikasi Statis.....	14
2.6.2 Metode Identifikasi Sistem Tanpa Osilasi	15
2.6.2.1 Metode Vitecková Orde 1	16
2.6.2.2 Metode Vitecková Orde 2.....	16
2.6.2.3 Metode Latzel	17
2.6.2.4 Metode Strecj.....	17
2.6.2.5 Metode Sundaesan & Krishnaswamy.....	19
2.7 ISE (<i>Integral Square Error</i>)	19

2.8 Kontroler Logika <i>Fuzzy</i>	20
2.8.1 Himpunan <i>Fuzzy</i>	20
2.8.2 Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i>	20
2.8.3 Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i>	22
2.8.4 Sistem Kontrol <i>Fuzzy</i>	23

BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1 Desain Sistem	27
3.2 Perancangan Perangkat Keras	28
3.2.1 Perancangan Mesin Sentrifugal	29
3.2.2 Motor Induksi 3 Fasa	29
3.2.3 Perancangan Rangkaian Penguat Tegangan	30
3.2.4 <i>Inverter</i>	32
3.2.5 Sensor <i>Rotary Encoder</i>	33
3.2.6 Panel Kontrol.....	35
3.3 Identifikasi <i>Plant</i>	36
3.3.1 Pembebanan Sentrifugal	36
3.3.2 Metode Identifikasi	37
3.3.3 Identifikasi Beban Nominal	40
3.4 Perancangan Kontroler Logika <i>Fuzzy</i>	40
3.4.1 Fungsi Keanggotaan Masukan dan Keluaran	40
3.4.2 Basis Aturan dan Mekanisme Inferensi	42
3.4.3 Defuzifikasi	43
3.5 Perancangan Kontroler PID	43
3.6 Perancangan Perangkat Lunak	45
3.6.1 <i>GX Work2</i>	45
3.6.2 <i>MX Component</i>	48
3.6.3 <i>MX-Sheet</i>	49
3.6.4 <i>Human Machine Interface (HMI) GT-Designer 3</i>	51

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian <i>Hardware</i>	53
4.1.1 Pengujian <i>Operational Amplifier</i> dan <i>Inverter Micromaster</i>	53
4.1.2 Pengujian <i>Inverter</i>	54
4.2 Pengujian Sistem <i>Open Loop</i>	56
4.3 Simulasi Kontroler Logika <i>Fuzzy</i>	58
4.4 Implementasi Dengan Kontroler PID.....	61

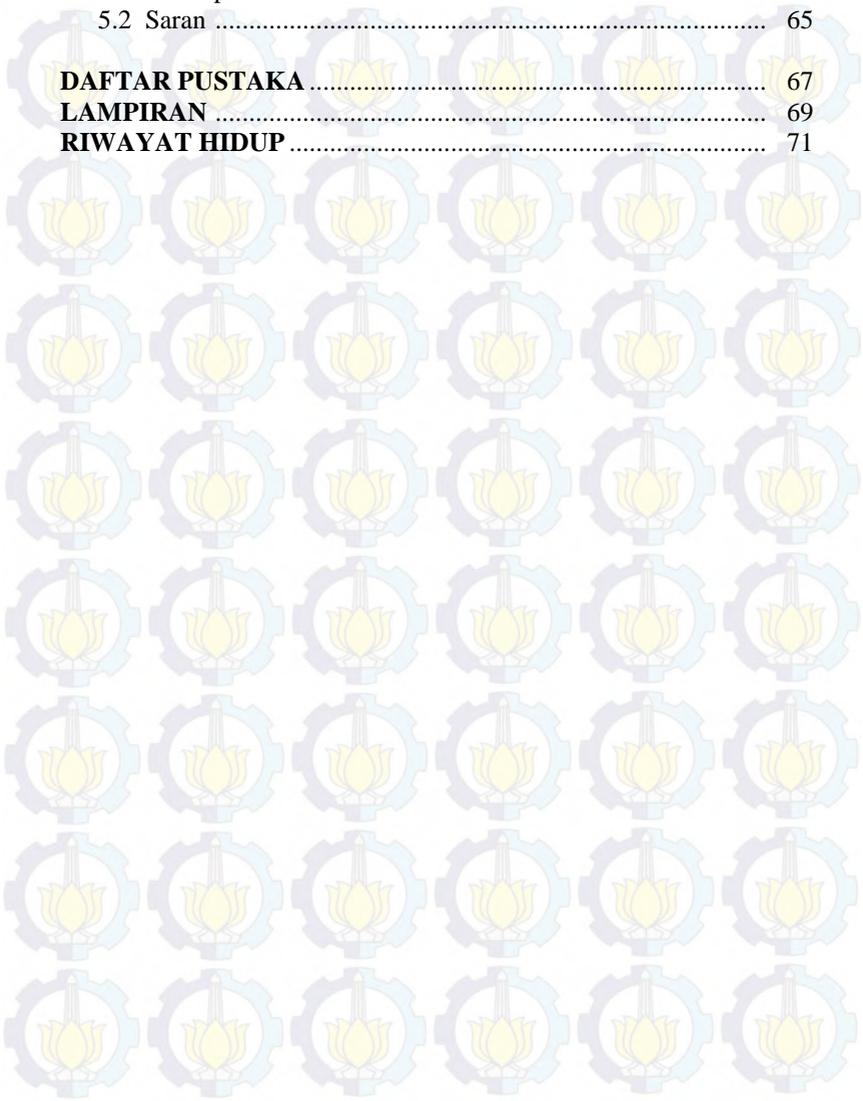
BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan 65
5.2 Saran 65

DAFTAR PUSTAKA 67

LAMPIRAN 69

RIWAYAT HIDUP 71





Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang, permasalahan, batasan masalah, dan tujuan dari Tugas Akhir ini. Selain itu, dijelaskan juga sistematika dalam pengerjaan Tugas Akhir serta relevansinya untuk penelitian berikutnya.

1.1 Latar Belakang

Mesin sentrifugal adalah mesin yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal. Mesin ini digunakan pada proses di industri yang dalam proses pembuatan produk menggunakan reaksi kimia, contohnya pada industri gula digunakan sebagai pemisah cairan *massecuite* dengan *strup* agar didapat kristal gula. Oleh karena itu, mesin sentrifugal banyak ditemui pada Pabrik Gula yang ada di Indonesia. Pentingnya pemanfaatan mesin sentrifugal ini membutuhkan proses pengaturan kecepatan yang sesuai yaitu proses *charging*, *spinning* dan *discharging*.

Pada penelitian [1] menggunakan kontroler *linear quadratic tracking* dan penelitian [2] menggunakan kontroler *sliding mode control*. Bedanya pada [1] menggunakan sensor tachogenerator dan [2] menggunakan sensor.

Karakteristik kerja dari mesin sentrifugal yaitu, *charging*, *spinning*, dan *discharging*. Karakteristik kerja tersebut membutuhkan kestabilan kecepatan. Oleh karena itu dibutuhkan suatu cara untuk dapat mengatur kecepatan dari mesin sentrifugal. Karena karakteristik dari kecepatan sentrifugal tersebut, maka dibutuhkan kontroler yang dapat mengatasi hal itu. Metode kontrol yang akan digunakan yaitu kontroler logika *fuzzy* (KLF).

Melalui Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa Pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Kontroler Logika *Fuzzy*” diharap dapat menjadi referensi untuk menangani masalah pengaturan kecepatan motor pada mesin sentrifugal ini secara baik. Selain itu juga dapat membantu meningkatkan efisiensi mesin sentrifugal..

1.2 Permasalahan

Motor tiga fasa banyak digunakan pada proses produksi pada proses industri. Salah satunya pada mesin sentrifugal dimana,

pengaturan mesin sentrifugal masih dilakukan secara manual yaitu dengan merubah posisi puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal sehingga kecepatan putaran mesin tidak dapat sesuai dengan sinyal referensi yang mempengaruhi kualitas dari produk yang dihasilkan. Dalam Tugas Akhir ini masalah yang akan dibahas mengenai kesulitan dalam mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa pada mesin sentrifugal sehingga kecepatannya sesuai dengan tahapan siklus dari mesin sentrifugal dan mampu tetap stabil walaupun mendapat gangguan

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Analisa pengukuran hanya ditekankan pada *error steady state*
2. Metode identifikasi secara statis tanpa memperhitungkan identifikasi fisik pada mesin sentrifugal

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah membuat perancangan dan implementasi untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa pada mesin sentrifugal menggunakan kontroler logika *fuzzy* sehingga percepatan dan perlambatan dari perubahan kecepatan sesuai dengan tahapan pada siklus dari mesin sentrifugal tersebut yaitu *charging*, *spinning* dan *discharging*.

1.5 Sistematika Penulisan

Pembahasan dalam Tugas Akhir ini akan dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika, dan relevansi.

Bab 2 : Teori Penunjang

Bab ini menjelaskan tentang tinjauan pustaka meliputi , Mesin sentrifugal, motor induksi tiga fasa, *incremental* , PLC Mitsubishi seri-Q, identifikasi sistem, *integral square error* (ISE), kontroler logika *fuzzy* .

Bab 3 : Perancangan Sistem

Bab ini membahas desain sistem, perancangan perangkat keras, identifikasi plant, perancangan kontroler logika *fuzzy*, dan kontroler PID.

Bab 4 : Pengujian dan Analisa

Bab ini berisi pengujian perangkat keras sistem, pengujian sistem open loop, simulasi kontroler, logika *fuzzy*, implementasi kontroler PID

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa pada mesin sentrifugal yang banyak digunakan di industri proses untuk proses pemisahan pemisahan *massecuite* dari *strup* dengan memanfaatkan gaya sentrifugal

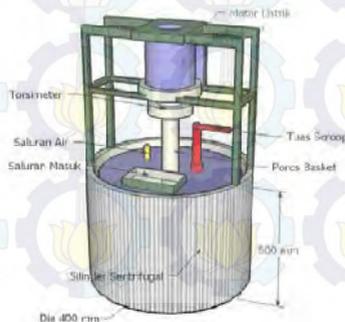
BAB 2

TEORI PENUNJANG

Pada bab ini akan dibahas mengenai materi dasar dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Beberapa hal yang dibahas meliputi tinjauan pustaka mengenai penelitian yang berkaitan, mesin sentrifugal, motor induksi tiga fasa, *Incremental*, PLC mitsubishi, inverter tiga fasa, idenfikasi sistem, dan kontroler logika *fuzzy*.

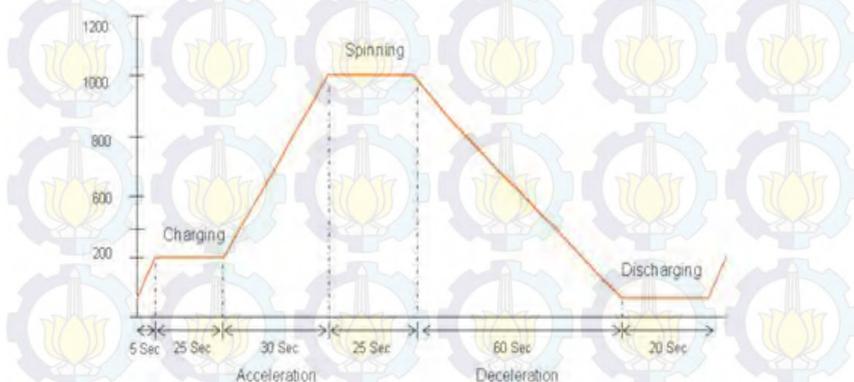
2.1 Mesin Sentrifugal [3],[4]

Gaya sentrifugal (F_s) adalah gaya gerak melingkar yang berputar menjauhi pusat lingkaran dimana nilainya adalah positif. Gaya sentrifugal ini adalah kebalikan dari gaya sentripetal, yang mendekati pusat lingkaran. Contoh dari aplikasi penggunaan gaya sentrifugal pada industri dapat dilihat pada mesin sentrifugal/stasiun putaran (Pabrik Gula). Dinamakan mesin sentrifugal karena mesin tersebut bekerja dengan gaya sentrifugal, dimana mesin berputar dengan kecepatan tinggi untuk memisahkan cairan dengan cairan lainnya dengan cairan lain, misalnya dalam proses memisahkan kristal gula dan *strup* pada *massecuite*. *Massecuite* yaitu krital gula yang masih mengandung lapisan-lapisan *strup* disekelilingnya. Pada Tugas Akhir ini, proses yang akan dibahas adalah proses sentrifugal pada Pabrik Gula khususnya pada Stasiun Putaran. Pada alat sentrifugal ini memiliki dinding yang memiliki pori-pori, sistem kerjanya yaitu dengan menggunakan gaya sentrifugal sehingga ketika diputar larutan akan tersaring dan kristal gula tertinggal dalam mesin. Mesin sentrifugal dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Prototipe Mesin Sentrifugal [1]

Proses sentrifugal adalah suatu proses yang relatif sulit karena pada proses ini perlu dilakukan pengaturan percepatan dan perlambatan dari beban yang memiliki inersia yang tinggi dan berubah pada setiap tahapan *charging*, *spinning* dan *discharging* dalam satu siklus operasional mesin sentrifugal. Pada pengaturan kecepatan sebelumnya suatu mesin sentrifugal umumnya dilakukan secara mekanik yaitu dengan cara merubah puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal. Pengaturan motor dengan metode ini mengakibatkan arus awal yang sangat tinggi diambil dari jaringan listrik terutama pada saat sentrifugal melakukan percepatan dan penggantian kutub. Secara periodik selama proses sentrifugal berlangsung seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2, terus-menerus terjadi pembebanan lebih pada komponen breaker, kontaktor, transmisi mesin dan juga pada motor induksi itu sendiri. Hal inilah yang menyebabkan biaya perawatan yang tinggi pada mesin sentrifugal.



Gambar 2.2 *Setting* Kecepatan Motor Sentrifugal [4]

Waktu yang dibutuhkan setiap siklus ini tergantung dari Inersia mesin sentrifugal yang digunakan. Selain itu tahapan dalam proses sentrifugal seperti *charging*, *spinning* dan *discharging* juga berbeda-beda pada setiap mesin sentrifugal, hal tersebut tergantung dari kualitas *massecuite* yang diputar.

2.2 Motor Induksi Tiga Fasa [5]

Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik yang banyak digunakan dan sangat berperan penting dalam berbagai aplikasi di industri. Motor ini banyak digunakan karena memiliki konstruksi yang sederhana, kokoh, harga yang relatif murah dan perawatannya yang mudah. Pada penerapannya, motor induksi masih memiliki kelemahan dibandingkan dengan motor DC yaitu dalam hal pengaturan kecepatan. Pengaturan kecepatan dari motor induksi sangat sulit untuk dilakukan.

