



TUGAS AKHIR - TF 181801

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
INDUKSI BERBASIS ADAPTIF PID DENGAN INVERTER TOSHIBA VF-nC3**

KHALISH MAUDUDY

NRP. 02311840000092

Dosen Pembimbing:

Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2022

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***MODELLING OF SPEED CONTROL SYSTEM FOR INDUCTION MOTOR BASED ON
ADAPTIVE PID USING TOSHIBA INVERTER VF-nC3***

***KHALISH MAUDUDY
NRP. 0231184000092***

Supervisors:

Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.

***DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2022***

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Khalish Maududy
NRP : 02311840000092
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "*RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI BERBASIS ADAPTIF PID DENGAN INVERTER TOSHIBA VF-nC3*" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 20 Juli 2022

Yang membuat pernyataan,



Khalish Maududy

NRP. 02311840000092

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
INDUKSI BERBASIS ADAPTIF PID DENGAN INVERTER TOSHIBA VF-nC3**

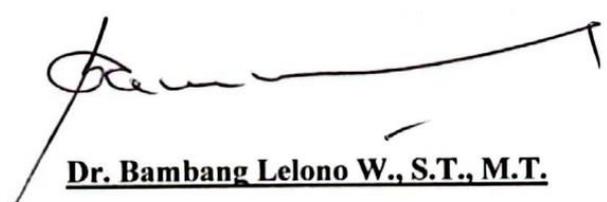
Oleh:

Khalish Maududy

NRP. 0231184000092

Surabaya, 20 Juli 2022

**Menyetujui,
Pembimbing**

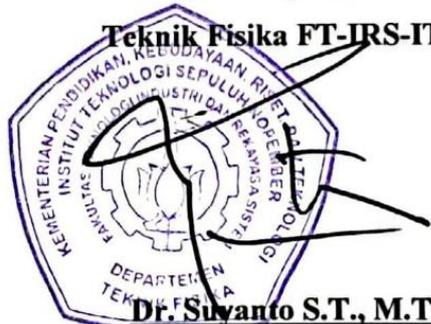

Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.

NIP. 19690507 199512 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FT-IRS-ITS



Dr. Suryanto S.T., M.T.

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI BERBASIS ADAPTIF PID DENGAN INVERTER TOSHIBA VF-nC3

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika

Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)

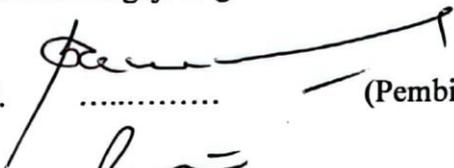
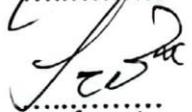
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Khalish Maududy

NRP. 02311840000092

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--|--|-----------------|
| 1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. |  | (Pembimbing) |
| 2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. |  | (Ketua Penguji) |
| 3. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC |  | (Penguji I) |
| 4. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. |  | (Penguji II) |

SURABAYA

2022

Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI BERBASIS ADAPTIF PID DENGAN INVERTER TOSHIBA VF-nC3

Nama : Khalish Maududy
NRP : 0231184000092
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S.T.,
M.T.

ABSTRAK

Kendali kecepatan motor induksi dibutuhkan untuk mengatasi pengurangan kecepatan akibat slip dan menjaga kecepatan stabil sesuai dengan *set point*. Untuk performa yang lebih baik saat menghadapi proses seperti perubahan *set point* atau penambahan beban saat berjalan stabil dibutuhkan sistem kendali yang lebih baik. Pada penelitian ini dirancang kontroler Adaptif PID yang digunakan untuk memecahkan masalah sistem yang nonlinier pada motor induksi. Dimana parameter kontrol pada kendali adaptif terus berubah seiring dengan berjalannya sistem. Parameter kontrol didapat melalui estimasi menggunakan model *Recursive Least Square* (RLS) yang merepresentasikan hubungan kecepatan dengan tegangan sinyal kontrol dalam satu sampel dan pengaturan hubungan estimator dan kontroler. Adaptif PID mampu memberikan hasil performansi yang lebih baik pada pengujian kecepatan 200, 600, dan 1000 RPM dengan nilai *rise time* 4.9206, 3.7017, dan 4.2228 detik dan *settling time* 29.3403, 12.7315, dan 24.4738 detik lebih rendah dibandingkan dengan PID. Kendali adaptif juga telah diuji dan mampu untuk mengatasi perubahan beban dengan waktu 15.17 detik dan perubahan *set point* dengan waktu 14.51 detik pada kenaikan *set point* dan 12.05 pada penurunan *set point*.

Kata Kunci: Kontrol PID, Kontrol Adaptif PID, Motor Induksi, Inverter.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**MODELLING OF SPEED CONTROL SYSTEM FOR INDUCTION MOTOR BASED
ON ADAPTIVE PID USING TOSHIBA INVERTER
VF-nC3**

Name : Khalish Maududy
NRP : 0231184000092
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Dr. Bambang Lelono W., S.T.,
M.T.

ABSTRACT

In application of machine drive, speed control is required to get the desired speed. The speed control of the induction motor is needed to overcome the speed reduction due to slip and maintain a stable speed according to the set point. For better performance when facing processes such as set point changes or load gain when running stable, a better control system is needed. Conventional PID controllers are not effective for capricious systems. Adaptive PID can be used to solve system problems that are nonlinear. Where the control parameters on adaptive control are constantly changing as the system progresses. Control parameters are obtained through estimation using Recursive Least Square (RLS) of inputs and outputs in a single sample and setting the relationship of the estimator and controller. Adaptive PID was able to provide better performance results at 200, 600, and 1000 RPM speed tests with rise time values of 4.9206, 3.7017, and 4.2228 seconds and settling times of 29.3403, 12.7315, and 24.4738 seconds lower than pid. Adaptive control has also been tested and is able to cope with load changes with a time of 15.17 seconds and set point changes with a time of 14.51 seconds in set point increments and 12.05 on set point increments.

Keywords: *PID control, Adaptif PID control, Inverter, Induction Motor*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul “RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI BERBASIS ADAPTIF PID DENGAN INVERTER TOSHIBA VF-nC3”. Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu mendukung saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku ketua penguji yang telah banyak membantu dan memberikan arahan selama pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Dr.rer.nat. Ir. Aulia M. T. Nasution, M.Sc. selaku dosen wali dan telah membimbing dan membantu saya selama menjalankan studi di Teknik Fisika.
5. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademik Teknik Fisika yang telah membantu penulis secara langsung maupun tidak langsung ketika penulis menjalani masa perkuliahan.
6. Mas Mufit, Mbak Nessa, Pak Fakhruzi, Pradana, Ariq, dan Dwiki yang telah memberikan masukan dan menemani penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir
7. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh terhadap penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman Teknik Fisika Angkatan 2018 dan teman-teman seperantauan dari Aceh yang telah memberikan dukungan moril kepada saya dan telah bersama-sama melewati masa-masa akademik yang pelik dan membantu bertukar pikiran untuk menyelesaikan masalah yang dihadapi penulis dalam segala lini kehidupan.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 20 Juli 2022

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>COVER PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	23
1.1 Latar Belakang	23
1.2 Rumusan Masalah	24
1.3 Tujuan	24
1.4 Batasan Masalah.....	25
1.5 Sistematika Laporan.....	25
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN SASAR TEORI	27
2.1 Motor Induksi.....	27
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	28
2.3 Permodelan Matematis Motor Induksi.....	29
2.4 Inverter	32
2.5 V/F Kontrol	33
2.6 Pengendali Proportional, Integral, Derivatif (PID)	34
2.7 Adaptif PID	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1 <i>Set-up</i> Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi	37
3.1.1 Komputer dan DAQ	38
3.1.2 Inverter TOSHIBA VF-nC3.....	39
3.1.3 Motor Induksi dan Beban.....	42
3.1.4 Sensor Kecepatan	44
3.2 Perancangan Metode Pengendali PID	45
3.3 Perancangan Estimator	47
3.4 Perancangan Adaptif PID.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	53

4.1	Pengujian Perangkat Keras.....	53
4.1.1	DAQ dan Frekuensi.....	53
4.1.2	Frekuensi dan Tegangan 3-Fasa.....	54
4.1.3	Validasi Sensor Kecepatan.....	54
4.1.4	Pembebanan.....	55
4.2	Respon Pengendali PID.....	56
4.3	Respon Pengendali Adaptif PID.....	60
4.4	Perbandingan Hasil Respon Pengendali PID dan Pengendali Adaptif PID.....	64
4.5	Pengujian Respon Penambahan Beban ketika Keadaan Stabil.....	69
4.6	Pengujian <i>Set point Tracking</i>	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		73
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN.....		lxxvii
BIODATA PENULIS.....		lxxxiii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Konstruksi motor induksi.....	27
Gambar 2. 2	Kaidah tangan kiri Flemming.....	27
Gambar 2. 3	Ilustrasi resultan gaya magnet.....	28
Gambar 2. 4	Rangkaian dinamika T-Model.....	29
Gambar 2. 5	Vektor gaya pada stator.....	30
Gambar 2. 6	Rangkaian inverter 3 fasa.....	32
Gambar 2. 7	Variasi tegangan dengan V/f kontrol.....	33
Gambar 2. 8	Blok Diagram PID kontrol.....	34
Gambar 2. 9	Skema pengendalian adaptif.....	35
Gambar 2. 10	Diagram blok STR.....	35
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	37
Gambar 3. 2	Skema plant.....	38
Gambar 3. 3	DAQ NI USB-6001.....	38
Gambar 3. 4	<i>Pinout</i> DAQ.....	39
Gambar 3. 5	Inverter Toshiba VF-nC3.....	40
Gambar 3. 6	Panel Operasi Inverter.....	41
Gambar 3. 7	<i>Connection Diagram</i> Inverter.....	42
Gambar 3. 8	Motor Induksi.....	43
Gambar 3. 9	Generator DC dan beban resistor.....	43
Gambar 3. 10	Pengkabelan sensor kecepatan.....	44
Gambar 3. 11	Blok diagram PID closeloop.....	45
Gambar 3. 12	Bentuk kurva S untuk analisa tuning.....	46
Gambar 3. 13	Grafik respon <i>open loop</i> dengan kecepatan 750 RPM.....	47
Gambar 3. 14	Adaptif PID dengan RLS estimator.....	51
Gambar 4. 1	Grafik respon PID pada kecepatan 200 RPM.....	57
Gambar 4. 2	Grafik respon PID pada kecepatan 600 RPM.....	57
Gambar 4. 3	Grafik respon PID pada kecepatan 1000 RPM.....	58
Gambar 4. 4	Grafik respon PID dengan beban pada kecepatan 200 RPM.....	59
Gambar 4. 5	Grafk respon PID dengan beban pada kecepatan 600 RPM.....	59
Gambar 4. 6	Grafik respon PID dengan beban pada kecepatan 1000 RPM.....	59
Gambar 4. 7	Grafik respon Adaptif PID pada kecepatan 200 RPM.....	61
Gambar 4. 8	Grafik respon Adaptif PID pada kecepatan 600 RPM.....	61
Gambar 4. 9	Grafik respon Adaptif PID pada kecepatan 1000 RPM.....	61

Gambar 4. 10	Grafik respon Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 200 RPM	63
Gambar 4. 11	Grafik respon Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 600 RPM	63
Gambar 4. 12	Grafik respon Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 1000 RPM	63
Gambar 4. 13	Respon PID dan Adaptif PID tanpa Beban pada kecepatan 200 RPM	64
Gambar 4. 14	Respon PID dan Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 200 RPM....	64
Gambar 4. 15	Respon PID dan Adaptif PID tanpa Beban pada kecepatan 600 RPM	65
Gambar 4. 16	Respon PID dan Adaptif PID dengan Beban pada kecepatan 600 RPM ...	65
Gambar 4. 17	Respon PID dan Adaptif PID tanpa Beban pada kecepatan 1000 RPM ...	66
Gambar 4. 18	Respon PID dan Adaptif PID dengan Beban pada kecepatan 1000 RPM .	67
Gambar 4. 19	Contoh grafik perubahan K_p pada kecepatan 1000 RPM.....	68
Gambar 4. 20	Contoh grafik perubahan T_i pada kecepatan 1000 RPM	68
Gambar 4. 21	Contoh grafik perubahan T_d pada kecepatan 1000 RPM.....	69
Gambar 4. 22	Pengujian beban dalam keadaan stabil pada pengendali PID	69
Gambar 4. 23	Pengujian beban dalam keadaan stabil pada pengendali PID	70
Gambar 4. 24	Grafik respon kenaikan <i>set point</i> pada pengendali PID	71
Gambar 4. 25	Grafik respon penurunan <i>set point</i> pada PID	71
Gambar 4. 26	Grafik respon kenaikan <i>set point</i> pada Adaptif PID.....	71
Gambar 4. 27	Grafik respon penurunan <i>set point</i> pada Adaptif PID	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Efek Peningkatan Parameter	34
Tabel 3. 1	Spesifikasi Inverter	40
Tabel 3. 2	Parameter Inverter.....	41
Tabel 3. 3	Parameter motor Induksi.....	42
Tabel 3. 4	Spesifikasi Generator DC	44
Tabel 3. 5	Aturan Ziegler-Nichols untuk tuning PID	46
Tabel 3. 6	Parameter kontrol PID	47
Tabel 4. 1	Hubungan Tegangan DAQ dan Frekuensi Inverter	53
Tabel 4. 2	Hubungan Frekuensi dan Tegangan 3-Fasa.....	54
Tabel 4. 3	Validasi Sensor Kecepatan	55
Tabel 4. 4	Kecepatan dan Efek Pembebanan.....	56
Tabel 4. 5	Hasil Performansi pengendali PID	57
Tabel 4. 6	Hasil Performansi pengendali PID dengan beban	58
Tabel 4. 7	Hasil performansi pengendali Adaptif PID	60
Tabel 4. 8	Hasil Performansi pengendali Adaptif PID dengan beban	62
Tabel 4. 9	Perbandingan Performansi PID dan Adaptif PID kecepatan 200 RPM.....	65
Tabel 4. 10	Perbandingan Performansi PID dan Adaptif PID kecepatan 600 RPM.....	66
Tabel 4. 11	Perbandingan Performansi PID dan Adaptif PID kecepatan 1000 RPM.....	67

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor Induksi merupakan penggerak bertenaga listrik yang paling banyak digunakan. Tidak hanya untuk industri manufaktur, motor ini juga digunakan di perumahan sebagai penggerak untuk pompa air hingga otomotif atau semua alat yang bergerak menggunakan listrik dan juga dikenal sebagai aktuator (Wach, 2011). Motor induksi atau juga dikenal dengan motor asinkron digerakkan dengan tenaga listrik AC 3 fasa. Ketika arus masuk ke kumparan yang terletak pada stator, menghasilkan medan magnet yang berputar. Medan magnet akan mengakibatkan tegangan induksi pada rotor sehingga rotor akan berputar menjadi energi mekanik. Dinamakan asinkron karena rotor yang berputar tidak bisa mengikuti kecepatan medan magnet pada stator. Perbedaan kecepatan medan pada stator dan aktual rotor ini dinamakan slip.

Banyak dari total energi yang diperlukan dalam industri dipakai oleh motor industri seperti pompa, kipas, blower, penggiling, atau kompresor. Sebenarnya semua alat tersebut tidak perlu performa yang baik untuk melakukan kerjanya. Namun dengan adanya kontrol kecepatan dapat menghemat energi lebih besar. Kontrol kecepatan diperlukan pada alat mesin, elevator atau penggerak mobil listrik. Hal ini digunakan untuk mendapatkan torsi tertentu dan posisi yang tepat (Trzynadlowski, 2001).

