



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) GAIN SCHEDULING* PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Fadli Wardana
NRP 2213105035

Dosen Pembimbing
Ir. Ali Fatoni, M.T.
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF GAIN SCHEDULING
LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) IN SPEED
CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR**

Fadli Wardana
NRP 2213105035

Supervisor
Ir. Ali Fatoni, M.T.
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

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

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) GAIN SCHEDULING* PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Ir. Ali Fatoni, M.T.
NIP. 19620603 1989 03 1002


Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng
NIP. 1962 1005 1990 03 1003



PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) GAIN SCHEDULING* PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Nama : Fadli Wardana
Pembimbing : Ir. Ali Fatoni, M.T.
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ABSTRAK

Motor induksi merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan di industri dibandingkan dengan motor listrik yang lain, karena jenis motor ini memiliki beberapa keuntungan diantaranya konstruksinya yang sederhana, kokoh, harga relatif murah dan tidak memerlukan pemeliharaan yang rumit. Namun permasalahan utama dari bahasan ini adalah menjaga agar kecepatan putar motor tetap konstan. Jika motor induksi diberi beban yang berubah sampai pada nilai tertentu dari beban nominalnya, maka responnya akan mengalami perubahan walaupun kontroler telah diberikan. Sehingga pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa jauh lebih sulit dilakukan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut digunakan teknik kontrol optimal yaitu metode *Linear Quadratic Regulator (LQR) Gain Scheduling*. Kontroler ini dipilih karena dapat otomatis beradaptasi dengan cara mengubah parameternya untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan parameter *plant*. Hasil pengujian kontroler *LQR Gain Scheduling* mampu mempertahankan kecepatan motor pada tiap kondisi pembebanan. Hasil respon mendekati respon beban nominal dengan spesifikasi τ sebesar 0,34 detik, t_s (5%) sebesar 1,02 detik, t_r (5%-95%) sebesar 1 detik, t_d sebesar 0,28 detik, dan e_{ss} sebesar 0,6%.

Kata kunci : *Gain Scheduling*, Labview, LQR, Motor Induksi

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF GAIN SCHEDULING
LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) IN SPEED CONTROL
OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR**

Name : Fadli Wardana
Supervisor : Ir. Ali Fatoni, M.T.
Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng.

ABSTRACT

Induction motor is a type of motor most widely used in the industry compared to other electric motors, because this type of motor has several advantages such as simple construction, sturdy, relatively cheap price and does not require complicated maintenance. But the main problem of this discussion is to keep the motor speed remains constant. If the induction motor load changes given to the particular value of the nominal load, then the response will change even if the controller has been given. Thus the speed control of three phase induction motor is much more difficult. For overcome these problems, optimal control techniques used namely Linear Quadratic Regulator (LQR) Gain Scheduling. The controllers have been selected because it can automatically adapt by changing its parameters for adjust from plant parameters changes. Results test LQR Gain Scheduling controller can maintain the speed of motor in every condition encumbering. Results response approaching response nominal load to the specifications of τ at 0,34 second, t_s (5%) at 1,02 second, t_r (5%-95%) at 1 second, t_d at 0,28 second, and e_{ss} at 0,6%.

Keywords : Gain Scheduling, Induction Motors, Labview, LQR

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyusun dan menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul:

Perancangan dan Implementasi *Linear Quadratic Regulator (LQR) Gain Scheduling* pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Penulis ingin berterima kasih kepada beberapa pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penyelesaian dari Tugas Akhir ini, diantaranya:

1. Kedua Orang tua tercinta, dan ketiga saudara di rumah yang selalu memberi doa, semangat dan nasehat kepada penulis.
2. Bapak Ir. Ali Fatoni, M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Ir. Josaphat Pramudijanto, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing II atas bantuan dan bimbingan hingga Tugas Akhir ini terselesaikan.
3. Para dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberi masukan dan saran kepada penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
4. Semua teman yang ada di Teknik Sistem Pengaturan khususnya anggota kelompok Tugas Akhir, dan
5. Semua orang yang belum sempat penulis sebutkan.

Harapan besar penulis bahwa buku Tugas Akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro pada khususnya. Penulis juga mengharapkan kritik dan saran atas buku Tugas Akhir ini karena penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak terdapat kekurangan.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR | v |
| HALAMAN PENGESAHAN | vii |
| ABSTRAK | ix |
| <i>ABSTRACT</i> | xi |
| KATA PENGANTAR | xiii |
| DAFTAR ISI | xv |
| DAFTAR GAMBAR | xix |
| DAFTAR TABEL | xxi |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 2 |
| 1.5 Metodologi | 2 |
| 1.6 Sistematika Penulisan | 3 |
| 1.7 Relevansi | 4 |
| | |
| BAB II TEORI PENUNJANG | 5 |
| 2.1 Motor Induksi Tiga Fasa..... | 5 |
| 2.1.1 Komponen Motor Induksi | 5 |
| 2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi | 6 |
| 2.2 Rem Elektromagnetik | 7 |
| 2.3 Sensor <i>Rotary Encoder</i> | 7 |
| 2.3.1 <i>Absolute Rotary Encoder</i> | 8 |
| 2.3.2 <i>Increment Rotary Encoder</i> | 8 |
| 2.4 <i>Inverter</i> | 9 |
| 2.5 DAQ Advantech USB-4716 | 10 |
| 2.6 Sensor Arus | 11 |
| 2.7 Sensor Temperatur | 12 |
| 2.8 <i>Integral Square Error (ISE)</i> | 13 |
| 2.9 Kontroler <i>Linear Quadratic Regulator (LQR)</i> | 13 |
| 2.10 Metode <i>Gain Scheduling</i> | 16 |
| 2.11 <i>LQR Gain Scheduling</i> | 17 |
| 2.12 Labview | 17 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.12.1 | <i>Front Panel</i> | 18 |
| 2.12.2 | <i>Block Diagram</i> | 18 |
| 2.12.3 | <i>Controls dan Functions Palette</i> | 19 |
| 2.12.3.1 | <i>Controls Palette</i> | 19 |
| 2.12.3.2 | <i>Functions Palette</i> | 20 |
| BAB III | PERANCANGAN SISTEM | 21 |
| 3.1 | Desain Sistem | 21 |
| 3.2 | Perancangan <i>Hardware</i> | 22 |
| 3.2.1 | Perancangan Mekanik <i>Plant</i> | 23 |
| 3.2.2 | <i>Inverter</i> Siemens Micromaster 420 | 25 |
| 3.2.3 | Perancangan Kotak Panel | 28 |
| 3.2.4 | DAQ Advantech USB-4716 | 29 |
| 3.2.5 | Sensor <i>Rotary Encoder</i> | 29 |
| 3.2.6 | Sensor Arus | 30 |
| 3.2.7 | Sensor Temperatur..... | 31 |
| 3.3 | Perancangan <i>Software</i> | 32 |
| 3.4 | Identifikasi <i>Plant</i> | 33 |
| 3.4.1 | Metode Pembebanan <i>Plant</i> | 33 |
| 3.4.2 | Metode Identifikasi..... | 34 |
| 3.4.3 | Identifikasi Beban Minimal | 34 |
| 3.4.4 | Identifikasi Beban Nominal | 35 |
| 3.4.5 | Identifikasi Beban Maksimal..... | 35 |
| 3.5 | Perancangan Kontroler <i>Linear Quadratic Regulator (LQR)</i> <i>Gain Scheduling</i> | 36 |
| 3.5.1 | Perancangan Kontroler LQR | 37 |
| 3.5.1.1 | Parameter <i>Plant</i> Beban Minimal | 38 |
| 3.5.1.2 | Parameter <i>Plant</i> Beban Nominal | 38 |
| 3.5.1.3 | Parameter <i>Plant</i> Beban Maksimal | 39 |
| 3.5.1.4 | Matrik Q dan R..... | 40 |
| 3.5.2 | Perancangan Mekanisme <i>Gain Scheduling</i> | 40 |
| 3.6 | Perancangan Simulasi | 43 |
| BAB IV | HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA | 45 |
| 4.1 | Pengujian Komponen Sistem | 45 |
| 4.1.1 | Pengujian DAQ Advantech USB-4716 | 45 |
| 4.1.2 | Pengujian <i>Inverter</i> Siemens Micromaster 420 | 46 |
| 4.1.3 | Pengujian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa | 47 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| 4.1.4 | Pengujian Rem Elektromagnetik dan Sensor Arus ACS 712 | 49 |
| 4.2 | Pengujian Kontroler Secara Simulasi pada Labview | 50 |
| 4.2.1 | Pengujian Kontroler LQR | 51 |
| 4.2.2 | Pengujian Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> | 54 |
| 4.3 | Pengujian Kontroler Secara Implementasi pada Labview .. | 58 |
| BAB V PENUTUP | | 61 |
| 5.1 | Kesimpulan | 61 |
| 5.2 | Saran | 61 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 63 |
| LAMPIRAN | | 65 |
| RIWAYAT HIDUP | | 67 |

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Spesifikasi DAQ Advantech USB-4716 | 11 |
| Tabel 2.2 | Spesifikasi Sensor Arus ACS 712 | 11 |
| Tabel 3.1 | Fungsi Tombol <i>Inverter</i> Micromaster 420 | 25 |
| Tabel 3.2 | Daftar Parameter <i>Quick Comissioning</i> | 26 |
| Tabel 3.3 | Spesifikasi <i>Rotary Encoder</i> Autonics E30S4-100-3-N-5 | 30 |
| Tabel 3.4 | Hasil Identifikasi pada Beban Minimal | 34 |
| Tabel 3.5 | Hasil Identifikasi pada Beban Nominal | 35 |
| Tabel 3.6 | Hasil Identifikasi pada Beban Maksimal | 36 |
| Tabel 3.7 | Model Matematika <i>Plant</i> untuk Setiap Kondisi Pembebanan | 36 |
| Tabel 3.8 | Parameter pada 3 Kondisi Pembebanan | 41 |
| Tabel 4.1 | Hasil Pengujian DAQ | 45 |
| Tabel 4.2 | Hasil Pengaturan <i>Inverter</i> | 46 |
| Tabel 4.3 | Hasil Pengujian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa . | 48 |
| Tabel 4.4 | Hasil Sensor Arus ACS 712 Terhadap Perubahan Beban | 50 |
| Tabel 4.5 | Spesifikasi Hasil Simulasi Kontroler LQR pada Beban Berbeda | 53 |
| Tabel 4.6 | Nilai Parameter Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> pada Beban Berbeda | 54 |
| Tabel 4.7 | Nilai Gain K dan Gain L Kontroler LQR <i>Gain</i> <i>Scheduling</i> | 55 |
| Tabel 4.8 | Spesifikasi Hasil Respon Kontroler LQR <i>Gain</i> <i>Scheduling</i> pada Beban Berbeda | 57 |
| Tabel 4.9 | Perbandingan Hasil Simulasi dan Implementasi | 58 |

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Komponen Motor Induksi | 6 |
| Gambar 2.2 | Bentuk Fisik Rem Elektromagnetik..... | 7 |
| Gambar 2.3 | Susunan Pola pada <i>Absolute Encoder</i> | 8 |
| Gambar 2.4 | Susunan Piringan <i>Increment Encoder</i> | 9 |
| Gambar 2.5 | <i>Inverter</i> Siemens Micromaster 420..... | 10 |
| Gambar 2.6 | Bentuk Fisik DAQ Advantech USB-4716..... | 10 |
| Gambar 2.7 | Sensor Arus ACS 712..... | 12 |
| Gambar 2.8 | Sensor LM35 | 13 |
| Gambar 2.9 | Diagram Blok Sistem LQR..... | 14 |
| Gambar 2.10 | Diagram Blok Sistem Kontroler <i>Adaptive Gain Scheduling</i> | 16 |
| Gambar 2.11 | Diagram Blok Sistem Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> | 17 |
| Gambar 2.12 | Tampilan <i>Front Panel</i> LabVIEW | 18 |
| Gambar 2.13 | Tampilan <i>Block Diagram</i> LabVIEW | 19 |
| Gambar 2.14 | Tampilan <i>Controls Palette</i> pada LabVIEW..... | 19 |
| Gambar 2.15 | Tampilan <i>Functions Palette</i> pada LabVIEW..... | 20 |
| Gambar 3.1 | Desain Sistem | 21 |
| Gambar 3.2 | Komponen dan Alur <i>Hardware</i> Sistem | 23 |
| Gambar 3.3 | Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa Tipe AY 638-4..... | 24 |
| Gambar 3.4 | Kontruksi Hasil Modifikasi <i>Plant</i> Secara Keseluruhan | 25 |
| Gambar 3.5 | Desain Kotak Panel..... | 28 |
| Gambar 3.6 | <i>Wiring</i> DAQ dengan Beberapa Komponen | 29 |
| Gambar 3.7 | Konfigurasi Sensor <i>Rotary Encoder</i> | 29 |
| Gambar 3.8 | <i>Wiring Pin</i> Sensor <i>Rotary Encoder</i> dengan DAQ .. | 30 |
| Gambar 3.9 | <i>Wiring</i> Sensor Arus ACS 712..... | 31 |
| Gambar 3.10 | <i>Wiring</i> Perancangan Sensor Temperatur | 31 |
| Gambar 3.11 | Diagram Blok dan <i>Pallet</i> pada Labview..... | 32 |
| Gambar 3.12 | <i>Setting Input</i> dan <i>Output</i> DAQ | 33 |
| Gambar 3.13 | Respon Hasil Tiap Kondisi Pembebanan..... | 37 |
| Gambar 3.14 | Diagram Blok Simulasi LQR <i>Gain Scheduling</i> pada Labview..... | 43 |
| Gambar 4.1 | Skema Pengujian DAQ..... | 45 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 4.2 | Skema Pengujian <i>Inverter</i> | 46 |
| Gambar 4.3 | Mekanisme Pengujian Kecepatan Motor Induksi .. | 47 |
| Gambar 4.4 | Hubungan <i>Rotary Encoder</i> dan Tachometer..... | 49 |
| Gambar 4.5 | Mekanisme Pengujian Sensor Arus ACS 712 pada Beban | 50 |
| Gambar 4.6 | Respon Keluaran Tanpa Kontroler | 51 |
| Gambar 4.7 | Respon Keluaran pada Kondisi Beban 0 | 52 |
| Gambar 4.8 | Respon Keluaran pada Kondisi Beban 1 | 52 |
| Gambar 4.9 | Respon Keluaran pada Kondisi Beban 2 | 53 |
| Gambar 4.10 | Respon Keluaran Kondisi Beban 0 dengan Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> | 55 |
| Gambar 4.11 | Respon Keluaran Kondisi Beban 1 dengan Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> | 56 |
| Gambar 4.12 | Respon Keluaran Kondisi Beban 2 dengan Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> | 56 |
| Gambar 4.13 | Respon Keluaran Kondisi Beban Variasi dengan Kontroler LQR <i>Gain Scheduling</i> | 57 |
| Gambar 4.14 | Respon Implementasi LQR <i>Gain Scheduling</i> Beban 0..... | 58 |
| Gambar 4.15 | Respon Implementasi LQR <i>Gain Scheduling</i> Beban 1 | 59 |
| Gambar 4.16 | Respon Implementasi LQR <i>Gain Scheduling</i> Beban 2..... | 59 |
| Gambar 4.17 | Respon Implementasi LQR <i>Gain Scheduling</i> Beban Variasi | 60 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi merupakan salah satu jenis dari motor listrik yang bekerja berdasarkan induksi elektromagnet. Motor induksi memiliki sebuah sumber energi listrik yaitu disisi stator, sedangkan sistem kelistrikan disisi rotornya diinduksikan melalui celah udara dari stator dengan media elektromagnet. Penggunaan motor induksi banyak digunakan di industri dengan berbagai aplikasi terutama yang memerlukan kecepatan konstan, karena jenis motor ini memiliki beberapa keunggulan diantaranya konstruksinya yang sederhana, kokoh, harga relatif murah dan tidak memerlukan pemeliharaan yang rumit.

Pada aplikasinya motor induksi seringkali dituntut untuk bekerja pada kecepatan konstan. Bertambahnya beban akan memperbesar kopel motor, yang akan memperbesar arus induksi pada rotor oleh karena itu, *slip* antara medan putar dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Perubahan beban ini akan menyebabkan berubahnya parameter motor oleh karena itu, kecepatan motor induksi turun dan tidak mencapai nilai referensi. Perubahan parameter secara otomatis mengakibatkan pemodelan matematis dari motor induksi yang merepresentasikan karakteristik motor menjadi tidak sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Berdasarkan hal tersebut maka dibutuhkan suatu cara untuk mengatur kecepatan dari motor induksi agar dapat mempertahankan kecepatan meskipun terjadi perubahan beban. Dibutuhkan metode yang tepat untuk melakukan kontrol kecepatan, maka metode yang digunakan untuk membuat permodelan dari motor induksi terhadap perubahan beban yaitu *adaptive* dan kontrolernya digunakan kontrol optimal [1]. Kontrol optimal mampu meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya sehingga menjaga kecepatan agar sesuai dengan referensi yang diinginkan.

Pada Tugas Akhir ini diharapkan dengan kontroler optimal LQR *Gain Scheduling* mampu mengikuti perubahan parameter yang disebabkan oleh perubahan beban oleh karena itu, diharapkan dengan sistem kontroler ini, keluaran dari *plant* yang dikontrol akan mengikuti referensi yang diinginkan [2].