Motor induksi adalah suatu mesin listrik yang merubah energi listrik menjadi energi gerak dengan menggunakan gandengan medan listrik dan mempunyai *slip* antara medan stator dan medan rotor. Stator adalah bagian dari mesin yang tidak berputar dan terletak pada bagian luar, dan terbuat dari besi bundar berlaminasi. Rotor adalah bagian dari mesin yang berputar bebas, terletak di bagian dalam dan terbuat dari besi laminasi yang mempunyai slot dengan batang aluminium/tembaga yang dihubungkan singkat pada ujungnya. Keuntungan yang dimiliki motor induksi tiga fasa sebagai berikut:

- Memiliki konstruksi yang sangat kuat dan sederhana
- Memiliki Harga yang relatif murah dan kehandalan yang tinggi.
- Memiliki efisiensi yang relatif tinggi pada keadaan normal, dan tidak ada sikat sehingga rugi gesekan kecil.
- Biaya pemeliharaan rendah.

Kerugian yang dimiliki motor induksi tiga fasa sebagai berikut:

- Kecepatan dari motor induksi yang sulit untuk dikontrol.
- Power faktor rendah pada beban ringan.

Arus *starting* pada motor induksi biasanya 5 sampai 7 kali dari arus nominal.

2.2.1 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa [6]

Pada motor induksi tidak terdapat hubungan listrik antara stator dan rotor, karena arus pada rotor merupakan arus induksi. Prinsip kerja dari motor induksi tiga fasa dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Ketika sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator, maka akan timbul kecepatan medan putar yang dirumuskan yaitu $ns = 120f/P$ (ns = kecepatan medan putar stator, f = frekuensi sumber, P = jumlah kutub)
2. Medan putar stator akan memotong konduktor yang terdapat pada sisi rotor, sehingga pada kumparan rotor akan timbul

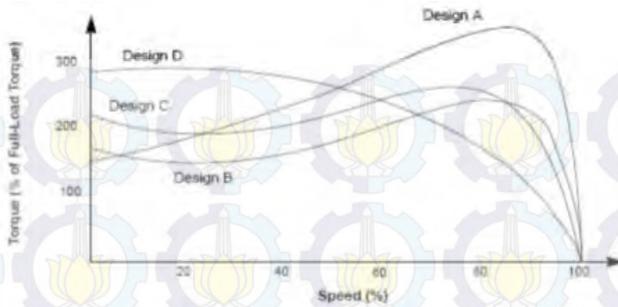
tegangan induksi (ggl) sebesar $E = 44,4fn\Phi$ (E = tegangan induksi (ggl), f = frekuensi, n = jumlah lilitan, Φ = fluks)

3. Selanjutnya tegangan induksi akan menghasilkan arus (I) karena kumparan rotor merupakan kumparan rangkaian tertutup
4. Adanya arus dalam medan magnet akan menimbulkan gaya (F) pada rotor.
5. Apabila torsi awal yang dihasilkan oleh gaya F pada rotor cukup besar untuk memikul torsi beban, maka rotor akan berputar searah dengan arah medan putar stator.
6. Untuk membangkitkan tegangan induksi E agar tetap ada, maka diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan putar rotor (n_r)
7. Perbedaan antara kecepatan n_r dengan n_s disebut dengan *slip* (S) yang dinyatakan dengan Persamaan $S = ((n_s - n_r) / n_s) (100\%)$
8. Apabila $n_s = n_r$, maka tegangan akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada rotor, sehingga tidak ada torsi yang dapat dihasilkan (Torsi suatu motor akan timbul apabila $n_s > n_r$).

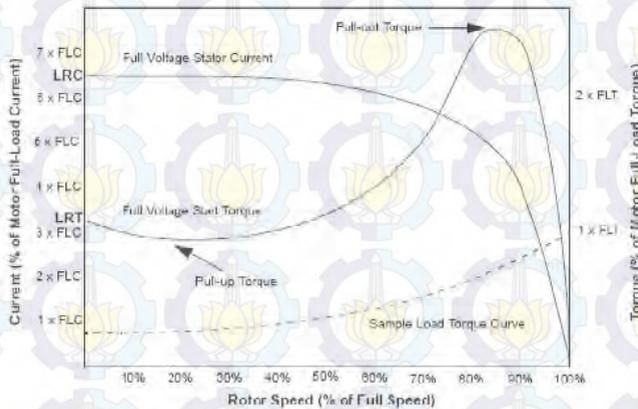
2.2.2 Hubungan Antara Beban, Kecepatan dan Torsi [6]

Torsi berbanding lurus dengan arus rotor ketika motor beroperasi secara normal. Arus rotor meningkat dengan proporsi yang sama dengan *slip*. Perubahan torsi terhadap *slip* menunjukkan bahwa torsi akan naik secara linier ketika *slip* naik dari 0%-10%. Ketika torsi dan *slip* naik melebihi torsi beban penuh, maka torsi akan mencapai harga maksimum sekitar 25% *slip*. Torsi maksimum disebut *breakdown torque* motor. Jika beban dinaikkan melebihi titik ini, motor akan *stall* dan segera berhenti.

Umumnya, *breakdown torque* bervariasi dari 200 hingga 300% torsi beban penuh. Torsi awal (*starting torque*) adalah nilai torsi pada 100% *slip* dan normalnya 150 hingga 200% torsi beban penuh. Torsi akan naik hingga *breakdown torque* seiring dengan pertambahan kecepatan dari rotor, dan turun mencapai nilai yang diperlukan untuk menarik beban motor pada kecepatan konstan, biasanya antara 0–10%. Karakteristik torsi terhadap kecepatan ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Karakteristik Torsi Terhadap Kecepatan

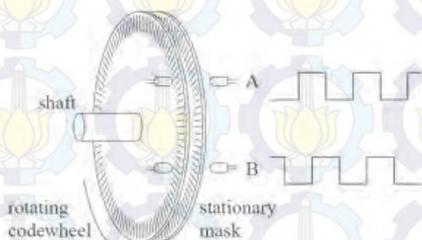


Gambar 2.4 Arus, Kecepatan dan Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

2.3 Incremental Rotary Encoder [7]

Incremental encoder adalah jenis sensor yang paling sesuai untuk mendeteksi kecepatan motor dibandingkan dengan jenis *absolute*. *Incremental encoder* terdiri dari dua *track* atau *single track* dan dua sensor yang disebut *channel A* dan *B*. Ketika poros berputar, deretan pulsa akan muncul di masing-masing *channel* pada frekuensi yang proporsional dengan kecepatan putar sedangkan hubungan fasa antara *channel A* dan *B* menghasilkan arah putaran. Dengan menghitung jumlah pulsa yang terjadi terhadap resolusi piringan maka putaran dapat diukur.

Untuk mengetahui arah putaran, dengan mengetahui *channel* mana yang *leading* terhadap *channel* satunya dapat kita tentukan arah putaran yang terjadi karena kedua *channel* tersebut akan selalu berbeda fasa seperempat putaran (*quadrature signal*).



Gambar 2.5 Susunan Piringan Untuk *Incremental Encoder*

2.4 PLC Mitsubishi Seri Q [8]

Tipe *Q - Series* merupakan PLC seri terbaru dari PLC Mitsubishi atau merupakan evolusi dari tipe *A - Series*. Tipe *Q - Series* ini paling banyak digunakan di industri-industri. Hal ini disebabkan karena beberapa keunggulan-kunggulannya yang meliputi :

1. *Program Memory* yang lebih banyak sehingga lebih banyak *points* (I/O) yang dapat disimpan dalam *memory*.
2. Desain lebih kecil daripada tipe sebelumnya (*A-Series*).
3. *Easy Maintenance* (mudah dalam perawatan).
4. *Basic Instruction Processing Speed* sangat cepat.



Gambar 2.6 PLC Mitsubishi seri-Q

Modul kontroler merupakan pusat pemrosesan dari algoritma-algoritma PID, berbentuk PLC modular. Konfigurasi *modul controller* dapat dilihat di Gambar 2.6.

Komponen pada modul PLC Mitsubishi Seri Q CPU 02 terdiri dari 6 modul, yaitu: modul *power supply*, CPU, *digital input*, *digital output*, *analog input*, *analog output*, dan modul *High Speed Counter*. Spesifikasi dari modul-modul yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. *Power supply* (Q61P)

Masukan *power supply* (100 – 240 VAC), keluaran 5 VDC (6A).

2. CPU (Q02HCPU)

Kapasitas *program* (28 kstep), kecepatan pemrosesan (0,034 μ sec), tipe memori (standar ROM). *Digital input* QX42 terdiri dari 64 *point*, 32 *point* dan 32 *common*, dengan tegangan 24VDC *input* (4mA), dan tipe pengkabelannya menggunakan *sink type*.

3. *Digital output* (QY42P)

Terdiri dari 64 *point*, 32 *point* dan 32 *common*, dengan tegangan 12 to 24 VDC, Dan sudah didukung dengan perlindungan termal dan *shortcircuit* sertategangan kejut.

4. *Analog Input* (Q64AD)

Total *channel analog* (4 *channel*), *range* konversi dari *analog* ke *digital* adalah 0 – 5 V DC linier dengan nilai digital 0 – 4000.

5. *Analog Output* (Q62DA)

Total *channel analog* (2 *channel*), *range* konversi dari *digital* ke *analog* adalah 0 – 5 VDC linier dengan nilai digital 0 – 4000.

6. *High Speed Counter* (QD62)

Modul *High speed counter* merupakan suatu modul yang dapat membacaperubahan masukan *digital* dengan cara *increment* atau *decrement* dalam frekuensi yang tinggi.

Total *channel* (2 ch), *range* pembacaan pulsasecara inc/dec antara - 2147483648 hingga 2147483647, frekuensi maksimum berbentuk pulsa yang dapat dibaca sebesar 200 kilo *pulse* perseconds. Untuk modul QD62 memiliki masukan berupa *DC input* dan keluaran *Sink Output*.

2.4.1 GX Works2

GX Works2 adalah generasi terbaru dari *Mitsubishi Automation* untuk konfigurasi dan pemrograman PLC seri FX dan seri Q. Tujuan di menggunakan *GX Works2* adalah untuk efisiensi yang maksimum dalam

pemrograman. Sebelum *GX Works2* muncul, pemrograman PLC Mitsubishi Seri Q bisa dilakukan dengan *software GX Developer*. *GX-Developer* merupakan sebuah program aplikasi dari modul PLC Mitsubishi yang dikeluarkan oleh Mitsubishi yang berbasis *Windows* seperti *windows 98, XP* ataupun *Windows7*. Program pendukung ini bertujuan agar setiap pengguna personal komputer yang bermaksud menggunakan PLC sebagai alat kontrol dapat berkomunikasi dengan PLC itu sendiri.

2.4.2 GT Designer3

Human Machine Interface merupakan piranti yang berfungsi sebagai media komunikasi antara operator dengan mesin, dalam hal ini PLC. *GT Designer3* merupakan *software HMI (Human Machine Interface)* yang memiliki lisensi dari *Mitsubishi Electric*. Untuk menjalankan *Human Machine Interface* secara *real time*, *software* yang digunakan adalah *software runtime license Mitsubishi Electric tipe GT16**-X(1024 x 768) v1.40S*.

Sebelum menjalankannya, yang harus dilakukan terlebih dahulu yaitu mengetahui Spesifikasi *Human Machine Interface*, Spesifikasi Konektivitas Pengendali, Spesifikasi Media Komunikasi, Spesifikasi Driver Komunikasi dan Daftar Divais pada tampilan *Human Machine Interface*.

1. Spesifikasi *Human Machine Interface*

Spesifikasi *Human Machine Interface* digunakan untuk mengetahui tipe dari *Graphic Operation Terminal (GOT)*, resolusi yang digunakan untuk tampilan dan *setting-an* warna yang digunakan.

2. Spesifikasi Konektivitas Pengendali

Spesifikasi konektivitas pengendali digunakan untuk inialisasi pabrikasi yang digunakan karena *GT Designer* tidak hanya digunakan untuk *brand Mitsubishi* saja karena bisa juga untuk *Allen Bradley, Siemens, Yokogawa* dsb. Selain itu spesifikasi konektivitas pengendali juga digunakan untuk inialisasi CPU yang digunakan.

3. Spesifikasi Media Komunikasi

Spesifikasi komunikasi untuk inialisasi komunikasi data menggunakan *ethernet, RS-232* dsb, sesuai dengan media komunikasi yang digunakan.

4. Spesifikasi *Driver* Komunikasi

Spesifikasi *driver* komunikasi digunakan untuk inisialisasi *driver* komunikasi yang digunakan, supaya nantinya PLC bisa terhubung dengan *Human Machine Interface* agar bisa di kontrol, di monitor dan *data record* dari sistem yang dirancang

2.5 Inverter 3 fasa (*Variable Frequency Drive*) [9]

Inverter adalah sebuah alat yang mengubah listrik arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Dengan menggunakan transformator, *switching*, serta rangkaian kontrol tegangan dan frekuensi yang dapat diatur sesuai dengan kebutuhan. Dikarenakan hasil yang didapatkan berupa tegangan atau frekuensi yang dapat diatur, maka *inverter* dapat diaplikasikan sebagai pengatur kecepatanrotasi sebuah motor listrik AC. Aplikasi ini dikenal dengan sebutan *Variable Frequency Drive* (VFD) atau *Inverter Drive*.

Agar *inverter* dapat bekerja sesuai dengan deskripsi yang diinginkan oleh *user* maka dibutuhkan parameter *setting*. Parameter *setting* berfungsi sebagai batasan operasional pengaman *inverter* serta mode operasional *inverter*. Beberapa parameter, diantaranya: Batasan frekuensi *maximum*, Batasan frekuensi *minimum*, mode pengoperasian (*network*, parameter unit, eksternal), dan lain-lain.

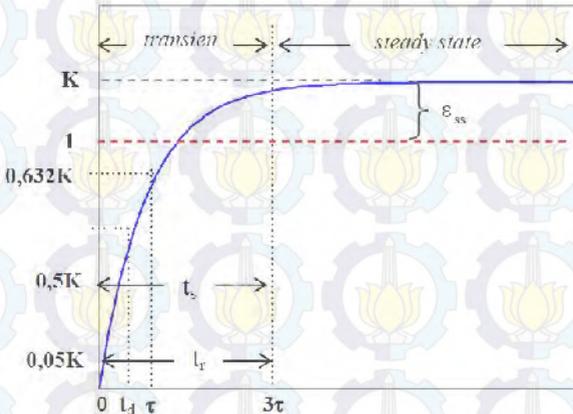
2.6 Identifikasi Sistem

Identifikasi merupakan salah satu tahap dalam melakukan penelitian untuk mendapatkan model matematik dari suatu sistem. Model matematik sistem diperlukan untuk menggambarkan hubungan masukan dan keluaran sistem. Metode identifikasi adalah suatu metode yang menggunakan hubungan data masukan dan keluaran yang selanjutnya dilakukan pengujian dan analisa dengan metode pendekatan, sehingga dapat ditentukan nilai parameter secara analitik. Beberapa sinyal masukan yang dapat digunakan untuk mendapatkan respon suatu sistem seperti sinyal *step*, *ramp*, *impulse*, dan *sinusoidal*.