Pada kenyataannya penggunaan motor induksi tidak selalu digunakan sesuai dengan spesifikasinya. Terkadang digunakan untuk membawa beban di luar kemampuannya baik kecil, sedang, maupun beban yang besar. Hal itu menyebabkan naik turunnya kecepatan. Sehingga dibutuhkan pengendalian untuk mendapatkan kecepatan yang konstan tanpa memedulikan beban yang diberikan untuk menjaga nilai efisiensi dari motor itu sendiri. Salah satu contoh kendali kecepatan yang paling umum digunakan adalah PID (Proportional Integral Derivatif) *controller*. Pengendali PID konvensional dapat meraih performansi sistem yang bagus (Olarinoye dkk., 2019). Namun untuk mencapai hasil yang cepat dan sedikit overshoot diperlukan pengendali yang lebih baik. PID konvensional sangat sulit mendapat hasil yang dan perlu dilakukan penyetelan untuk keadaan beban yang berbeda (Perveen, R., 2020).

Perkembangan sekarang sudah sangat maju baik dari aspek teknologi komputer, penggunaan komponen daya listrik, kontrol modern, dan kendali pintar sudah mulai dikembangkan dan menjadi generasi baru untuk pengendalian kecepatan motor induksi.

Secara teori terdapat dua metode yang digunakan untuk mengendalikan motor induksi yaitu *scalar control* dan *vector control*. Kontrol secara skalar yaitu metode kendali dengan nilai amplitudo dan frekuensi dari tegangan atau arus. Sedangkan kontrol secara vektor yaitu metode kendali dengan nilai amplitudo dan fasa dari tegangan atau arus (Chan dan Shi, 2011.)

Sistem kendali linear dapat dengan mudah dimodelkan dengan metode klasik seperti Nyquist dan Bode plot. Bagaimanapun dalam aplikasinya parameter dalam listrik dan mesin sebagai penggerak sangat susah ditentukan sebagai variabel konstan. Dikarenakan beban torsi sebagai *disturbance* (Bose, 2002). Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan metode yang dapat beradaptasi terhadap perubahan parameter tersebut.

Metode yang dipilih pada tugas akhir ini adalah *Adaptive Control* dengan *Self Tuning* parameter kontrol menggunakan *Recursive Least Square* (RLS) untuk mengidentifikasi parameter respon pada motor induksi. Dengan menggunakan kendali Adaptif PID diharapkan mampu memberikan respon terhadap perubahan parameter. Dalam tugas akhir ini juga dibahas mengenai perbandingan kontrol Adaptif PID dengan kontrol konvensional PID.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

- a) Bagaimana performansi inverter Toshiba VF-nC3 untuk mengendalikan kecepatan motor Induksi?
- b) Bagaimana perancangan Adaptif PID untuk mengendalikan kecepatan putar motor induksi?
- c) Bagaimana performansi kontrol kecepatan menggunakan Adaptif PID jika dibandingkan dengan kontrol menggunakan *Proportional Integral Derivative* (PID)?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) Penggunaan dan performansi inverter Toshiba VF-nC3 untuk mengendalikan kecepatan motor induksi.
- b) Membuat rancangan Adaptif PID untuk mengendalikan kecepatan putar motor induksi.
- c) Performansi kontrol kecepatan dengan Adaptif PID.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a) Variabel yang dikendalikan adalah kecepatan putar (RPM) dengan jarak pengukuran sebesar 1000 RPM.
- b) Sensor kecepatan yang digunakan yaitu Infrared (IR) HW-201.
- c) Motor induksi yang digunakan yaitu Alliance Motori tipe A-Y3A-90L dengan spesifikasi input 3 fasa, 4 pole, dan putaran maksimal 1500RPM yang digerakkan dengan Inverter TOSHIBA VF-nC3 sebagai sumber tegangan.
- d) Pembebanan diberikan menggunakan generator DC yang terhubung dengan beban resistansi.
- e) Skema kontrol dan permodelan diprogram dengan software Simulink Matlab 2021a dengan pengukuran langsung menggunakan sensor RPM terhadap putaran motor.
- f) Analisa hasil pengujian dilakukan pada analisa respon *steady state*, *settling time*, *rise time*, *error*, dan *overshoot*.

1.5 Sistematika Laporan

Berikut merupakan sistematika laporan dari penelitian ini:

- BAB I Pendahuluan
Pada BAB I ini terdiri dari Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan, Batasan Masalah dan Sistematika Laporan.
- BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori
Pada BAB II ini terdiri dari teori-teori penunjang dalam tugas akhir ini diantaranya adalah teori Motor Induksi, Prinsip Motor Induksi, Model Matematis Motor Induksi, Inverter, V/f kontrol, Pengendali *Proportional, Integral, Derivatif* (PID), dan Adaptif PID.
- BAB III Metodologi Penelitian
Kemudian pada BAB III ini berisi tentang langkah-langkah dalam menjawab rumusan masalah melalui proses *step by step* dimulai dengan *Set up* Perangkat Keras Motor Induksi, Perancangan Pengendali PID, Perancangan Estimator, dan Perancangan Adaptif PID.
- BAB IV Hasil dan Pembahasan
BAB IV ini berisi hasil dari penelitian dalam tugas akhir ini yang meliputi: Pengujian Perangkat Keras, Respon Pengendali PID, Respon Pengendali Adaptif PID, Perbandingan Hasil Respon Pengendali PID dan Pengendali Adaptif PID, Pengujian Respon Penambahan Beban ketika Keadaan Stabil, dan Pengujian *Set point Tracking*.

- **BAB V Kesimpulan dan Saran**

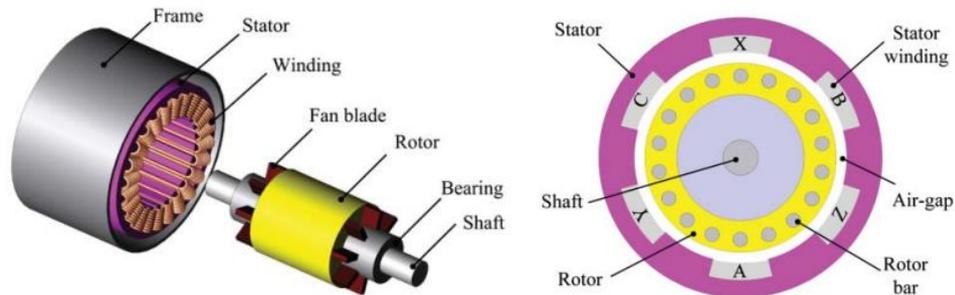
Bab terakhir pada laporan ini adalah kesimpulan yang berisi hasil-hasil yang telah diperoleh guna menjawab rumusan masalah serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN SASAR TEORI

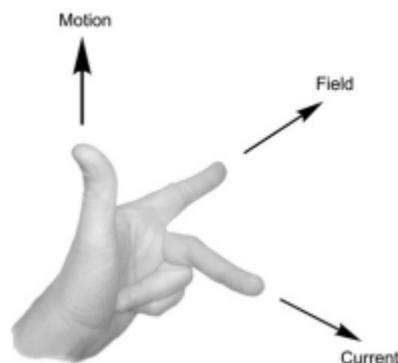
2.1 Motor Induksi

Semua jenis motor listrik menghasilkan gaya gerak dengan medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir di kawat konduktor. Motor induksi terdiri dari 2 tipe untuk konstruksi dan sumber tegangan. Secara konstruksi motor induksi terbagi menjadi *squirrel cage* rotor yaitu jenis rotor yang hanya terdiri dari rangka besi berbentuk silinder dan *wound* rotor yaitu rotor yang memiliki gulungan kawat tambahan agar dapat diatur resistansi dan arus rotor. Secara sumber tegangan yaitu tegangan AC 1 fasa dan tegangan AC 3 fasa. Jenis *wound rotor* tidak banyak digunakan karena beberapa alasan seperti biaya yang mahal dan memerlukan perawatan.



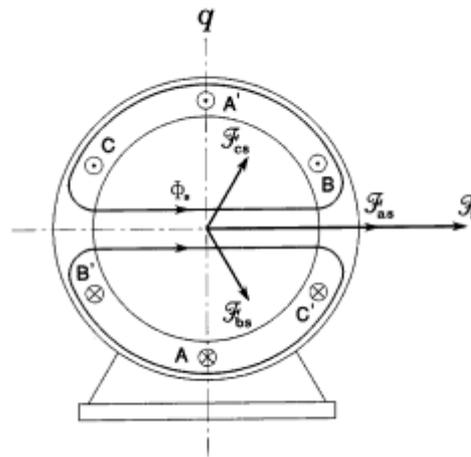
Gambar 2. 1 Konstruksi motor induksi (Chau K. T., 2015)

Seperti jenis penggerak lainnya baik penggerak dengan bahan bakar, motor induksi juga menghasilkan energi mekanik dari energi listrik. Perputaran rotor dihasilkan oleh gaya magnet yang terus berputar seiring arus tiga fasa mengalir di kumparan stator. Arus mengalir pada sebuah kawat akan menghasilkan medan magnet secara tegak lurus dengan arah aliran. Gaya magnet dihasilkan oleh medan magnet dan arus secara tegak lurus mengikuti kaidah tangan kiri Flemming.



Gambar 2. 2 Kaidah tangan kiri Flemming (Hughes dan Drury, 2013)

Stator terbuat dari gulungan kawat yang tersebar dalam rangka membentuk silinder. Setiap slot gulungan dilapisi oleh lapisan laminasi tipis setebal 0.5 mm. Setiap kumpulan gulungan kawat membentuk fasa terpisah 120° membentuk kutub elektromagnet. Jumlah kutub pada motor induksi ditentukan hubungan antar kumparan yang membentuk stator. Gulungan kawat dengan bentuk silinder akan menghasilkan medan listrik yang saling menguatkan sehingga gaya yang dihasilkan akan lebih besar. Pada konstruksi tiga fasa, gaya total yang dihasilkan merupakan jumlah vektor dari tiap gaya yang dihasilkan masing-masing fasa.



Gambar 2.3 Ilustrasi resultan gaya magnet (Trzynadlowski, 2001)

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi berdasarkan dari persamaan hukum Faraday dan Hukum Lorenz. Suatu batang konduktor yang berada dalam medan magnet yang terus berubah akan terbentuk gaya elektromekanik. Urutan terjadinya proses tersebut dapat dijelaskan dengan urutan berikut:

- a) Pada tiap batang konduktor yang terdapat pada rotor akan menerima flux magnet dari medan magnet stator. Tegangan induksi akan terjadi di setiap konduktor senilai $E = Blv$. B merupakan rapat jenis fluks dan v adalah kecepatan konduktor relatif terhadap kecepatan medan magnet.
- b) Dengan adanya tegangan induksi akan menghasilkan arus I yang mengalir dari satu ujung ke ujung lainnya dan kembali melalui konduktor yang lain.
- c) Karena konduktor yang telah mengalir arus listrik tersebut berada dalam medan magnet permanen maka menghasilkan gaya mekanik atau gaya Lorentz
- d) Gaya tersebut akan terus ada dan menarik konduktor menuju medan magnet stator.

Ketika kumparan tiga fasa motor induksi terhubung dengan sumber tiga fasa akan mengalir arus listrik dengan beda fasa 120° pada masing-masing kumparan. Dari tiap kumparan tersebut akan menghasilkan fluks magnetik yang terus berputar mengikuti gelombang sinusoidal dari arus.

Kecepatan putar medan magnet juga bergantung kepada frekuensi sumber. Jika tegangan yang diberikan memiliki frekuensi (f) 50 Hz, maka medan magnet akan berputar dalam satu siklus putaran dalam waktu $1/50$ detik atau 1500 putaran/menit. Satu siklus dihitung terhadap jumlah kutub (P) yang terbentuk dalam konstruksi stator. Kecepatan tersebut juga dapat dikatakan kecepatan sinkron dan dinyatakan dengan persamaan

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

dengan:

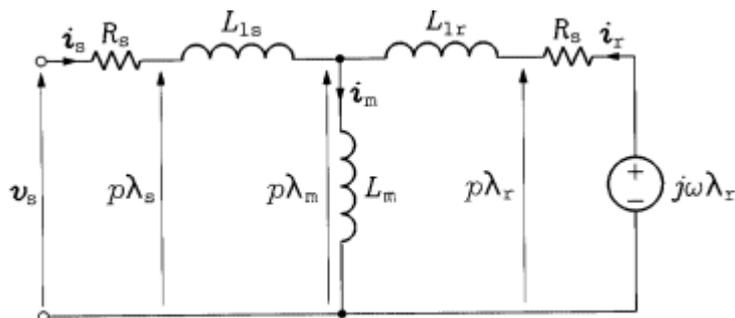
N_s = Kecepatan stator (RPM)

f = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah Pole

2.3 Permodelan Matematis Motor Induksi

Prinsip kerja dari sebuah motor induksi sama dengan prinsip kerja sebuah trafo listrik. Arus yang mengalir di rotor merupakan hasil dari induksi oleh variasi perubahan fluks stator yang terus berputar terhadap konduktor rotor. Permodelan motor induksi sesuai dengan T-model dalam bentuk sirkuit listrik dengan bingkai merujuk ke stator.



Gambar 2.4 Rangkaian dinamika T-Model (Trzynadlowski, 2001)

Slip merupakan perbedaan kecepatan sinkron stator dan kecepatan sebenarnya atau kecepatan putar rotor. Persamaan slip dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Slip = N_s - N_r \quad (2.2)$$

dengan:

N_r = Kecepatan rotor (RPM)

Bentuk vektor variabel motor 3-fasa seperti, tegangan, arus, atau flux digunakan untuk menganalisis dan mengendalikan motor induksi. Dalam analisis vektor, permodelan motor induksi menggunakan transformasi abc- dq yaitu mengubah analisa 3-fasa menjadi koordinat 2 vektor stator.

$$\begin{bmatrix} \mathcal{F}_{ds} \\ \mathcal{F}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{as} \\ \mathcal{F}_{bs} \\ \mathcal{F}_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dan

$$\begin{bmatrix} \mathcal{F}_{as} \\ \mathcal{F}_{bs} \\ \mathcal{F}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{ds} \\ \mathcal{F}_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Dengan:

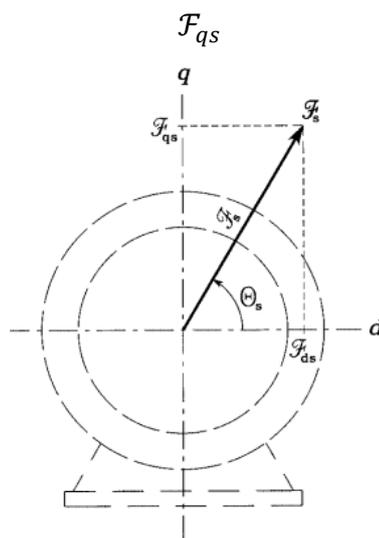
\mathcal{F}_{as} = Gaya magnet stator fasa a (N)

\mathcal{F}_{bs} = Gaya magnet stator fasa b (N)

\mathcal{F}_{cs} = Gaya magnet stator fasa c (N)

\mathcal{F}_{ds} = Gaya magnet stator sumbu d (N)

\mathcal{F}_{qs} = Gaya magnet stator sumbu q (N)



Gambar 2.5 Vektor gaya pada stator (Trzynadlowski, 2001)

Transformasi 2.3 dan 2.4 digunakan pada setiap variabel vektor 3-fasa yang berlaku pada motor induksi seperti tegangan input, arus stator, dan flux rotor. Pada Gambar 2.4 terdapat

tiga jenis nilai induktansi yaitu induktansi stator (L_{ls}), induktansi kebocoran rotor (L_{lr}), dan induksi magnet rotor (L_m).

Permodelan matematis bisa didapat melalui analisa rangkaian dari Gambar 2.4 dengan pengubahan analisa 3-fasa menjadi analisa vektor. Model rangkaian ini merupakan model paling umum digunakan terhadap motor induksi (Mulyawan dan Yahya., 2020). Persamaan tegangan stator-rotor motor induksi merupakan fungsi dari arus stator dan rotor, serta fungsi dari fluks yang terdapat pada hubungan kumparan.