1.2 Perumusan Masalah

Pada Tugas Akhir ini, masalah yang dibahas mengenai pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa. Salah satu kesulitan dalam pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa adalah kelemahan motor induksi yang tidak mampu mempertahankan kecepatannya dengan konstan bila terjadi perubahan pada beban. Motor induksi akan diberikan pembebanan berupa rem elektromagnetik yang dapat diatur daya kemagnetannya. Apabila terjadi perubahan pada beban maka kecepatan motor induksi akan turun. Oleh karena itu pada Tugas Akhir ini dibutuhkan kontroler yang dapat membuat kecepatan motor tetap konstan walaupun diberikan efek pembebanan. Kontroler LQR *Gain Scheduling* diharapkan dapat menjaga kecepatan agar tetap konstan pada saat ada perubahan beban.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa hal yang perlu dibatasi dalam Tugas Akhir ini agar penelitian yang dilakukan dapat tercapai, yaitu:

1. Efek pembebanan rem elektromagnetik pada *plant* hanya dilihat dari adanya perubahan masukan arus dan pengaruh secara spesifik tidak diperhitungkan secara detail.
2. Ruang lingkup perubahan parameter kontroler berdasarkan 3 kondisi pembebanan yang diberikan.
3. Metode *Gain Scheduling* digunakan untuk mengubah parameter kontroler yang terdapat pada sistem.
4. Pada Tugas Akhir ini, kontrol optimal yang digunakan adalah *Linear Quadratic Regulator* (LQR).
5. Sistem kontrol yang dirancang hanya untuk mengatur kecepatan.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini bertujuan membuat perancangan dan implementasi untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa dengan menerapkan metode kontroler LQR *Gain Scheduling*, sehingga dapat dihasilkan aksi kontrol yang mampu menjaga kecepatan tetap konstan jika terjadi perubahan beban.

1.5 Metodologi

Metodologi dalam pelaksanaan penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu:

1. Studi Literatur

Tahap studi literatur dilakukan dengan mencari beberapa sumber referensi yang berhubungan dengan *LQR Gain Scheduling*. Sumber referensi yang digunakan dapat berupa buku, jurnal, *website* dan sebagainya.

2. Identifikasi Sistem

Tahap identifikasi sistem dilakukan untuk memperoleh model matematis sistem.

3. Perancangan Kontroler

Tahap perancangan kontroler dilakukan dengan merancang algoritma kontroler yang didapat dari tahap identifikasi sistem. Kontroler yang didesain akan diuji serta disimulasikan kelayakannya.

4. Implementasi dan Analisa Data

Tahap implementasi dan analisa data dilakukan untuk melihat peforma kontroler yang didesain dan juga analisa terhadap hasil implementasi kontroler pada *plant*.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir

Penulisan buku Tugas Akhir merupakan tahap akhir dalam penelitian. Buku Tugas Akhir ditulis secara intensif bila proses pengujian telah selesai.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang disusun pada Tugas Akhir ini terdiri dari lima bab, sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, sistematika penulisan dan relevansi.

BAB II : TEORI PENUNJANG

Bab ini berisi tentang teori-teori penunjang dari tiap komponen yang digunakan pada sistem yang akan dirancang seperti: teori motor induksi tiga fasa, identifikasi sistem, *inverter*, sensor *rotary encoder*, dan *advantech* DAQ.

BAB III : PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi tentang perancangan sistem secara garis besar yang terdiri dari perancangan perangkat keras (*hardware*), perancangan perangkat lunak (*software*), identifikasi sistem, dan perancangan kontroler.

BAB IV : HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini menjelaskan tentang hasil implementasi dan pengujian sistem secara keseluruhan.

BAB V : PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari penelitian Tugas Akhir ini dan saran-saran mengenai kemungkinan pengembangan penelitian ini.

1.7 Relevansi

Hasil yang dicapai dari Tugas Akhir ini diharapkan menjadi salah satu referensi yang dapat digunakan dalam mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa, sehingga dapat membantu dalam melakukan pengaturan motor induksi tiga fasa yang umumnya banyak digunakan di industri. Selain itu penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi perbandingan dari beberapa metode pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dimasa sebelumnya maupun yang akan datang.

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa [3]

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. Keuntungan yang dimiliki motor induksi tiga fasa sebagai berikut:

1. Memiliki konstruksi yang sangat kuat dan sederhana
2. Memiliki harga yang relatif murah dan kehandalan yang tinggi
3. Memiliki efisiensi yang relatif tinggi pada keadaan normal, dan tidak ada sikat sehingga rugi gesekan kecil
4. Biaya pemeliharaan rendah.

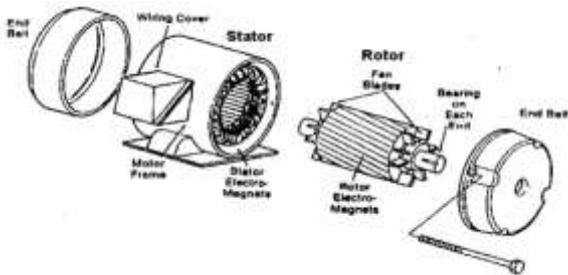
Kerugian yang dimiliki motor induksi tiga fasa sebagai berikut:

1. Kecepatan dari motor induksi yang sulit untuk dikontrol
2. *Power factor* rendah pada beban ringan
3. Arus *starting* pada motor induksi biasanya 5 sampai 7 kali dari arus nominal.

2.1.1 Komponen Motor Induksi

Motor induksi memiliki dua komponen listrik utama yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.

1. 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.
2. Stator adalah bagian dari motor induksi yang tidak berputar dan terletak pada bagian luar serta terbuat dari besi bundar berlaminasi.



Gambar 2.1 Komponen Motor Induksi

2.1.2 Prinsip Kerja Motor 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, Q = fluks)
3. Selanjutnya tegangan induksi akan menghasilkan arus (I) karena kumparan rotor merupakan kumparan rangkain 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 (ns) dengan kecepatan putar rotor (nr)
7. Perbedaan antara kecepatan nr dengan ns disebut dengan *slip* (S) yang dinyatakan dengan Persamaan $S = ((ns - nr) / ns) (100\%)$
8. Apabila $ns=nr$, maka tegangan akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada rotor, sehingga tidak ada torsi yang dapat dihasilkan (Torsi suatu motor akan timbul apabila $ns > nr$).

2.2 Rem Elektromagnetik [4]

Rem adalah suatu alat yang digunakan untuk melakukan suatu aksi yang akan menurunkan kecepatan dalam selang waktu yang ditentukan. Tipe rem yang umum digunakan adalah rem yang menggunakan gaya gesek untuk memberikan gaya lawan terhadap gaya gerak. Sistem pengereman elektromagnetik menggunakan gaya elektromagnetik untuk memperlambat suatu gerakan. Sebuah piringan dengan bahan logam non-feromagnetik terpasang dengan poros yang berputar. Piringan tersebut diapit oleh sisi stator berupa sistem lilitan elektromagnetik yang dapat membangkitkan medan magnet dari aliran listrik.

Rem elektromagnetik akan optimal untuk memberikan penurunan kecepatan, bukan untuk menghentikan gerak suatu objek. Sehingga Rem ini sering diaplikasikan untuk sistem pengereman pada *roller coaster*, kereta api dan juga digunakan pada alat *dinamometer* untuk pengukuran torsi suatu mesin. Bentuk fisik dari rem elektromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bentuk Fisik Rem Elektromagnetik

2.3 Sensor Rotary Encoder [5]

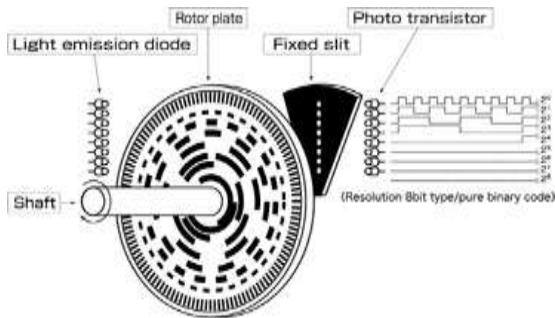
Rotary encoder adalah elektro-mekanik yang dapat mengukur gerakan dan posisi. *Rotary encoder* umumnya menggunakan sensor optik untuk menghasilkan sinyal pulsa yang dapat diartikan menjadi gerakan, posisi, dan arah. *Rotary encoder* tersusun dari suatu piringan tipis yang memiliki lubang-lubang pada bagian lingkaran piringan. LED ditempatkan pada salah satu sisi piringan sehingga cahaya akan menuju ke piringan. Pada sisi yang lain *photo-transistor* diletakkan sehingga dapat mendeteksi cahaya dari LED yang berseberangan. Piringan tipis tadi dikopel dengan poros motor, sehingga ketika motor berputar piringan juga akan ikut berputar.

Apabila cahaya dari LED dapat mencapai *photo-transistor* melalui lubang yang ada pada piringan, maka *photo-transistor* akan mengalami saturasi dan akan menghasilkan suatu pulsa gelombang persegi (pulsa). Semakin banyak jumlah lubang yang ada pada piringan, maka semakin tinggi nilai akurasi dari *rotary encoder* tersebut. Terdapat dua tipe sensor *rotary encoder*, yaitu tipe *absolute* dan *incremental*.

2.3.1 Absolute Rotary Encoder

Absolute encoder menggunakan piringan dan sinyal optik yang diatur sedemikian sehingga dapat menghasilkan kode digital untuk menyatakan sejumlah posisi tertentu dari poros yang dihubungkan padanya. Piringan yang digunakan untuk *absolute encoder* tersusun dari segmen-segmen cincin konsentris yang dimulai dari bagian tengah piringan ke arah tepi luar piringan yang jumlah segmennya selalu dua kali jumlah segmen cincin sebelumnya.

Cincin pertama di bagian paling dalam memiliki satu segmen transparan dan satu segmen gelap, cincin kedua memiliki dua segmen transparan dan dua segmen gelap, dan seterusnya hingga cincin terluar. Contoh *absolute encoder* seperti pada Gambar 2.3.



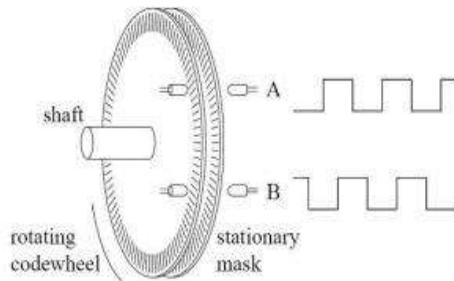
Gambar 2.3 Susunan Pola pada *Absolute Encoder* [6]

2.3.2 Incremental Rotary Encoder

Incremental encoder adalah jenis sensor *rotary encoder* 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.

Pada *rotary encoder* harus diketahui *channel* mana yang *leading* terhadap *channel* satunya. Hal tersebut dapat menentukan arah putaran yang terjadi karena kedua *channel* tersebut akan selalu berbeda fasa seperempat putaran (*quadrature signal*). Contoh *incremental encoder* seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Susunan Piringan *Incremental Encoder* [6]

2.4 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronika yang digunakan untuk mengubah listrik arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Keluaran suatu *inverter* dapat berupa tegangan AC dengan bentuk gelombang sinus (*sine wave*), gelombang kotak (*square wave*) dan sinus modifikasi (*sine wave modified*). Sumber tegangan masukan *inverter* dapat menggunakan baterai, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. *Inverter* dalam proses konversi tegangan DC menjadi tegangan AC membutuhkan suatu kenaikan tegangan berupa *step up transformer*. Hasil yang diperoleh berupa tegangan atau frekuensi yang dapat diatur, maka *inverter* dapat diaplikasikan sebagai pengatur kecepatan rotasi sebuah motor listrik AC. Aplikasi ini dikenal dengan sebutan *Variable Frequency Drive* (VFD).

Inverter dapat bekerja sesuai dengan deskripsi yang diinginkan, maka dibutuhkan parameter *setting*. Parameter *setting* berfungsi sebagai batasan operasional pengaman *inverter* serta mode operasional *inverter*. Beberapa parameter diantaranya batasan frekuensi maksimum, batasan

frekuensi minimum, daya serta arus yang semuanya dapat diperoleh dari spesifikasi motor yang digunakan.

Pada Tugas Akhir ini *inverter* yang digunakan yaitu Siemens tipe Micromaster 420, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Inverter* Siemens Micromaster 420 [7]

2.5 DAQ Advantech USB-4716

Data Acquisition (DAQ) merupakan bagian dari proses pengambilan *sample* dari kondisi *real* untuk menghasilkan data yang dapat dimanipulasi oleh komputer. DAQ mengubah gelombang analog menjadi digital dan sebaliknya. Pada Tugas Akhir ini digunakan Advantech USB-4716 sebagai modul DAQ. Modul DAQ USB-4716 diperlihatkan seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Bentuk Fisik DAQ Advantech USB-4716 [8]

DAQ USB-4716 merupakan *instrument amplifier* dengan *gain* yang dapat diprogram sehingga memungkinkan membuat sebuah sinyal *input* tanpa adanya pengkondisi sinyal eksternal. Dalam DAQ USB4716

terdapat *buffer* FIFO yang menyediakan *transfer* data dengan kecepatan tinggi dan memori SRAM yang memungkinkan melakukan konversi A/D *multichannel*. Adapun spesifikasi yang dimiliki DAQ USB-4716 diperlihatkan seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi DAQ Advantech USB-4716 [8]

| | | |
|----------------------|---------------------------|---|
| <i>Analog Input</i> | <i>Channels</i> | <i>16 SE/8 Diff</i> |
| | <i>Sampling Rates</i> | <i>200 kS/s</i> |
| | <i>Resolution</i> | <i>16 bits</i> |
| | <i>Unipolar Input (V)</i> | <i>0 ~ 10, 0 ~ 5, 0 ~ 2.5, 0 ~ 1.25</i> |
| | <i>Bipolar Inputs (V)</i> | <i>±10, ±5, ±2.5, ±1.25, ±0.625</i> |
| <i>Analog Output</i> | <i>Resolution</i> | <i>16 bits</i> |
| <i>General</i> | <i>Power Consumption</i> | <i>Typical:5V@360mA; Max:5V@450mA</i> |
| | <i>I/O Connectors</i> | <i>Onboard screw terminal</i> |
| | <i>Dimensions</i> | <i>132x80x32 mm</i> |
| | <i>Bus</i> | <i>USB 2.0</i> |
| <i>Timer/Counter</i> | <i>Resolution</i> | <i>32 bits</i> |
| | <i>Time Base</i> | <i>1 kHz</i> |
| | <i>Channels</i> | <i>1</i> |
| <i>TTL DI/O</i> | <i>Input Channels</i> | <i>8</i> |
| | <i>Output Channels</i> | <i>8</i> |

2.6 Sensor Arus [9]

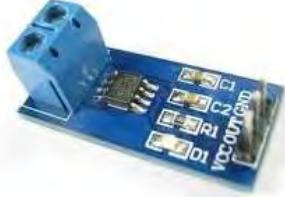
Pada Tugas Akhir ini sensor arus yang digunakan adalah sensor arus ACS 712. Sensor ini dapat mengukur arus AC maupun DC dengan *range* arus yang dapat dialirkan dari 0-5 A. Spesifikasi dari sensor arus ACS 712 ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor Arus ACS 712

| | |
|---------------------|----------|
| Tegangan Catu Daya | 5 Volt |
| Sensifitas Keluaran | 185 mV/A |
| Arus Maksimal | 5 A |
| Suhu Maksimal | 40 °C |

Konfigurasi dari sensor ini memiliki 2 terminal sebagai masukan arus dan 3 pin keluaran. Pin pertama dari sensor ini merupakan masukan untuk tegangan catu daya sebesar 5 Volt. Pin kedua merupakan jalur keluaran dari sensor berupa tegangan dari 0-5 Volt sedangkan pin ketiga

merupakan pin untuk titik referensi *ground* (GND). Sensor ACS 712 seperti diperlihatkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sensor Arus ACS 712

Prinsip kerja dari sensor ini yaitu jika sensor diberi tegangan catu daya sebesar 5 Volt tanpa ada arus yang mengalir pada sensor, maka akan mengeluarkan tegangan sebesar 2,5 Volt. Jika terdapat arus yang mengalir pada sensor (arus bernilai positif), maka tegangan yang keluar akan lebih besar dari 2,5 Volt. Perhitungan konversi tegangan yang terbaca oleh sensor menjadi nilai arus dapat dirumuskan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.1.

$$I = \frac{V_o - 2,5V}{0,185V/A} \quad (2.1)$$

2.7 Sensor Temperatur [10]

Sensor temperatur adalah suatu sensor yang bisa mengkonversi perubahan energi thermal suatu objek menjadi energi listrik. Sensor temperatur banyak jenis dan tipe nya. Pemilihan jenis dan tipe sensor temperatur tergantung dari jenis objek yang akan diukur temperaturnya, berdasarkan skala batasan temperatur, kebutuhan respon atau lambat, serta keakurasian pengukuran.