Terdapat dua macam identifikasi sistem yaitu identifikasi statis dan identifikasi dinamis. Pada identifikasi statis, sinyal yang diberikan berupa sinyal *step* yang konstan sampai sistem mencapai keadaan . Pada identifikasi dinamis, sinyal yang digunakan berupa sinyal acak (*random*).

2.6.1 Identifikasi Statis [10],[11]

Suatu sistem disebut orde satu atau pendekatan orde satu apabila dilihat secara grafis memiliki bentuk respon seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.7 Karakteristik Respon Orde Satu [10]

Karakteristik respon sistem orde satu dilihat berdasarkan respon sistem ketika sistem diberi masukan sinyal *step*. Karakteristik sistem orde satu dibedakan menjadi karakteristik respon *transien* dan karakteristik respon keadaan tunak atau . Model matematika sistem orde satu dirumuskan dengan:

$$G = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

Berdasarkan Persamaan 2.11, terdapat 2 parameter yaitu K yang menyatakan *gain overall* dan τ yang menyatakan *time constant* (konstanta waktu). Nilai K merupakan hasil perhitungan dari Persamaan 2.2:

$$G = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (2.2)$$

dengan Y_{ss} adalah keluaran saat dan X_{ss} adalah masukan saat .

Terdapat 2 macam karakteristik respon pada orde satu yaitu karakteristik respon *transien* dan . Karakteristik respon *transien* pada orde satu terdiri dari:

1. Spesifikasi Teoritis

Time constant atau konstanta waktu (t) adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t = 0$ sampai respon mencapai 63,2% dari respon . Konstanta waktu menyatakan kecepatan respon sistem. Konstanta waktu yang lebih kecil akan mempercepat respon sistem.

2. Spesifikasi Praktis

a) *Settling time* atau waktu tunak (t_s) adalah ukuran waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah masuk pada daerah. Jika dihubungkan dengan konstanta waktu , maka t_s dapat dirumuskan dengan :

$$t_s (\pm 5\%) = 3t \quad (2.3)$$

$$t_s (\pm 2\%) = 4t \quad (2.4)$$

$$t_s (\pm 0,5\%) = 5t \quad (2.5)$$

b) *Rise time* atau waktu naik (t_r), adalah ukuran waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah naik dari 5% ke 95% atau 10% ke 90% dari nilai respon *steady state*.

$$t_r (5\% - 95\%) = \ln 19 \quad (2.6)$$

$$t_r (10\% - 90\%) = \ln 9 \quad (2.7)$$

c) *Delay time* atau waktu tunda (t_d), adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t = 0$ sampai respon mencapai 50% dari nilai *steady state*. Waktu tunda menyatakan besarnya faktor keterlambatan respon akibat proses *sampling*.

$$t_d = t \ln 2 \quad (2.8)$$

Karakteristik respon sistem orde satu diukur berdasarkan kesalahan pada keadaan tunak atau (e_{ss}), yaitu:

$$e_{ss} = Y_{ss} - X_{ss} \quad (2.9)$$

2.6.2 Metode Identifikasi Sistem Tanpa Osilasi [12]

Identifikasi sistem tanpa osilasi dengan masukan respon *step* dapat dilakukan dengan beberapa metode. Pada subbab ini dijelaskan 5 metode, antara lain:

1. Metode Víteková Orde 1
2. Metode Víteková Orde 2
3. Metode Latzel
4. Metode Strejc

5. Metode Sundaresan & Krishnaswamy

Untuk semua metode, terdapat *gain overall* yaitu K . Dimana K adalah hasil perhitungan keluaran dibagi dengan masukan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (2.10)$$

dengan Y_{ss} adalah keluaran saat *steady state* dan X_{ss} adalah masukan saat *steady state*.

2.6.2.1 Metode Vítecková Orde 1

Metode ini didekati dengan pendekatan orde 1 dengan kemungkinan adanya *time delay* (penundaan waktu). Fungsi alih untuk metode Vítecková Orde 1 diberikan pada Persamaan 2.11.

$$G_{V1} = \frac{K}{\tau_{V1}s+1} e^{-T_{dv1}s} \quad (2.11)$$

dimana T_{dv1} adalah *time delay*:

$$T_{dv1} = 1,498 t_{33} - 0,498 t_{70} \quad (2.12)$$

dan τ_{V1} adalah konstanta waktu:

$$\tau_{V1} = 1,245 (t_{70} - t_{33}) \quad (2.13)$$

dengan t_{33} dan t_{70} adalah waktu saat respon berada pada kondisi 33% dan 70% dari keluaran *steady state* (Y_{ss}). Jika T_{dv1} bernilai kurang dari 0 atau negatif, maka sistem dianggap tidak memiliki *time delay*.

2.6.2.2 Metode Vítecková Orde 2

Metode ini didekati dengan pendekatan orde 1 dengan kemungkinan adanya *time delay* (penundaan waktu). Fungsi alih untuk metode Vítecková Orde 1 diberikan pada Persamaan 2.14.

$$G_{V2} = \frac{K}{\tau_{V2}s+1} e^{-T_{dv2}s} \quad (2.14)$$

dimana T_{dv1} adalah *time delay*:

$$T_{dv2} = 1,937 t_{33} - 0,937 t_{70} \quad (2.15)$$

dan τ_{V1} adalah konstanta waktu:

$$\tau_{V1} = 1,245 (t_{70} - t_{33}) \quad (2.16)$$

dengan t_{33} dan t_{70} adalah waktu saat respon berada pada kondisi 33% dan 70% dari keluaran *steady state* (Y_{ss}). Jika T_{dv1} bernilai kurang dari 0 atau negatif, maka sistem dianggap tidak memiliki *time delay*.

2.6.2.3 Metode Latzel

Metode Latzel didekati dengan pendekatan fungsi alih yang diberikan pada Persamaan 2-14.

$$G_L = \frac{K}{(\tau_L s + 1)^n} \quad (2.14)$$

dimana τ_L adalah konstanta waktu:

$$\tau_L = a_{10}t_{10} + a_{50}t_{50} + a_{90}t_{90} \quad (2.15)$$

dengan t_{10} , t_{50} , dan t_{90} adalah waktu saat respon berada pada kondisi 10%, 50%, dan 90% dari keluaran *steady state* (Y_{ss}). Untuk mendapatkan a_{10} , a_{50} , dan a_{90} terlebih dahulu dicari nilai parameter μ yang dirumuskan dengan:

$$\tau_L = \frac{t_{10}}{t_{90}} \quad (2.16)$$

Setelah diperoleh parameter μ dapat diperoleh parameter μ_a . Nilai parameter μ_a ditunjukkan pada Tabel 2.1. Dari nilai μ_a yang ada pada tabel, diperoleh order n , dan parameter a_{10} , a_{50} , dan a_{90} .

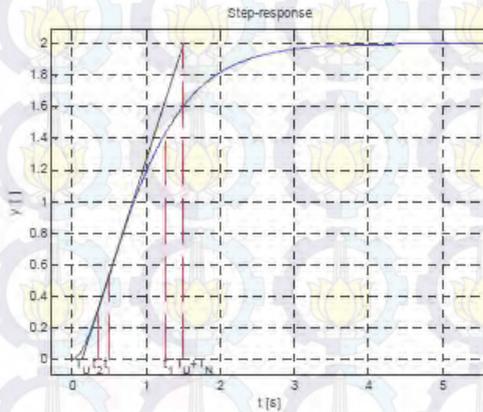
Tabel 2.1 Paramater untuk Metode Latzel

μ_a	N	a_{10}	a_{50}	a_{90}	μ_a	n	a_{10}	a_{50}	a_{90}
0,137	2,0	1,880	0,596	0,257	0,456	11	0,142	0,094	0,065
0,174	2,5	1,245	0,460	0,216	0,472	12	0,128	0,086	0,060
0,207	3,0	0,907	0,374	0,188	0,486	13	0,116	0,079	0,056
0,261	4,0	0,573	0,272	0,150	0,499	14	0,106	0,073	0,053
0,304	5,0	0,411	0,214	0,125	0,512	15	0,097	0,068	0,050
0,340	6,0	0,317	0,176	0,108	0,523	16	0,090	0,064	0,047
0,370	7,0	0,257	0,150	0,095	0,533	17	0,084	0,060	0,045
0,396	8,0	0,215	0,130	0,085	0,543	18	0,078	0,057	0,042
0,418	9,0	0,184	0,115	0,077	0,552	19	0,073	0,054	0,040
0,438	10,0	0,161	0,103	0,070	0,561	20	0,069	0,051	0,039

2.6.2.4 Metode Strecj

Metode ini dilakukan dengan menarik garis singgung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Fungsi alih untuk metode Strecj ditunjukkan pada Persamaan 2.33.

$$G_{ST}(s) = \frac{K}{(\tau_{ST} s + 1)^n} e^{-T_{dST} s} \quad (2.17)$$



Gambar 2.8 Penarikan Garis Singgung pada Metode Strecj

T_{dST} merupakan waktu tunda. Pada metode ini juga terdapat prosedur tertentu untuk mendapatkan τ_{ST} dan T_{dST} seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Prosedur untuk mendapatkan τ_{ST} dan T_{dST} sebagai berikut:

1. Menentukan titik belok pada grafik respons yang diidentifikasi
2. Menentukan garis singgung pada titik belok
3. Mendapatkan nilai T_u dan T_a
4. Mendapatkan nilai orde n , dimana nilai n sesuai dengan Tabel 2.2 ketika nilai T_u / T_a respon lebih besar dari pada T_u / T_a pada table 2.2.
5. Mendapatkan nilai τ_{ST} dengan menggunakan T_u / T_a pada tabel
6. Mendapatkan nilai T_u' yang dirumuskan:

$$T_u' = \frac{T_u}{T_a \text{ tabel}} \times T_a \quad (2.18)$$

7. Mendapatkan nilai T_{dST} yang dirumuskan:

$$T_{dST} = T_u - T_a \quad (2.19)$$

8. Apabila nilai T_{dST} bernilai negatif, maka n salah, dan kembali ke langkah 5.
9. Mensubstitusikan nilai n, τ_{ST} , dan T_{dST} pada Persamaan 2.17.

Tabel 2.2 Parameter untuk Metode Strecj

n	T_a / τ_{ST}	T_u / τ_{ST}	T_u / T_a
1	1,000	0,000	0,000
2	2,718	0,282	0,104
3	3,695	0,805	0,218
4	4,463	1,425	0,319
5	5,119	2,100	0,410

2.6.2.5 Metode Sundaresan & Krishnaswamy

Metode ini dilakukan dengan melakukan pendekatan orde satu dengan kemungkinan adanya waktu tunda. Fungsi alih untuk metode Sundaresan & Krishnaswamy ditunjukkan pada Persamaan 2-20.

$$G_{SK}(s) = \frac{K}{\tau_{SK} s + 1} e^{-T_{dSK} s} \quad (2.20)$$

T_{dSK} adalah waktu tunda

$$T_{dSK} = 1,3 t_{35,3} - 0,29 t_{85,3} \quad (2.21)$$

τ_{SK} adalah konstanta waktu

$$\tau_{SK} = 0,67 (t_{85,3} - t_{35,3}) \quad (2.22)$$

$t_{35,3}$ dan $t_{85,3}$ merupakan waktu saat respon berada pada kondisi 35,3% dan 85,3% dari keluaran *steady state* (Y_{ss}). Apabila τ_{dSK} bernilai *negatif*, maka sistem dianggap tidak memiliki waktu tunda.

2.7 ISE (Integral Square Error) [12]

Integral Square Error atau ISE digunakan untuk mengetahui kualitas dari sistem (mengetahui kualitas hasil pemodelan terhadap respon plant sebenarnya). Perhitungan ISE dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (2.23)$$

di mana e adalah hasil pengurangan dari data hasil pemodelan dan data hasil pengukuran terhadap waktu. Nilai e tersebut kemudian dikuadratkan dan dijumlahkan sesuai dengan banyaknya data terhadap waktu.

Hasil perhitungan ISE menunjukkan seberapa baik fungsi alih merepresentasikan respon hasil pengukuran. Semakin kecil nilai dari ISE, maka semakin baik pula fungsi alih yang dibuat.

2.8 Kontroler Logika Fuzzy [13][14]

Konsep logika *fuzzy* pertama kali dikenalkan pada tahun 1965 oleh L.A. Zadeh dari universitas California Berkeley dalam makalah seminarnya yang berjudul “Set”. Pada konsep logika harga kebenaran diberikan dalam variabel bahasa (linguistik) dengan menyertakan sifat kekaburan (*fuzziness*) pada proposisinya. Harga kebenaran dan derajat kekaburan pada variabel linguistik dapat dinyatakan dengan tolok ukur, misalnya agak, cukup, sangat, dan sebagainya. Sehingga dalam logika memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1. Ini yang membedakan antara logika dan logika *Boolean* yang nilai keanggotaannya hanya 0 dan 1.

2.8.1 Himpunan Fuzzy

Suatu himpunan F dalam semesta X didefinisikan sebagai kumpulan pasangan elemen x dan fungsi keanggotaan $\mu_F(x)$. Fungsi keanggotaan $\mu_F(x)$ mempunyai nilai interval $[0, 1]$ pada tiap x dalam semesta X . Nilai fungsi keanggotaan menunjukkan tingkat keanggotaan elemen x dalam F . Tingkat keanggotaan 1 menunjukkan keanggotaan penuh (*full membership*), tingkat 0 menyatakan tanpa keanggotaan (*non membership*), tingkat antara 0 dan 1 menyatakan kekaburan antara keanggotaan penuh dan tanpa keanggotaan.

Tingkat keanggotaan inilah yang biasanya disebut tingkat logika. Himpunan pada F pada semesta pembicaraan X yang anggotanya berhingga, $X = \{ x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \}$ dapat dinyatakan dalam bentuk himpunan. Secara umum himpunan dinotasikan sebagai :

$$F = \{(x, \mu_F(x)) \mid x \in X\} \quad (2.24)$$

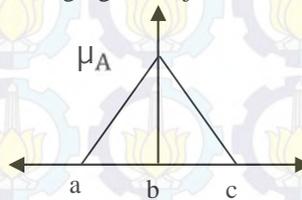
2.8.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Fungsi keanggotaan *fuzzy* adalah suatu fungsi untuk menyatakan hubungan antara sebuah masukan dengan sebuah himpunan. Untuk

menyatakan suatu fungsi keanggotaan dalam pendefinisian himpunan *fuzzy* tergantung pada metode yang akan digunakan. Secara umum ada dua metode yaitu pendefinisian secara numerik dan bentuk fungsi. Pendefinisian secara numerik diterapkan atas himpunan dengan pendukung diskrit, sedangkan pendefinisian bentuk fungsi diterapkan pada pendukung kontinyu. Beberapa jenis fungsi keanggotaan dan parameter yang biasa digunakan untuk menyatakan fungsi keanggotaan dari suatu masukan dapat dilihat pada Gambar 2.9, Gambar 2.10, dan Gambar 2.11.