Persamaan tegangan acuan didapat sebagai berikut

$$V_{sd}(t) = R_s i_{sd}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \quad (2.5)$$

$$V_{sq}(t) = R_s i_{sq}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} \quad (2.6)$$

$$V_{rd}(t) = 0 = R_r i_{rd}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{rq} + \frac{d}{dt} \lambda_{rd} \quad (2.7)$$

$$V_{rq}(t) = 0 = R_r i_{rq}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{rd} + \frac{d}{dt} \lambda_{rq} \quad (2.8)$$

Pada tugas akhir ini digunakan motor induksi dengan jenis *squirrel cage* (sangkar tupai). Nilai tegangan rotor dianggap 0 karena rotor pada awalnya tidak memiliki tegangan yang hanya berupa silinder batang logam. Persamaan medan putar yang didapat adalah

$$\lambda_{sd} = L_s i_{sd}(t) + L_m i_{rd}(t) \quad (2.9)$$

$$\lambda_{sq} = L_s i_{sq}(t) + L_m i_{rq}(t) \quad (2.10)$$

$$\lambda_{rd} = L_r i_{rd}(t) + L_m i_{sd}(t) \quad (2.11)$$

$$\lambda_{rq} = L_r i_{rq}(t) + L_m i_{sq}(t) \quad (2.12)$$

Dengan:

V_{sd}, V_{sq} = Tegangan stator pada sumbu d-q (Volt)

V_{rd}, V_{rq} = Tegangan rotor pada sumbu d-q (Volt)

i_{sd}, i_{sq} = Arus stator pada sumbu d-q (Ampere)

i_{rd}, i_{rq} = Arus rotor pada sumbu d-q (Ampere)

$\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$ = Fluks stator pada sumbu d-q (Webber)

$\lambda_{rd}, \lambda_{rq}$ = Fluks rotor pada sumbu d-q (Webber)

R_s = Resistansi stator (Ω)

R_r = Resistansi rotor (Ω)

L_s = Induktansi stator (H)

L_r = Induktansi rotor (H)

L_m = Induktansi magnetik (H)

ω_n = Kecepatan mekanik motor (rad/s)

Persamaan untuk torsi elektromagnetik dapat ditulis

$$T_{em} = \frac{2 PL_M}{3 2JL_r} (\lambda_{rd} i_{sd}(t) - \lambda_{rq} i_{sd}(t)) \quad (2.13)$$

Sementara untuk persamaan elektrodinamika dapat dituliskan dalam persamaan

$$J_{eq} \frac{d}{dt} \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_b(t) - T_L(t) \quad (2.14)$$

$$T_b(t) = B_m \omega_m(t) \quad (2.15)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m(t) = \omega_m(t) \quad (2.16)$$

Dengan:

T_{em} = Torsi elektromagnetik (Nm)

J_{eq} = Momen inersia ($kg m^2$)

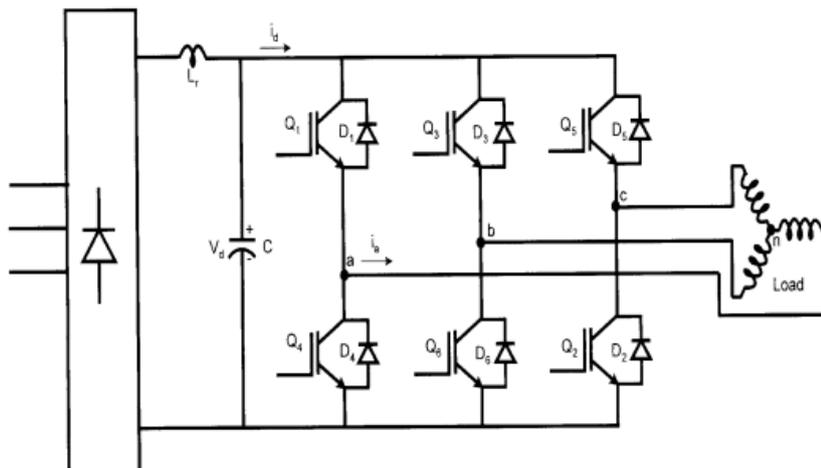
ω_n = Kecepatan putar mekanik motor (rad/s)

θ_m = Posisi sudut (rad)

P = Jumlah Pole rangkaian

2.4 Inverter

Ketika tidak dikendalikan, motor induksi akan bekerja sesuai dengan spesifikasi maksimalnya. Biasanya dengan sumber seperti yang didistribusikan untuk penggunaan umum yaitu 220-220 V satu fasa atau 380 tiga fasa dengan frekuensi 50 - 60 Hz tergantung aturan penggunaan listrik di wilayah tertentu. Jika ingin mengendalikan kecepatan dibawah nilai tersebut dibutuhkan pembangkit tegangan yang dapat divariasikan.



Gambar 2. 6 Rangkaian inverter 3 fasa (Bose, 2002)

Inverter merupakan komponen pengubah tegangan DC menjadi AC. Untuk mengubah tegangan DC atau tegangan AC satu fasa menjadi tiga fasa digunakan inverter

dengan *Three-Phase Bridge*. Transistor digunakan sebagai *switch* untuk membangkitkan tegangan AC dengan bentuk sinyal *Space Vector Pulse Width Modulation (SV-PWM)*. Keluaran tegangan berupa sinyal kotak dengan 6 mode operasi. Sirkuit memiliki tiga dioda *half-bridge*, dengan tiap fasa berbeda $2\pi/3$ untuk membangkitkan sinyal tegangan tiga fasa. Input inverter biasanya berupa sumber tegangan AC satu fasa atau tiga fasa yang menyuplai lewat penyearah *LC* atau *C* filter. Sinyal kotak tiap fasa digambarkan dengan deret Fourier seperti berikut

$$V_{ao} = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots \right] \quad (2.17)$$

$$V_{bo} = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \dots \right] \quad (2.18)$$

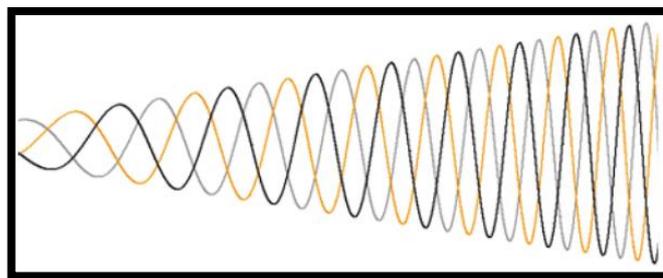
$$V_{co} = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \cos 3 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{5} \cos 5 \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \dots \right] \quad (2.19)$$

Dengan:

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} = Tegangan 3-fasa (Volt)

2.5 V/f Kontrol

Scalar kontrol atau *V/f* kontrol merupakan salah satu metode untuk mengatur kecepatan motor induksi. Pengendalian menggunakan metode ini biasanya ditujukan untuk hal yang tidak memerlukan biaya tinggi dan performa yang terlalu bagus (Yu et al., 2011). Biasa juga disebut dengan pengendalian frekuensi dimana metode ini mengatur rasio antara tegangan dan frekuensi dari sumber secara konstant dari kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi. Dengan mengatur rasio perbandingan konstan akan mengatur flux magnet pada motor menjadi konstant.



Gambar 2.7 Variasi tegangan dengan *V/f* kontrol (Levkin D, 2022)

Pada umumnya sebuah inverter sudah mengatur keluaran tegangan dan frekuensi. Untuk beberapa kasus, pengaturan pada variabel frekuensi diatur konstan tetapi nilai tegangan akan dikendalikan tergantung beban yang mempengaruhi.

2.6 Pengendali Proportional, Integral, Derivatif (PID)

Pengendali PID (*Proportional Integral Derivative*) merupakan kontroler yang digunakan untuk menentukan presisi suatu sistem dengan karakteristik adanya umpan balik (*feedback*) pada sistem tersebut. Kendali ini terdiri dari tiga cara pengaturan yaitu P (Proportional) I (Integral) dan D (derivatif) dengan masing masing memiliki karakteristik tersendiri. Dalam implementasinya, ketiga parameter tersebut dapat bekerja sendiri maupun digabung. Respon kendali yang diberikan dan diterapkan dengan bentuk paralel dengan output seperti persamaan berikut (Ang dkk., 2005)

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \tag{2.20}$$

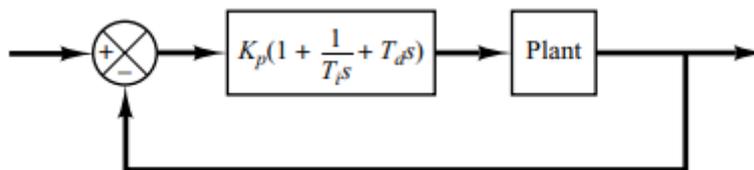
$$= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Efek dari masing masing parameter dalam respon tertutup dapat dilihat pada tabel 2.1. Dalam perancangan pengendali PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter K_p , K_i , dan K_d agar respon sinyal keluaran sistem terhadap masukan sesuai dengan yang diinginkan.

Tabel 2.1 Efek Peningkatan Parameter

Respon Closed-Loop	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-state Error	Stability
Proporsional	Berkurang	Meningkat	Sedikit Meningkatkan	Menurun	Menurun
Integral	Sedikit Menurun	Meningkat	Meningkat	Sangat Menurun	Menurun
Derivatif	Sedikit Menurun	Menurun	Menurun	Tidak Berubah	Meningkat

Diagram blok sistem tertutup dengan pengendali PID seperti gambar berikut

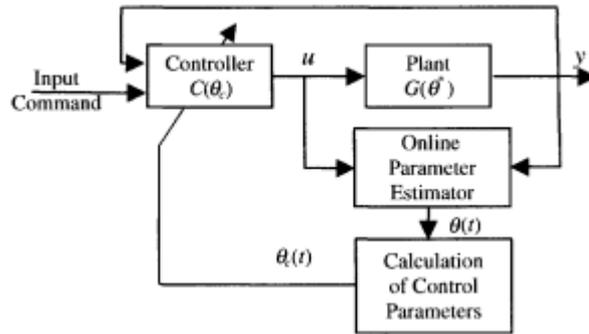


Gambar 2.8 Blok Diagram PID kontrol (Ogata, 2010)

2.7 Adaptif PID

Sistem kendali Adaptif merupakan sistem kendali yang dilengkapi dengan algoritma pembelajaran. Algoritma pembelajaran yang diberikan oleh sistem kendali Adaptif akan

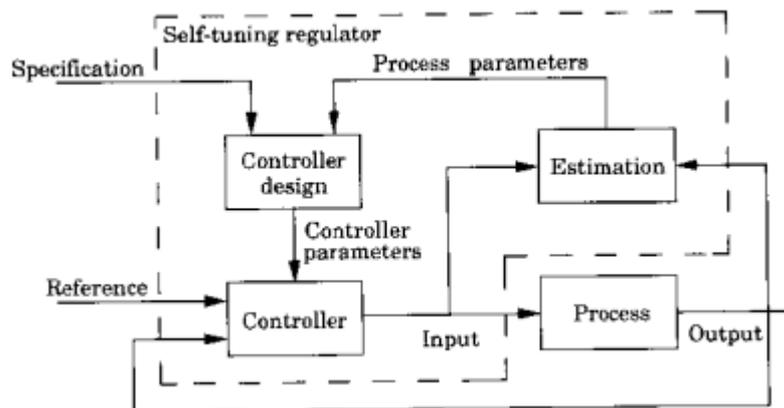
mengatur parameter-parameter dari pengendali berdasarkan pada pasangan data input-output. Estimasi parameter dilakukan secara langsung saat proses berjalan (Loannou P. dan Baris, 2006).



Gambar 2. 9 Skema pengendalian adaptif (Loannou Petros & Fidan Baris, 2006)

Ada dua tipe dari metode adaptif yaitu *direct adaptive* dan *indirect adaptive*. Dalam *direct adaptive*, permodelan plant sudah ditentukan parameter yang mempengaruhinya. Estimasi dilakukan langsung tanpa ada perubahan dan perhitungan parameter plant. Sedangkan *indirect adaptive*, permodelan plant didasarkan parameter yang dapat berubah sehingga perlu dilakukan estimasi secara langsung saat proses berjalan.

Salah satu skema adaptif adalah *self-tuning regulator* (STR). Diagram blok STR ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Pengendali Adaptif berjalan dalam dua proses. Proses pertama menerima nilai *feedback* dari output sistem. Parameter kontrol itu sendiri dilakukan estimasi secara rekursif dan perhitungan parameter estimasi. Perlu diketahui bahwa proses dalam proses estimasi dilakukan dan diperbaharui untuk setiap periode sampel tertentu.

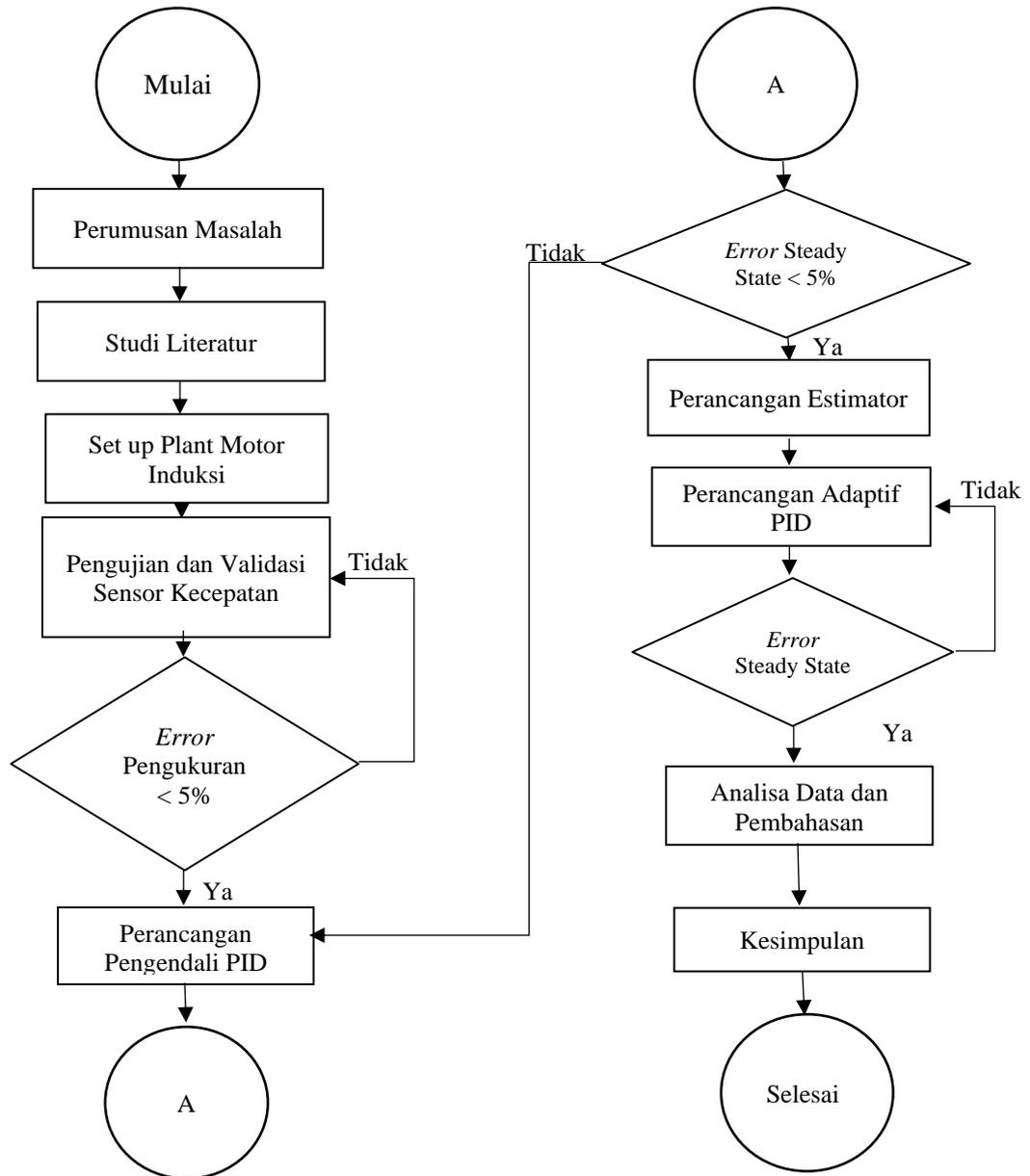


Gambar 2. 10 Diagram blok STR (Astrom K. and Bjorn W., 1994)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan dari penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini mengikuti diagram alir (*flowchart*) sebagai berikut