Sensor temperatur yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah IC LM35. IC LM35 merupakan sensor temperatur yang memiliki kelinieran yang sangat tinggi, perubahan tegangan sebesar $10\text{mV}/^\circ\text{C}$, kalibrasi dalam skala celcius, impedansi output yang kecil, harga yang murah. Sensor temperatur LM35 seperti diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Sensor LM35 [11]

2.8 *Integral Square Error (ISE)* [12]

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

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (2.2)$$

Hasil perhitungan ISE menunjukkan seberapa baik fungsi alih merepresentasikan respon hasil pengukuran, semakin kecil nilai ISE maka semakin baik pula model matematika yang digunakan.

2.9 *Kontroler Linear Quadratic Regulator (LQR)* [1]

Kontrol optimal adalah teknik kontrol yang berbasiskan maksimisasi atau minimisasi fungsi kriteria tertentu. Ada beberapa metode kontrol optimal seperti teknik kontrol *robust*, *tracking*, *linear quadratic regulator* dan lainnya. Pada Tugas Akhir ini digunakan metode kontrol *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk mencari *gain state feedback* (K).

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah sebuah kontrol optimal yang bertujuan membawa *state* akhir ke titik nol dengan meminimalkan *state cost function*. Misalkan sebuah *plant* mempunyai bentuk *state space* sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{B}(t)u(t) \quad (2.3)$$

$$y(t) = \mathbf{C}(t)x(t) \quad (2.4)$$

Dengan Indeks Performansi:

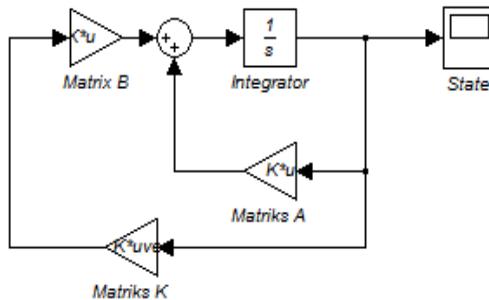
$$J = \frac{1}{2} x'(t_f)F(t_f)x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{x'(t)Q(t)x(t) + u'(t)R(t)u(t)\} dt \quad (2.5)$$

Dimana:

Q = Matriks simetris, semi definit positif

R = Matriks simetris, definit positif

Pengontrolan sistem LQR didasarkan pada nilai matriks pembobot Q dan R. Gambar diagram blok LQR ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram Blok Sistem LQR

Fungsi pembobot dari sistem didefinisikan pada Persamaan 2.6

$$V(x, u, t) = \frac{1}{2} \{x'(t)Q(t)x(t) + u'(t)R(t)u(t)\} \quad (2.6)$$

Sehingga diperoleh persamaan *Hamiltonian* pada Persamaan 2.7

$$H(x, u, \lambda, t) = V(x, u, t) + \lambda' f(x, u, t)$$

$$H(x, u, \lambda, t) = \frac{1}{2} x' Q x + \frac{1}{2} u' R u + \lambda' (A x + B u) \quad (2.7)$$

Kontrol optimal:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$R u^* + B' \lambda^* = 0 \quad (2.8)$$

$$u^* = -R^{-1} B' \lambda^* \quad (2.9)$$

dimana,

$$\frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{1}{2} u' R u \right) = R u$$

$$\frac{\partial}{\partial u} (\lambda' B u) = B' \lambda$$

State dan costate system:

$$\dot{x}^* = + \left(\frac{\partial H}{\partial \lambda} \right)_* = Ax^* + Bu^* \quad (2.10)$$

$$\dot{\lambda}^* = - \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)_* = -Qx^* - A' \lambda^* \quad (2.11)$$

Substitusi Persamaan kontrol (2.9) ke Persamaan *state* (2.10)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}^* \\ \dot{\lambda}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -E \\ -Q & -A' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dimana,

$$E = BR^{-1}B'$$

Closed-loop kontrol optimal:

$$\lambda^* = Px^* \quad (2.13)$$

Substitusi Persamaan (2.13) ke Persamaan kontrol (2.9)

$$u^* = -R^{-1}B'Px^* \quad (2.14)$$

$$\dot{\lambda}^* = \dot{P}x^* + P\dot{x}^* \quad (2.15)$$

Dengan menggunakan Persamaan transformasi (2.13) ke dalam Persamaan kontrol (2.9), *state* dan *costate* (2.10), (2.11) maka:

$$\dot{x}^* = Ax^* - BR^{-1}B'Px^* \quad (2.16)$$

$$\dot{\lambda}^* = -Qx^* - A'Px^* \quad (2.17)$$

Lalu, substitusi *state* dan *costate* Persamaan (2.16) dan (2.17) ke Persamaan (2.15)

$$\begin{aligned} -Qx^* - A'Px^* &= \dot{P}x^* + P[Ax^* - BR^{-1}B'Px^*] \\ [\dot{P} + PA + A'P + Q - PBR^{-1}B'P]x^* &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Persamaan *matrix differential Riccati*:

$$\dot{P} + PA + A'P + Q - PBR^{-1}B'P = 0 \quad (2.19)$$

Untuk Persamaan sinyal kontrol (2.14) menjadi:

$$\begin{aligned} u^*(t) &= -R^{-1}(t)B'(t)P(t)x^*(t) \\ u^*(t) &= -Kx^*(t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Dengan *gain state feedback*

$$K = -R^{-1}(t)B'(t)P(t) \quad (2.21)$$

Permasalahan yang umum ditemui dalam bidang kontrol yaitu tidak hanya menstabilkan sistem, tetapi bagaimana keluaran sistem mengikuti perubahan referensi atau *setpoint*. Dalam hal ini jika

diinginkan keluaran *plant* mengikuti sebuah sinyal perintah (referensi) tertentu, maka perlu dirancang sistemnya menggunakan *nonzero setpoint* [3]. Bentuk umum sinyal kontrol untuk *nonzero setpoint*:

$$u = -Kx + Lr \quad (2.22)$$

dimana,

$$L = [C(BK - A)^{-1}B]^{-1} \quad (2.23)$$

Untuk mencari nilai *gain state feedback* (K) pada *software* Labview bisa dilakukan langsung dalam *Mathscript* dengan sintaks:

$$[K,S,e]=lqr(A,B,Q,R)$$

Dengan

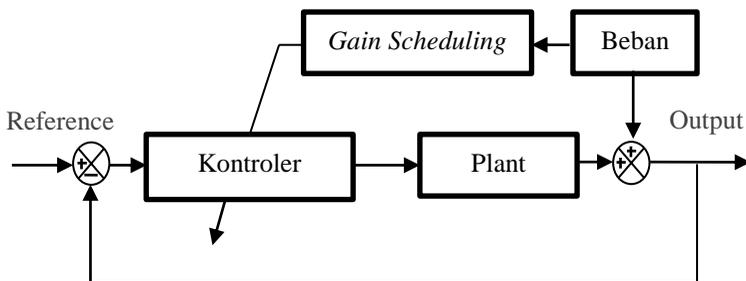
K = *gain state feedback*

S = solusi persamaan Aljabar Riccati

e = *closed-loop eigenvalue*

2.10 Metode *Gain Scheduling* [13], [14]

Pada Tugas Akhir ini digunakan metode *Gain Scheduling*. *Gain scheduling* merupakan salah satu metode yang efektif bagi sistem yang memiliki perubahan dinamik pada proses kerjanya. Prinsip kerja dari metode ini adalah melakukan proses penjadwalan parameter kontroler berdasarkan beberapa kondisi yang telah diketahui melalui *open loop*, sehingga kontroler dapat beradaptasi ketika terjadi perubahan pada proses kerja sistem. Diagram blok dari *Gain Scheduling* ditunjukkan seperti pada Gambar 2.10.

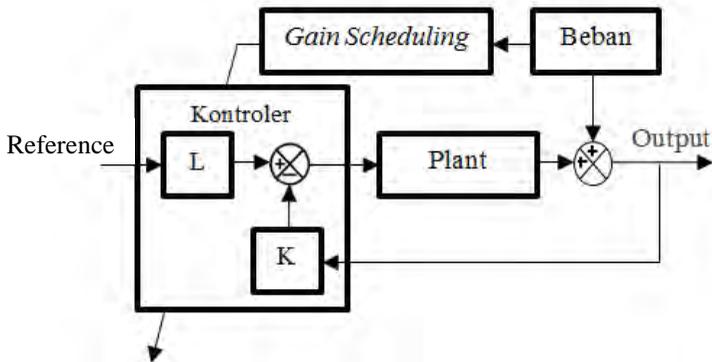


Gambar 2.10 Diagram Blok Sistem Kontroler *Adaptive Gain Scheduling*

Metode *Gain Scheduling* memiliki kelebihan yaitu parameter kontroler dapat berubah dengan cepat untuk merespon perubahan dinamika *plant*, tetapi metode ini juga memiliki kekurangan yaitu pada daerah transisi operasinya terjadi perubahan parameter yang kasar, sehingga menyebabkan performansi kurang baik. Hal tersebut terjadi karena sangat sulit untuk menentukan model linear di setiap titik operasi linearnya.

2.11 LQR Gain Scheduling [15]

LQR *Gain Scheduling* terdiri dari dua bagian yaitu LQR yang digunakan sebagai kontroler pada *plant*, sedangkan *Adaptive Gain Scheduling* digunakan untuk mengubah parameter kontroler LQR sehingga dapat memperbaiki kerja dari kontroler tersebut apabila terjadi perubahan dinamik pada *plant*. Pada metode *Adaptive Gain Scheduling* digunakan model regresi untuk menentukan nilai parameter. Diagram blok dari kontroler LQR *Gain Scheduling* ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Diagram Blok Sistem Kontroler LQR *Gain Scheduling*

2.12 LabVIEW [16]

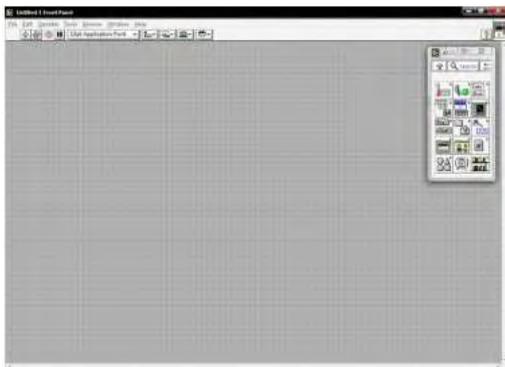
LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) adalah sebuah *software* pemrograman yang diproduksi oleh *National Instruments* dengan konsep yang berbeda. *Software* LabVIEW ini pertama kali dikembangkan tahun 1986. Seperti bahasa pemrograman lainnya yaitu C++, Matlab atau Visual Basic, LabVIEW yang mempunyai fungsi dan peranan yang sama, perbedaannya

LabVIEW menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis atau blok diagram sedangkan bahasa pemrograman lainnya berbasis teks.

Dalam pemrograman LabVIEW menggunakan ikon yang merepresentasikan suatu instruksi. Jika bahasa pemrograman berbasis teks mengeksekusi instruksi sesuai dengan urutan yang ditulis, LabVIEW menggunakan metode dimana alur data melalui berbagai ikon akan menentukan urutan eksekusi dari setiap instruksi. Pemrograman LabVIEW dikenal dengan sebutan VI atau *Virtual Instruments* karena penampilannya dan operasinya dapat meniru sebuah *instrument*. Tampilan *interface software* LabVIEW terdiri dari tiga komponen yaitu *Front Panel*, *Block Diagram* serta *Controls Palette* dan *Functions Palette*.

2.12.1 Front Panel

Front panel adalah *window* yang berlatar belakang abu-abu serta mengandung kontrol dan indikator. *Front panel* digunakan untuk membangun *virtual instrument* dan menjalankan program. *Front panel* berfungsi sebagai *interface* antara pengguna dengan program. Didalam *front panel* terdapat kontrol (*input*) dan indikator (*output*). Tampilan *front panel* dapat dilihat seperti pada Gambar 2.12.

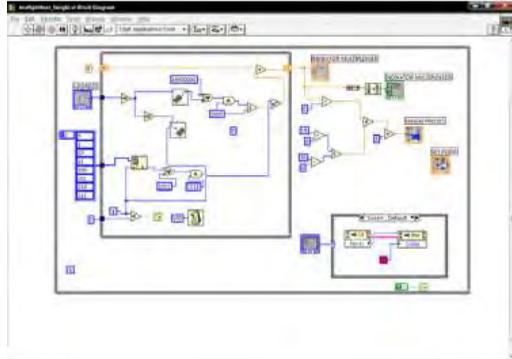


Gambar 2.12 Tampilan *Front Panel* LabVIEW

2.12.2 Block Diagram

Block diagram adalah bagian *window* yang berlatar belakang putih berisi *source code* yang telah dibuat. *Block diagram* berfungsi sebagai

instruksi untuk *front panel*. Tampilan *block diagram* dapat dilihat seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Tampilan *Block Diagram* LabVIEW

2.12.3 Controls dan Functions Palette

Dalam LabVIEW terdapat *controls palette* dan *functions palette* yang digunakan untuk membangun sebuah *Virtual Instrument (VI)*.

2.12.3.1 Controls Palette

Controls palette merupakan tempat beberapa kontrol dan indikator pada *front panel*. *Controls palette* hanya terdapat di *front panel*, untuk menampilkan *controls palette* dapat dilakukan dengan mengklik pada menu toolbar *View >> Controls Palette* atau klik kanan pada *front panel*. Tampilan *controls palette* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Tampilan *Controls Palette* pada LabVIEW

2.12.3.2 *Functions Palette*

Functions palette digunakan untuk membangun sebuah *block diagram* dan hanya terdapat pada jendela *block diagram*. Untuk menampilkan *functions palette* dapat dilakukan dengan mengklik pada menu toolbar *View >> Functions Palette* atau klik kanan pada jendela kerja *block diagram*. Tampilan *functions palette* dapat dilihat seperti pada Gambar 2.15.



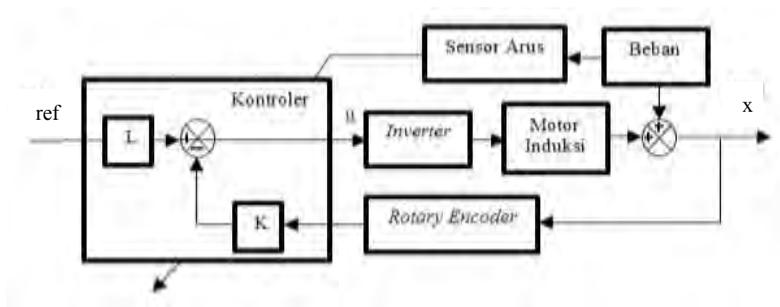
Gambar 2.15 Tampilan *Functions Palette* pada LabVIEW

BAB III PERANCANGAN SISTEM

3.1 Desain Sistem

Sistem yang dirancang adalah sistem pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa. Sistem yang dirancang ini mempunyai tujuan agar dapat menghasilkan kecepatan motor yang konstan pada kondisi beban yang berubah. Prinsip kerja dari sistem yaitu motor induksi dioperasikan pada kecepatan tertentu sesuai dengan referensi yang telah ditentukan, kemudian motor tersebut diberi beban berupa rem elektromagnetik dengan kondisi yang berubah. Kondisi perubahan beban dapat diketahui dari perubahan arus yang diberikan. Semakin besar perubahan beban yang diberikan, semakin besar pula perubahan arus yang terjadi sehingga kecepatan dari motor cenderung semakin menurun. Sistem kontrol digunakan untuk mengatur kecepatan motor agar dapat mempertahankan kecepatannya secara konstan pada kondisi beban yang berubah.

Sistem yang dirancang terdiri dari beberapa komponen yang terhubung satu dengan lain. Komponen dan desain dari sistem ditunjukkan seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Desain Sistem

Komponen yang digunakan pada sistem ini, diantaranya *Personal Computer* (PC), modul DAQ, *inverter*, motor induksi, sensor arus, sensor temperatur dan *rotary encoder*. Pada sistem ini, PC sebagai HMI (*Human Machine Interface*) menggunakan *software* LabVIEW yang digunakan untuk mengetahui respon keluaran dari sistem dan juga

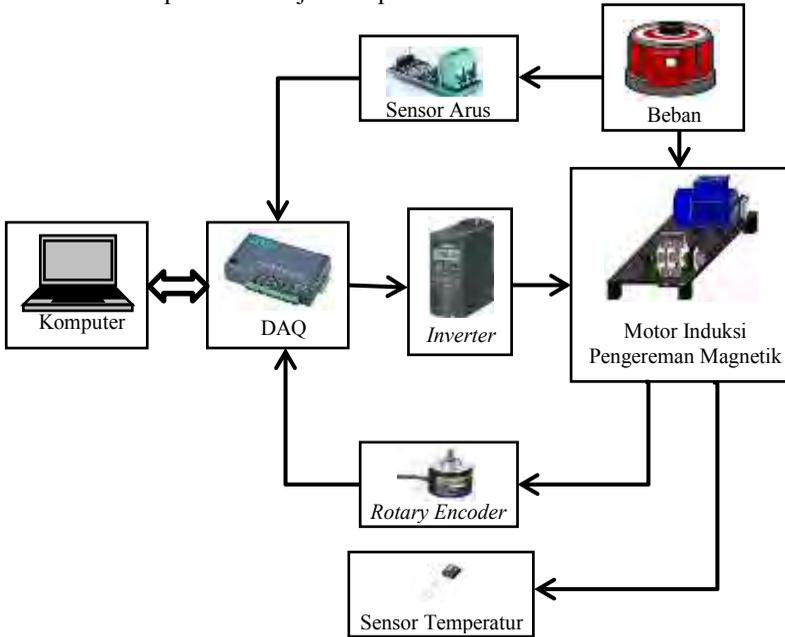
digunakan untuk pemberian nilai referensi yang diinginkan. Labview juga digunakan sebagai kontroler untuk memberikan mekanisme kontrol pada motor induksi sesuai dengan program yang diberikan. Modul DAQ digunakan sebagai pemberi tegangan kontrol terhadap *inverter* juga akuisisi data dari *rotary encoder* dan sensor arus. *Inverter* sebagai aktuator yang digunakan untuk pemberian aksi dalam pengaturan kecepatan motor induksi. *Rotary encoder* sebagai sensor yang memberikan sinyal umpan balik pada sistem sehingga dapat mengetahui nilai *error* yang terjadi dalam sistem kontrol. Sensor arus digunakan untuk mengetahui adanya indikasi perubahan pada beban. Indikasi perubahan arus pada beban digunakan untuk mengatur nilai parameter dari kontroler sehingga kontroler dapat memperbaiki kerja sistem. Dan sensor temperatur digunakan untuk mengetahui adanya indikasi perubahan suhu pada beban. Indikasi perubahan suhu pada beban digunakan untuk memonitoring agar beban tidak bekerja diatas batas temperatur maksimum.