1. Fungsi keanggotaan Segitiga (Triangular)

Fungsi keanggotaan segitiga (tringular) sesuai dengan namanya berbentuk segitiga dengan parameter a , b dan x . Fungsi keanggotaan segitiga ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



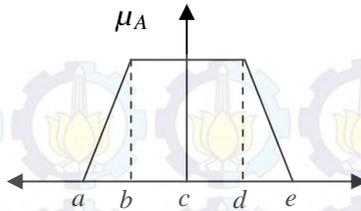
Gambar 2.9 Fungsi Keanggotaan Segitiga

$$\mu_A x = \begin{cases} 0, & x \leq a; x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (2.25)$$

2. Fungsi Keanggotaan Trapesium

Fungsi ini menggunakan parameter a dan b , dengan Persamaan (2.46), serta bentuk fungsi keanggotaan Trapesium dapat ditunjukkan pada Gambar 2.10.

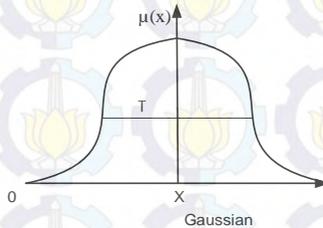
$$\mu_A x = \begin{cases} 0, & x \leq a; x \geq e \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq d \\ \frac{d-x}{d-c}, & d < x < e \end{cases} \quad (2.26)$$



Gambar 2.10 Fungsi Keanggotaan Trapesium

3. Fungsi Keanggotaan Gaussian

Fungsi ini menggunakan parameter x, \bar{x}, σ yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Fungsi Keanggotaan Gaussian

$$\mu_A x = \exp - \frac{1}{2} \frac{x - \bar{x}}{\sigma}^2 \quad (2.27)$$

2.8.3 Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi dasar yang berlaku pada himpunan A dan B dari semesta X dengan tingkat keanggotaan $\mu_A(x)$ dan $\mu_B(x)$ untuk $x \in X$ adalah sebagai berikut :

1. Dua himpunan A dan B dikatakan sama ($A = B$) apabila keduanya memiliki semesta yang sama dan fungsi keanggotaan yang sama. Hal ini dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.28.

$$\frac{\mu(x_A)}{x} = \frac{\mu(x_B)}{x}; x \in X \quad (2.28)$$

2. Gabungan dua himpunan A dan B ($A \cup B$) dinyatakan dengan persamaan 2.29.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) ; x \in X \quad (2.29)$$

3. Irisan dari himpunan A dan B ($A \cap B$) dinyatakan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.30.

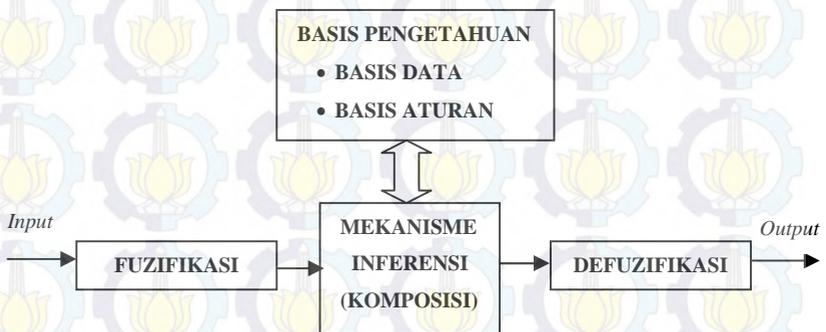
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) ; x \in X \quad (2.30)$$

4. Komplemen (operasi “NOT”) himpunan A dinotasikan dengan \bar{A} dapat dinyatakan pada Persamaan 2.31.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) ; x \in X \quad (2.31)$$

2.8.4 Sistem Kontrol *Fuzzy* [14]

Sistem kontrol *fuzzy* merupakan pemetaan dari masukan menjadi keluaran . Secara umum sistem kontrol terdiri dari empat bagian dasar yaitu fuzifikasi, aturan basis (*Rule Base*), inferensi , dan defuzifikasi. Proses pada sistem kontrol dimulai dari nilai masukan diubah menjadi himpunan melalui proses fuzifikasi. Selanjutnya himpunan masuk ke mekanisme inferensi untuk menentukan kesimpulan dengan mengacu pada *rule base*. Proses akhir masuk ke proses defuzifikasi untuk diubah menjadi keluaran . Sistem kontrol ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Sistem Kontrol *fuzzy*

1. Fuzifikasi

Fuzifikasi merupakan proses yang mengubah variabel nyata menjadi variabel . Hal ini bertujuan agar masukan kontroler bisa dipetakan menuju jenis yang sesuai dengan himpunan. Pemetaan dilakukan dengan bantuan model dari fungsi keanggotaan agar dapat diketahui besar masukan tersebut. Jenis fungsi keanggotaan terdiri dari berbagai macam yaitu bentuk segitiga, bentuk trapesium, dan bentuk *Gaussian*.

2. Aturan Basis (*Rule Base*)

Kaidah dasar yang berisi aturan-aturan secara linguistik yang menunjukkan kepakaran terhadap plant atau suatu aturan yang menghubungkan antara masukan dan aksi kontrol dari kontroler. Format yang paling umum adalah aturan *IF-THEN*, sebagai berikut:

IF premise THEN conclusion

3. Inferensi

Inferensi adalah sebuah proses formulasi pemetaan masukan terhadap keluaran dengan menggunakan logika. Proses dari inferensi melibatkan fungsi keanggotaan operator logika, dan aturan *IF-THEN*. Terdapat dua metode inferensi yang paling dikenal yaitu metode inferensi Mamdani dan metode inferensi Takagi-Sugeno. Pada metode Mamdani, menggunakan operasi *Max-Min* atau *Max-product* dalam memperoleh keluaran, sedangkan pada metode Takagi-Sugeno menggunakan fungsi keanggotaan keluaran yang bersifat linear atau konstan. Apabila keluaran linear $f(x,y)$, maka jika $f(x,y)$ polinomial orde satu, maka keluaran inferensi juga model sugeno orde satu, begitu sebaliknya. Apabila keluaran konstan, maka akan menghasilkan keluaran singleton (memiliki keluaran hanya pada masukan x). Metode inferensi Mamdani dan Takagi-Sugeno dapat dilihat ssebagai berikut:

- Metode Mamdani

$$\tilde{u}_u(k) = \max [\tilde{u}_u(k), \min \{ \tilde{u}_e(j), \tilde{u}_{de}(i) \}] \quad (2.32)$$

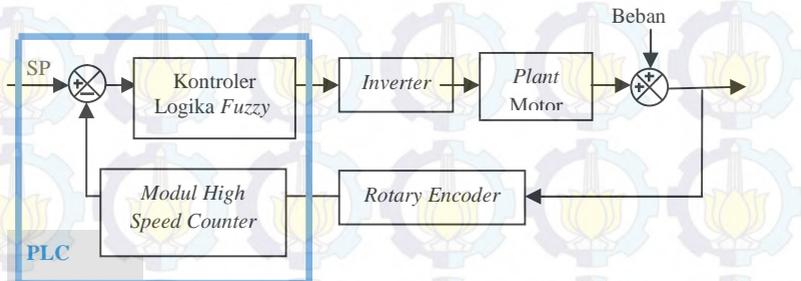
- Metode Takagi-Sugeno

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Bab 3 menjelaskan tentang perancangan sistem secara keseluruhan yang dibagi dalam 5 subbab yaitu disain sistem, perancangan perangkat keras, identifikasi plant, perancangan kontroler logika *fuzzy*, kontroler PID dan perancangan perangkat lunak.

3.1 Desain Sistem

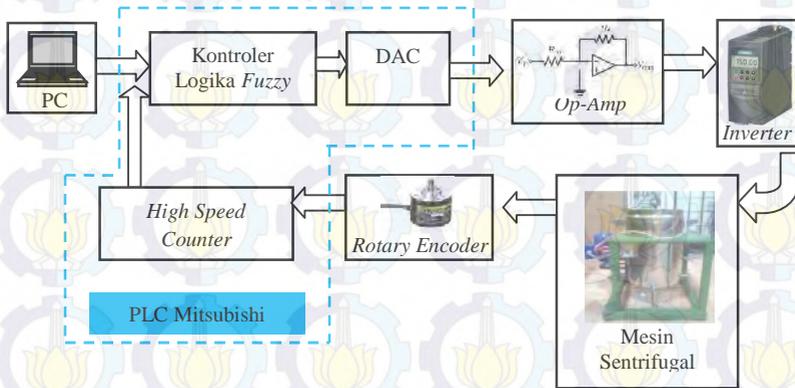
Sistem yang dirancang adalah sistem untuk mengendalikan tracking kecepatan motor induksi 3 fasa pada *plant* sentrifugal. sistem yang ingin dirancang seperti pada Gambar 3.1 Motor induksi dioperasikan pada tiga proses kecepatan yang diperlukan yakni *charging*, *spinning* dan *discharging* kemudian diberi beban sehingga kecepatannya cenderung menurun. Sistem kontrol adaptif digunakan untuk mengatur kecepatan motor agar saat diberi beban atau tanpa beban, kecepatan motor dapat dipertahankan secara konstan. Terdapat rangkaian *op-amp* yang digunakan untuk sinyal *conditioning* untuk mengubah tegangan dari DAC ke tegangan yang dibutuhkan oleh inverter untuk menggerakkan motor. Hasil pergerakan dari motor induksi dikopel dengan *rotary encoder* dan akan terbaca oleh modul *High Speed Counter* yang akan diumpungkan ke kontroler untuk diproses.



Gambar 3.1 Blok Sistem Kontrol Pengaturan Kecepatan Mesin Sentrifugal

3.2 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dari Tugas Akhir ini diantaranya merancang rangkaian pengkondisi sinyal, dan *hardware* pendukung lainnya. Sistem terdiri dari beberapa perangkat keras. Alur dari perangkat keras sistem secara spesifik diperlihatkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alur Arsitektur Perangkat Keras Sistem

Blok diagram diatas memperlihatkan bahwa untuk menjalankan motor induksi digunakan sebuah komputer yang berfungsi sebagai *Human Machine Interface* (HMI). HMI digunakan memonitoring nilai *setpoint*, *present value*, *error*, dan parameter kontrol. Kontroler logika fuzzy terdapat pada program dalam PLC yang secara langsung mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa agar sesuai dengan *input* yang diinginkan.. Sinyal kontrol dari MRAC berupa tegangan 0 – 5 VDC. Tegangan ini yang akan masuk ke *inverter* untuk diubah menjadi frekuensi (Hz).

Tegangan DC yang dapat terbaca oleh *inverter* berkisar antara 0 sampai 10 V dengan *range* frekuensi yang dihasilkan sebesar 0 – 50 Hz. Hal ini sesuai dengan spesifikasi *inverter* yang digunakan yaitu Siemens tipe Micromaster 420. Oleh karena itu diperlukan suatu rangkaian penguat dua kali *Operational Amplifier* agar tegangan DC yang dikeluarkan PLC menjadi 0 – 10 volt. Saat *inverter* mendapatkan tegangan DC yang sesuai maka tegangan tersebut akan diubah menjadi frekuensi (Hz) sehingga dapat memutar motor induksi 3 fasa. Poros

motor induksi dirancang dikopel dengan sensor yang dapat mendeteksi kecepatan (rpm) dengan cara mengkonversi jumlah pulsa yang dihasilkan dalam setiap putaran motor. *Output* sensor dapat langsung dibaca oleh modul QD62 (*High Speed Counter*) yang ada pada PLC Mitsubishi untuk diproses sebagai sebagai sinyal *feedback*.

3.2.1 Perancangan Mesin Sentrifugal

Prototipe mesin sentrifugal yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah mesin yang digunakan pada Tugas Akhir sebelumnya [1] dan [2]. Mesin sentrifugal yang digunakan telah dimodifikasi dengan memberikan tambahan tempat penompang mesin agar pada kondisi yang stabil dan konstruksi yang kokoh pada saat mesin sedang dioperasikan. Mesin yang dibuat berbahan stainless steel dan berbentuk tabung. Pada mesin ini terdapat dua bagian tabung yaitu bagian dalam dan luar, di bagian dalam terdapat tabung yang memiliki lubang kecil yang berfungsi sebagai pemisah antara larutan dengan padatan. Sedangkan pada bagian luar merupakan tabung yang tertutup. *Prototipe* ini juga terdapat saluran untuk keluarnya air dari proses sentrifugal. Berikut ini mesin sentrifugal yang telah dibuat dan digunakan pada Tugas Akhir yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



(a) Tampak Depan



(b) Tampak Atas

Gambar 3.3 Mesin Sentrifugal

3.2.2 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa yang diproduksi oleh Alliance-Italy dengan tipe IEC - 34 CE. Motor

induksi ini dihubungkan dengan *inverter* sebagai *driver*-nya. Konfigurasi yang digunakan untuk menghubungkan motor dengan *inverter* yaitu menggunakan hubungan secara *star*. *Inverter* akan mengubah arus DC dari *Programable Logic Controller* menjadi arus AC 3 fasa untuk mengatur putaran motor induksi tiga fasa.



Gambar 3.4 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi yang digunakan mempunyai spesifikasi, yang bisa dilihat pada *nameplate* Gambar 3.5.

Alliance - Italy		IEC 34 - CE
TYPE AY 638 - 4		No. 02030688
0,18 KW	0,25 HP	1,07 / 0,62 A
220 / 380 V	1310 r/min	LW 52 dB(A)
CONN. : / Y	PROT GRADE IP 55	50 Hz - 4,7 Kg
JB / T8680, 1-1998	Work Rule S1	INS. CLASS F DATE 02

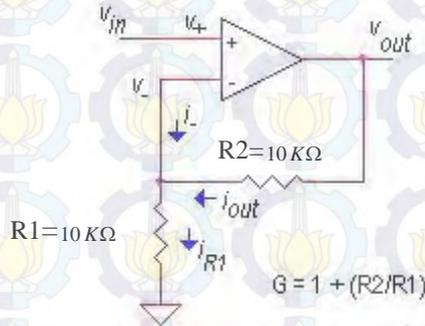
Gambar 3.5 *Nameplate* Motor 3 Fasa [13]

3.2.3 Perancangan Rangkaian Penguat Tegangan

Rangkaian penguat tegangan atau *Operational Amplifier* (Op-Amp) pada Tugas Akhir ini digunakan untuk menguatkan tegangan *output* yang dihasilkan oleh PLC Mitsubishi *Q-Series* (modul Q62DA). Hasil penguatan tegangan dari rangkaian *Operational Amplifier* (Op-Amp) digunakan untuk tegangan masukan *inverter*. Hal ini diperlukan karena tegangan masukan yang dibutuhkan oleh *inverter* sebesar 0-10 volt. Fungsi rangkaian Op-Amp disini adalah untuk menjembatani adanya perbedaan *range* tegangan kerja antara PLC dengan *inverter*.