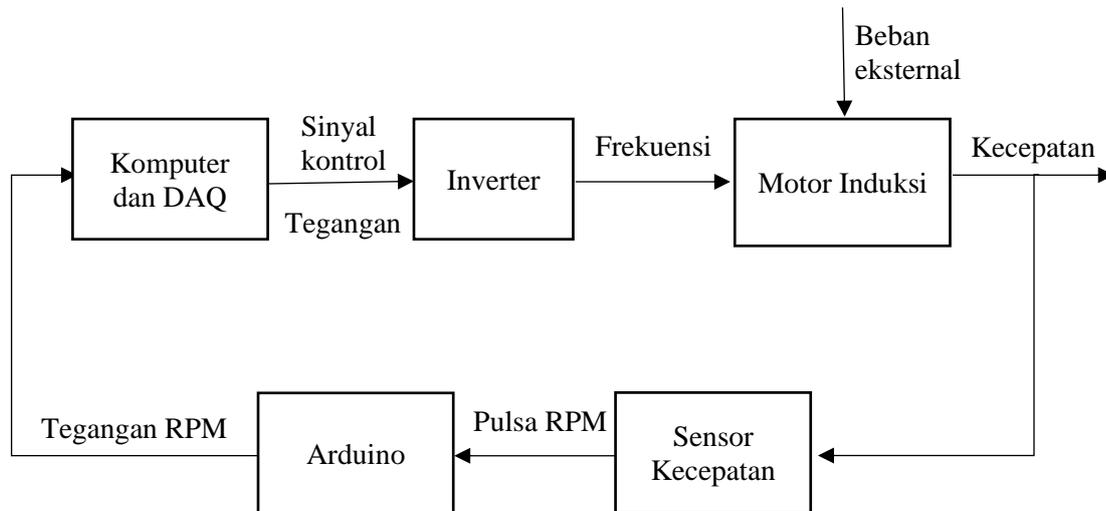


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 *Set-up* Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi

Sistem pengendalian kecepatan dilakukan dengan beberapa alat agar dapat berfungsi maksimal. Pemilihan alat merupakan tahap awal dalam merancang suatu sistem. Dalam penelitian ini digunakan beberapa alat yang telah ada di laboratorium sebelumnya dan ada

yang perlu ditambahkan untuk penyesuaian. Komputer digunakan untuk merancang dan menjalankan perintah kontrol.



Gambar 3.2 Skema plant

Perangkat lunak yang digunakan yaitu MATLAB dan Simulink. *Data Acquisition* (DAQ) digunakan sebagai penerima dan pengirim data antara alat dan komputer dengan keluaran berupa tegangan 0-10 Vdc. Inverter digunakan sebagai *power converter* atau suplai daya motor induksi dengan keluaran berupa nilai frekuensi. Generator DC digunakan sebagai variasi beban putar atau *disturbance* terhadap sistem. Sensor kecepatan untuk mengukur kecepatan putar motor. Dan beberapa penyesuaian kecil lainnya yang akan dijelaskan lebih lanjut.

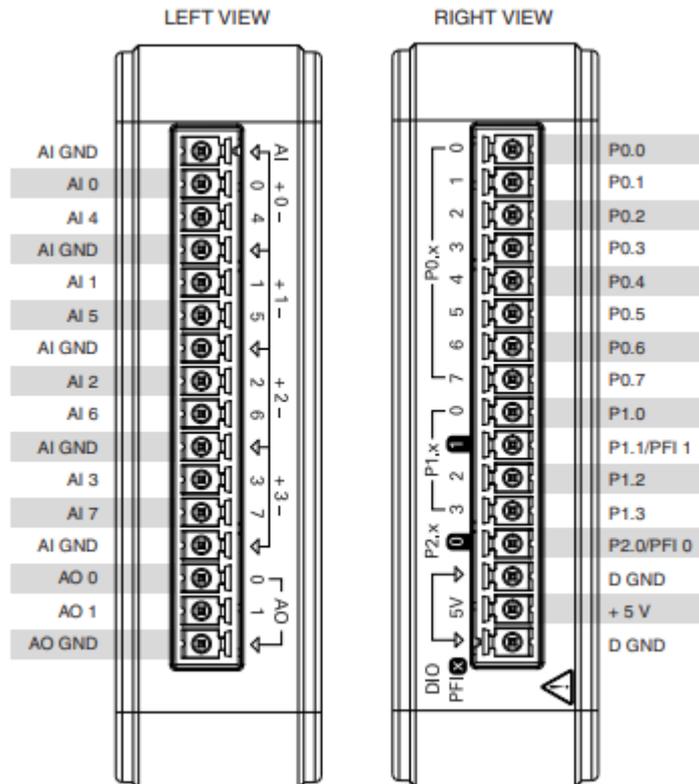
3.1.1 Komputer dan DAQ

Perhitungan dan kontrol akan dijalankan melalui komputer. Perangkat lunak MATLAB dan simulink digunakan untuk memudahkan proses penyimpanan data dan jalannya proses kontrol dari pemberian *set point*, analisa grafik respon hingga identifikasi sistem. Penerimaan dan pengiriman data dari komputer menuju alat dipermudah dengan adanya *library Data Acquisition* di dalam Simulink.



Gambar 3.3 DAQ NI USB-6001

DAQ yang digunakan dari National Instrumen dengan tipe NI USB-6001. DAQ memiliki *port* input dan output untuk sinyal digital dan analog. Dalam sistem ini hanya memakai *port* analog input untuk menerima sinyal analog 0-10V dari sensor dan analog output untuk mengirim sinyal analog 0-10V kontrol menuju inverter. *Analog to Digital Converter* (ADC) memiliki resolusi 14-bit dan maksimum pengambilan sampel 20 kS/detik. Perlu diperhatikan untuk pengaturan tipe penerimaan data pada blok simulink menggunakan *Single-ended* menandakan sinyal analog dari kabel positif dihubungkan ke *ground*.



Gambar 3.4 Pinout DAQ (__,2014)

Pada tugas akhir ini digunakan pin AO 1 dan AO GND sebagai output yang akan terhubung ke terminal inverter VI dan CC

3.1.2 Inverter TOSHIBA VF-nC3

Inverter yang digunakan memiliki tipe *voltage source inverter* (VSI) yang artinya inverter sebagai sumber daya dengan variabel tegangan. Ditandai dengan penggunaan transistor sebagai *switch*. Secara bawaan inverter ini telah memiliki kontrol sendiri terhadap ratio V/f . Variabel yang dapat dikendalikan melalui inverter ini hanya nilai frekuensi sedangkan tegangan mengikuti spesifikasi dan kontrol rasio dari pabrikannya.

Tabel 3.1 Spesifikasi Inverter

Spesifikasi	Nilai
Input	1-fasa, 240 V
Motor (kW)	2.2
Output(kVA)	3.9
Arus output(A)	10 A
Tegangan Output (V)	3-fasa 200-240V
Batas <i>overload</i> Arus	150%-60 detik, 200%-0.5 detik
Frekuensi	50-60 Hz
Kapasitas Sumber Daya (KVA)	4.0
Rating Ketahanan	IP 20
Sistem Pendingin	Kipas

**Gambar 3.5** Inverter Toshiba VF-nC3 (-, 2019)

Pengaturan semua parameter dilakukan melalui panel yang terdapat diatas inverter. Dalam panel terdapat *display*, tombol *run*, *stop*, *mode*, dan *easy*. *Display* digunakan sebagai penampil nilai yang akan diubah dan nilai frekuensi ketika inverter dijalankan. Untuk menjalankan fungsi inverter dapat dengan menekan tombol *run* dan untuk menghentikannya dengan menekan tombol *stop*. Tombol *easy* digunakan untuk menggunakan fungsi inverter sesuai dengan pengaturan awal tanpa ada perubahan parameter. Tombol *mode* digunakan untuk mengubah parameter yang ingin diterapkan.

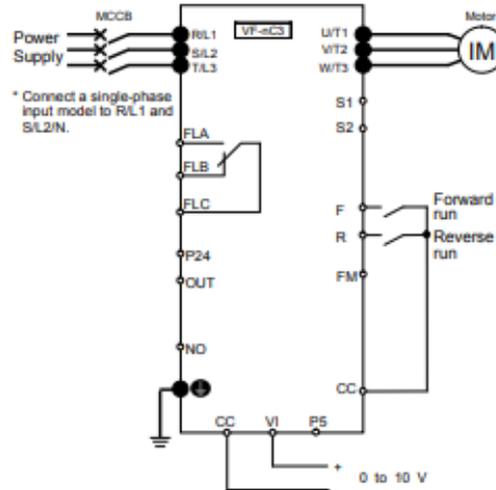


Gambar 3. 6 Panel Operasi Inverter

Dalam penggunaan inverter untuk sistem ini perlu melakukan penyesuaian beberapa parameter yang dibutuhkan untuk pengendalian frekuensi dengan input secara eksternal. Pengaturan untuk kendali frekuensi secara eksternal dengan sinyal analog dapat dilakukan dengan mengubah parameter $Fnod$ menjadi 0. Kabel dihungkan melalui terminal VI sebagai kabel positif dan CC sebagai kabel ground. Kedua kabel tersebut dihubungkan ke *port* analog output DAQ. Parameter selanjutnya yang perlu diubah adalah $F109$ menjadi 0 yang digunakan untuk mengatur tipe sinyal analog yaitu 0-10V sesuai dengan output DAQ. Kemudian perlu dipastikan parameter lainnya dalam keadaan awal seperti parameter $Cnod$ dengan nilai 0 untuk perintah nyala mati inverter dan Fr dengan nilai 0 untuk memastikan bahwa putaran motor searah jarum jam. Output tegangan 3-fasa dapat dihubungkan dengan tiga kabel ke motor melalui terminal output dengan kode U, V, W, ground yang terdapat di depan inverter dengan kode yang sama tertera pada motor.

Tabel 3. 2 Parameter Inverter

Judul	Fungsi	Keterangan	Pengaturan
AUH	<i>History</i>	Menampilkan Parameter yang sedang dipakai dan diubah	-
$Cn0d$	Perintah	Mulai dan Berhenti	1
$Fn0d$	Kendali Frekuensi	Melalui papan terminal (eksternal)	0
$F109$	Analog input terminal	0-10V	0
Fr	<i>Forward/Reverse</i>	Mengatur arah putaran	0
$Fnsl$	Parameter Output	Mengirim sinyal parameter melalui terminal	0



Gambar 3.7 Connection Diagram Inverter (-, 2019)

3.1.3 Motor Induksi dan Beban

Motor induksi sebagai komponen utama yang akan dikendalikan. Motor yang digunakan merupakan motor AC 3-fasa dari Alliance motori dengan tipe A-Y3A-90L-4 dengan daya sebesar 1.5 kW, kecepatan maksimum 1500 RPM, dan memiliki 4 *pole*. Berikut merupakan spesifikasi dan beberapa parameter dari motor induksi yang digunakan.

Tabel 3.3 Parameter motor Induksi

NO	Parameter	Lambang	Nilai
1	<i>Pole</i>	P	4
2	Induktansi Mutual	L_m	0.258 H
3	Induktansi Stator	L_s	0.274 H
4	Induktansi Rotor	L_r	0.274 H
5	Hambatan Rotor	R_r	3.805 Ohm
6	Hambatan Stator	R_s	4.84 Ohm
7	<i>Power</i>	kW, HP	1,5 kW, 2 HP
8	<i>Frekuensi Max, Speed</i>	Hz, RPM	50Hz, 1500 RPM
9	<i>Efficiency</i>	η	78.5%
10	<i>Power Factor</i>	$\cos \phi$	0.78
11	Inersia Rotor	$kg \cdot m^2 \cdot 10^3$	2.7



Gambar 3. 8 Motor Induksi

Pada plant motor induksi ini diperlukan beban untuk menghambat putaran motor induksi agar dapat melihat respon kontrol terhadap adanya beban eksternal. Generator DC merupakan salah satu pilihan yang dapat diterapkan. Beban yang digunakan pada sistem ini berupa generator DC bekas *treadmill* dengan merek JKEXER.



Gambar 3. 9 Generator DC dan beban resistor

Shaft generator DC dikopel langsung secara seri dengan *shaft* motor induksi. Output dari generator DC dihubungkan dengan beban resistif yang terdiri dari *coil* resistor 100 ohm sebanyak 10 dan disusun secara paralel. Beban dapat diatur nyala dan mati menggunakan tombol *switch* didepan panel. Berikut merupakan spesifikasi dan gambar beban generator.

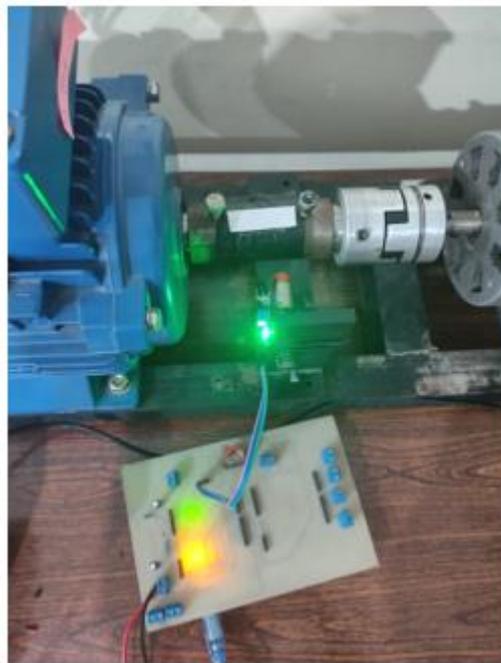
Tabel 3. 4 Spesifikasi Generator DC

Spesifikasi	Nilai
Tegangan (V)	230
Kecepatan Putar (RPM)	4000
Daya (HP)	2

Dari tabel 3.4 dapat dilihat bahwa kecepatan maksimal dari generator senilai 4000 RPM sedangkan kecepatan maksimal dari motor induksi 1500 RPM. Oleh karena itu tegangan keluaran generator yang dapat dipakai hanya senilai 86.25 Volt.

3.1.4 Sensor Kecepatan

Pengukuran kecepatan putar motor induksi menggunakan *IR Proximity Sensor*. Sensor tersebut merupakan sensor inframerah yang menangkap pantulan cahaya dan dari objek. *Tracker RPM* diperlukan dan dipasang pada *shaft* motor agar dapat mengetahui gelombang untuk tiap putaran. Berbentuk lapisan hitam dan putih sebagai pembeda sensor mentedeteksi objek atau tidak. Output sensor berupa pulsa gelombang dalam bentuk tegangan yang dihubungkan langsung ke Arduino Uno untuk pemrosesan data. Pin Vcc sensor dihubungkan dengan 5 Vdc Arduino. Pin GND dihubungkan dengan Ground Arduino. Pin output dihubungkan dengan pin 2 digital input Arduino.

**Gambar 3. 10** Pengkabelan sensor kecepatan

Perhitungan kecepatan dilakukan di Arduino dengan menerapkan pengukuran periode gelombang dari tiap putaran motor. Gelombang berbentuk gelombang kotak dengan data digital 5V menandakan *high* dan 0V menandakan *low*. Ketika sensor mendeteksi bagian

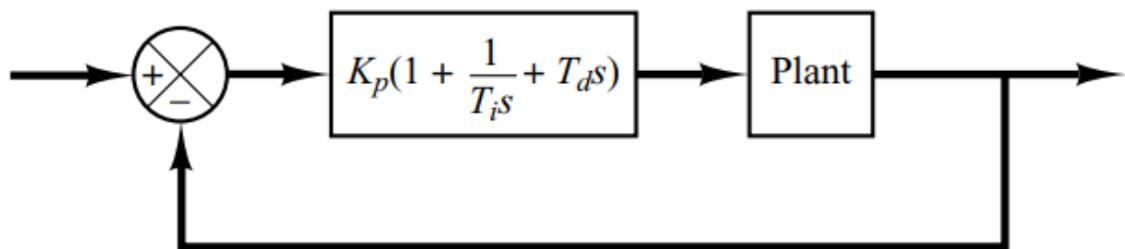
putih maka akan mengeluarkan tegangan 5V sedangkan bagian hitam akan mendeteksi 0V. Resolusi waktu gelombang diukur dalam mikrodetik. Sehingga untuk perhitungan menggunakan rumus.

$$RPM = \frac{\text{gelombang}}{\text{menit}} = \frac{\text{periode}}{\text{periode}} = \frac{60 * 1000 * 1000 \mu s}{\text{periode} \mu s} \quad (3.1)$$

Hasil RPM akan dikirim ke komputer melalui DAQ dengan sinyal PWM dari *port* analog output. Sinyal PWM harus difilter terlebih dahulu menggunakan RC filter agar mendapatkan nilai analog tegangan 5V.