3.2 Perancangan Hardware

Tahap pertama dalam perancangan sistem adalah perancangan *hardware* yang meliputi perancangan mekanik *plant*, perancangan kotak panel, perancangan *wiring* komponen pada kotak panel. *Hardware* dari sistem terdiri dari beberapa komponen. Komponen-komponen tersebut dirancang dan disesuaikan berdasarkan kebutuhan yang diperlukan pada *plant*. Komponen yang diperlukan pada *plant* diantaranya modul DAQ, *inverter*, motor induksi tiga fasa, *rotary encoder*, sensor arus, sensor temperature, rem elektromagnetik, kotak panel dan *power supply*. Modul DAQ yang digunakan pada sistem adalah Advantech USB-4716 dan *inverter* yang digunakan adalah *inverter* Siemens Micromaster 420.

Referensi diberikan melalui Labview dalam komputer yang diteruskan ke DAQ dan selanjutnya DAQ akan memberikan aksi pada *inveter*. Keluaran yang dihasilkan modul DAQ berupa tegangan 0-10 Volt. Dan tegangan masukan yang diperlukan oleh *inverter* Siemens Micromaster 420 sebesar 0-10 Volt agar dapat menghasilkan frekuensi 0-50 Hz yang nantinya digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa. Sensor arus digunakan untuk mengetahui indikasi perubahan pada beban dan keluaran dari sensor arus berupa tegangan yang nilainya sebanding dengan bertambahnya nilai arus yang ada pada beban. Keluaran dari sensor arus berupa tegangan 2,4-2,6 Volt yang

nantinya diteruskan ke DAQ. Komponen dan alur dari perangkat keras sistem secara spesifik ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Komponen dan Alur *Hardware* Sistem

Sensor temperatur digunakan untuk mengetahui indikasi perubahan temperatur pada beban agar beban tidak bekerja melebihi batas maksimal temperatur. Sensor *rotary encoder* digunakan untuk mengukur kecepatan piringan yang berputar diantara kumparan medan magnet. Keluaran dari sensor ini berupa pulsa dan hasil keluaran akan disalurkan ke DAQ. Hasil pembacaan kecepatan dari *rotary encoder* digunakan untuk mengetahui nilai *error* yang terjadi dan nantinya hasil tersebut digunakan untuk proses kontrol yang digunakan.

3.2.1 Perancangan Mekanik *Plant*

Plant yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah motor induksi tiga fasa dan *plant* yang digunakan ini merupakan hasil modifikasi dari *plant* Tugas Akhir sebelumnya. Motor induksi yang digunakan pada

plant merupakan produk dari *Alliance-Italy* dengan tipe AY 638-4. Spesifikasi dari motor ini dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.

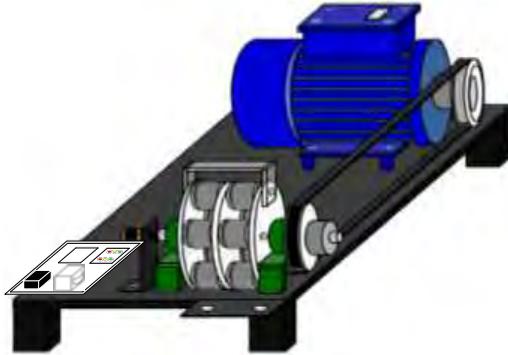
| Alliance – Italy | | IEC 34- CE | |
|------------------|---------------|---------------|---------|
| TYPE AY 638 – 4 | | No. 02030688 | |
| 0,18 KW | 0,25 HP | 1,07 / 0,62 A | |
| 220/380 V | 1310 r/min | LW 52 dB(A) | |
| CONN Δ/Y | PROT GRADE 55 | 50 Hz | 4,7 Kg |
| JB/T8680, 1-1998 | Work Rule S1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

Gambar 3.3 Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa Tipe AY 638-4

Motor induksi tiga fasa diberi beban berupa rem elektromagnetik. Beban rem elektromagnetik tersebut digunakan untuk mempengaruhi sistem kerja dari motor induksi. Pengaruh yang ditimbulkan oleh rem elektromagnetik berupa penurunan kecepatan dari motor induksi. Penurunan kecepatan dari motor induksi diakibatkan karena adanya gaya magnet yang dihasilkan oleh beban. Semakin besar beban yang diberikan, maka kecepatan motor induksi akan semakin menurun. Beban rem elektromagnetik akan berpengaruh sangat besar ketika motor induksi berputar dengan kecepatan yang tinggi.

Motor induksi dihubungkan dengan *shaft* dari sebuah piringan besi yang terdapat pada bagian tengah rem elektromagnetik. Puli dan *belt* digunakan untuk menghubungkan antara motor induksi dan piringan besi tersebut. Modifikasi yang dilakukan yaitu menambahkan rangkaian sensor arus dan indikator temperatur didekat *plant* motor induksi. Sebuah sensor *rotary encoder* diletakkan pada ujung *shaft* piringan besi. Sensor *rotary encoder* digunakan untuk mengetahui kecepatan yang dihasilkan oleh motor induksi. Hasil keluaran dari sensor *rotary encoder* akan dikirim ke Labview melalui DAQ. Sebuah *Auto Transformer* digunakan pada *plant*, bertujuan untuk mengatur perubahan nilai tegangan beban rem elektromagnetik yang nantinya akan diberikan pada motor induksi. *Auto Transformer* yang digunakan dapat menghasilkan tegangan AC sebesar 0-240 Volt. Pada *plant* ini juga terdapat rangkaian penyearah yang digunakan untuk mengubah tegangan AC *Auto Transformer* menjadi tegangan DC sebesar 0-240 Volt. Tegangan DC ini diberikan ke rem elektromagnetik sehingga dapat menimbulkan gaya magnet pada tiap kumparan. Gaya magnet yang dihasilkan akan semakin

kuat dengan bertambahnya nilai tegangan yang diberikan pada rem elektromagnetik tersebut. Deskripsi dari *plant* hasil modifikasi secara detail ditunjukkan seperti pada Gambar 3.4.



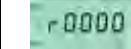
Gambar 3.4 Konstruksi Hasil Modifikasi *Plant* Secara Keseluruhan

3.2.2 *Inverter* Siemens Micromaster 420

Inverter ini merupakan *inverter* pengendali frekuensi yang biasa digunakan untuk pengaturan kecepatan motor AC tiga fasa. *Inverter* ini dikontrol oleh sebuah *mikroprocessor* yang menggunakan teknologi *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) sehingga memiliki kehandalan yang tinggi. *Inverter* Siement Micromaster 420 memiliki dua pilihan *mode* untuk pengaturan, yaitu *Basic Operator Panel* (BOP) dan *Advanced Operator Panel* (AOP). Perbedaan antara keduanya terletak pada cara *setting* parameter dan informasi yang ditampilkan LCD. Pada BOP informasi yang ditampilkan hanya berupa frekuensi (Hz), sedangkan pada AOP informasi yang ditampilkan beragam. Pada Tugas Akhir ini, *mode* yang digunakan adalah *mode* BOP.

Terdapat beberapa tombol yang harus diketahui terlebih dahulu sebelum pengoperasian *inverter* Siement Micromaster 420. Beberapa tombol tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Fungsi Tombol *Inverter* Micromaster 420

| Panel/Button | Fungsi | Keterangan |
|---|-----------------|---|
|  | Status Indikasi | Tampilan ketika akan memilih pengaturan parameter |

| Panel/Button | Fungsi | Keterangan |
|---|-------------------------|---|
|  | <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> dan akan tetap berjalan selama tombol ditekan |
|  | <i>Functions</i> | Tombol untuk menampilkan informasi tambahan. |
|  | <i>Access Parameter</i> | Tombol untuk mengakses parameter |
|  | <i>Increase Value</i> | Tombol untuk menaikkan nilai yang ditampilkan |
|  | <i>Decrease Value</i> | Tombol untuk menurunkan nilai yang ditampilkan |
|  | <i>AOP menu</i> | Kombinasi tombol ini digunakan untuk masuk ke <i>mode AOP</i> |

Langkah selanjutnya yang dilakukan setelah mengetahui fungsi dari setiap tombol adalah melakukan *setting* pada parameter. Langkah dan cara mengakses nilai parameter yang dibutuhkan sebagai berikut:

1. Tekan tombol  untuk mengakses parameter
2. Tekan tombol  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-*setting*
5. *Setting* nilai parameter berikutnya dengan cara yang sama.

Daftar parameter yang di-*setting* sesuai spesifikasi motor ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 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 |

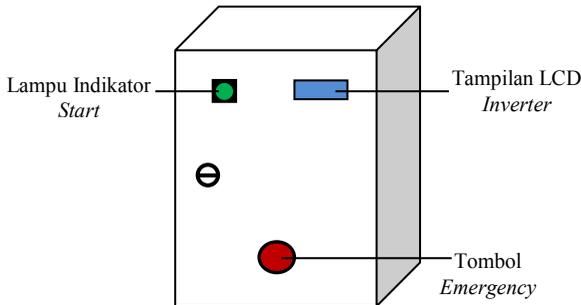
| No. | Parameter | Opsi | Nilai yang dipilih |
|-----|---|--|-----------------------------|
| 2. | P0010 (Memulai <i>Comissioning</i>) | 0 = <i>Ready</i> 1 = <i>Quick Comissioning</i> 30 = <i>Factory Setting</i> | 0 |
| 3. | P0100 (Frekuensi <i>Supply</i>) | 0 = [kW]; 50 Hz 1 = [HP]; 60 Hz 2 = [kW]; 60 Hz | 0 |
| 4. | P0304 (Tegangan Nominal Motor) | 10 – 2000 V | 380 <i>(name plate)</i> |
| 5. | P0305 (Arus Nominal Motor) | 0,01 – 3,25 A | 0,62 <i>(name plate)</i> |
| 6. | P0307 (Daya Motor) | 0,16 – 4,02 A | 0,18 <i>(name plate)</i> |
| 7. | P0310 (Frekuensi Motor) | 12 – 650 Hz | 50 <i>(name plate)</i> |
| 8 | P0311 (Kecepatan Motor) | 0 – 40000 rpm | 1310 <i>(name plate)</i> |
| 9. | P0700 (Pemilihan Sumber Perintah) | 0 = <i>Factory default setting</i> 1 = <i>BOP keypad</i> 2 = <i>Terminal</i> 4 = <i>USS BOP link</i> 5 = <i>USS COM link</i> | 1 |
| 10. | P1000 (Pemilihan <i>Setpoint</i> Frekuensi) | 1 = <i>MOP Setpoint</i> 2 = <i>Analog Setpoint</i> 3 = <i>Fixed Frequency</i> | 2 |
| 11. | P1080 (Frekuensi Minimum Motor) | 0 – 650 Hz | 0 |
| 12. | P1082 (Frekuensi Maksimum Motor) | 0 – 650 Hz | 50 |
| 13. | P1120 (<i>Ramp-up Time</i>) | 0,00 – 650,00 detik | 10 |
| 14. | P1121 (<i>Ramp-down Time</i>) | 0,00 – 650,00 detik | 10 |
| 15. | P3900 (<i>End of Quick Comissioning</i>) | 0 = <i>No Quick Comissioning</i> 1 = <i>End Quick Comissioning with factory reset</i> 2 = <i>End Quick Comissioning with I/O factory reset</i> | 1 |

| No. | Parameter | Opsi | Nilai yang dipilih |
|-----|-----------|---|--------------------|
| | | 3 = <i>End Quick Comissioning without factory reset</i> | |

Setelah melakukan pengaturan untuk konfigurasi komponen *inverter* dengan beberapa ketentuan yang terdapat dalam tabel, maka *inverter* tersebut telah siap untuk digunakan.

3.2.3 Perancangan Kotak Panel

Kotak panel pada Tugas Akhir ini digunakan sebagai tempat untuk meletakkan beberapa komponen elektronik dan juga berfungsi untuk memberikan kenyamanan dan keamanan bagi pengguna. Kotak panel terbuat dari logam dan memiliki ukuran panjang 30 cm, lebar 20 cm, dan tinggi 40 cm. Desain dari kotak panel yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



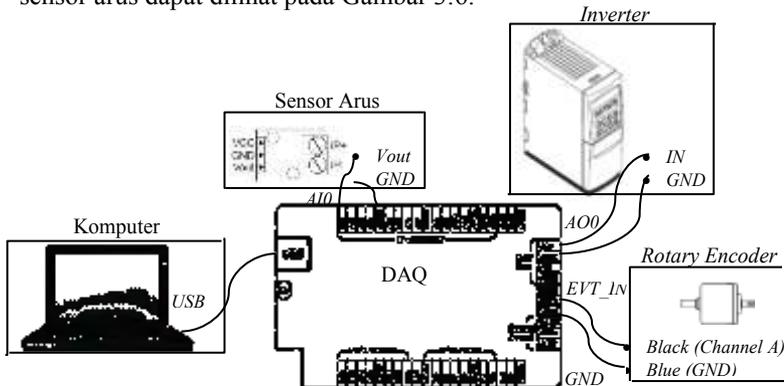
Gambar 3.5 Desain Kotak Panel

Kotak *panel* ini berisikan beberapa komponen seperti rangkaian, antara lain:

1. *Power supply* (5 Volt, ± 12 Volt dan 24 Volt)
2. *Inverter* Siemens Micromaster 420
3. DAQ Advantech USB-4716
4. MCB (*Main Circuit Breaker*)
5. Lampu indikator *start*
6. Tombol *emergency*.

3.2.4 DAQ Advantech USB-4716

DAQ yang digunakan pada Tugas Akhir ini merupakan buatan dari Advantech dengan tipe USB-4716. DAQ digunakan untuk memberikan tegangan kontrol dari Labview sebagai tempat pemrograman di Komputer. DAQ juga digunakan mengakuisisi data dari *rotary encoder* dan sensor arus yang keduanya menjadi *feedback* dalam kontrol yang dipakai. *Wiring* diagram antara DAQ, *inverter*, *rotary encoder* dan sensor arus dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 *Wiring* DAQ dengan Beberapa Komponen

3.2.5 Sensor *Rotary Encoder*

Sensor *rotary encoder* yang digunakan pada Tugas Akhir ini merupakan buatan dari Autonics dengan tipe E30S4-100-3-N-5. Sensor *rotary encoder* digunakan untuk mengukur kecepatan putar dari motor dan berfungsi sebagai penghasil sinyal umpan balik (*feedback*) berupa kecepatan terhadap pengaturan sistem. Sensor *rotary encoder* Autonics dengan tipe E30S4-100-3-N-5 memiliki resolusi sebesar 100 P/R (*Pulse/Rotation*) dan memiliki 2 *output phase* yaitu *channel A* dan *channel B*. Konfigurasi/bentuk fisik dan spesifikasi secara detail sensor *rotary encoder* ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan Tabel 3.3.

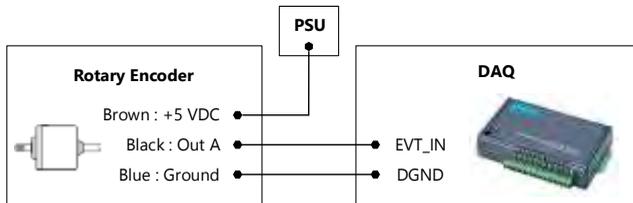


Gambar 3.7 Konfigurasi Sensor *Rotary Encoder*

Tabel 3.3 Spesifikasi *Rotary Encoder* Autonics E30S4-100-3-N-5

| | |
|--------------------------------------|--|
| Typ Encoder | <i>Incremental</i> |
| Tegangan Supply | 5 V DC (<i>ripple</i> (p-p): maksimal 5%) |
| Konsumsi Arus | 20 mA DC (maksimal) |
| Resolusi | 100 P/R (<i>Pulse/Rotation</i>) |
| Output Phase | A, B |
| Control output (Output type) | NPN <i>open collector output</i> |
| Control output (Load current) | 30 mA max. (<i>sink current</i>) |

Wiring diagram antara kabel *rotary encoder* dan DAQ dapat dilihat pada Gambar 3.8.