Tegangan *output* PLC berkisar 0 – 5 V, sedangkan *inverter* memerlukan tegangan 0 – 10 V untuk menggerakkan motor.

Salah satu jenis rangkaian Op-Amp yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah rangkaian *non-inverting*. Rangkaian *non-inverting* ditunjukkan pada Gambar 3-6.



Gambar 3.6 Rangkaian Penguat Tegangan

Rumus perhitungan dari rangkaian penguat tegangan dapat dilihat pada Persamaan 3.1.

$$V_o = 1 + \frac{R_f}{R_i} V_i \quad (3.1)$$

Pada Tugas Akhir ini, rangkaian *Op-Amp* dirancang menggunakan IC LM741 dengan penguatan sebesar dua kali. Penguatan yang diperlukan sebesar dua kali sehingga dipilih R_f dan R_i dengan nilai yang sama ($R_f/R_i = 1$). Nilai hambatan dari resistor yang digunakan bersifat bebas dan pada Tugas Akhir ini, nilai R_f dan R_i sebesar 10 K .

Besarnya penguatan tegangan yang dihasilkan dari rangkaian penguat *non-inverting* tergantung pada nilai R_f dan R_i yang digunakan. Hasil perhitungan nilai penguatan dari tegangan masukan $V_i = 5$ Volt pada rangkaian *non-inverting* dengan penguatan dua kali dapat dilihat pada persamaan 3-2.

$$V_o = 1 + \frac{10K}{10K} \cdot 5 \text{ Volt} = 10 \text{ Volt} \quad (3.2)$$

3.2.4 Inverter

Pada tugas akhir ini digunakan *inverter siemens micromaster 420* sebagai *inverter* pengendali frekuensi untuk putar balik motor AC tiga fasa. *Quick commissioning* adalah cara mudah untuk mengkonfigurasi secara optimal *inverter* untuk motor tertentu. Sebuah alternatif untuk *Quick commissioning* adalah *kloning* parameter yang dapat digunakan untuk menjalankan beberapa motor dengan spesifikasi yang sama. Ada beberapa tombol/fungsi yang harus diketahui terlebih dahulu sebelum melakukan *Quick Commissioning*. Tombol-tombol tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Fungsi Tombol *Inverter Micromaster 420*

Panel/Button	Fungsi	Keterangan
	Status Indikasi	Tampilan LCD saat akan memilih parameter yang akan di- <i>setting</i>
	<i>Start Motor</i>	Tombol untuk menjalankan motor
	<i>Stop Motor</i>	Tombol untuk memberhentikan motor
	<i>Change Direction</i>	Tombol untuk mengubah arah putaran motor
	<i>Jog Motor</i>	Tombol untuk menjalankan motor sesuai <i>joging present</i> . Motor akan berjalan selama tombol ditahan
	<i>Functions</i>	Tombol untuk menampilkan informasi tambahan. Tombol ini
	<i>Access Parameter</i>	Tombol untuk mengakses parameter
	<i>Increase Value</i>	Tombol untuk menaikkan nilai yang ditampilkan

Setelah mengetahui fungsi dari masing-masing tombol, maka *Quick Commissioning* dapat dilakukan dengan cara mengakses setiap parameter. Langkah dan cara mengakses nilai parameter dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Langkah-Langkah men-*setting* Parameter

	Langkah-langkah	Tampilan LCD
1.	Tekan  untuk mengakses parameter	
2.	Tekan  sampai menunjukkan parameter yang akan diakses. Misal: P0003	
3.	Tekan  untuk mengakses parameter. Kemudian tekan  atau  untuk memilih nilai	
4.	Tekan kembali  untuk konfirmasi sekaligus menyimpan nilai yang di- <i>setting</i>	
5.	<i>Setting</i> nilai parameter berikutnya dengan cara yang sama	

Quick Comissioning dilakukan dengan mengikuti langkah seperti yang dijelaskan pada Tabel 3.3. Berikut daftar parameter yang di-*setting* sesuai spesifikasi motor yang akan dikendalikan.

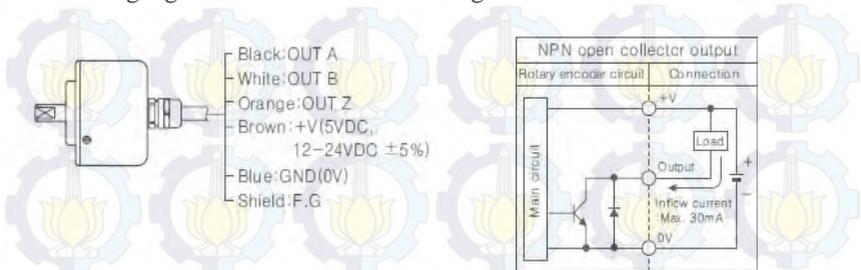
Tabel 3.3 Daftar Parameter *Quick Comissioning*

No.	Parameter	Opsi	Nilai yang dipilih
1.	P0003 (<i>Level akses pengguna</i>)	1 = <i>Standart</i> 2 = <i>Extended</i> 3 = <i>Expert</i>	1
2.	P0010 (<i>Memulai Comissioning</i>)	0 = <i>Ready</i> 1 = <i>Quick Comissioning</i> 30 = <i>Factory Setting</i>	0

3.2.5 Sensor Rotary Encoder

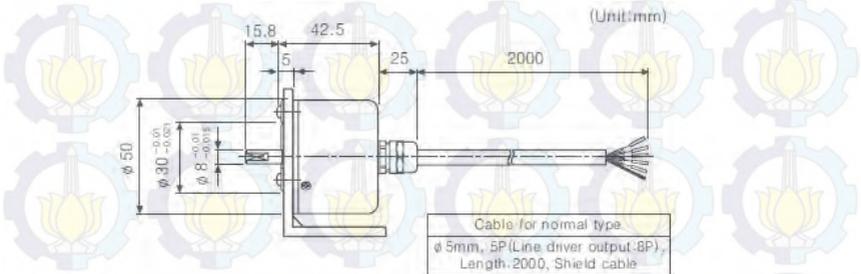
Sensor kecepatan yang digunakan adalah sensor . E50S8-200-3-N-24 merek Autonics. Spesifikasi yang digunakan pada Tugas Akhir ini berjenis *incremental* dengan tipe E50S ini dapat membaca 200 pulsa dalam satu kali putaran dan memiliki keluaran fasa sebanyak tiga fasa yaitu A, B, Z. Tipe *output control* ini bertipe NPN. Sedangkan daya

yang dibutuhkan agar ini dapat digunakan yaitu dengan memberikan sumber tegangan sebesar 12-24VDC dengan toleransi $\pm 5\%$.



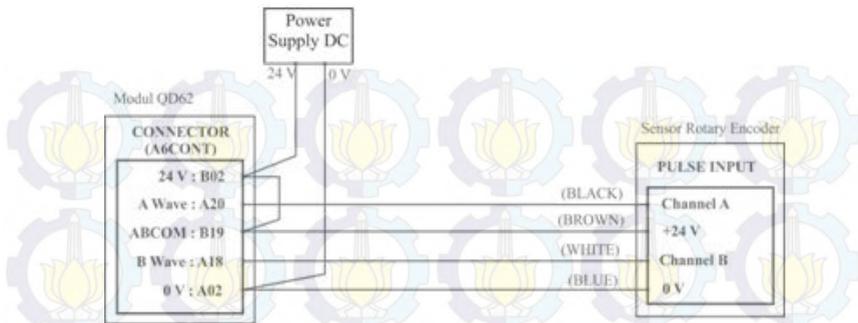
Gambar 3.7 Konfigurasi Kabel *Output* dan Diagram *Control Output* NPN [12]

digunakan sebagai umpan balik ke *Programable Logic Controller*. dikopel dengan poros mesin sentrifugal. Sehingga pada saat motor induksi berputar menggerakkan mesin sentrifugal, maka yang terpasang akan ikut berputar secara bersamaan.



Gambar 3.8 *Rotary Encoder* Dimensi tipe E50S8 [12]

Sensor terdapat 4 jenis kabel. Masing-masing kabel memiliki warna yang berbeda-beda. Dan setiap warna memiliki fungsi sendiri-sendiri. untuk menghubungkan sensor ke modul QD62 di PLC diperlukan suatu *connector* A6CONT. berikut ini gambar perancangan kabel sensor ke *connector* A6CONT:



Gambar 3.9 Wiring Rotary Encoder[13]

Dari gambar diatas, dapat diketahui bahwa *rotary encoder* yang digunakan memiliki dua *channel*, yaitu *channel A* dan *B*. *Channel* tersebut akan membangkitkan gelombang pulsa. Sensor ini akan bekerja apabila mendapatkan tegangan DC sebesar 24 Volt.

3.2.6 Panel Kontrol

Panel kontrol berfungsi sebagai tempat komponen-komponen yang dibutuhkan untuk motor agar dapat beroperasi serta indikasi yang sedang dioperasikan terlihat pada Gambar 3.10 terdapat rangkaian *non-inverting op-amp* penguatan dua kali, inverter, *power supply*, *pilot lamp*, saklar, MCB, *emergency button*, *buzzer*, dan *pushbutton*. Dari panel kontrol ini mesin sentrifugal dioperasikan dengan menggunakan *pushbutton start* dan *pushbutton stop* untuk memberhentikan motor.



Gambar 3.10 Panel Kontrol

Pilot lamp yang dipasang pada panel kontrol ada 2 buah dimana lampu berwarna hijau menandakan bahwa sistem sudah aktif menggunakan kontroler dan merah menandakan bahwa sistem tidak sedang beroperasi. Pada panel kontrol juga terdapat 2 buah *pushbutton* dimana berfungsi untuk menyalakan sistem dan mengatur mesin beroperasi dengan kontroler sedangkan *buzzer* digunakan sebagai *indicator* apabila proses sentrifugal telah selesai.

3.3 Identifikasi Plant

Identifikasi sistem diperlukan untuk mendapatkan model matematika motor induksi tiga fasa. Pada Tugas Akhir ini, identifikasi dilakukan adalah identifikasi statis dengan melihat keluaran respon berupa kecepatan terhadap referensi yang diberikan. Sinyal uji *step* diberikan melalui PLC Mitsubishi dengan member nilai *setpoint* sebesar 800 rpm atau 3,4636 Volt. Hasil respon *plant* yang terbaca oleh akan ditampilkan di perangkat display PLC. Data kecepatan juga dan disimpan oleh *microsoft excel* melalui bantuan *Mx Sheet* dan *Mx Component* dengan *time sampling* yang digunakan sebesar 0,1 detik.

3.3.1 Pembebanan Plant Sentrifugal

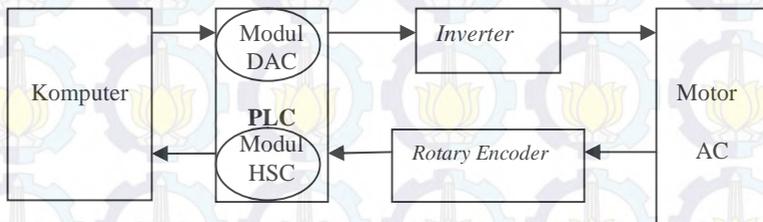
Dalam proses identifikasi metode pembebanan dibutuhkan untuk menentukan model matematika suatu *plant* dalam kondisi yang berbeda. Perubahan parameter *plant* dapat terjadi akibat perubahan beban. Beban

yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa massa atau berat dari bahan yang akan dipisah oleh mesin sentrifugal. Pada penelitian ini digunakan tiga kondisi pembebanan yaitu beban nominal, minimal, dan maksimal.

Beban minimal didefinisikan bahwa sistem tidak diberikan pembebanan berat. Beban nominal didefinisikan pembebanan massa sebesar 3 Kg. Beban maksimal didefinisikan pembebanan massa sebesar 6 Kg. Hasil identifikasi beban nominal digunakan untuk perancangan kontroler. Sedangkan hasil identifikasi minimal dan maksimal digunakan untuk model beban yang diberikan untuk pengujian terhadap gangguan.

3.3.2 Metode Identifikasi

Proses identifikasi dilakukan secara *open loop* untuk mendapatkan respon motor. Sinyal *input* didapat dari *setpoint* yang diberikan melalui PLC, kemudian hasil respon *plant* yang terbaca oleh yang selanjutnya akan ditampilkan pada komputer. Pengambilan data untuk proses identifikasi dilakukan sebanyak 1 kali, kemudian dicari nilai ISE yang paling kecil.



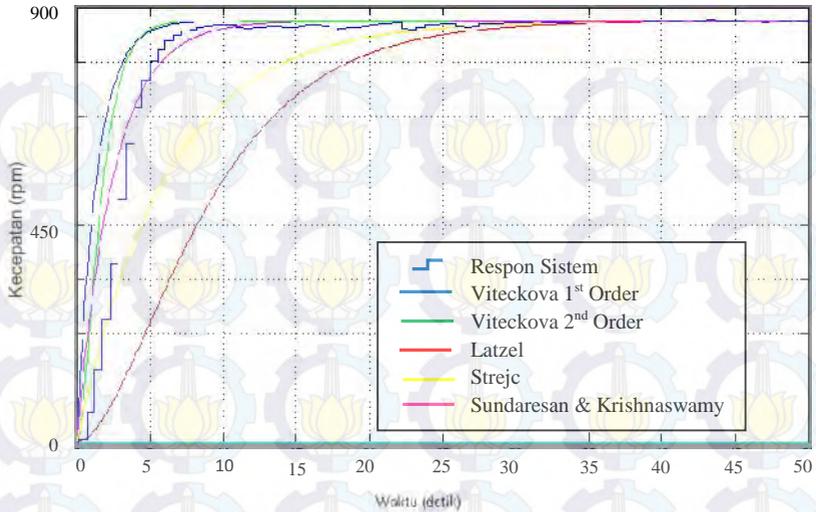
Gambar 3.11 Konfigurasi Fisik Identifikasi Motor

Metode identifikasi diperlukan untuk mencari respon model yang paling mendekati respon *plant*. Berdasarkan paper dengan penulis Ing. Pavel Jakoubek, terdapat 5 metode identifikasi yang digunakan untuk sistem tanpa osilasi dengan masukan respons *step*. Kelima metode identifikasi tersebut adalah metode Viteckova 1st Order, Viteckova 2nd Order, Latzel, Strejc dan Sundaresan - Krishnaswamy. Kelima metode ini dibandingkan dengan respon hasil pengukuran kecepatan yang telah dikonversi ke tegangan untuk mendapatkan pendekatan model yang terbaik. Metode validasi yang digunakan adalah metode ISE (*Integral Square Error*). dengan *Simulation stop time* 50 sekon.