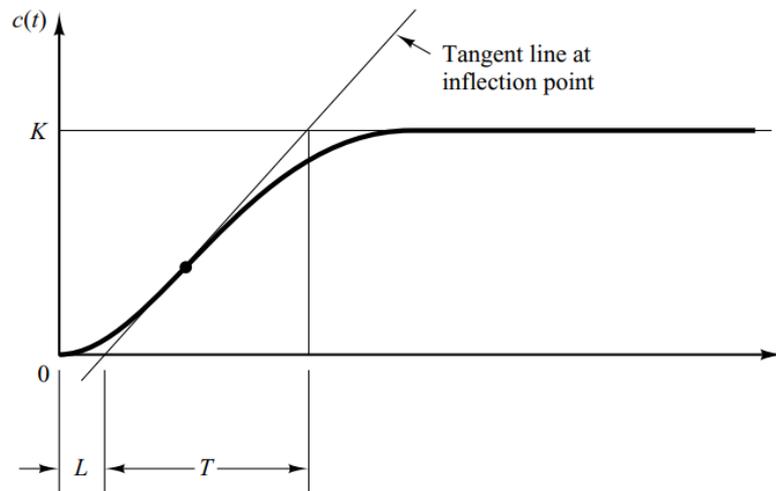
3.2 Perancangan Metode Pengendali PID

Sebuah sistem pengendali akan bekerja apabila ada sinyal *error*, yaitu selisih antara *set point* yang diinginkan dengan nilai aktual yang terukur. Variabel yang akan dimanipulasi pada sistem ini merupakan putaran motor. Kendali yang akan diterapkan yaitu kendali PID. Pengendali PID digunakan untuk meningkatkan *rise time* sistem dan mengurangi *steady state error*.



Gambar 3. 11 Blok diagram PID *close loop*

Untuk mendapatkan nilai parameter PID diperlukan proses tuning. Dalam sistem ini dilakukan tuning parameter gain proporsional K_p , waktu integral T_i , dan waktu derivatif T_d menggunakan aturan Zieger-Nichols. Dalam menggunakan metode ini perlu dilakukan analisa respon loop terbuka dengan sinyal input diberikan berupa sinyal unit-step. Hasil respon uji *open loop* yang didapat berupa kurva S.



Gambar 3. 12 Bentuk kurva S untuk analisa tuning.

Kurva bentuk S memiliki karakteristik dengan 2 buah konstanta, yaitu *delay time* (L) dan *time constant* (T). Kedua parameter tersebut diperoleh dengan menggambar garis tangensial pada titik infleksi kurva S. Dari grafik tersebut maka nilai parameter dapat ditentukan dengan mengikuti aturan tuning Ziegler-Nichols seperti pada tabel

Tabel 3. 5 Aturan Ziegler-Nichols untuk tuning PID

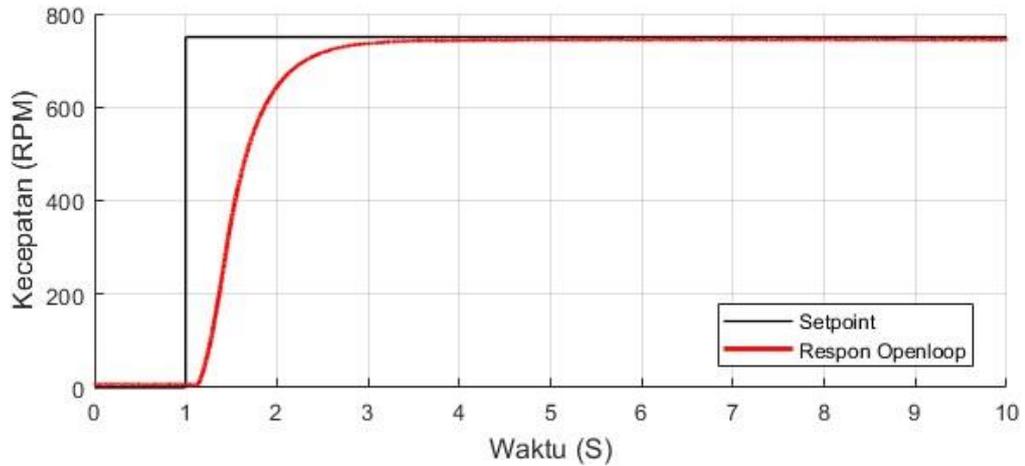
Jenis Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$12 T/L$	$2 L$	$0.5 L$

dengan:

$$T = 1,5 (t_{63\%} - t_{28\%}) \quad (3.2)$$

$$L = t_{63\%} - T$$

Perancangan pengendali PID dilakukan dengan menguji sistem secara *open loop* dengan pengaturan *set point* dalam jangkauan nilai input sistem dari 0 hingga 1500 RPM. Dalam pengujian ini dipilih nilai 750 RPM untuk pengaturan nilai input yang merupakan nilai tengah. Kemudian didapat grafik *open loop* sebagai berikut



Gambar 3. 13 Grafik respon *open loop* dengan kecepatan 750 RPM

Gambar 3.13 merupakan hasil uji *open loop* sistem. Garis warna hitam merupakan nilai input sinyal step yang diberikan dan garis warna merah merupakan respon *open loop*. Kemudian untuk mendapatkan nilai *delay time* (L) dan nilai *time constant* (T) menggunakan persamaan (3.2) dan didapat nilai tuning parameter gain proporsional K_p , waktu integral T_i , dan waktu derivatif T_d yang ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 3. 6 Parameter kontrol PID

Parameter	Nilai
<i>Time constant</i> (T)	0.3780
<i>Time Delay</i> (L)	1.251
K_p	0.3626
T_i	2.5020
T_d	0.6255

3.3 Perancangan Estimator

Estimator digunakan untuk mengestimasi parameter gain dari kontroler PID yang akan digunakan. Metode yang dipilih adalah RLS estimator (*Recursive Least Square*). Dalam predictive control menggunakan permodelan plant dalam bentuk diskrit. Walaupun kebanyakan proses pada aslinya berjalan secara kontinyu, permodelan diskrit digunakan untuk menentukan parameter yang ada. Biasanya Recursive Least Estimator digunakan untuk menentukan parameter tersebut. Khususnya digunakan untuk mengendalikan plant yang tidak stabil (A.G. Kuztenov, 1994).

Nilai-nilai yang dikalkulasi biasanya dilakukan menggunakan komputer digital. Sehingga semua nilai dari input hingga output biasanya akan disampling. Dapat ditentukan

nilai h nilai waktu sampling dan nilai L merupakan waktu *delay* yang lebih kecil dari h . Suatu model dapat digambarkan dengan fungsi alih bentuk diskrit (Åström dkk., 1995)

$$H(z) = \frac{b_1 z + b_2}{z^n(z - a)} \quad (3.3)$$

Dimana a, b_1, b_2 merupakan parameter yang ditambahkan. Untuk sistem dengan orde yang lebih tinggi, persamaan dapat ditulis

$$A(z)y(kh) = B(z)u(kh) \quad (3.4)$$

Nilai $A(z)$ dan $B(z)$ merupakan bilangan polinomial

$$A(z) = z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n \quad (3.5)$$

$$B(z) = b_1 z^{n-1} + b_2 z^{n-2} + \dots + b_n \quad (3.6)$$

Sehingga fungsi alih untuk orde tinggi menjadi

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{n-1} + b_2 z^{n-2} + \dots + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n} \quad (3.7)$$

Maka didapat fungsi alih untuk sistem orde 2 adalah

$$\frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3.8)$$

Estimasi parameter dalam model sistem diskrit dapat dilakukan dengan melihat hubungan urutan tiap input dan output

$$\{u(kh), y(kh), \quad k = 1, 2, \dots, N\} \quad (3.9)$$

Parameter ditentukan dengan menambahkan *error* ke persamaan 3.3 sehingga

$$e(kh + nh) = B(z)u(kh) - A(z)y(kh), \quad k = 1, \dots, N - n \quad (3.10)$$

Nilai tiap parameter merupakan kuadrat terkecil untuk jumlah *error* yang didapat. Sehingga persamaannya adalah

$$V(\theta) = \sum_{k=n+1}^N e^2(kh) \quad (3.11)$$

Dengan:

$V(\theta)$ = Fungsi output estimasi

$e(kh)$ = Rekursif *error*

Tiap parameter akan memiliki nilai akhir dari pengulangan hubungan input output yang berjalan hingga mencapai minimum. Hal ini mirip dengan solusi untuk optimisasi namun sedikit berbeda karena akan terus berlanjut mengikuti sistem yang dapat berubah.

Kondisi hubungan input dan output akan terus berlanjut akan menghasilkan hasil *tuning* untuk setiap sampel. Hasil estimasi tiap parameter juga bisa dihitung dengan mengelompokkan semua nilai a_i dan b_i sebagai vektor

$$\theta = (a_1 a_2 \dots a_n b_1 b_2 b_n)^T \quad (3.12)$$

$$\varphi_{k-1} = (-y(kh - h) \dots - y(kh - nh) u(kh - h) \dots u(kh - nh))^T \quad (3.13)$$

Dengan:

θ = Vektor output estimasi

φ_{k-1} = Vektor regresi

Estimasi dapat dihitung terus menerus hingga mendapat nilai yang optimal dengan

$$e_k = y(kh) - \varphi_{k-1}^T \theta_{k-1} \quad (3.14)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + P_k \theta_{k-1} e_k \quad (3.15)$$

$$P_k = P_{k-1} - \frac{P_{k-1} \varphi_{k-1} \varphi_{k-1}^T P_{k-1}}{1 + \varphi_{k-1}^T P_{k-1} \varphi_{k-1}} \quad (3.16)$$

Dengan:

e_k = Error estimasi

θ_k = Parameter estimasi

P_k = Matriks kovarian

Sehingga untuk plant orde 2 yang digunakan pada penelitian ini digunakan parameter estimasi dan vektor regresi sesuai persamaan (3.8), (3.12), dan (3.13) adalah sebagai berikut

$$\theta^T = [a_1, a_2, b_1, b_2]$$

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1), -y(k-2), u(k-1), u(k-2)]$$

3.4 Perancangan Adaptif PID

Dalam perancangan Adaptive PID diperlukan perubahan domain diskrit karena akan dilakukan perhitungan dengan komputer. Persamaan PID kontroler dengan domain kontinu dapat dituliskan sebagai berikut

$$H_{PID}(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right] \quad (3.17)$$

Kontroler ini dikarakterisasi dengan empat parameter tuning yaitu K (gain proporsional), T_i (aksi integral), T_d (aksi derivatif), dan T_d/N (filter terhadap aksi derivatif). Beberapa metode diskritisasi dapat digunakan untuk mendapatkan model PID digital. Dengan menggunakan

pendekatan *backward difference*. Yaitu dengan menerapkan pendekatan s (derivatif) dengan $(1 - q^{-1})/T_s$ dan $1/s$ (integral) dengan $T_s/(1 - q^{-1})$ akan mendapatkan hasil integral

$$\frac{1}{T_i s} = \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1 - q^{-1}} \quad (3.18)$$

Hasil derivatif

$$T_d s = \frac{T_d}{T_s} (1 - q^{-1}) \quad (3.19)$$

Dan hasil filter derivatif

$$\frac{1}{1 + \frac{T_d}{N} s} = \frac{1}{1 + \frac{T_d}{NT_s} (1 - q^{-1})} = \frac{\frac{NT_s}{T_d + NT_s}}{1 - \frac{T_d}{T_d + NT_s} q^{-1}} \quad (3.20)$$

Maka dihasilkan persamaan PID kontroler dalam variabel diskrit berupa

$$H_{PID}(s) = \frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = K \left[1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1 - q^{-1}} + \frac{\frac{NT_s}{T_d + NT_s} (1 - q^{-1})}{1 - \frac{T_d}{T_d + NT_s} q^{-1}} \right] \quad (3.21)$$

Persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = \frac{k_1 + k_2 q^{-1} + k_3 q^{-2}}{(1 - q^{-1})(1 + k_0 q^{-1})} \quad (3.22)$$

Menurut (Mudia, 2015.) pemilihan hubungan antara persamaan (3.8) dan (3.22) adalah

$$a_1 = \frac{k_2}{k_1}, \quad a_2 = k_0 = \frac{b_2}{b_1} \quad (3.23)$$

Maka didapatkan parameter kontroler sebagai berikut

$$k_1 = \left(\frac{1}{b_1}\right) \left(\frac{2T_s}{T_s + 2\tau}\right) \quad (3.24)$$

$$k_2 = a_1 k_1 \quad (3.25)$$

$$k_3 = a_2 k_1 \quad (3.26)$$

$$k_0 = \frac{b_2}{b_1} \quad (3.27)$$

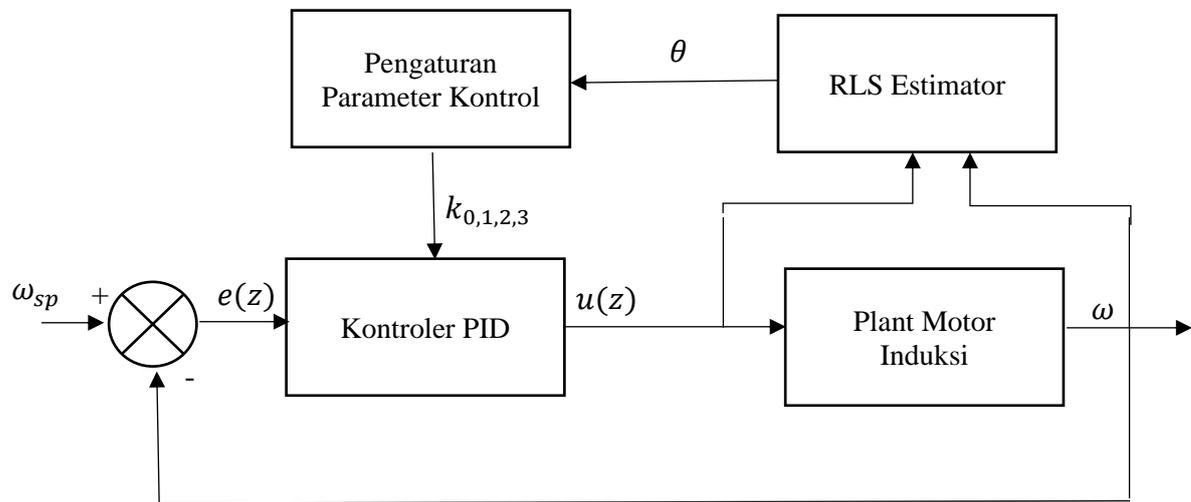
$$K_p = \frac{k_1 k_0 - k_2 - (2 + k_0) k_3}{(1 + k_0)^2} \quad (3.28)$$

$$T_i = T_s \frac{K_p (1 + k_0)}{k_1 + k_2 + k_3} \quad (3.29)$$

$$T_d = T_s \frac{k_0 k_1 - k_0 k_2 + k_3}{K_p (1 + k_0)^3} \quad (3.30)$$

Semua parameter kontroler PID telah didapat dalam bentuk parameter plant. Bentuk diagram blok Adaptif PID ditampilkan dalam Gambar 3.14. Input yang masuk berupa *set point*

kecepatan. Nilai *error* yang masuk ke kontroler merupakan selisih antara nilai *set point* dan nilai kecepatan terukur (*feedback*). Keluaran kontroler dan keluaran plant akan menjadi nilai input untuk estimator sehingga nilai parameter estimasi (θ) akan terus mengubah parameter kontrol.