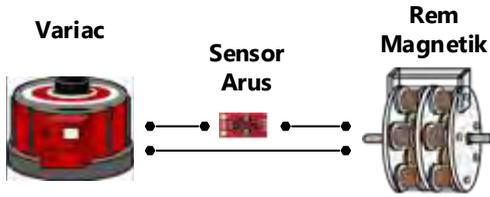


Gambar 3.8 *Wiring Pin* Sensor *Rotary Encoder* dengan DAQ

3.2.6 Sensor Arus

Sensor arus digunakan untuk mengetahui efek pembebanan saat motor induksi beroperasi. Sensor arus dipasang secara seri dengan beban rem elektromagnetik. Sensor arus yang digunakan adalah sensor arus ACS 712. Sensor ini dapat mengukur arus AC maupun DC dengan *range* arus yang dapat dialirkan dari 0-5 A. Spesifikasi dari sensor arus ACS 712 ditunjukkan pada Tabel 2.2.

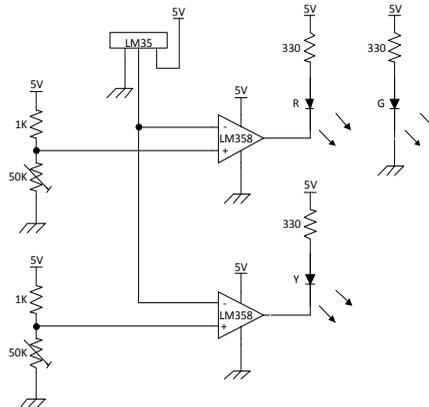
Konfigurasi dari sensor ini memiliki 2 terminal sebagai masukan arus dan 3 pin keluaran. Pin pertama dari sensor ini merupakan masukan untuk tegangan catu daya sebesar 5 Volt. Pin kedua merupakan jalur keluaran dari sensor berupa tegangan dari 0-5 Volt sedangkan pin ketiga merupakan pin untuk titik referensi *ground* (GND). *Wiring* kabel antara *auto transformer*, sensor arus dan rem magnetik dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Wiring Sensor Arus ACS 712

3.2.7 Sensor Temperatur

Sensor temperatur digunakan untuk memonitoring agar rem magnetik tidak bekerja pada temperatur maksimum. Ketika rem elektromagnetik bekerja pada kondisi temperatur maksimum (*overheat*) menyebabkan rem kehilangan daya cengkramnya karena medan magnet yang dihasilkan berkurang akibat panas. Sensor temperatur dipasang menempel pada rem magnetik. Pada Tugas Akhir ini digunakan sensor temperatur LM35 yang dibagian kiri dan kanan piringan rem magnetik. Terdapat tiga warna indikator yang mengindikasikan level panas dari piringan magnet tersebut. Warna hijau menandakan panas antara *range* 0°C sampai 40°C, warna kuning menandakan panas antara *range* 40°C sampai 60°C, warna merah menandakan panas telah melebihi batas 60°C. Berikut skema rancangan dari sensor temperatur pada Gambar 3.10.



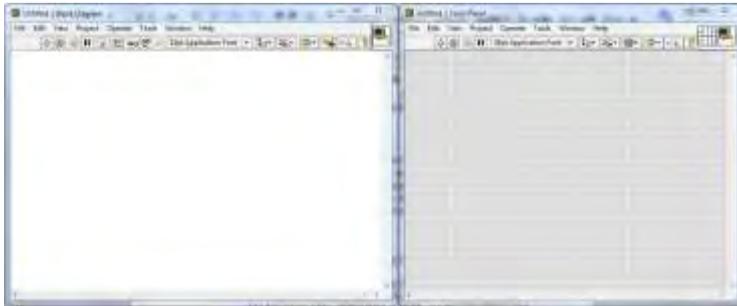
Gambar 3.10 Wiring Perancangan Sensor Temperatur

3.3 Perancangan Software

Software yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah Labview 2013 sebagai media untuk memprogram kontroler dan merancang sebuah HMI (*Human Machine Interface*) dari komputer sebagai *interface* alat dengan operator.

Untuk membuat program pada Labview 2013 sebagai kontroler LQR *Gain Scheduling* serta sebagai HMI untuk mengontrol kecepatan motor induksi berikut adalah langkah-langkahnya:

1. Membuka *pallet* baru di Labview dengan cara mengklik *Blank VI*, maka akan muncul *pallet* serta diagram blok seperti pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Diagram Blok dan *Pallet* pada Labview

2. Buat *while loop* untuk mengeksekusi komponen-komponen yang berada di dalam *loop* sehingga program dapat terus-menerus dieksekusi. Kemudian desain *input* dan *output* dari DAQ sebagai media komunikasi Labview dengan DAQ menggunakan DAQ *Navi Assistant*, kemudian akan muncul *window* baru DAQ *Navi Assistant Advantech*, kemudian pertama pilih sebagai *output analog* untuk sinyal kontrol, pilih *static AO*, selanjutnya pilih Device USB-4716 kemudian pilih *range* tegangan untuk semua *channel* 0~10 Volt, kemudian *next* untuk pilih *scan channel*, *next* kembali untuk melihat *preview setting* yang dipilih, kemudian klik *finish*. Untuk DAQ *Navi Assistant* kedua pilih sebagai *frequency counter* yaitu dengan men-*setting* sebagai *counter*, kemudian pilih *frequency measurement* untuk sinyal *feedback* dari sensor *rotary encoder*, selanjutnya klik *next* untuk melihat *channel* dan *period*,

pilih *channel 0*, kemudian klik *next* untuk melihat *overview* dari hasil *setting*, kemudian klik *finish*. Dan untuk DAQ Navi Assistant ketiga pilih sebagai *input analog* untuk sinyal *feedback* beban, pilih *static AI*, selanjutnya pilih Device USB-4716 kemudian pilih *range* tegangan untuk semua *channel 0~5 Volt*, kemudian *next* untuk pilih *scan channel*, *next* kembali untuk melihat *preview setting* yang dipilih, kemudian klik *finish*. Gambar hasil *setting-an input* dan *output* DAQ seperti terlihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 *Setting Input dan Output DAQ*

3.4 Identifikasi *Plant*

Identifikasi sistem diperlukan untuk mendapatkan model matematika motor induksi tiga fasa. Pada Tugas Akhir ini, identifikasi yang dilakukan adalah identifikasi dinamis yang dilakukan secara *open loop* dengan melihat keluaran respon berupa kecepatan terhadap referensi yang diberikan. Sinyal uji PRBS diberikan melalui Labview dengan nilai *setpoint* antara 600-700 rpm. Hasil respon *plant* yang terbaca oleh *rotary encoder* akan ditampilkan di Labview. Data kecepatan juga disimpan oleh *microsoft excel* melalui Labview dengan *time sampling* yang digunakan sebesar 0,01 detik.

3.4.1 Metode Pembebanan *Plant*

Pembebanan diperlukan untuk menentukan model matematika dari suatu *plant* dalam kondisi yang berbeda. Perubahan parameter pada *plant* dapat terjadi akibat adanya pembebanan yang diberikan pada sistem. Pada Tugas Akhir ini, rem elektromagnetik digunakan sebagai

beban motor induksi tiga fasa. Pembebanan dibagi ke dalam 3 kondisi berdasarkan nilai tegangan yang masuk ke rem elektromagnetik, yaitu beban 0 (0V), beban 1 (140V) dan beban 2 (220V). Pengambilan data dilakukan ketika motor induksi berputar dengan sinyal PRBS dalam *range* 600-700 rpm. Penentuan model matematik didasarkan pada tiga kondisi yaitu kondisi beban minimal, nominal dan maksimal. Beban minimal yaitu ketika motor diberi beban 0. Beban nominal yaitu ketika motor diberi beban 1 dan beban maksimal ketika motor diberi beban 2.

3.4.2 Metode Identifikasi

Metode identifikasi diperlukan untuk mencari respon model yang paling mendekati respon *plant*. Pada Tugas Akhir ini identifikasi dilakukan menggunakan *toolbox identification* pada *software* Matlab. Identifikasi dinamis menggunakan sinyal PRBS dengan *output* yang dihasilkan dicatat ke *.txt file* kemudian diolah menggunakan *toolbox identification software* pada Matlab. Dari sinyal *input* dan *output* dapat dibentuk ke persamaan *transfer function* melalui *process identification* (P2D) pada *toolbox*. Setelah didapatkan model matematika dari *plant*, selanjutnya validasi kesalahan dengan ISE agar model hasil identifikasi mendekati dengan model aslinya.

3.4.3 Identifikasi Beban Minimal

Identifikasi ini dilakukan pada kondisi motor induksi berputar dengan sinyal PRBS dalam *range* 600-700 rpm tanpa diberi beban atau tegangan masukan pada beban 0. Identifikasi untuk mendapatkan model matematika beban minimal dilakukan sebanyak tiga kali. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan model matematika dengan nilai ISE yang terkecil. Nilai ISE yang dihasilkan menyatakan kualitas dari model matematika untuk kondisi beban minimal. Hasil untuk kondisi beban minimal ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hasil Identifikasi pada Beban Minimal

| No | Model Matematika | ISE |
|----|--------------------------------------|------|
| 1. | $\frac{76,83}{s^2 + 16,15s + 65,24}$ | 1794 |
| 2. | $\frac{67,77}{s^2 + 15,11s + 57,05}$ | 1609 |
| 3. | $\frac{70,52}{s^2 + 16,11s + 59,85}$ | 1671 |

Berdasarkan data yang telah diperoleh seperti pada Tabel 3.4. Nilai ISE (*Integral Square Error*) terkecil bernilai 1609, sehingga hasil identifikasi model matematika yang digunakan untuk beban minimal seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

$$G(s) = \frac{67,77}{s^2 + 15,11s + 57,05} \quad (3.1)$$

3.4.4 Identifikasi Beban Nominal

Identifikasi ini dilakukan pada kondisi motor induksi berputar dengan sinyal PRBS dalam *range* 600-700 rpm dan diberi beban rem elektromagnetik dengan tegangan masukan pada beban sebesar 140 Volt. Identifikasi untuk mendapatkan model matematika beban nominal dilakukan sebanyak tiga kali. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan model matematika dengan nilai ISE yang terkecil. Nilai ISE yang dihasilkan menyatakan kualitas dari model matematika untuk kondisi beban nominal. Hasil untuk kondisi beban nominal ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Hasil Identifikasi pada Beban Nominal

| No | Model Matematika | ISE |
|----|--------------------------------------|------|
| 1. | $\frac{73,93}{s^2 + 16,37s + 62,95}$ | 2044 |
| 2. | $\frac{74,68}{s^2 + 16,08s + 64,61}$ | 1953 |
| 3. | $\frac{76,81}{s^2 + 16,02s + 65,8}$ | 2123 |

Berdasarkan data yang telah diperoleh seperti pada Tabel 3.5. Nilai ISE (*Integral Square Error*) terkecil bernilai 1953, sehingga hasil identifikasi model matematika yang digunakan untuk beban nominal seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.2.

$$G(s) = \frac{74,68}{s^2 + 16,08s + 64,61} \quad (3.2)$$

3.4.5 Identifikasi Beban Maksimal

Identifikasi ini dilakukan pada kondisi motor induksi berputar dengan sinyal PRBS dalam *range* 600-700 rpm dan diberi beban rem elektromagnetik dengan tegangan masukan pada beban sebesar 220

Volt. Identifikasi yang dilakukan untuk mendapatkan model matematika beban maksimal dilakukan sebanyak tiga kali. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan model matematika dengan nilai ISE yang terkecil. Nilai ISE yang dihasilkan menyatakan kualitas dari model matematika untuk kondisi beban maksimal. Hasil untuk kondisi beban maksimal ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Hasil Identifikasi pada Beban Maksimal

| No | Model Matematika | ISE |
|----|--------------------------------------|------|
| 1. | $\frac{80,66}{s^2 + 16,83s + 70,85}$ | 2197 |
| 2. | $\frac{80,31}{s^2 + 16,8s + 70,54}$ | 2206 |
| 3. | $\frac{79,10}{s^2 + 15,77s + 69,65}$ | 2320 |

Berdasarkan data yang telah diperoleh seperti pada Tabel 3.6. Nilai ISE (*Integral Square Error*) terkecil bernilai 2197, sehingga hasil identifikasi model matematika yang digunakan untuk beban maksimal seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.3.

$$G(s) = \frac{80,66}{s^2 + 16,83s + 70,85} \quad (3.3)$$

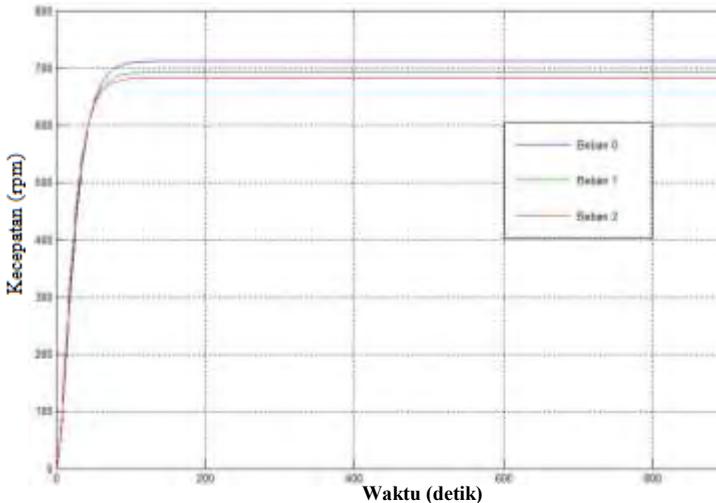
3.5 Perancangan Kontroler *Linear Quadratic Regulator (LQR) Gain Scheduling*

Model matematika untuk tiap kondisi pembebanan ditunjukkan seperti pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Model Matematika *Plant* untuk Setiap Kondisi Pembebanan

| No | Pembebanan | Model Matematika |
|----|------------|--------------------------------------|
| 1. | Beban 0 | $\frac{67,77}{s^2 + 15,11s + 57,05}$ |
| 2. | Beban 1 | $\frac{74,68}{s^2 + 16,08s + 64,61}$ |
| 3. | Beban 2 | $\frac{80,66}{s^2 + 16,83s + 70,85}$ |

Grafik respon dari tiap pembebanan ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Respon Hasil Tiap Kondisi Pembebanan

Berdasarkan pada hasil respon yang ditunjukkan pada Gambar 3.13, maka didesain kontroler yang dapat beradaptasi terhadap perubahan beban. Pada Tugas Akhir ini metode kontrol yang digunakan adalah kontroler LQR *Gain Scheduling*. Metode *Gain Scheduling* digunakan untuk penjadwalan nilai parameter kontroler LQR dan untuk melakukan mekanisme penalaran nilai parameter dalam *Gain Scheduling* digunakan perhitungan pendekatan model regresi. Mekanisme kontroler LQR *Gain Scheduling* ditunjukkan pada Gambar 2.11.

3.5.1 Perancangan Kontroler LQR

Pada Tugas Akhir ini, kontroler LQR dirancang agar dapat menjaga kestabilan kecepatan putar motor induksi tiga fasa. Ada beberapa prosedur yang dilakukan untuk mendapatkan parameter kontroler LQR. Penghitungan parameter kontroler LQR membutuhkan parameter *plant* dalam bentuk *state space* [1]. Oleh karena itu fungsi

alih sistem harus diubah dalam bentuk *state space*. Pengubahan fungsi alih sistem dalam bentuk *state space* dilakukan untuk tiap pembebanan.