Tabel 3.4 Validasi Model Matematika dari Kelima Metode

No	Metode	Model Matematika	ISE
1.	Viteckova 1 st Order	$\frac{1,119}{1,34 s + 1} e^{-1,6597}$	0,1716
2.	Viteckova 2 nd Order	$\frac{1,119}{0,74 s^2 + 1,72 s + 1} e^{-1,9857}$	0,0995
3.	Latzel	$\frac{1,119}{22,55 s^2 + 9,49 s + 1} e^{-1,9857}$	0,7407
4.	Strejc	$\frac{1,119}{6,12 s + 1} e^{-0,4912 s}$	0,1936
5.	Sundaresan & Krishnaswamy	$\frac{1,119}{2,47 s + 1} e^{-0,7032 s}$	0,0459

Metode Sundaresan & Krishnaswamy dipilih karena memiliki validasi nilai ISE yang terkecil diantara metode yang lain yaitu 0,0459. Hasil respon dari pendekatan Sundaresan & Krishnaswamy yang didapatkan adalah berupa respon orde 1 tanpa *delay*. Hasil dari tiap perhitungan dari beberapa metode yang terdapat dalam tabel, disimulasikan pada *software* Matlab. Hal ini dilakukan untuk dapat melihat perbandingan hasil dari perhitungan dengan data hasil respon sebenarnya. Hasil grafik respon pada Matlab didapatkan bahwa pendekatan model matematika dengan metode Sundaresan & Krishnaswamy yang paling mendekati data yang sebenarnya. Perbandingan respon hasil pemodelan dari lima metode identifikasi dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Perbandingan Hasil Identifikasi Respon dengan 5 Metode

Perhitungan dalam menentukan pendekatan model matematika dengan metode Sundaresan & Krishnaswamy adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai K yang didapatkan dari pembagian nilai Y_{ss} dengan X_{ss} ($Y_{ss} = 895\text{rpm}$; $X_{ss} = 799\text{ rpm}$).

$$K = \frac{895}{799} = 1,119 \quad (3.3)$$

2. Pada grafik respon didapatkan waktu saat respon mencapai 35,3% dari nilai Y_{ss} ($t_{35,5} = 2,75$) dan 85,3% dari nilai Y_{ss} ($t_{85,3} = 6,45$).

3. Menentukan nilai T_{dSK} dan τ_{SK} .

$$T_{dSK} = 1,3 t_{35,3} - 0,29 t_{85,3} = 1,7 \quad (3.4)$$

$$\tau_{SK} = 0,67 (t_{85,3} - t_{35,3}) = 2,48 \quad (3.5)$$

4. Model matematik untuk metode Sundaresan & Krishnaswamy adalah :

$$G_{SK}(s) = \frac{K}{2,48 s + 1} e^{-1,7 s}$$

3.3.3 Identifikasi Beban Nominal

Pada Proses identifikasi untuk beban nominal, mesin sentrifugal diberi massa sebesar 3 Kg. Untuk identifikasi beban nominal, dilakukan percobaan sebanyak lima kali. Model Matematika dan ISE untuk setiap percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Hasil Identifikasi pada Beban Nominal

No	Model Matematika	ISE
1.	$G_{SK} s = \frac{1,119}{2,40 s + 1} e^{-1,761 s}$	0,0495
2.	$G_{SK} s = \frac{1,119}{1,43 s + 1} e^{-1,9857 s}$	0,1547
3.	$G_{SK} s = \frac{1,119}{0,87 s + 1} e^{-1,0989 s}$	0,2847
4.	$G_{SK} s = \frac{1,119}{3,49 s + 1} e^{-0,989 s}$	0,0351
5.	$G_{SK} s = \frac{1,156}{4,49 s + 1} e^{-0,7032 s}$	0,0735

Berdasarkan model matematik pada Tabel 3.6, dapat disimpulkan bahwa ISE terkecil bernilai 0,0351. Sehingga hasil identifikasi yang digunakan untuk beban minimal adalah model matematik nomer 4, yaitu:

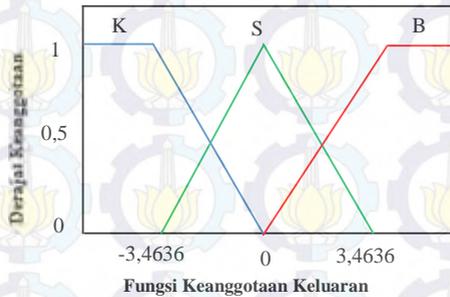
$$G_{SK} s = \frac{1,119}{3,49 s + 1} e^{-0,989 s} \quad (3.6)$$

3.4 Perancangan Kontroler Logika *Fuzzy*

Perancangan kontroler logika terdiri dari fungsi keanggotaan masukan (*error* dan *delta error*) dan keluaran (sinyal kontrol). Kemudian data dioalah oleh basis aturan-inferensi . Pada basis aturan, menggunakan aturan Mark Vicar Whelan. Untuk inferensi menggunakan metode Mamdani. Dari hasil basis aturan-inferensi kemudian di defikasi sinyal kontrol yang masih berupa himpunan, diubah menjadi nilai kecepatan (rpm).

3.4.1 Fungsi Keanggotaan Masukan dan Keluaran

Fungsi keanggotaan masukan terdiri dari nilai *error* dan *delta error*. Nilai *error* dan *delta error* didapat dari analisa respon *plant*. Kemudian diperoleh nilai maksimum dan nilai minimum dari data



Gambar 3.15 Fungsi Keanggotaan Keluaran

3.4.2 Basis Aturan dan Mekanisme Inferensi

Perancangan basis aturan untuk kontroler logika fuzzy diperlukan agar kontroler dapat bekerja pada plant. Berdasarkan fungsi keanggotaan masukan berupa *error* dan *delta error* serta keluaran berupa sinyal kontrol, terdapat 9 basis aturan yang akan disusun berdasarkan Tabel Mark Vicar Whelan. Basis aturan berdasarkan Mark Vicar Whelan ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Basis Aturan

<i>Error</i> \ <i>Error</i>	N	Z	P
N	K	K	S
Z	K	S	B
P	S	B	B

Dari basis aturan seperti pada Tabel 3.6 dapat disusun aturan seperti berikut:

- Jika *error* = N dan *delta error* = N, maka sinyal kontrol = K
- Jika *error* = N dan *delta error* = Z, maka sinyal kontrol = K

- Jika $error = N$ dan $\Delta error = P$, maka sinyal kontrol = S
- Jika $error = Z$ dan $\Delta error = N$, maka sinyal kontrol = K
- Jika $error = Z$ dan $\Delta error = Z$, maka sinyal kontrol = S
- Jika $error = Z$ dan $\Delta error = P$, maka sinyal kontrol = B
- Jika $error = P$ dan $\Delta error = N$, maka sinyal kontrol = S
- Jika $error = P$ dan $\Delta error = Z$, maka sinyal kontrol = B
- Jika $error = P$ dan $\Delta error = P$, maka sinyal kontrol = B

Metode inferensi yang digunakan ialah metode Mamdani dengan persamaan berikut:

$$\tilde{u}_u(k) = \max [\tilde{u}_u(k), \min \{\tilde{e}_e(j), \tilde{e}_{de}(i)\}] \quad (3.7)$$

3.4.3 Defuzifikasi

Defuzifikasi digunakan untuk mengubah hasil dari inferensi menjadi variabel nyata, atau diubah menjadi nilai nyata yang berupa nilai tunggal. Metode defuzifikasi yang digunakan menggunakan Mamdani. Defuzifikasi untuk mendapatkan nilai sinyal kontrol yang digunakan. Metode yang digunakan untuk defuzifikasi yaitu *Center of Area (COA)*.

$$U_0 = \frac{\sum_{k=1}^m u_k(T) \bullet \mu_u(u_k(T))}{\sum_{k=1}^m \mu_k(u_k(T))} \quad \forall u \in U(T) \quad (3.8)$$

3.5 Perancangan Kontroler PID

Kontroler PID merupakan kontroler proporsional ditambah integral dan ditambah dengan differensial. Langkah-langkah desain kontroler PID:

1. Dari Identifikasi sistem secara statis saat beban nominal dengan kecepatan 200 rpm diperoleh model matematika sebagai berikut:

$$\text{Transfer Function} = \frac{1,02}{(0,0544 s^2 + 0,1088 s + 1)} \quad (3.9)$$

2. Menentukan spesifikasi performansi respon orde pertama yang diinginkan dengan $\tau = \frac{5}{3}$ detik.

3. Mencari K_p , τ_i , dan τ_d

$$\triangleright \frac{1}{\omega_n^2} = 0,0544 \quad (3.10)$$

$$\omega_n = \frac{1}{0,0544}$$

$$\omega_n = 4,29$$

$$\triangleright \frac{2\xi}{\omega_n} = 0,1088 \quad (3.11)$$

$$\xi = 0,2333$$

$$\triangleright t_s \pm 5\% \quad 3\tau = 5 \text{ detik} \quad (3.12)$$

$$\tau = \frac{5}{3} \text{ detik}$$

$$\triangleright \tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (3.13)$$

$$\tau_i = 0,1087$$

$$\triangleright \tau_d = \frac{1}{2\xi\omega_n} \quad (3.14)$$

$$\tau_d = 0,49957$$

$$\triangleright K_p = \frac{2\xi}{\tau \omega_n K} \quad (3.15)$$

$$K_p = \frac{2 \times 0,2333}{\frac{5}{3} \times 4,29 \times 1,02}$$

$$K_p = 0,06389$$

Hasil dari penentuan nilai τ_i , τ_d , dan K_p , kemudian dimasukkan ke dalam program Matlab untuk simulasi dan program *GxWork* untuk implementasi.

3.6 Perancangan Perangkat Lunak

Pada perancangan perangkat lunak ini akan dibahas pembuatan program pada PLC untuk mengontrol mesin sentrifugal dan HMI (*Human Machine Interface*) sebagai *interface* antara *plant* dengan manusia. Selain itu juga akan dibahas mengenai program kontroler MRAC yang akan dibuat pada *ladder diagram*.

3.6.1 GX Work2

GX Work2 merupakan *software* program yang dibuat oleh Mitsubishi untuk memprogram PLC. Pada Tugas Akhir ini *GX Work2* akan digunakan sebagai *software* untuk membuat *ladder diagram* dari sistem yang dibuat. Berikut langkah-langkah yang dilakukan untuk membuat program :

1. Membuat *Project* Menggunakan *GX Work2*

Pada langkah awal membuat program *ladder* untuk PLC Mitsubishi harus melakukan *setup* terlebih dahulu dengan langkah-langkah sebagai berikut :

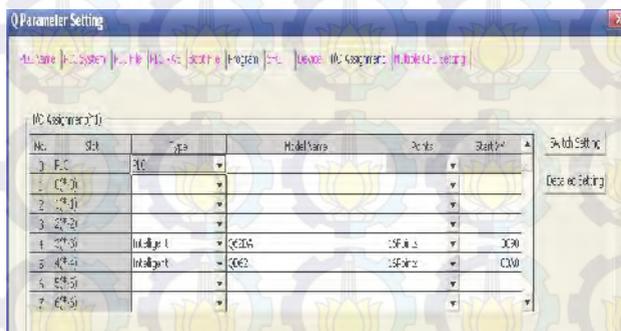
- Menentukan tipe *project* yang akan dibuat, untuk tipe *project* yang digunakan yaitu tipe *simple project* karena tidak membutuhkan pemrograman *function blok* dengan tipe ini sudah cukup dan bisa digunakan.
- Menentukan seri PLC yang digunakan yaitu PLC seri QCPU(*Q mode*)
- Menentukan tipe CPU PLC yang digunakan, dan pada PLC yang digunakan menggunakan CPU Q02/Q02H.
- Menentukan bahasa pemrograman yang digunakan, dan bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa *ladder diagram*.



Gambar 3.16 Pembuatan *Project* Baru

2. Inisialisasi PLC Parameter

Langkah berikutnya menginisialisai *intelligence* modul yang akan digunakan. Modul yang akan digunakan adalah modul Q62DA untuk DAC (*Digital to Analog Converter*) dan modul QD62 (*High Speed Counter*) yang digunakan untuk menghitung pulsa keluaran dari kemudian dikonversi menjadi rpm. Pada Gambar 3.17 merupakan tampilan PLC parameter.



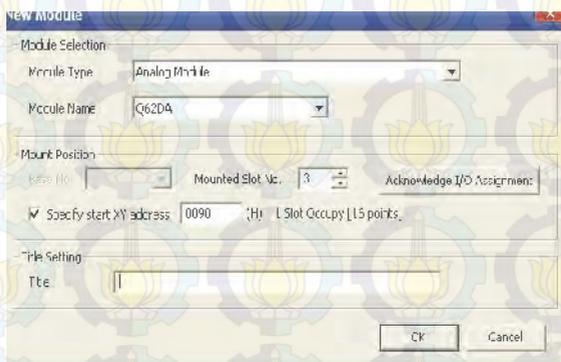
Gambar 3.17 Inisialisasi PLC Parameter

Pada PLC yang digunakan modul DAC pada slot ke-3 dengan alamat 0090 dan sedangkan modul *High Speed Counter* pada slot ke-4 dengan alamat 00A0

3. Inisialisasi Modul (*Digital to Analog Converter*)

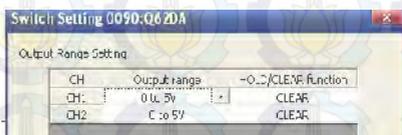
Tahap selanjutnya mengaktifkan modul Q62DA terlebih dahulu harus melakukan *setup* untuk modul DAC. Berikut ini adalah langkah-langkah *setup* modul Q64AD PLC Mitsubishi Q series.

- Membuat *new module* pada *intelligent function module* yang terletak pada bagian kiri *project*. Kemudian *setting* modul Q62DA sama seperti Gambar 3.18.