Gambar 3. 14 Adaptif PID dengan RLS estimator

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Perangkat Keras

Pengujian perangkat keras dilakukan untuk mengetahui hubungan input dan output tiap alat yang dipakai. Beberapa penyesuaian perlu dilakukan terhadap nilai variabel yang dapat diterima oleh tiap alat. Dan juga untuk melihat karakteristik dan sinyal yang terdapat dalam sistem agar sesuai dengan teori.

4.1.1 DAQ dan Frekuensi

DAQ digunakan untuk mengirim sinyal kontrol kepada inverter untuk menyesuaikan frekuensi pada sistem. Sinyal keluaran DAQ berupa sinyal analog tegangan 0-10V. Inverter dapat diatur menerima sinyal tegangan analog dengan mengubah parameter F109 menjadi 0. Tegangan 0-10 V akan menghasilkan nilai frekuensi pada inverter 0-50 Hz. Pengujian dilakukan dengan mengatur nilai tegangan dari Simulink dari 0 hingga 10 V dengan kelipatan 1. Nilai frekuensi adalah data yang tertampil di *display* inverter. Data yang didapat sebagai berikut

Tabel 4. 1 Hubungan Tegangan DAQ dan Frekuensi Inverter

Input	Tegangan Terukur	Frekuensi
0	0	0
1	1.002	4.9
2	2.003	9.9
3	3.004	14.9
4	4.0	19.9
5	5.0	24.9
6	6.0	29.9
7	7.0	34.9
8	8.0	39.9
9	9.0	44.9
10	10.0	49.9

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa hubungan antara tegangan dan frekuensi adalah linier. Nilai frekuensi merupakan nilai tanpa adanya perubahan pada parameter inverter. Dengan demikian bahwa nilai tersebut tetap dapat dipakai sebagai sinyal kontrol untuk sistem.

4.1.2 Frekuensi dan Tegangan 3-Fasa

Pengujian ini dilakukan untuk melihat hubungan antara frekuensi dan tegangan yang masuk ke motor induksi. Inverter yang digunakan sudah terdapat kontrol V/f rasio sehingga ketika frekuensi rendah maka akan menghasilkan tegangan rendah juga. Tegangan 3-fasa berupa tegangan AC diukur menggunakan multimeter. Frekuensi dan sinyal tegangan divalidasi menggunakan osiloskop. Berikut merupakan data yang didapat

Tabel 4. 2 Hubungan Frekuensi dan Tegangan 3-Fasa

Frekuensi	Tegangan		
	Vab	Vbc	Vca
5	58.5	58.5	58.3
10	87.6	87.1	87.5
15	113.7	113.2	112.8
20	135.5	135.3	135.5
25	155.4	155.0	155.2
30	174.4	175.0	175.5
35	189.5	190.0	190.4
40	204.3	204.8	204.6
45	219.5	219.7	220.1
50	237.0	237.4	237.4

Dari data tersebut dapat dipastikan bahwa benar bahwa jika frekuensi rendah menghasilkan tegangan rendah dan jika frekuensi tinggi menghasilkan tegangan tinggi.

4.1.3 Validasi Sensor Kecepatan

Validasi sensor kecepatan dilakukan dengan membandingkan hasil yang terbaca ketika menggunakan sensor IR HW-201 dengan hasil yang terbaca menggunakan *tachometer*. Validasi dilakukan untuk setiap frekuensi guna memastikan sensor dapat bekerja dengan baik dalam jarak kecepatan maksimal. Pengaturan frekuensi dilakukan dari 5 Hz hingga 45 Hz dengan memberikan sinyal kontrol melalui Simulink. Tiap pengaturan frekuensi diambil 5 data dan diambil nilai rata-rata dalam *sampling time* 0.2 detik.

Hasil yang didapat bahwa pengukuran kecepatan dengan nilai pengaturan frekuensi menghasilkan kecepatan dari 0 – 1340 RPM dengan *error* sebesar 0.859317527%. Nilai *error* yang didapat pengukuran sudah memenuhi kriteria *error* kurang dari 5%. Nilai kecepatan maksimal yang terukur oleh *tachometer* adalah 1494 RPM, namun sensor IR HW-201 tidak mampu mengukur kecepatan tersebut sehingga jarak RPM terukur hanya 1340.

Tabel 4.3 Validasi Sensor Kecepatan

<i>Set point (V)</i>	Sensor Kecepatan (RPM)	Tachometer (RPM)	<i>Error (%)</i>
2.5	76.94	71.76	7,215720085
5	149.51	146.8	1,845228118
7.5	223.13	222	0,509084886
10	296.27	296	0,090087569
12.5	371.99	371	0,26662847
15	445.61	445	0,137205661
17.5	523.03	522	0,197353918
20	592.37	598	0,941734194
22.5	665.75	672	0,930452131
25	743.49	741	0,336064663
27.5	820.67	819	0,203592186
30	896.15	894.2	0,217793672
32.5	968.64	967	0,169337266
35	1049.37	1041	0,804080644
37.5	1123.72	1119	0,421731661
40	1194.92	1188	0,582166397
42.5	1271.45	1274.4	0,231732012
45	1341.92	1337	0,367721954
Rata – rata <i>Error (%)</i>			0,859317527

4.1.4 Pembebanan

Pembebanan dalam sistem ini diberikan agar melihat kondisi pengendalian apabila diterapkan pada keadaan operasi dengan beban tertentu. Pemilihan beban yang tepat harus yang sesuai dengan daya motor induksi yang digunakan. Dalam penelitian ini terdapat kesalahan peneliti dalam pemilihan beban akibat kurangnya referensi.

Beban seharusnya juga memiliki daya maksimal 1.5 kW ketika diputar 1500 RPM, namun dengan generator DC yang digunakan hanya menghasilkan

$$\frac{\text{kecepatan}}{\text{Max kecepatan}} * \text{Max tegangan} = \frac{1500}{4000} * 230V = 86.25V \quad (4.1)$$

$$\text{Watt} = \frac{V^2}{R} = \frac{(86.25)^2}{10} = 743.9 \text{ watt} \quad (4.2)$$

Dengan daya tersebut menghasilkan daya yang lebih kecil lagi ketika diputar dengan RPM lebih rendah sehingga efek pembebanan tidak terlalu mengurangi kecepatan motor. Namun pengujian pembebanan tetap dilakukan guna melihat apakah dengan pemberian beban tetap dapat mengurangi kecepatan putar secara konstan. Data kecepatan yang didapat untuk setiap pengaturan *set point* kecepatan adalah sebagai berikut

Tabel 4. 4 Kecepatan dan Efek Pembebanan

No	<i>Set point</i>	Kecepatan Tanpa Beban	Kecepatan dengan Beban	Selisih
1	100	97.5	96.15	1,35
2	200	199.64	195.6	4,04
3	300	297.83	288.4	9,43
4	400	395.22	387.4	7,82
5	500	493.82	482.0	11,82
6	600	595.67	582.0	13,67
7	700	694.68	674.7	19,98
8	800	794.90	770.4	24,5
9	900	892.29	867	25,29
10	1000	996.17	963.5	32,67
11	1100	1094	1065.0	29
12	1200	1192.2	1154	38,2
13	1300	1299.7	1254.2	45,5
14	1340	1334.6	1292.0	42,6

Dari data tersebut dapat dibuktikan bahwa dengan adanya pembebanan akan menyebabkan pengurangan pada kecepatan putar motor induksi. Beban yang diterapkan pada pengujian yaitu dengan resistor 10 ohm. Beban akan berubah tiap peningkatan kecepatan putar motor karena beban dipengaruhi oleh tegangan keluaran generator DC. Semakin cepat putaran motor menghasilkan tegangan yang lebih tinggi.

4.2 Respon Pengendali PID

Pengujian pengendali PID dilakukan dengan mengatur *set point* secara step dengan *step time* pada detik ke-5. Pengaturan kecepatan divariasikan pada kecepatan 200, 600, dan 100 RPM tanpa pembebanan dan juga pembebanan. Waktu pengambilan data dilakukan selama 100 detik dengan *sampling time* sebesar 0.01 detik.

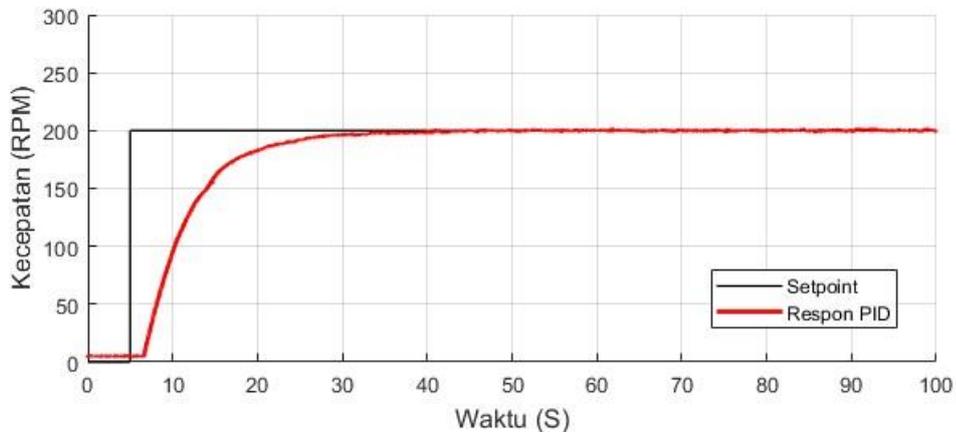
Gambar 4.1 hingga 4.3 merupakan respon kecepatan motor induksi ketika diberi variasi *set point*. Garis warna merah menunjukkan respon dari sistem dan garis warna hitam

menunjukkan *set point*. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pengendali PID memberikan hasil performansi seperti berikut.

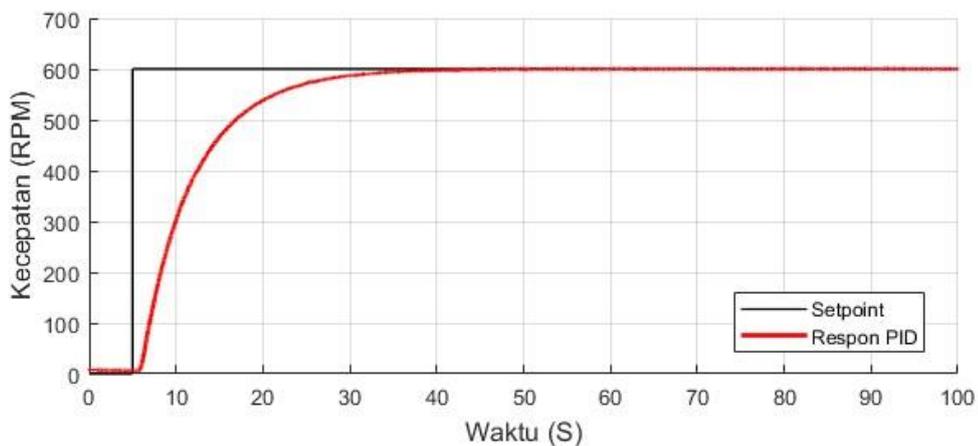
Tabel 4.5 Hasil Performansi pengendali PID

Parameter Performansi	Hasil Performansi Variasi Kecepatan		
	200 RPM	600 RPM	1000 RPM
<i>Rise time</i> (s)	11.6743	13.6118	12.8595
<i>Settling time</i> (s)	35.3602	31.2016	30.4335
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	1.2414	0.4287	0.2662
<i>Steady-state error</i> (%)	0.7635	0.5435	0.5842

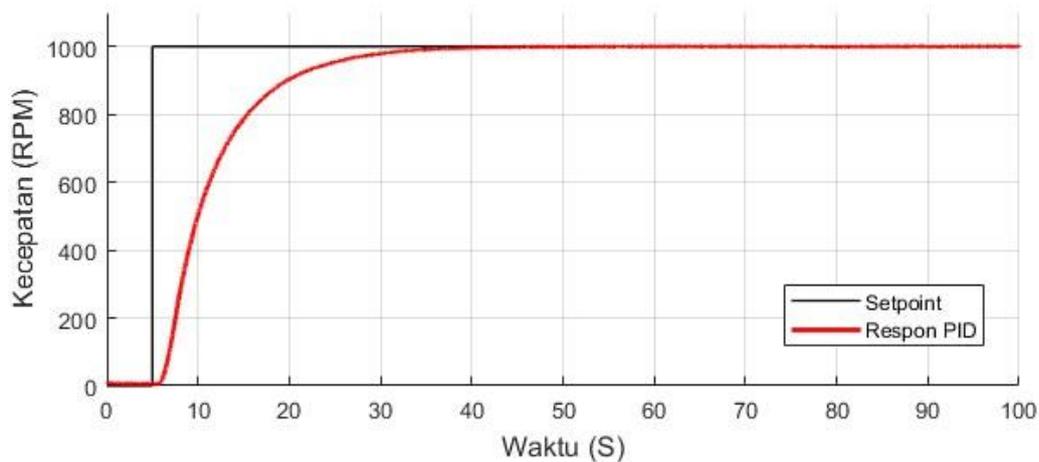
Berdasarkan hasil performansi pada tabel 4.5 dan gambar, pada kecepatan 200 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil pada 11.6743 detik dan memiliki nilai overshoot 1.2414%. Pada kecepatan 600 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil pada 31.2016 detik dan memiliki nilai overshoot 0.4287%. Pada kecepatan 1000 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil pada 30.4335 detik dan memiliki nilai overshoot 0.2662%.



Gambar 4.1 Grafik respon PID pada kecepatan 200 RPM



Gambar 4.2 Grafik respon PID pada kecepatan 600 RPM



Gambar 4.3 Grafik respon PID pada kecepatan 1000 RPM

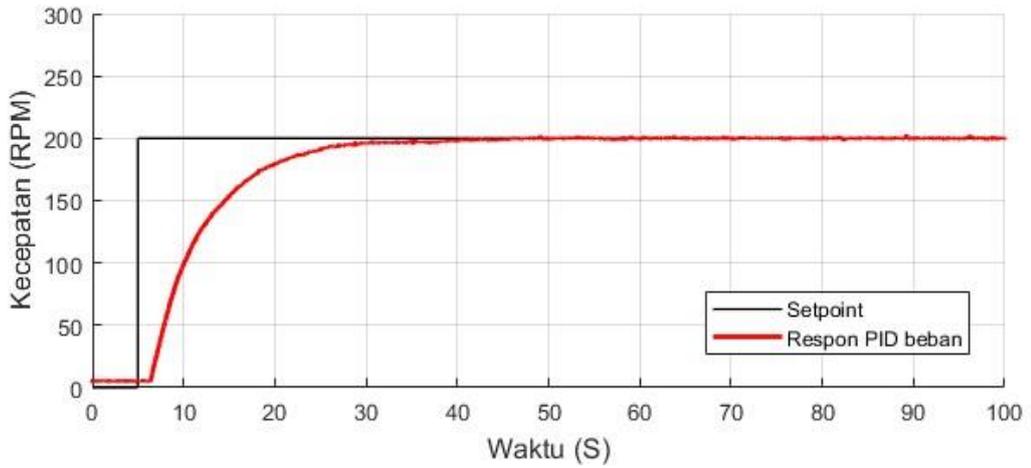
Pengujian pengendali PID dengan beban dilakukan dengan mengatur *set point* secara step dengan *step time* pada detik ke-5. Pengaturan kecepatan divariasikan pada kecepatan 200, 600, dan 1000 RPM tanpa pembebanan dan juga pembebanan. Waktu pengambilan data dilakukan selama 100 detik dengan *sampling time* sebesar 0.01 detik.

Gambar 4.4 hingga 4.6 merupakan respon kecepatan motor induksi dengan beban ketika diberi variasi *set point*.