3.5.1.1 Parameter Plant Beban Minimal

Didapatkan model matematika *plant* untuk beban minimal dari proses identifikasi seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.4.

$$G(s) = \frac{67,77}{s^2 + 15,11s + 57,05} \quad (3.4)$$

Kemudian persamaan *transfer function* diubah dalam bentuk *state space* dengan langkah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} s^2y(s) + 15,11sy(s) + 57,05y(s) &= 67,77u(s) \\ \frac{s^2y(t)}{dt^2} + \frac{15,11sy(t)}{dt} + 57,05y(t) &= 67,77u(t) \\ \ddot{y} &= -15,11\dot{y} - 57,05y + 67,77u \end{aligned} \quad (3.5)$$

Maka diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned} x_1 &= y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y} \\ x_2 &= \dot{y} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} = -15,11\dot{y} - 57,05y + 67,77u \end{aligned} \quad (3.6)$$

Maka bentuk *plant* dalam *state space* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -57,05 & -15,11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 67,77 \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Didapatkan parameter *plant* beban minimal:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -57,05 & -15,11 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 67,77 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \quad (3.8)$$

3.5.1.2 Parameter Plant Beban Nominal

Didapatkan model matematika *plant* untuk beban nominal dari proses identifikasi seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.9.

$$G(s) = \frac{74,68}{s^2 + 16,08s + 64,61} \quad (3.9)$$

Kemudian persamaan *transfer function* diubah dalam bentuk *state space* dengan langkah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
s^2y(s) + 16,08sy(s) + 64,61y(s) &= 74,68u(s) \\
\frac{s^2y(t)}{dt^2} + \frac{16,08sy(t)}{dt} + 64,61y(t) &= 74,68u(t) \\
\ddot{y} &= -16,08\dot{y} - 64,61y + 74,68u
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Maka diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned}
x_1 &= y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y} \\
x_2 &= \dot{y} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} = -16,08\dot{y} - 64,61y + 74,68u
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Maka bentuk *plant* dalam *state space* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -64,61 & -16,08 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 74,68 \end{bmatrix} u \\
y &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Didapatkan parameter *plant* beban nominal:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -64,61 & -16,08 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 74,68 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \tag{3.13}$$

3.5.1.3 Parameter Plant Beban Maksimal

Didapatkan model matematika *plant* untuk beban maksimal dari proses identifikasi seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.14.

$$G(s) = \frac{80,66}{s^2 + 16,83s + 70,85} \tag{3.14}$$

Kemudian persamaan *transfer function* diubah dalam bentuk *state space* dengan langkah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
s^2y(s) + 16,83sy(s) + 70,85y(s) &= 80,66u(s) \\
\frac{s^2y(t)}{dt^2} + \frac{16,83sy(t)}{dt} + 70,85y(t) &= 80,66u(t) \\
\ddot{y} &= -16,83\dot{y} - 70,85y + 80,66u
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Maka diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned}
x_1 &= y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y} \\
x_2 &= \dot{y} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} = -16,83\dot{y} - 70,85y + 80,66u
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Maka bentuk *plant* dalam *state space* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -70,85 & -16,83 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 80,66 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Didapatkan parameter *plant* beban maksimal:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -70,85 & -16,83 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 80,66 \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \quad (3.18)$$

3.5.1.4 Matrik Q dan R

Matrik Q adalah matrik yang nilainya menentukan lebar area *state*, sedangkan matrik R adalah matrik yang nilainya menentukan lebar jangkauan aksi kontrol. Semakin besar matrik Q maka akan memperbesar elemen penguatan *state feedback gain* K sehingga akan mempercepat respon mencapai keadaan tunak. Pada Tugas Akhir ini dipilih nilai matrik Q dan R sebagai berikut:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix} \quad R = [100]$$

3.5.2 Perancangan Mekanisme Gain Scheduling

Pada dasarnya kontroler LQR hanya dapat digunakan pada *plant* dengan satu fungsi alih saja, sehingga tidak dapat digunakan pada keadaan dengan fungsi alih yang berbeda. Hal ini yang menjadi dasar dalam penggunaan mekanisme *Gain Scheduling*. Data masukan yang digunakan dalam hal ini berupa data arus yang masuk pada beban dan data keluaran berupa nilai parameter a, b dan c.

Mekanisme dirancang dengan pendekatan model regresi [15]. Perhitungan pendekatan model ini sama dengan pendekatan model matematika menggunakan rumus *least square*. Perbedaan diantara kedua pendekatan adalah untuk *least square* secara *online* dan regresi untuk *offline*. Model regresi yang digunakan model kuadratik untuk memperoleh parameter kontroler pada masing-masing perubahan beban. Seperti yang telah dijelaskan, pembebanan dibagi ke dalam 3 kondisi yaitu beban 0 (0V), beban 1 (140V) dan beban 2 (220V). Persamaan model *state space plant* adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a & -b \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ c \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0] \quad (3.19)$$

Nilai dari a, b dan c didasarkan pada data nilai yang didapatkan dari perhitungan *plant* pada kondisi pengujian yang berbeda-beda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Parameter pada 3 Kondisi Pembebanan

| No | Kondisi Pembebanan | Arus/ i_l | Parameter | | |
|----|--------------------|-------------|-----------|-------|-------|
| | | | a | b | c |
| 1. | Beban 0 | 2,48 | 57,05 | 15,11 | 67,77 |
| 2. | Beban 1 | 2,56 | 64,61 | 16,08 | 74,68 |
| 3. | Beban 2 | 2,6 | 70,85 | 16,83 | 80,66 |

Dengan model regresi kuadratik digunakan untuk mencari parameter pada setiap nilai a, b dan c yang diperhitungkan. Nantinya akan diperoleh masing-masing nilai parameter dengan rumus perhitungan *least square* seperti pada Persamaan 3.22. Berikut rincian perhitungan model regresi:

$$a = \alpha_1 + \alpha_2 * i_l + \alpha_3 * i_l^2 \quad (3.20)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & i_l & i_l^2 \\ 1 & i_l & i_l^2 \\ 1 & i_l & i_l^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = ((I_L)^T * I_L)^{-1} * (I_L)^T * A \quad (3.22)$$

Maka akan diperoleh nilai α_1 , α_2 , α_3 sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2411,1 \\ 1966 \\ -409,9 \end{pmatrix}$$

Nilai parameter β_1 , β_2 , dan β_3 dengan acuan nilai b dan i_l yang telah diperoleh dari model matematik. Berikut rincian perhitungan model regresi:

$$b = \beta_1 + \beta_2 * i_l + \beta_3 * i_l^2 \quad (3.23)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & i_l & i_l^2 \\ 1 & i_l & i_l^2 \\ 1 & i_l & i_l^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = ((\mathbf{I}_L)^T * \mathbf{I}_L)^{-1} * (\mathbf{I}_L)^T * \mathbf{B} \quad (3.25)$$

Maka akan diperoleh nilai $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -250,5932 \\ 199,4565 \\ -42,1301 \end{pmatrix}$$

Serta nilai parameter $\gamma_1, \gamma_2,$ dan γ_3 dengan acuan nilai c dan i_l yang telah diperoleh dari model matematik. Berikut rincian perhitungan model regresi:

$$c = \gamma_1 + \gamma_2 * i_l + \gamma_3 * i_l^2 \quad (3.26)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & i_l & i_l^2 \\ 1 & i_l & i_l^2 \\ 1 & i_l & i_l^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = ((\mathbf{I}_L)^T * \mathbf{I}_L)^{-1} * (\mathbf{I}_L)^T * \mathbf{C} \quad (3.28)$$

Maka akan diperoleh nilai $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2582,9 \\ -2085,2 \\ 431,8 \end{pmatrix}$$

Keterangan:

- a = nilai parameter K untuk *plant* pada kondisi tertentu
- b = nilai parameter K untuk *plant* pada kondisi tertentu
- c = nilai parameter K untuk *plant* pada kondisi tertentu
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = konstanta
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = konstanta
- $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ = konstanta
- i_l = nilai tegangan sensor arus pada kondisi tertentu

Berdasarkan Persamaan 3.20, 3.23 dan 3.26 maka diperoleh persamaan regresi untuk nilai a, b dan c sebagai berikut:

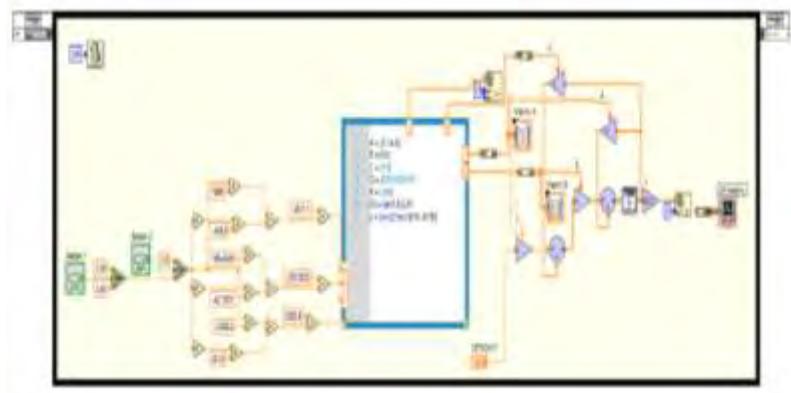
$$a = -2411,1 + 1966 * i_l - 409,9 * i_l^2 \quad (3.29)$$

$$b = -250,6 + 199,5 * i_l - 42,1 * i_l^2 \quad (3.30)$$

$$c = 2582,9 - 2085,2 * i_l + 431,8 * i_l^2 \quad (3.31)$$

3.6 Perancangan Simulasi

Simulasi merupakan salah satu tahap yang dapat menentukan keberhasilan dari kontroler yang telah didesain sebelum kontroler diimplementasikan pada *plant*. Pada Tugas Akhir ini, simulasi dari kontroler menggunakan Labview. Diagram blok Labview dari simulasi yang telah dibuat secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Diagram Blok Simulasi LQR *Gain Scheduling* pada Labview

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Komponen Sistem

Tahap ini dilakukan pengujian terhadap beberapa komponen yang terdapat pada sistem. Beberapa pengujian yang dilakukan yaitu pengujian pada DAQ Advantech USB-4716, pengujian pada *inverter* Siemens Micromaster 420, pengujian kecepatan motor induksi tiga fasa, pengujian pada beban (rem elektromagnetik) dan sensor arus ACS 712.

4.1.1 Pengujian DAQ Advantech USB-4716

Pengujian terhadap DAQ dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan yang dihasilkan oleh pin *analog output* (AO) sudah sesuai dengan tegangan yang diberikan dari Labview. Pengujian dilakukan Labview dengan cara memberikan tegangan ke *analog output* (AO) DAQ Advantech USB-4716 yaitu sebesar 0-10VDC. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Skema Pengujian DAQ

Data hasil pengujian untuk DAQ Advantech USB-4716 dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian DAQ

| No | Input Labview (Volt) | Analog Output DAQ (Volt) |
|----|----------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 0,994 |
| 2 | 2 | 1,989 |
| 3 | 3 | 2,984 |
| 4 | 4 | 3,979 |
| 5 | 5 | 4,980 |
| 6 | 6 | 5,980 |

| No | Input Labview (Volt) | Analog Output DAQ (Volt) |
|----|----------------------|--------------------------|
| 7 | 7 | 6,980 |
| 8 | 8 | 7,980 |
| 9 | 9 | 8,980 |
| 10 | 10 | 9,980 |

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa *output analog* dari DAQ sudah mengikuti tegangan *input* dari Labview, sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa pengujian ini berhasil dan DAQ dapat digunakan untuk memberikan tegangan *input* ke *inverter*.

4.1.2 Pengujian *Inverter* Siemens Micromaster 420

Pengujian pada *inverter* ini dilakukan sebanyak dua kali. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara keluaran yang dihasilkan oleh *inverter* dengan pengaturan yang diinginkan pada *inverter*. Tegangan masukan yang digunakan pada *inverter* sebesar 0-10 Volt dari DAQ dan keluaran frekuensi yang diinginkan sebesar 0-50 Hz. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Skema Pengujian *Inverter*

Data dari hasil pengamatan keluaran *inverter* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Inverter*

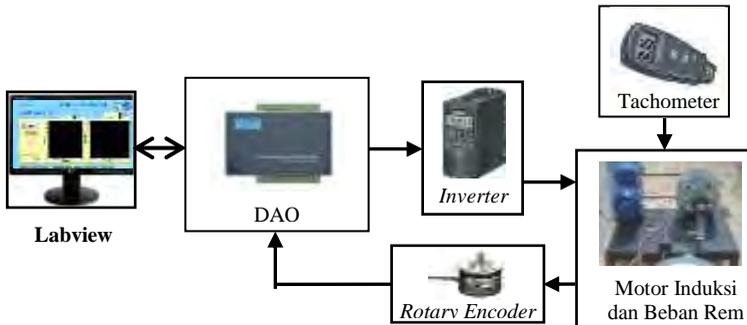
| No | DAQ (Volt) | Frekuensi <i>Inverter</i> (Hz) |
|----|------------|--------------------------------|
| 1 | 1 | 04,78 |
| 2 | 2 | 09,78 |
| 3 | 3 | 14,78 |
| 4 | 4 | 19,78 |
| 5 | 5 | 24,78 |

| No | DAQ (Volt) | Frekuensi <i>Inverter</i> (Hz) |
|----|------------|--------------------------------|
| 6 | 6 | 29,78 |
| 7 | 7 | 34,78 |
| 8 | 8 | 39,78 |
| 9 | 9 | 45,78 |
| 10 | 10 | 49,78 |

Berdasarkan data pengujian yang didapatkan pada tabel, hasilnya menunjukkan bahwa frekuensi berbanding lurus dengan tegangan masukan. Jadi yang diperoleh pada pengujian ini sesuai dengan yang diinginkan dan dapat digunakan untuk menjalankan motor induksi.

4.1.3 Pengujian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Mekanisme pengujian kecepatan motor induksi tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Mekanisme Pengujian Kecepatan Motor Induksi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan mengkalibrasi kecepatan hasil dari pembacaan sensor *rotary encoder* pada motor induksi tiga fasa dengan kecepatan hasil pembacaan tachometer. Tachometer adalah sensor kecepatan yang memanfaatkan sensor cahaya LDR (*Light Dependent Resistor*). Agar tachometer dapat menangkap kecepatan motor, poros motor harus diberi warna yang berbeda. Perbedaan warna tersebut membuat lampu LDR membaca nilai tegangan yang berbeda. Pada motor ini, warna yang digunakan di sekeliling poros motor adalah warna hitam, dan warna garis yang

digunakan sebagai pembeda tegangan adalah warna putih. Perbedaan nilai tegangan pada perbedaan warna garis inilah yang ditangkap LDR sebagai satu putaran penuh.

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan motor induksi dengan sumber tiga fasa dari *inverter*. Sensor *rotary encoder* dipasang pada piringan yang terkopel dengan poros motor. Hasil pembacaan *rotary encoder* dikirim ke modul DAQ melalui kabel. Data yang didapat kemudian diolah dan hasilnya ditampilkan pada Labview. Tachometer digunakan untuk melihat perbandingan kecepatan dari piringan dengan hasil pengolahan Labview.

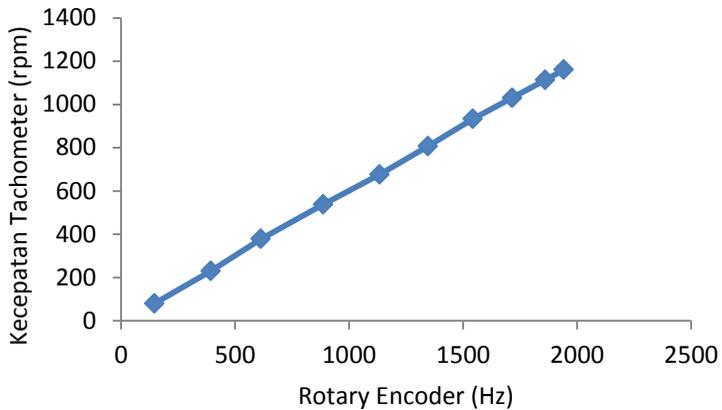
Hasil pengujian untuk kecepatan motor induksi tiga fasa dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

| Tegangan <i>Input</i> (Volt) | <i>Rotary Encoder</i> (Hz) | Tachometer (rpm) |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 1 | 147 | 80 |
| 2 | 394 | 230 |
| 3 | 613 | 378 |
| 4 | 887 | 538 |
| 5 | 1134 | 676 |
| 6 | 1346 | 807 |
| 7 | 1542 | 933 |
| 8 | 1715 | 1030 |
| 9 | 1860 | 1113 |
| 10 | 1942 | 1160 |

Hubungan kecepatan hasil pengukuran tachometer dengan *rotary encoder* menghasilkan grafik linearitas yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Grafik ini menunjukkan bahwa letak linearitas motor induksi tiga fasa berada pada kecepatan 400-1000 rpm. Persamaan 4.1 adalah persamaan linear yang menunjukkan hubungan kecepatan motor induksi dan keluaran *rotary encoder*.

$$Kec = \frac{1160}{1942} OutputEncoder \quad (4.1)$$



Gambar 4.4 Hubungan *Rotary Encoder* dan Tachometer

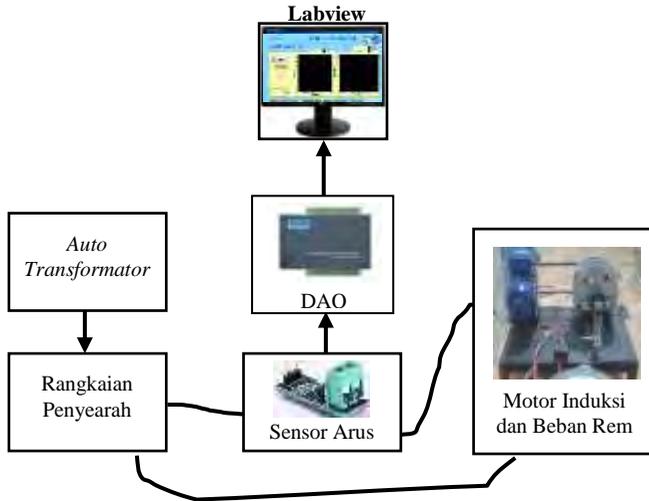
Berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil pembacaan kecepatan motor dengan tachometer dan keluaran *rotary encoder* menunjukkan bahwa pengujian dan kalibrasi untuk kecepatan motor induksi telah berhasil dan sesuai.