Gambar 3.18 Inisialisasi Modul Q62DA

- *Menyetting* parameter dilakukan agar modul DAC dapat digunakan. Apabila tanpa melakukan inisialisasi tersebut modul DAC tidak bisa digunakan sesuai fungsinya.
- Langkah selanjutnya adalah melakukan *switch setting* seperti pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 *Switch Setting* Modul Q62DA

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA

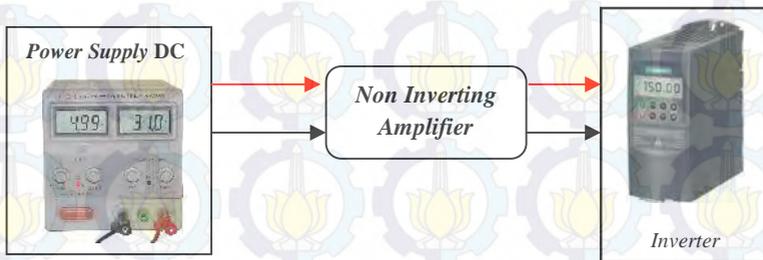
Pada Bab ini akan dijelaskan mengenai analisa dari hasil simulasi dan implementasi pada sistem mesin sentrifugal.

4.1 Pengujian *Hardware* Sistem

Pengujian *hardware* dilakukan bertujuan untuk mengetahui *hardware* berfungsi dengan semestinya. Pengujian *hardware* sistem terdiri dari pengujian *operational amplifier* dan *inverter micromaster* serta pengujian kecepatan motor induksi.

4.1.1 Pengujian *Operational Amplifier* dan *Inverter Micromaster*

Cara pengujian rangkaian *Non-Inverting Amplifier* yaitu pemberian *input* berupa tegangan pada rangkaian *Non-Inverting Amplifier* melalui *power supply* DC yang diukur keluarannya oleh multimeter dan hasil dari pengujian dari rangkaian bisa dilihat pada *output Non-Inverting Amplifier* yang diukur oleh multimeter.



Gambar 4.1 Langkah Pengujian *Non inverting Amplifier* dan *Inverter*

Langkah yang dilakukan pada Gambar 4.1 bisa dilihat pada Tabel 4.1 hasil pengujian rangkaian *Non-Inverting Amplifier* pada kolom ke 2 merupakan hasil penguatan. Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa tegangan keluaran dari *Op-Amp* adalah dua kali dari tegangan masukan *Op-Amp*. Sesuai dengan yang diharapkan karena *inverter* membutuhkan *range* tegangan 0–10 Volt untuk menjalankan motor induksi tiga fasa sedangkan PLC hanya memberikan tegangan *output* 0–5VDC, sehingga dibutuhkan penguatan dua kali.

Pada pengujian *inverter* Micromaster 420 terdapat beberapa komponen yang digunakan seperti *power supply* DC, Multimeter, rangkaian *Non-Inverting Amplifier* dan *inverter*. Langkah pengujianya rangkaian *Non-Inverting Amplifier* memberikan *gain* sebesar dua kali *input power supply* DC.

Hasil keluaran dari *power supply* DC diukur menggunakan multimeter. Sedangkan *output* dari *Non-Inverting Amplifier* masuk ke *terminal* 3 dan 4 pada *inverter*. Dimana *terminal* 3 berfungsi sebagai ADC (+) dan *terminal* 4 sebagai ADC (-) dan hasil frekuensi bisa dilihat pada tampilan *inverter*. Hasil pengujian nilai frekuensi *inverter* bisa dilihat pada Tabel 4.1 pada kolom ketiga. Hasil frekuensi *inverter* berbanding lurus dengan tegangan *input*. Jadi bisa diambil kesimpulan bahwa pengujian ini berhasil dan *inverter* bisa digunakan untuk melakukan *drive* motor induksi tiga fasa.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian *Op-Amp* dan Frekuensi *Inverter*

No.	Tegangan DAC (Volt)	Hasil Penguatan (Volt)	Frekuensi (Hz)
1	0,542	1,150	5,420
2	1,050	2,190	10,620
3	1,480	3,025	15,200
4	2,039	4,160	20,020
5	2,525	5,120	25,400
6	3,041	6,160	30,400
7	3,519	7,120	35,030
8	4,140	8,350	41,030
9	4,570	9,240	45,600
10	5,080	10,240	50,000
11	5,080	10,250	50,000
12	4,590	9,280	46,500
13	4,090	8,260	41,200
14	3,480	7,020	35,020
15	3,087	6,260	31,100

4.1.2 Pengujian Kecepatan Motor Induksi

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan motor induksi dengan sumber tiga fasa dari *inverter*. Kemudian mengatur frekuensi pada *inverter* dengan cara pemberian *input* pada rangkaian penguat

tegangan *Non-Inverting Amplifier* menggunakan Modul DAC PLC dan mengambil data rpm motor AC dengan dan *output* dari *rotary* akan dibandingkan dengan alat tachometer laser.

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data perbandingan antara *data word* dari modul DAC PLC dengan kecepatan output plant.dari langkah yang telah dilakukan didapatkan data seperti pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

No	Masukan DAC PLC (Volt)	Kecepatan <i>Rotary Encoder</i> (rpm)	Kecepatan Tachometer(rpm)
1	0,0003	0,0000	0,0000
2	0,4980	115,0000	115,0000
3	0,9940	248,0000	248,5000
4	1,4930	397,0000	397,6000
5	1,9900	535,0000	535,3000
6	2,4880	679,0000	679,2000
7	2,9880	803,0000	803,0000
8	3,4830	914,0000	914,0000
9	3,9800	1005,0000	1005,0000
10	4,4700	1078,0000	1078,0000
11	4,9700	1150,0000	1150,0000

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian kecepatan motor, apabila diberikan tegangan maksimal 4,97 Volt menghasilkan kecepatan 1150 rpm. Diperoleh rumus *gradient* dari *output plant* sebagai berikut :

$$y = mx$$

$$m_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{1150 - 0}{4,97 - 0} = 230,923$$

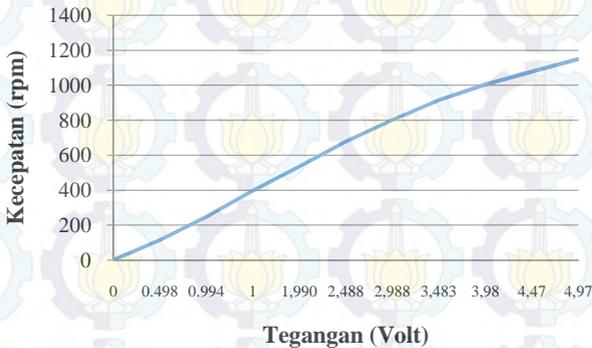
diperoleh persamaan : $y = 230,923x$ (4.1)

Persamaan (4.1) digunakan untuk konversi tegangan ke rpm dimana y merupakan *output* rpm sedangkan x merupakan *input* tegangan sedangkan untuk perbandingan dari data *word* ke tegangan.

$$m_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{4000 - 0}{4,97 - 0} = 803,21$$

diperoleh persamaan : $y = 803,21x$ (4.2)

Persamaan (4.2) digunakan untuk konversi tegangan ke *data word* dimana y merupakan *data word* pada PLC sedangkan x merupakan *input* tegangan.



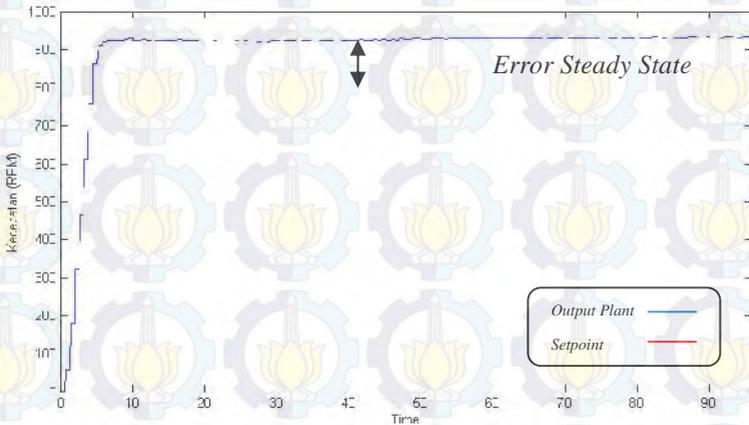
Gambar 4.2 Data Hasil Pengukuran Kecepatan Motor

Berdasarkan grafik diatas diperoleh data bahwa *output plant* tidak linier pada tegangan *input* lebih dari satu Volt atau pada kecepatan lebih dari 400 rpm apabila tanpa kontroler. Fungsi data pengujian kecepatan motor untuk menghubungkan perbandingan antara data *word* pada modul DAC PLC dengan tegangan *input inverter* dan juga perbandingan tegangan *input* dengan kecepatan motor.

4.2 Pengujian Sistem *Open Loop*

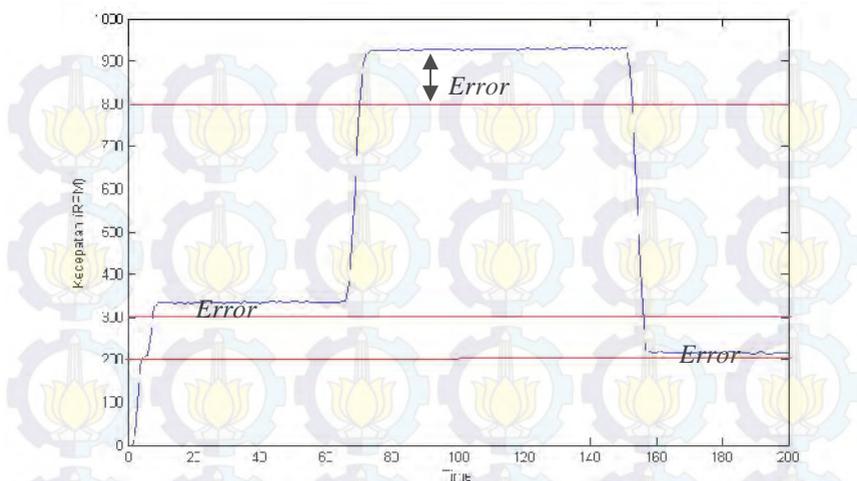
Pada pengujian sistem secara *open loop* berfungsi untuk mengetahui respon kecepatan *plant* mesin sentrifugal apabila diberikan *input* referensi statis dan *tracking* sesuai dengan yang dibutuhkan pada

proses sentrifugal. Pada pengujian kali ini diberikan *input* referensi konstan sebesar 800 rpm dan dalam kondisi tanpa beban. Data akan direkam sebanyak 1000 data dengan *sampling* pengambilan data 0,1 detik untuk referensi konstan sedangkan pada referensi *tracking* *sampling* sebesar 1 detik pada *software* MX-Sheet.



Gambar 4.3 Respon Motor Tanpa Kontroler Referensi Konstan

Berdasarkan data yang didapat seperti Pada Gambar 4.3 *output* sistem ketika diberi masukan konstan *output* mencapai kondisi pada kecepatan rata-rata 925 rpm dari yang seharusnya adalah 800 rpm, sehingga disini terjadi *error* yang cukup besar yaitu sebesar 16%, *settling time* selama 6,4 detik. Pada Gambar 4.4 adalah respon *output* kecepatan motor dengan *input* referensi *tracking*.

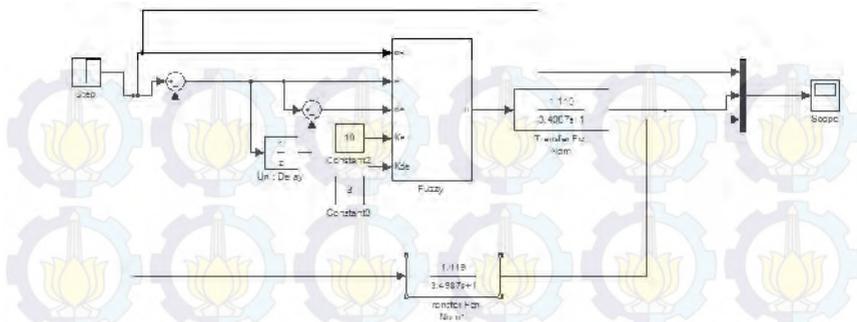


Gambar 4.4 Respon Motor Tanpa Kontroler dengan Referensi *Tracking*

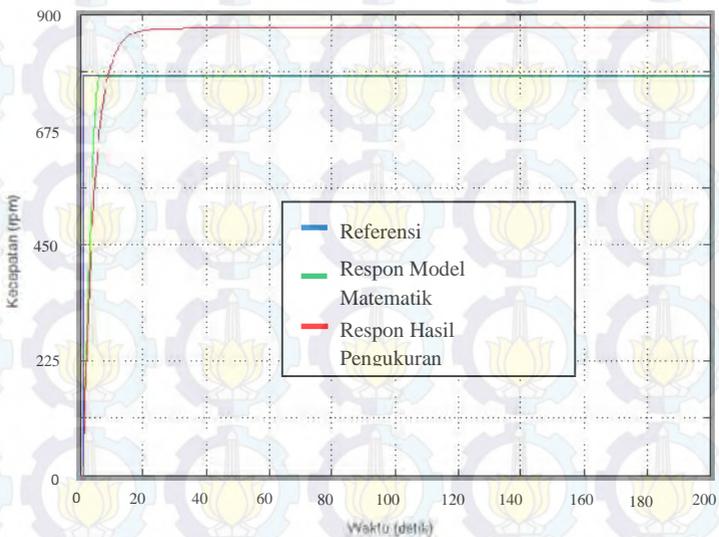
Pada pengujian *open loop* dengan *input* referensi *tracking* tanpa kontroler diperoleh hasil bahwa *output plant* tidak sesuai dengan referensi yang diinginkan terdapat *error* pada tiap-tiap kecepatan yang diinginkan. Pada 200 rpm *error* rata-rata 7,94 % sedangkan pada 300 rpm rata-rata 11,48 % dan pada kecepatan 800 rpm rata-rata 15,91 % sehingga semakin besar rpm rata-rata *error* akan semakin besar apabila tanpa kontroler. Berdasarkan pengujian *open loop output plant* tidak sesuai dengan nilai referensi yang diinginkan sehingga perlu adanya kontroler agar *plant* bisa mendapatkan respon yang lebih baik.

4.3 Simulasi Kontroler Logika Fuzzy

Simulasi kontroler logika dilakukan dengan referensi konstan dan referensi *tracking*. Referensi konstan diberikan dalam bentuk tegangan 3,46 VDC atau setara dengan 800 rpm. Referensi *tracking* dalam bentuk tegangan 0,866; 1,299; dan 3,46 VDC atau setara dengan 200, 300, dan 800 rpm.