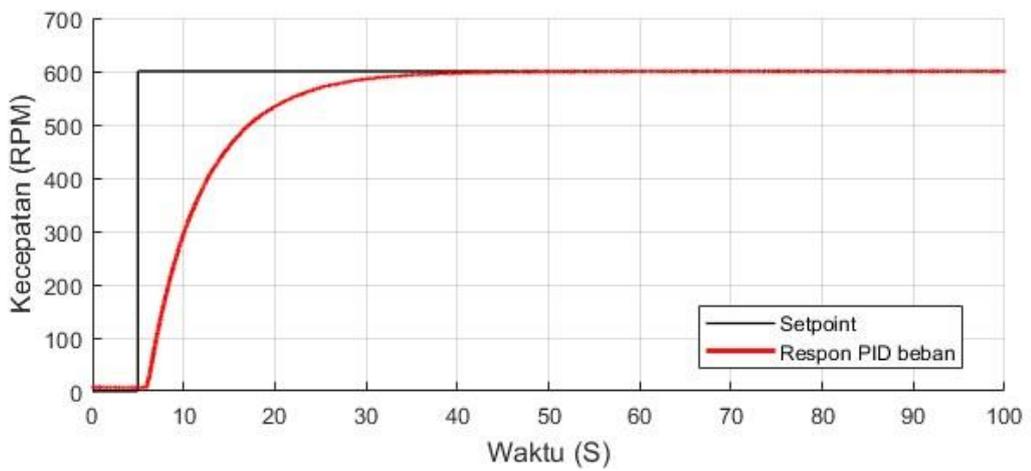
Tabel 4.6 Hasil Performansi pengendali PID dengan beban

Parameter Performansi	Hasil Performansi Variasi Kecepatan		
	200 RPM	600 RPM	1000 RPM
<i>Rise time</i> (s)	13.2323	13.9961	13.4345
<i>Settling time</i> (s)	37.7440	31.5133	31.6918
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	1.6471	0.3611	0.2662
<i>Steady-state error</i> (%)	0.7635	0.6739	0.9900

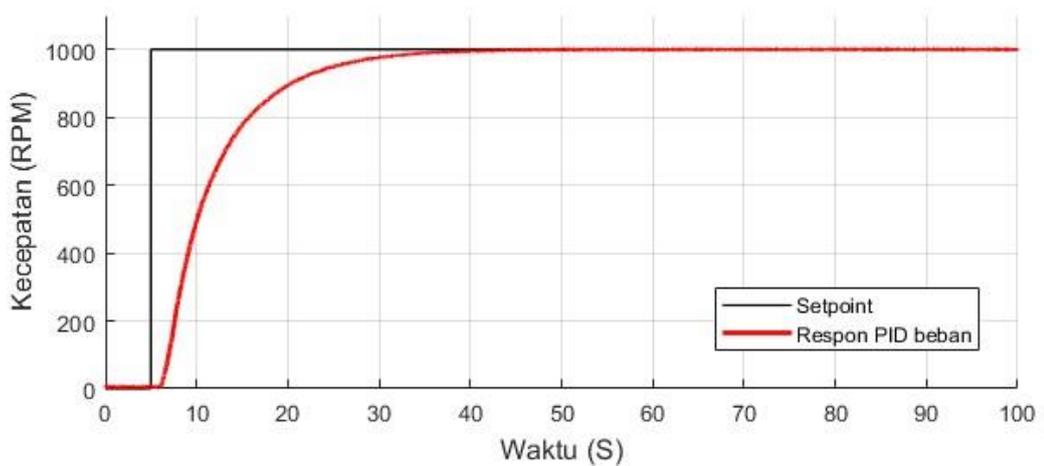
Berdasarkan hasil performansi pada Tabel 4.6, pada kecepatan 200 RPM dengan beban, motor dapat mencapai keadaan stabil meningkat yaitu dengan waktu 37.7440 detik dan memiliki nilai overshoot 1.6471%. Pada kecepatan 600 RPM dengan beban, motor dapat mencapai keadaan stabil meningkat tidak jauh dari keadaan tanpa beban pada waktu 31.5133 detik dan memiliki nilai overshoot 0.3611%. Pada kecepatan 1000 RPM dengan beban, motor dapat mencapai keadaan stabil meningkat dengan waktu 31.6918 detik dan memiliki nilai overshoot 0.2662%. Nilai *steady-state error* terkecil pada kecepatan 600 RPM dengan 0.6739% dan nilai *steady-state error* terbesar pada kecepatan 1000 RPM dengan 0.9900%.



Gambar 4. 4 Grafik respon PID dengan beban pada kecepatan 200 RPM



Gambar 4. 5 Grafk respon PID dengan beban pada kecepatan 600 RPM



Gambar 4. 6 Grafik respon PID dengan beban pada kecepatan 1000 RPM

4.3 Respon Pengendali Adaptif PID

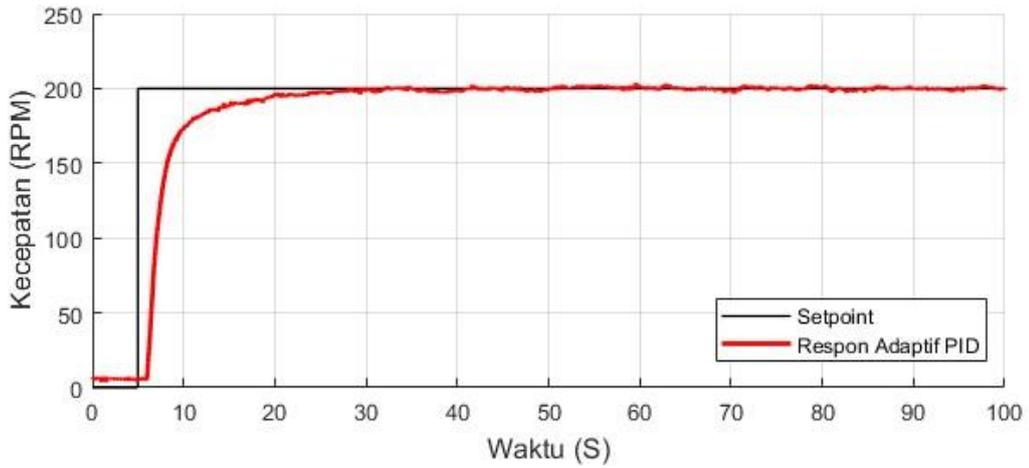
Pengujian pengendali Adaptif PID juga dilakukan dengan mengatur *set point* secara *step* dengan *step time* pada detik ke-5. Pengaturan kecepatan divariasikan pada kecepatan 200, 600, dan 1000 RPM tanpa pembebanan dan dengan pembebanan. Waktu pengambilan data dilakukan selama 100 detik dengan *sampling time* sebesar 0.01 detik.

Gambar 4.7 hingga 4.9 merupakan respon kecepatan dengan pengendali Adaptif PID tanpa beban ketika diberikan variasi *set point*. Garis warna merah menunjukkan respon dari sistem dan garis warna hitam menunjukkan *set point*. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kontroler Adaptif PID dengan kontroler *selftuning* dapat memberikan respon yang baik dan mencapai keadaan stabil. Adapun parameter performansi yang didapat dari grafik respon adalah sebagai berikut

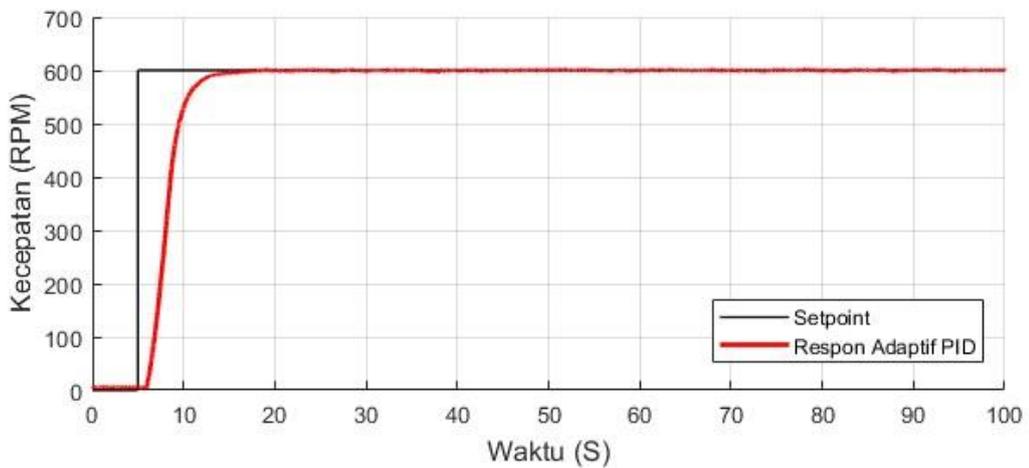
Tabel 4. 7 Hasil performansi pengendali Adaptif PID

Parameter Performansi	Hasil Performansi Variasi Kecepatan		
	200 RPM	600 RPM	1000 RPM
<i>Rise time</i> (s)	4.9206	3.7017	4.2228
<i>Settling time</i> (s)	29.3403	12.7315	24.4738
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	1.8500	0.6316	6.7991
<i>Steady-state error</i> (%)	0.3577	0.2681	0.1785

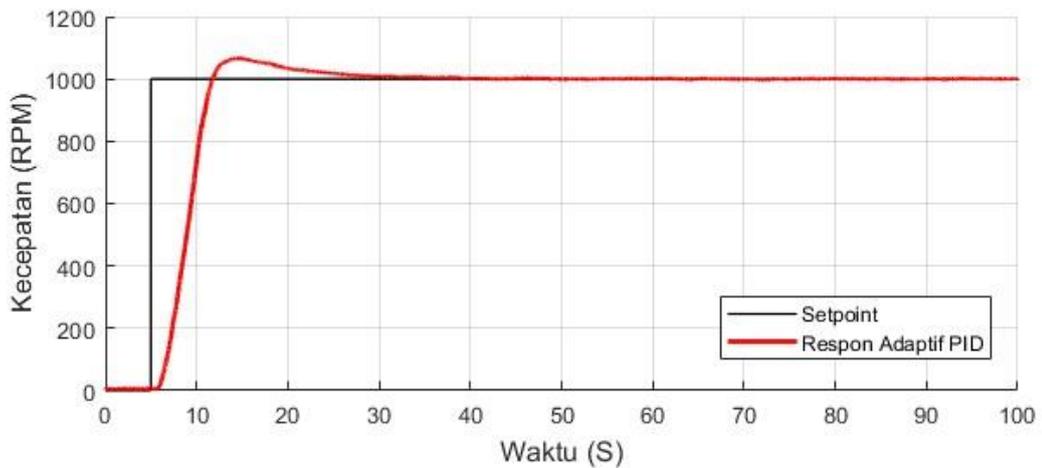
Berdasarkan hasil performansi pada tabel 4.7 dan gambar, pada kecepatan 200 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu 29.3403 detik dan memiliki nilai overshoot 1.8500%. Pada kecepatan 600 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu 12.7315 detik dan memiliki nilai overshoot 0.6316%. Pada kecepatan 1000 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu 24.4738 detik dan memiliki nilai overshoot 24.4738. Nilai *steady-state error* terkecil pada kecepatan 1000 RPM dengan 0.1377% dan nilai *steady-state error* terbesar pada kecepatan 200 RPM dengan 0.7635%.



Gambar 4.7 Grafik respon Adaptif PID pada kecepatan 200 RPM



Gambar 4.8 Grafik respon Adaptif PID pada kecepatan 600 RPM



Gambar 4.9 Grafik respon Adaptif PID pada kecepatan 1000 RPM

Pengujian pengendali Adaptif PID dengan beban dilakukan dengan mengatur *set point* secara step dengan *step time* pada detik ke-5. Pengaturan kecepatan divariasikan pada

kecepatan 200, 600, dan 1000 RPM tanpa pembebanan dan juga pembebanan. Waktu pengambilan data dilakukan selama 100 detik dengan *sampling time* sebesar 0.01 detik.

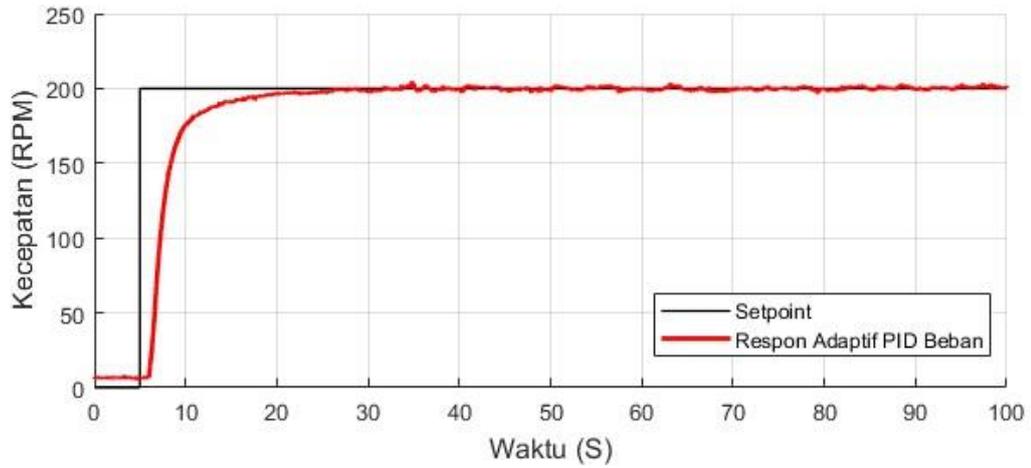
Gambar 4.10 hingga 4.13 merupakan respon kecepatan dengan pengendali Adaptif PID tanpa beban ketika diberikan variasi *set point*. Garis warna merah menunjukkan respon dari sistem dan garis warna hitam menunjukkan *set point*. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kontroler Adaptif PID dengan kontroler *selftuning* dapat memberikan respon yang baik dan mencapai keadaan stabil. Adapun parameter performansi yang didapat dari grafik respon adalah sebagai berikut

Tabel 4.8 Hasil Performansi pengendali Adaptif PID dengan beban

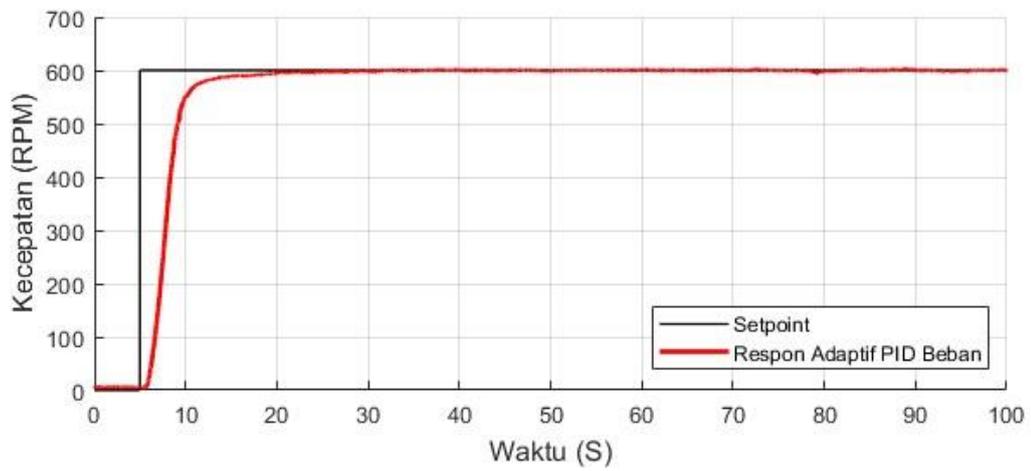
Parameter Performansi	Hasil Performansi Variasi Kecepatan		
	200 RPM	600 RPM	1000 RPM
<i>Rise time</i> (s)	4.5066	3.3602	4.3507
<i>Settling time</i> (s)	34.8136	15.0703	26.3027
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	2.4587	0.6316	7.5701
<i>Steady-state error</i> (%)	0.4538	0.2681	0.2273

Berdasarkan hasil performansi pada tabel 4.8 dan gambar, pada kecepatan 200 RPM dengan beban, motor dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu 44.0601 detik dan memiliki nilai overshoot 27.8193%. Pada kecepatan 600 RPM dengan beban, motor dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu 41.913 detik dan memiliki nilai overshoot 19.4999%. Pada kecepatan 1000 RPM motor dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu 38.2919 detik dan memiliki nilai overshoot 22.0966. Nilai *steady-state error* terkecil pada kecepatan 200 RPM dengan 0.0481% dan nilai *steady-state error* terbesar pada kecepatan 1000 RPM dengan 0.1785%.