4.1.4 Pengujian Rem Elektromagnetik dan Sensor Arus ACS 712

Pengujian rem elektromagnetik dan sensor arus dilakukan untuk mengetahui efek pembebanan rem elektromagnetik pada motor induksi. Perhitungan secara spesifik untuk gaya magnet yang dihasilkan oleh rem elektromagnetik dan bahan yang digunakan secara detail diabaikan. Pada Tugas Akhir ini, efek pembebanan rem elektromagnetik dilihat dari adanya perubahan nilai arus yang masuk pada rem elektromagnetik. Berdasarkan pengujian, didapatkan bahwa efek gaya magnet yang dihasilkan sebanding dengan perubahan masukan arus dan dapat disimpulkan bahwa semakin besar arus yang masuk pada beban maka semakin besar pula gaya magnet yang dihasilkan.

Sensor arus yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah ACS712. Sensor ini dapat mengukur arus mencapai 5A dan memiliki ketelitian hingga 0,175 mA/V. Pengujian yang dilakukan pada sensor ini adalah dengan cara memasang sensor pada rem elektromagnetik dan memberi tegangan masukan pada tiga kondisi pembebanan yaitu beban minimal (0 Volt), beban nominal (140 Volt) dan beban maksimal (220 Volt) dari

Auto Transformator. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan tegangan yang dihasilkan oleh sensor terhadap perubahan arus yang terjadi pada beban. Mekanisme pengujian sensor arus ACS 712 terhadap perubahan arus pada beban ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Mekanisme Pengujian Sensor Arus ACS 712 pada Beban

Hasil yang telah didapatkan dalam pengujian sensor arus pada beban ditunjukkan pada Tabel 4.4.

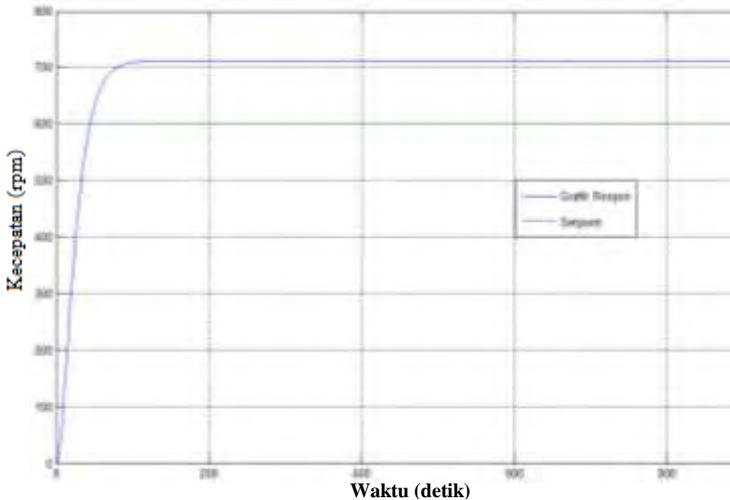
Tabel 4.4 Hasil Sensor Arus ACS 712 Terhadap Perubahan Beban

| No | Tegangan Masukan Beban (Volt) | Arus Kumparan (A) | Tegangan Keluaran Sensor (Volt) |
|----|-------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 2,468 |
| 2 | 140 | 0,53 | 2,542 |
| 3 | 220 | 0,82 | 2,600 |

4.2 Pengujian Kontroler Secara Simulasi pada Labview

Tahap ini dilakukan untuk mengetahui dan menguji proses kerja dari kontroler yang telah didesain. Pengujian dilakukan menggunakan *software* Labview. Pada Tugas Akhir ini dilakukan pengujian untuk kontroler LQR dan LQR *Gain Scheduling* pada beberapa kondisi

pembebanan secara simulasi. Sebelum melakukan pengujian terhadap kontroler terlebih dahulu dilakukan pengujian terhadap sistem pada kondisi tanpa kontroler. hasil respon dari pengujian yang telah dilakukan untuk sistem tanpa kontroler dapat dilihat pada Gambar 4.6.

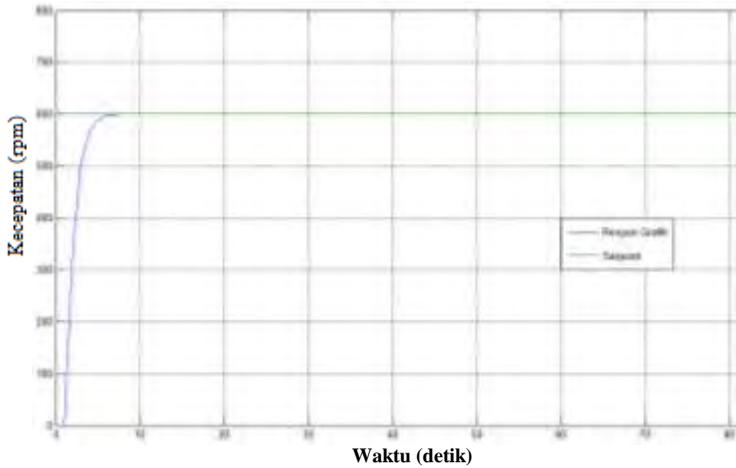


Gambar 4.6 Respon Keluaran Tanpa Kontroler

Berdasarkan Gambar 4.6 *error steady state* untuk sinyal respon yaitu sebesar 18,78%. Pada kasus ini, maka didesain suatu kontroler dengan tujuan agar hasil respon keluaran dari sistem dapat mengikuti nilai referensi (kecepatan) yang diberikan.

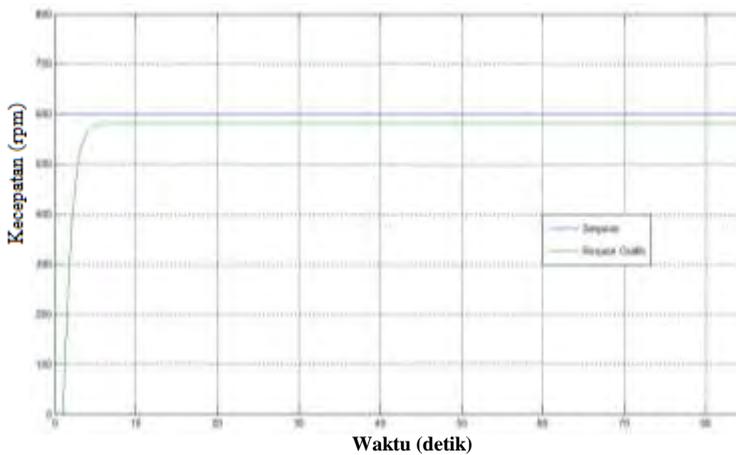
4.2.1 Pengujian Kontroler LQR

Pada pengujian ini digunakan kontroler LQR. Menggunakan nilai matriks $Q = [0.01 \ 0; \ 0 \ 0.01]$ dan $R = [100]$ serta matriks A, B dan C menggunakan parameter *plant* beban minimal (beban 0) untuk memperoleh *gain* K dan L. Hasil keluaran respon dari simulasi kontroler ini dengan perlakuan yaitu diberikan pada tiga kondisi pembebanan yang berbeda, ditunjukkan pada Gambar 4.7, Gambar 4.8, Gambar 4.9.



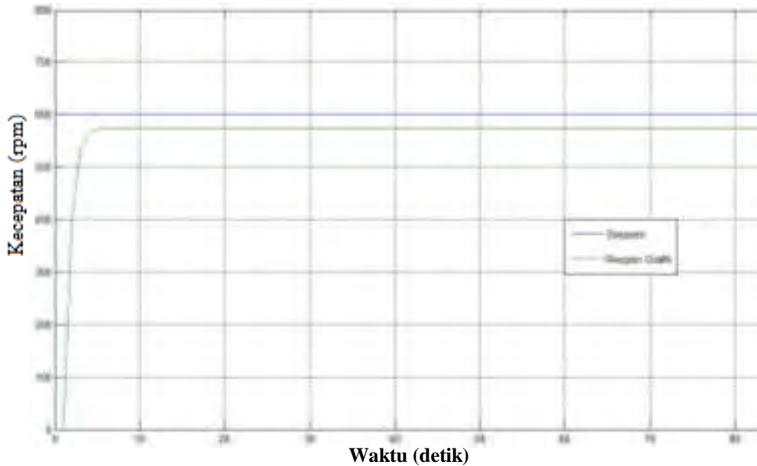
Gambar 4.7 Respon Keluaran pada Kondisi Beban 0

Respon keluaran yang dihasilkan pada kondisi beban 0 dapat dilihat pada Gambar 4.7. Nilai e_{ss} yang dihasilkan pada kondisi ini sebesar 0%.



Gambar 4.8 Respon Keluaran pada Kondisi Beban 1

Respon keluaran yang dihasilkan pada kondisi beban 1 dapat dilihat pada Gambar 4.8. Nilai e_{ss} yang dihasilkan pada kondisi ini sebesar 2,92%.



Gambar 4.9 Respon Keluaran pada Kondisi Beban 2

Respon keluaran yang dihasilkan pada kondisi beban 2 dapat dilihat seperti pada Gambar 4.9. Nilai e_{ss} yang dihasilkan pada kondisi ini sebesar 4,33%.

Spesifikasi respon dari sistem setelah diberi kontroler LQR pada kondisi beban 0, beban 1 dan beban 2 dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Spesifikasi Hasil Simulasi Kontroler LQR pada Beban Berbeda

| Spesifikasi | Kondisi | | |
|------------------|------------|------------|------------|
| | Beban 0 | Beban 1 | Beban 2 |
| τ | 0,32 detik | 0,29 detik | 0,28 detik |
| t_s (5%) | 0,96 detik | 0,89 detik | 0,86 detik |
| t_r (5% - 95%) | 0,94 detik | 0,87 detik | 0,85 detik |
| t_d | 0,28 detik | 0,27 detik | 0,27 detik |
| e_{ss} | 0% | 2,92% | 4,33% |

Hasil respon dari kontroler LQR untuk *plant* Tugas Akhir ini, menunjukkan bahwa nilai keluaran yang dihasilkan hanya dapat

mempertahankan kecepatan sesuai dengan nilai referensi yang diberikan pada kondisi beban 0. Sedangkan nilai keluaran yang dihasilkan untuk beban 1 dan beban 2 masing-masing memiliki e_{ss} sebesar 2,92% dan 4,33% dari nilai referensi.

4.2.2 Pengujian Kontroler LQR Gain Scheduling

Pengujian dari kontroler LQR *Gain Scheduling* ini memiliki tujuan untuk menganalisa dan melihat proses kerja dari kontroler dalam memperbaiki nilai parameternya berdasarkan pada setiap terjadinya perubahan pada sistem. Desain kontroler LQR *Gain Scheduling* dibuat pada setiap kondisi pembebanan terhadap perubahan nilai arus beban. Persamaan model *state space plant* adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a & -b \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ c \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0]$$

Nilai dari a, b dan c didasarkan pada data nilai yang didapatkan dari perhitungan *plant* pada kondisi beban 0, beban 1 dan beban 2 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Nilai Parameter Kontroler LQR *Gain Scheduling* pada Beban Berbeda

| No | Kondisi Pembebanan | Arus/ i_1 | Parameter | | |
|----|--------------------|-------------|-----------|-------|-------|
| | | | a | b | c |
| 1. | Beban 0 | 2,48 | 57,05 | 15,11 | 67,77 |
| 2. | Beban 1 | 2,56 | 64,61 | 16,08 | 74,68 |
| 3. | Beban 2 | 2,6 | 70,85 | 16,83 | 80,66 |

Berdasarkan data diatas, dan dengan menggunakan nilai matriks $Q = [0.01 \ 0; 0 \ 0.01]$ dan $R = [100]$, nilai gain K dan L diperoleh dengan menggunakan sintaks pada *Mathscript Labview* sebagai berikut:

$$[K] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$$

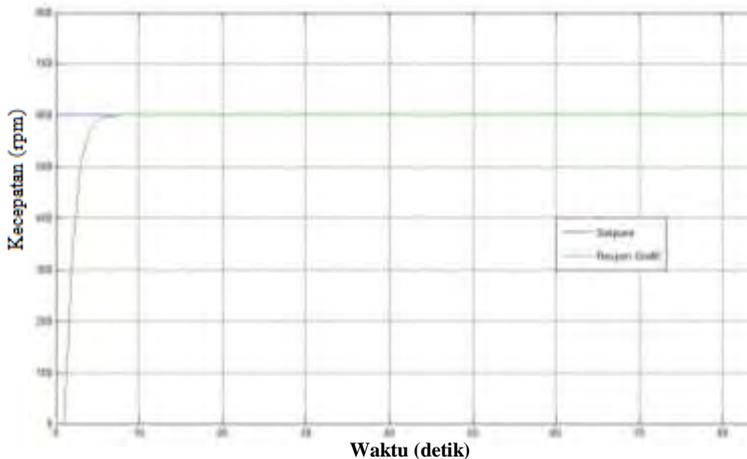
$$L = [\text{inv}(C * \text{inv}((B * K) - A) * B)]$$

Sehingga diperoleh nilai gain K dan L seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Nilai Gain K dan Gain L Kontroler LQR *Gain Scheduling*

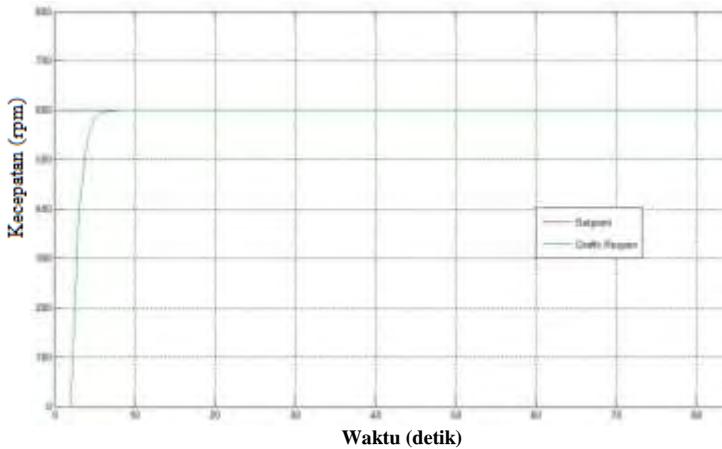
| No | Kondisi Pembebanan | Arus/ i_1 | Parameter LQR <i>Gain Scheduling</i> | |
|----|--------------------|-------------|--------------------------------------|--------|
| | | | Gain K | Gain L |
| 1. | Beban 0 | 2,48 | $[5,96E - 5 \quad 2,27E - 4]$ | 0,83 |
| 2. | Beban 1 | 2,56 | $[5,78E - 5 \quad 2,35E - 4]$ | 0,86 |
| 3. | Beban 2 | 2,6 | $[5,70E - 5 \quad 2,42E - 4]$ | 0,87 |

Hasil pengujian untuk simulasi kontroler LQR *Gain Scheduling* menunjukkan bahwa nilai parameter dari *gain* K dan L yang dihasilkan dapat beradaptasi sesuai dengan adanya perubahan pada beban. Respon keluaran dari hasil simulasi kontroler LQR *Gain Scheduling* pada kondisi pembebanan yang berbeda-beda secara berurutan ditunjukkan sesuai pada Gambar 4.10, Gambar 4.11, Gambar 4.12 dan Gambar 4.13.



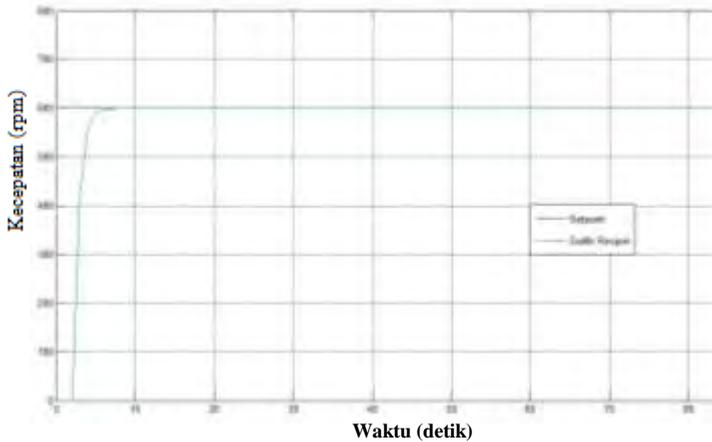
Gambar 4.10 Respon Keluaran Kondisi Beban 0 dengan Kontroler LQR *Gain Scheduling*

Berdasarkan Gambar 4.10, spesifikasi untuk sinyal respon yaitu $\tau = 0,32$ detik, $t_s (5\%) = 0,96$ detik, $t_r (5\%-95\%) = 0,94$ detik, $t_d = 0,28$ detik, dan $e_{ss} = 0 \%$. Berdasarkan hal tersebut diketahui bahwa hasil keluaran respon pada kondisi beban 0 mendekati referensi.



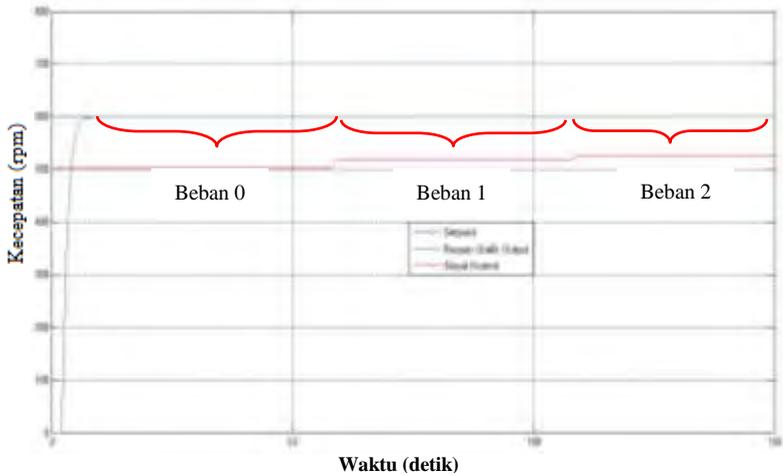
Gambar 4.11 Respon Keluaran Kondisi Beban 1 dengan Kontroler LQR Gain Scheduling

Berdasarkan Gambar 4.11, spesifikasi untuk sinyal respon yaitu $\tau = 0,29$ detik, $t_s (5\%) = 0,89$ detik, $t_r (5\%-95\%) = 0,87$ detik, $t_d = 0,27$ detik, dan $e_{ss} = 0 \%$.