Gambar 4.5 Blok Simulink Kontroler Logika pada *Plant* Mesin Sentrifugal dengan Referensi Konstan



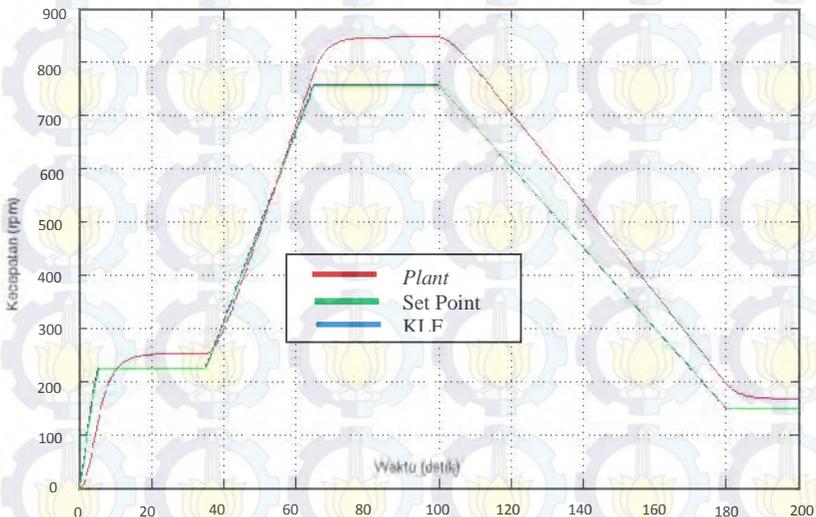
Gambar 4.6 Hasil Simulasi Kontroler Logika pada Referensi Konstan

Berdasarkan respon plant pada Gambar 4.7 diperoleh spesifikasi respon pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spesifikasi Respon Kontroler Logika dengan Referensi Konstan

Spesifikasi	Respon Hasil Pengukuran (Tanpa Kontroler)	Respon Model Matematik (Kontroler Logika)
	6,07 detik	2,10 detik
t_s ($\pm 5\%$)	14,00 detik	4,60 detik
t_r (5% - 95%)	18,90 detik	2,26 detik
t_d	5,00 detik	1,40 detik
e_{ss}	16,00 %	0,10 %

Pada tabel 4.3 menunjukkan spesifikasi respon dengan referensi konstan. Pada respon model matematik atau dengan menggunakan kontroler logika dapat memperbaiki respon hasil pengukuran hingga mendekati nilai referensi. Untuk simulasi dengan referensi *tracking* ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil Simulasi Kontroler Logika pada Referensi *Tracking*

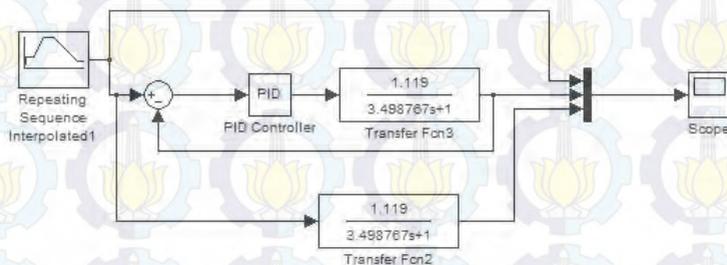
Dari grafik pada Gambar 4.20 dapat terlihat bahwa:

1. Saat diberi inferensi 300 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 300,45 rpm. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,1\%$ dari kondisi *steady state*.
2. Saat diberi inferensi 800 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 800,8 rpm. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,1\%$ dari kondisi .
3. Saat diberi 200 rpm keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 200,3 rpm. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,1\%$ dari kondisi .

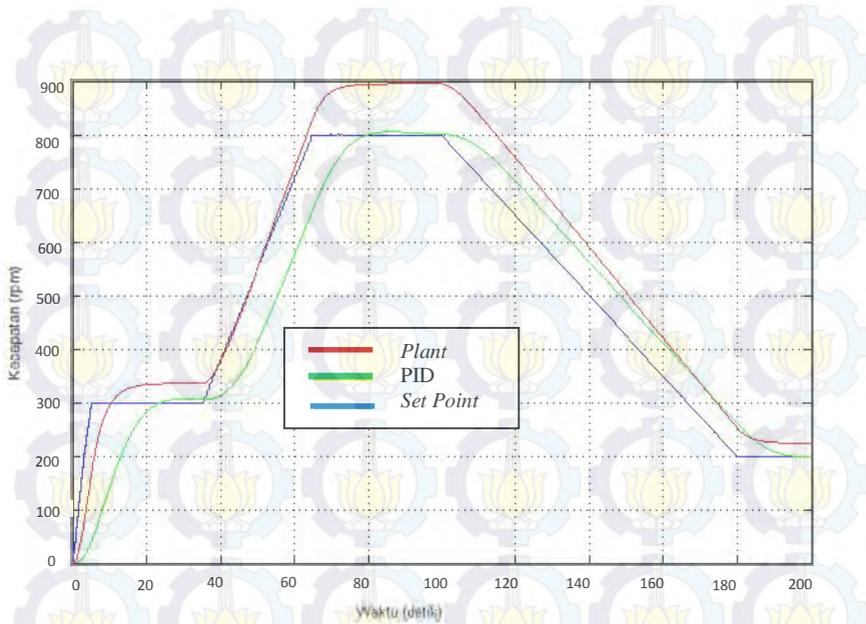
Dari hasil analisa *error steady* pada simulasi, diperoleh nilai rata-rata dari *error steady state* saat *charging*, *spinning*, dan *discharging* sebesar $\pm 0,1\%$.

4.4 Implementasi dengan Kontroler PID

Pada implementasi penelitian ini menggunakan kontroler PID dikarenakan implementasi kontroler dengan PLC masih belum selesai. Metode perhitungan kontroler PID menggunakan *trial and error*, dimana penentuan nilai K_p , τ_i , dan τ_d mencoba-coba untuk meminimalisirkan overshoot. Implementasi menggunakan PID ini kemudian dibandingkan dengan simulasi menggunakan Matlab. Simulasi kontroler PID dilakukan dengan referensi referensi tracking. Referensi tracking dengan 200, 300, dan 800 rpm. Blok *simulink* dan hasil simulasi kontroler PID menggunakan Matlab ditunjukkan pada Gambar 4.8, dan 4.9.



Gambar 4.8 Blok *Simulink* Kontroler PID

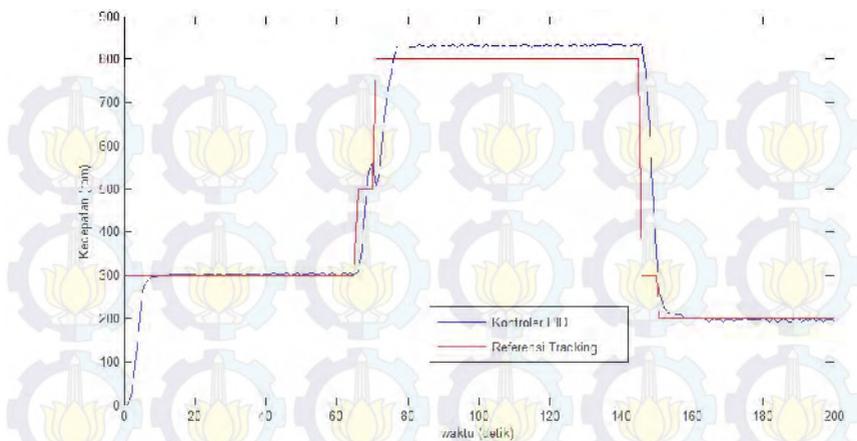


Gambar 4.9 Hasil Simulasi Kontroler PID pada Referensi *Tracking*

Dari grafik pada Gambar 4.9 dapat terlihat bahwa:

1. Saat diberi referensi 300 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 300,45 rpm. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,1\%$ dari kondisi *steady state*.
2. Saat diberi referensi 800 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 800,8 rpm. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,1\%$ dari kondisi *steady state*.
3. Saat diberi referensi 200 rpm keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 200,3 rpm. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,1\%$ dari kondisi *steady state*.

Dari hasil analisa *error steady state* pada simulasi, diperoleh nilai rata-rata dari *error* saat *charging*, *spinning*, dan *discharging* sebesar $\pm 0,1\%$.



Gambar 4.10 Implementasi dengan Kontroler PID

Dari grafik pada Gambar 4.10 dapat terlihat bahwa:

1. Saat diberi referensi sebesar 300 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal terdapat pada rata-rata 299,5 rpm, namun memiliki nilai rpm sebesar $\pm 0,5$ rpm pada kondisi . Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 0,17\%$ dari kondisi *steady state*.
2. Saat diberi referensi sebesar 800 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 818 rpm, namun memiliki nilai rpm sebesar 18 rpm pada kondisi . Sehingga Terjadi *error* sebesar 2,25% dari kondisi *steady state*.
3. Saat diberi referensi sebesar 200 rpm keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 198 rpm, namun memiliki nilai rpm sebesar ± 2 rpm pada kondisi *steady state*. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 1\%$ dari kondisi *steady state*.

Dari implementasi kontroler PID dapat memiliki *error steady state* yang hampir mendekati nilai *error steady state* pada simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler PID memiliki kehandalan kontroler yang dapat mempertahankan nilai referensi. Nilai referensi pada karakteristik kerja mesin sentrifugal yaitu 300 rpm, 800 rpm dan 200 rpm. Dari ketiga referensi itu diperoleh rata-rata *erro steady state* sebesar 1,14 %.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil simulasi kontroler dan implementasi kontroler PID pada Tugas Akhir ini diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil analisa *error steady state* pada simulasi dengan kontroler logika *fuzzy*, dan kontroler PID, diperoleh nilai rata-rata dari *error steady state* saat *charging*, *spinning*, dan *discharging* sebesar $\pm 0,1\%$.
2. Dari hasil analisa *error steady state* pada implementasi dengan kontroler PID, diperoleh nilai rata-rata dari *error steady state* saat *charging*, *spinning*, dan *discharging* sebesar $\pm 1,14\%$.
3. Pada simulasi kontroler logika *fuzzy* dan kontroler PID serta implementasi kontroler PID dapat mengikuti karakteristik kerja kurva saat *charging*, *spinning*, dan *discharging* dengan *error steady state* yang tidak jauh berbeda dengan referensi yang diberikan.

5.2 Saran

Konstruksi dari *plant* secara keseluruhan yang sederhana dan tanpa memperhatikan perhitungan secara detail dalam pembangunannya dapat mempengaruhi hasil dari kontroler yang akan didesain, sehingga hasil desain dari kontroler yang telah dibuat tidak sesuai dengan hasil implementasi.

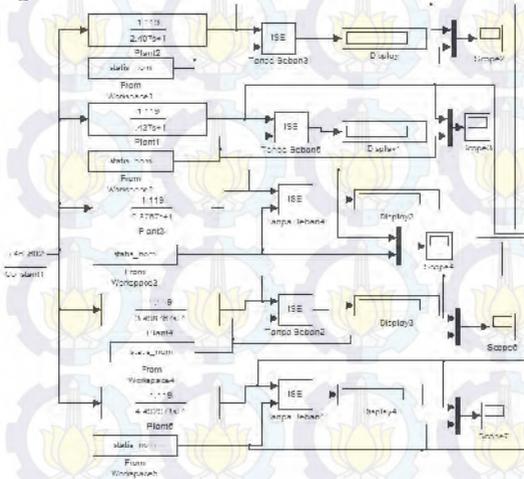
Penambahan sensor pengukuran massa pada beban mesin sentrifugal diharapkan dapat ditambahkan pada penelitian selanjutnya. Dengan harapan hasil pengukuran lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

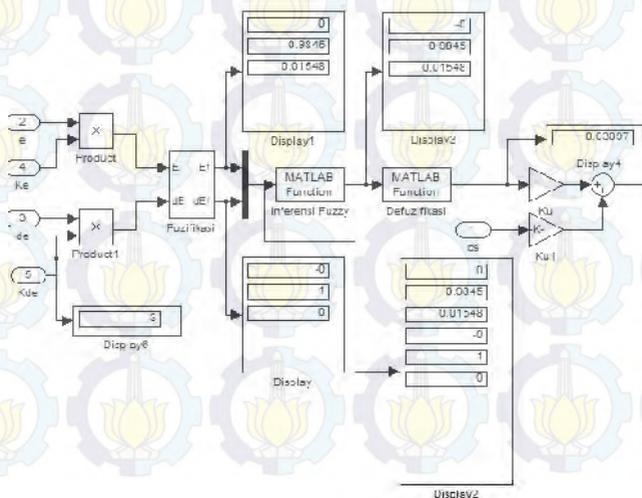
- [1] Yudistira, Adityo., "Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa Pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Metode Sliding Mode Control", *Tugas Akhir*, JTE-ITS,Surabaya, 2014.
- [2] Hidayah, Fahmi., "Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa Pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Metode Linear Quadratic Tracking", *Tugas Akhir*, JTE-ITS,Surabaya, 2013.
- [3] Hidayah Ika Putri, R., "Penerapan Adaptif Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa", *Jurnal Teknik Gelagar*, vol.18 , no.1 , Politeknik Negeri Malang, 2007.
- [4] Faisal Afif Alhamdi, M., "Perancangan dan Implementasi Kontroler Knowledge Based-PI Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa", *Tugas Akhir*, JTE-ITS,Surabaya, 2014.
- [5] Putri Suryaditya, Nindita., "Pengaturan Proses Face Miling pada Mesin Computer Numerikal Control (CNC) dengan Kontroler -PID", *Tugas Akhir*, JTE-ITS,Surabaya, 2013.
- [6] Ing. Pavel Jakoubek, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods",*Konference Students kétv r í innosti*, 2009.
- [7] Zainudin, Aziz., "Stabilisasi Sistem Pendulum-Kereta Menggunakan Gain Scheduling", *Tugas Akhir*, JTE-ITS,Surabaya, 2014.
- [8] Effendie AK, Rusdianto, "*Sistem Pengaturan Cerdas*", Diktat Kuliah ITS, Surabaya, 2014.
- [9] J. Astrom, Karl dan B. Wittenmark, "*Adaptive Control*", Addison Wesley, Reading, MA, 1989.
- [10] Gamayanti, Nurlita, Karakteristik Sistem Orde Pertama, *Handout Mata Kuliah Dasar Sistem Pengaturan*, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2012.
- [11] Josaphat Pramudijanto, Identifikasi Model Matematik, *Handout Mata Kuliah Dasar Sistem Pengaturan*, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2012.

LAMPIRAN

A. Program menentukan nilai ISE



B. Subsistem Fuzifikasi pada Matlab



C. Tampilan Video HMI di Youtube



Link youtube : <http://www.youtube.com/watch?v=WLST5Z8X3fQ>

RIWAYAT HIDUP



Marendra Kurniawan lahir di Sidoarjo pada tanggal 26 September 1990. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bambang Djojo Kusumo dan Kurniasih. Setelah lulus dari SMAN 1 Sidoarjo pada tahun 2009, penulis melanjutkan studi di Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pada tahun 2012 terdaftar sebagai mahasiswa lintas jalur Genap Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Jurusan Teknik Elektro dengan Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan. Penulis selama menempuh studi aktif dalam kompetisi ilmiah tingkat nasional seperti PIMNAS. Penulis mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir di Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro. Email penulis adalah marendra007@gmail.com. Nomer telepon seluler 08563463700.