Gambar 4.12 Respon Keluaran Kondisi Beban 2 dengan Kontroler LQR Gain Scheduling

Berdasarkan Gambar 4.12, spesifikasi untuk sinyal respon yaitu $\tau = 0,28$ detik, $t_s (5\%) = 0,86$ detik, $t_r (5\% - 95\%) = 0,85$ detik, $t_d = 0,27$ detik, dan $e_{ss} = 0\%$.



Gambar 4.13 Respon Keluaran Kondisi Beban Variasi dengan Kontroler LQR *Gain Scheduling*

Tabel 4.8 Spesifikasi Hasil Respon Kontroler LQR *Gain Scheduling* pada Beban Berbeda

| Spesifikasi | Kondisi | | |
|--------------------|------------|------------|------------|
| | Beban 0 | Beban 1 | Beban 2 |
| τ | 0,32 detik | 0,29 detik | 0,28 detik |
| $t_s (5\%)$ | 0,96 detik | 0,89 detik | 0,86 detik |
| $t_r (5\% - 95\%)$ | 0,94 detik | 0,87 detik | 0,85 detik |
| t_d | 0,28 detik | 0,27 detik | 0,27 detik |
| e_{ss} | 0 % | 0 % | 0 % |

Berdasarkan data yang terdapat dalam Tabel 4.8, hasil respon dari kontroler LQR *Gain Scheduling* mendekati nilai referensi. Simulasi ini menunjukkan bahwa kontroler LQR *Gain Scheduling* mampu mempertahankan kecepatan motor pada tiap kondisi pembebanan. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil dari kontroler yang dibuat telah sesuai dengan desain perancangan.

4.3 Pengujian Kontroler Secara Implementasi pada Labview

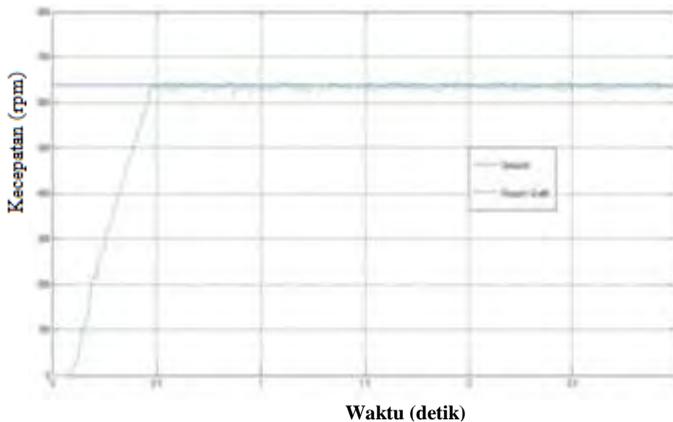
Pengujian ini digunakan untuk mengetahui dan menguji kontroler yang telah dibuat dan disimulasikan dapat bekerja pada *plant* sebenarnya. Perbandingan dari hasil simulasi dan implementasi untuk kontroler LQR *Gain Scheduling* seperti ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perbandingan Hasil Simulasi dan Implementasi

| X | Simulasi | | Implementasi | |
|---|--------------------------|--------|--------------------------|--------|
| | Gain K | Gain L | Gain K | Gain L |
| 0 | [5,96E - 5 2,27E - 4] | 0,83 | [5,96E - 5 2,27E - 4] | 0,83 |
| 1 | [5,78E - 5 2,35E - 4] | 0,86 | [5,78E - 5 2,35E - 4] | 0,86 |
| 2 | [5,70E - 5 2,42E - 4] | 0,87 | [5,70E - 5 2,42E - 4] | 0,87 |

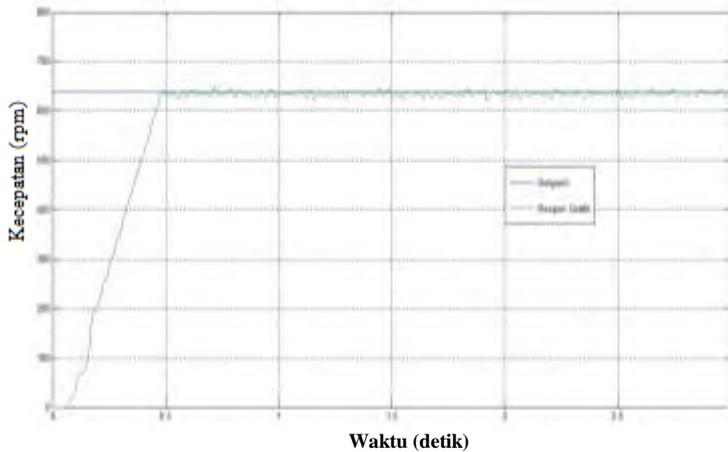
Keterangan: X = Kondisi beban

Hasil pada tabel menunjukkan parameter yang dihasilkan dari implementasi mendekati nilai parameter yang dihasilkan dari simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa nilai adaptasi untuk implementasi sesuai dengan hasil perancangan. Hasil pengujian secara implementasi dengan beban 0, beban 1, beban 2 dan beban variasi dapat dilihat masing-masing pada Gambar 4.14, Gambar 4.15, Gambar 4.16 dan Gambar 4.17.



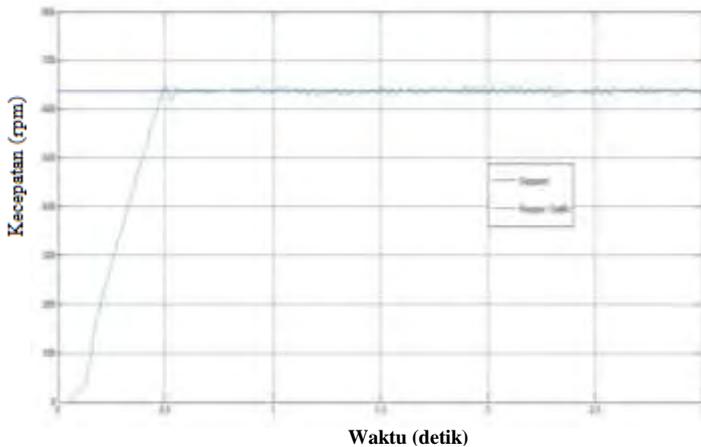
Gambar 4.14 Respon Implementasi LQR *Gain Scheduling* Beban 0

Berdasarkan Gambar 4.14, spesifikasi untuk sinyal respon beban 0 yaitu $\tau = 0,33$ detik, $t_s (5\%) = 0,99$ detik, $t_r (5\%-95\%) = 0,97$ detik, $t_d = 0,28$ detik, dan $e_{ss} = 0,5\%$.



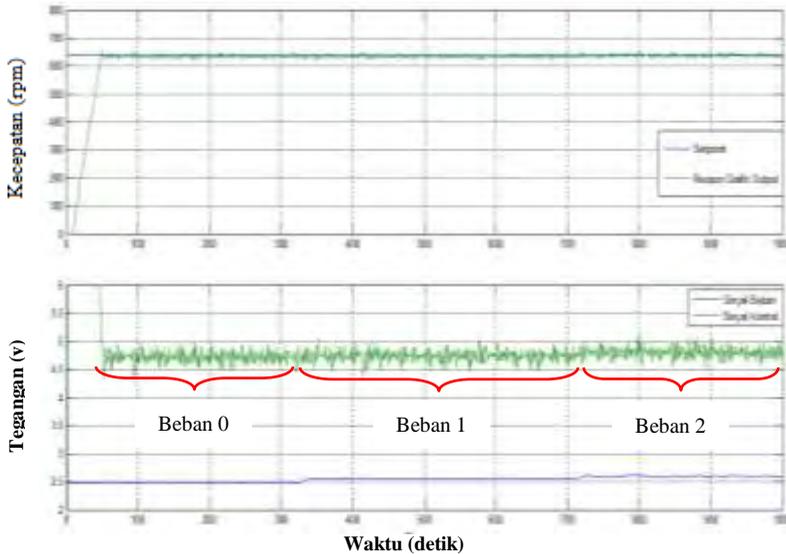
Gambar 4.15 Respon Implementasi LQR *Gain Scheduling* Beban 1

Berdasarkan Gambar 4.15, spesifikasi untuk sinyal respon beban 1 yaitu $\tau = 0,34$ detik, $t_s (5\%) = 1,02$ detik, $t_r (5\%-95\%) = 1$ detik, $t_d = 0,28$ detik, dan $e_{ss} = 0,6\%$.



Gambar 4.16 Respon Implementasi LQR *Gain Scheduling* Beban 2

Berdasarkan Gambar 4.16, spesifikasi untuk sinyal respon beban 2 yaitu $\tau = 0,34$ detik, $t_s (5\%) = 1,02$ detik, $t_r (5\%-95\%) = 1$ detik, $t_d = 0,28$ detik, dan $e_{ss} = 0,12\%$.



Gambar 4.17 Respon Implementasi LQR *Gain Scheduling* Beban Variasi

Dan berdasarkan Gambar 4.17, spesifikasi untuk sinyal respon beban variasi yaitu $\tau = 0,33$ detik, $t_s (5\%) = 0,99$ detik, $t_r (5\%-95\%) = 0,97$ detik, $t_d = 0,28$ detik, dan $e_{ss} = 0,4\%$.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa respon yang dihasilkan masih sesuai dengan hasil simulasi. Hasil respon beresilasi untuk setiap kondisi disebabkan konstruksi mekanik *plant* yang memiliki getaran ketika berjalan sehingga sinyal yang terbaca dan dikeluarkan oleh sensor *rotary encoder* juga beresilasi. Pada pengujian dengan beban 0, beban 1 dan beban 2 terlihat bahwa respon yang dihasilkan mendekati nilai referensi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa terhadap simulasi maupun implementasi pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *Linear Quadratic Regulator (LQR) Gain Scheduling* dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kontroler *LQR Gain Scheduling* yang digunakan memiliki *error steady state* (e_{ss}) saat beban minimal sebesar 0,5%, e_{ss} beban nominal sebesar 0,6%, e_{ss} beban maksimal sebesar 0,12%.
2. Hasil respon implementasi dengan kontroler pada beban nominal memiliki spesifikasi respon yaitu $\tau = 0,34$ detik, t_s (5%) = 1,02 detik, t_r (5%-95%) = 1 detik, $t_d = 0,28$ detik.
3. Penggunaan kontroler *LQR Gain Scheduling* mampu beradaptasi terhadap setiap perubahan beban dengan menggunakan algoritma gabungan *block diagram* dan *mathscript* pada pemrograman Labview.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Penggunaan metode *adaptive* dalam mendapatkan nilai parameter *plant* diharapkan bisa digunakan secara *online* pada Labview agar mampu meningkatkan performansi kerja motor induksi saat pembebanan bervariasi.
2. Pada penelitian selanjutnya perlu modifikasi perbandingan *gear* yang digunakan, sehingga pengaruh rem elektromagnetik pada motor lebih terlihat.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

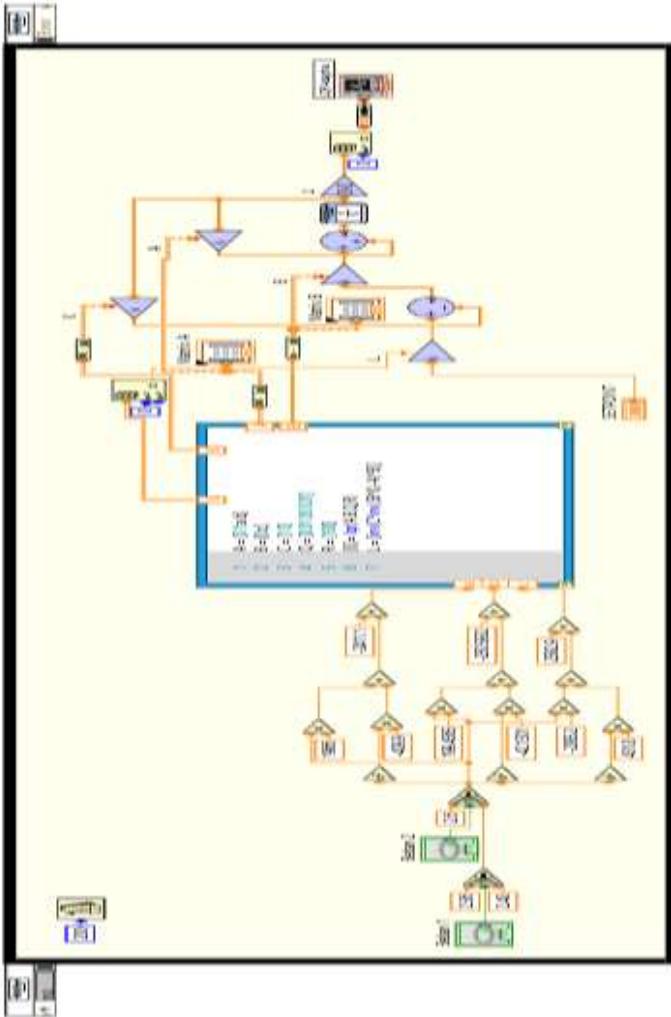
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Naidu, Desineni S., "*Optimal Control System*", CRC Press: New York, 2003.
- [2] Darmawan, Aria, "Perancangan Embedded Kontroler LQR Adaptive Menggunakan Mikrokontroler untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC", *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2011.
- [3] Semit, Arwanjer, "Perancangan dan Implementasi Kontroler Linear Quadratic Regulator (LQR) pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa", *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2014.
- [4] Sholihah, Suci Endah, "Desain dan Implementasi Kontroler Sliding Mode untuk Pengaturan Akselerasi pada Simulator Hybrid Electric Vehicle", *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2012.
- [5] Yudistira, Adityo, "Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa Pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Metode Sliding Mode Control", *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2014.
- [6] Rizqiawan, Arwindra, "*Sekilas Rotary Encoder*", 20 Mei 2015, <http://konversi.wordpress.com/2009/06/12/sekilas-rotary-encoder/>
- [7] _____, "*Getting Started Guide*", Siemens, September 2000, <http://www.siemens.de/micromaster>
- [8] _____, "*Industrial Automation / Data Acquisition (DAQ) & Communication / USB Modules / USB-4716*", Advantech, Agustus 2013.
- [9] Ovi, Candra W., "Kontrol Fuzzy Adaptive Gain Scheduling untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa", *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2014.
- [10] Shatomeia, "*Sensor Suhu LM35*", 14 Mei 2015, <http://shatomeia.com/2008/12/sensor-suhu-lm35/>
- [11] _____, "*Sensor Temperature LM35*", 22 Mei 2015, <http://www.rf-microwave.com/en/shop/0/223-precision-crystal-heaters-temperature-sensors.html>
- [12] Ing, Pavel Jakoubek, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods", *Konference Students kétvúrčičinnosti*, 2009.
- [13] J. Astrom, Karl dan B. Wittenmark, "*Adaptive Control*", Addison Wesley, Reading, MA, 1989.
- [14] Iskandar, Eka, "*Sistem Pengaturan Adaptif*", Diktat Kuliah ITS, Surabaya, 2009.

- [15] Yunita, Rizqah, “Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan PID Self Tuning Regulator (STR)”, *Tugas Akhir*, JTE-ITS, Surabaya, 2014.
- [16] _____, “*National Instrument/getting started Labview/National Instrument*”, Agustus 2013.

LAMPIRAN

A. Program Simulasi Kontroler LQR *Gain Scheduling*



RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap **Fadli Wardana** lahir di Kolaka, provinsi Sulawesi Tenggara pada tanggal 30 Mei 1990. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Ngadi Raharjo dan Endang Widiarsih. Menamatkan Sekolah Dasar di SDN 2 Tegalorejo Yogyakarta, kemudian melanjutkan ke SMPN 1 Wundulako, Kolaka. Untuk jenjang SMA penulis menyelesaikan sekolahnya di SMAN 1 Wundulako, Kolaka. Setelah menamatkan SMA, penulis melanjutkan pendidikan Diploma III Elektronika dan Instrumentasi (ELINS) di FMIPA Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Spesialis bidang studi yang ditekuni oleh penulis adalah Instrumentasi. Setelah menamatkan Diploma III, penulis melanjutkan studi Strata 1 Lintas Jalur di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun 2013. Spesialis bidang studi yang ditakuni oleh penulis adalah Teknik Sistem Pengaturan. Selama menjalani studi di ITS penulis aktif menjadi asisten di Laboratorium Teknik Sistem Pengaturan. Pada bulan Juni 2015 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. Penulis dapat dihubungi di Email: fadliwardanemail@gmail.com.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--