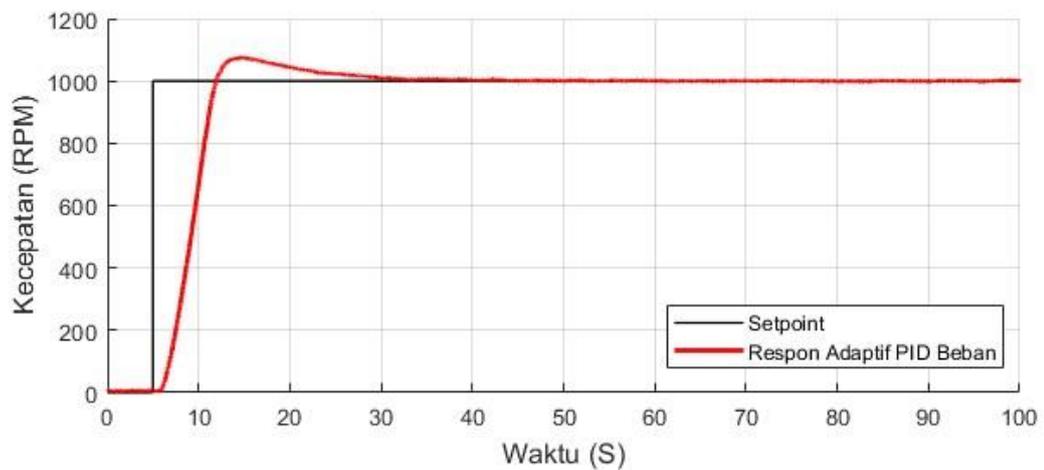
Berdasarkan tabel hasil performansi tanpa beban dan dengan beban, pengendali Adaptif PID memberikan hasil yang berbeda karena parameter *gain* PID yang terus berubah seiring waktu mengikuti input dan output *plant* motor induksi. Pembebanan memberikan respon yang lebih lama dilihat dari nilai *rise time*, *settling time*, dan *maximum overshoot* yang meningkat. Hal ini sesuai dengan penerapan beban akan memperlambat putaran motor induksi sehingga memberikan pengaruh kepada hubungan input dan output dan membuat respon menjadi lebih lama untuk mencapai keadaan stabil.



Gambar 4. 10 Grafik respon Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 200 RPM



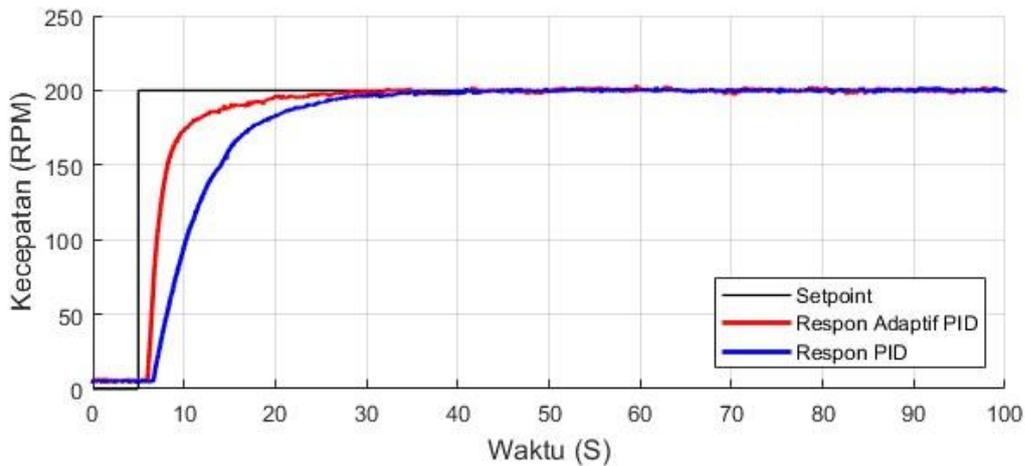
Gambar 4. 11 Grafik respon Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 600 RPM



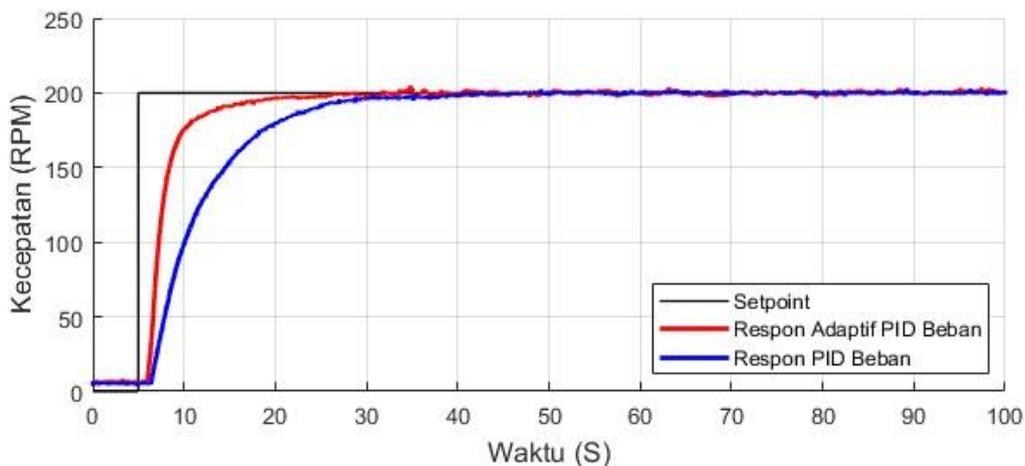
Gambar 4. 12 Grafik respon Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 1000 RPM

4.4 Perbandingan Hasil Respon Pengendali PID dan Pengendali Adaptif PID

Perbandingan dilakukan untuk melihat respon pengendali Adaptif PID memiliki performansi yang lebih baik daripada pengendali PID. Perbandingan dilakukan pada tiap variasi kecepatan tanpa beban dan dengan beban. Sinyal input berupa sinyal *step* dengan *step time* pada detik ke-5. Pada kecepatan 200 RPM, hasil perbandingan yang diperoleh seperti gambar berikut



Gambar 4.13 Respon PID dan Adaptif PID tanpa Beban pada kecepatan 200 RPM



Gambar 4.14 Respon PID dan Adaptif PID dengan beban pada kecepatan 200 RPM

Dari gambar 4.13 dan 4.14 dapat dilihat pada kecepatan 200 RPM bahwa hasil perbandingan respon bahwa Adaptif PID memberikan performansi yang lebih baik. Nilai *rise time* dan *settling time* dapat diraih dengan waktu yang lebih cepat.

Seperti yang tertera pada Tabel 4.5 hingga Tabel 4.8 nilai *settling time* pada pengendali PID senilai 35.3602 detik pada keadaan tanpa beban dan 37.7440 detik pada keadaan dengan beban sedangkan pada pengendali Adaptif PID memiliki nilai 29.3403 detik pada keadaan tanpa beban dan 34.8136 detik pada keadaan dengan beban. Nilai *rise time* pada pengendali

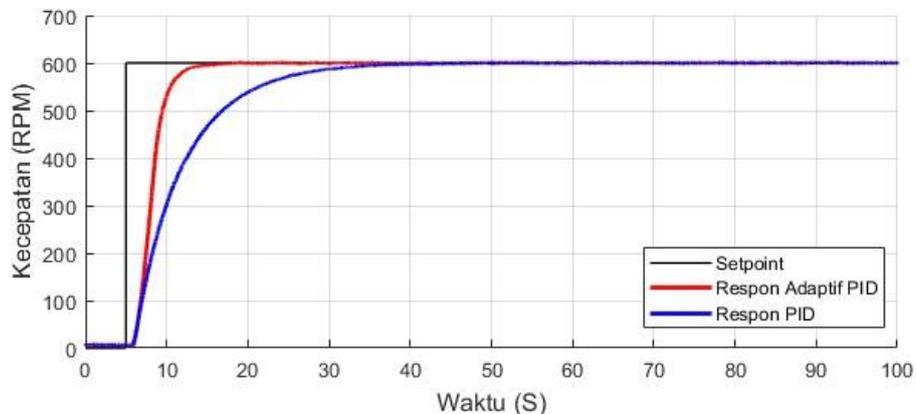
PID senilai 11.6743 detik pada keadaan tanpa beban dan 13.2323 detik pada keadaan dengan beban, sedangkan pada pengendali Adaptif PID memiliki nilai 4.9206 detik pada keadaan tanpa beban dan 4.5066 detik pada keadaan dengan beban.

Nilai *settling time* menandakan sistem lebih lama mencapai keadaan stabil diakibatkan adanya beban yang diberikan pada sistem. Pengendali Adaptif PID dapat memberikan respon yang lebih baik ditandai dengan nilai parameter performansi yang lebih kecil dibanding dengan pengendali PID pada kecepatan 200 RPM.

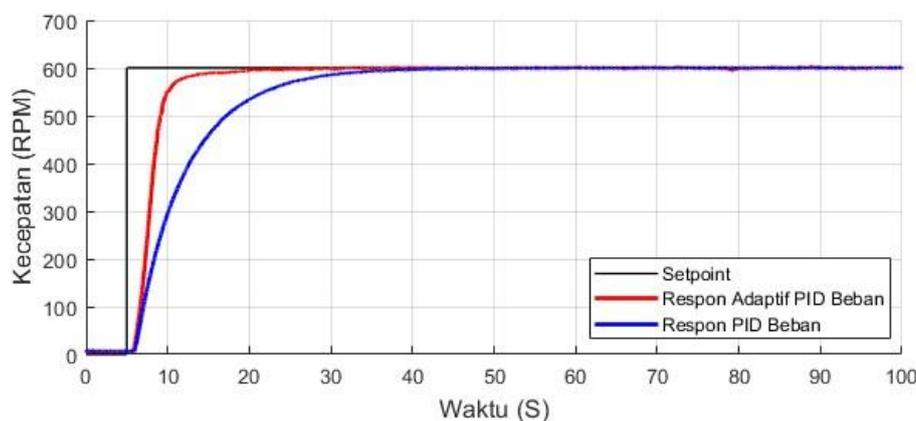
Tabel 4. 9 Perbandingan Performansi PID dan Adaptif PID kecepatan 200 RPM

Parameter Performansi	Tanpa Beban		Dengan Beban	
	PID	Adaptif PID	PID	AdaptifPID
<i>Rise time</i> (s)	11.6743	4.9206	13.2323	4.5066
<i>Settling time</i> (s)	35.3602	29.3403	37.7440	34.8136
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	1.2414	1.8500	1.6471	2.4587
<i>Steady-state error</i> (%)	0.7635	0.3577	0.7635	0.4538

Pada kecepatan 600 RPM, hasil perbandingan yang diperoleh seperti gambar berikut



Gambar 4. 15 Respon PID dan Adaptif PID tanpa Beban pada kecepatan 600 RPM



Gambar 4. 16 Respon PID dan Adaptif PID dengan Beban pada kecepatan 600 RPM

Dari gambar 4.15 dan 4.16 dapat dilihat pada kecepatan 600 RPM bahwa hasil perbandingan respon bahwa Adaptif PID juga memberikan performansi yang lebih baik. Nilai *rise time* dan *settling time* dapat diraih dengan waktu yang lebih cepat.

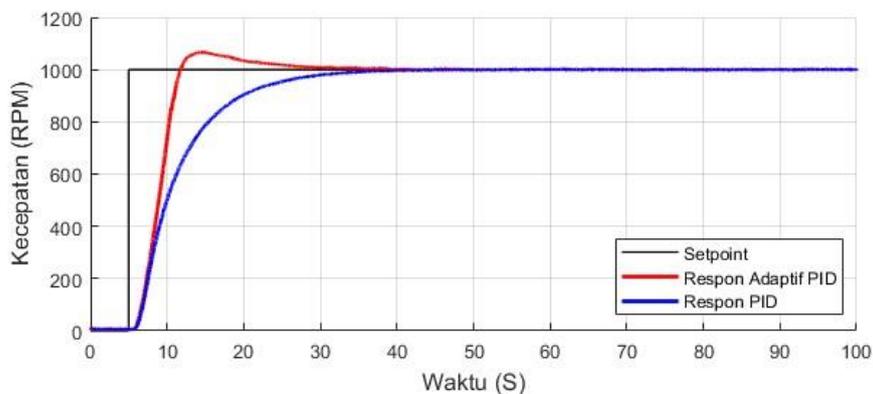
Seperti yang tertera juga pada Tabel 4.5 hingga Tabel 4.8 nilai *settling time* pada pengendali PID senilai 31.2016 detik pada keadaan tanpa beban dan 31.2016 detik pada keadaan dengan beban. Sedangkan pada pengendali Adaptif PID memiliki nilai 12.7315 detik pada keadaan tanpa beban dan 15.0703 detik pada keadaan dengan beban. Nilai *rise time* pada pengendali PID senilai 13.6118 detik pada keadaan tanpa beban dan 13.9961 detik pada keadaan dengan beban, sedangkan pada pengendali Adaptif PID memiliki nilai 3.7017 detik pada keadaan tanpa beban dan 3.3602 detik pada keadaan dengan beban.

Nilai *settling time* juga mengalami peningkatan akibat adanya beban yang diberikan pada sistem. Pengendali Adaptif PID dapat memberikan respon yang lebih baik ditandai dengan nilai parameter performansi yang lebih kecil dibanding dengan pengendali PID pada kecepatan 600 RPM.

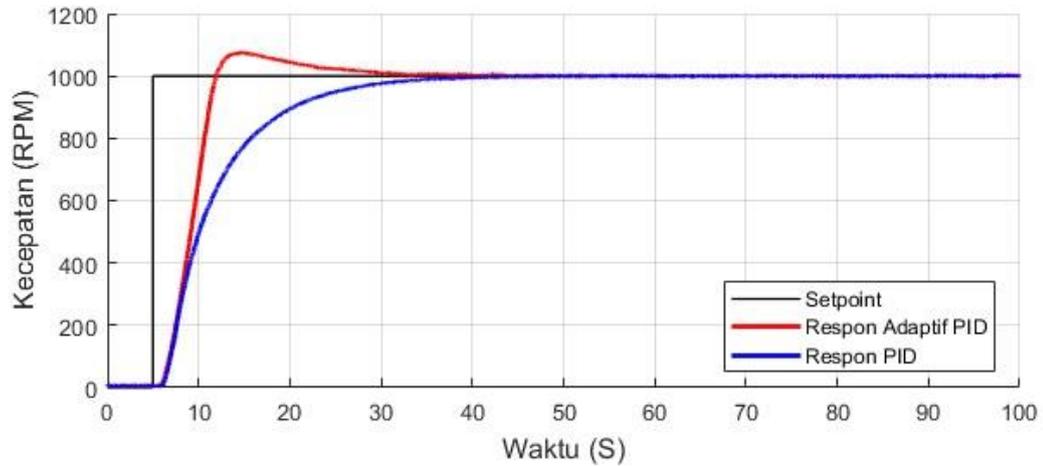
Tabel 4. 10 Perbandingan Performansi PID dan Adaptif PID kecepatan 600 RPM

Parameter Performansi	Tanpa Beban		Dengan Beban	
	PID	Adaptif PID	PID	AdaptifPID
<i>Rise time</i> (s)	13.6118	3.7017	13.9961	3.3602
<i>Settling time</i> (s)	31.2016	12.7315	31.5133	15.0703
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	0.4287	0.6316	0.3611	0.6316
<i>Steady-state error</i> (%)	0.5435	0.2681	0.6739	0.2681

Pada kecepatan 1000 RPM, hasil perbandingan yang diperoleh seperti gambar berikut



Gambar 4. 17 Respon PID dan Adaptif PID tanpa Beban pada kecepatan 1000 RPM



Gambar 4. 18 Respon PID dan Adaptif PID dengan Beban pada kecepatan 1000 RPM

Dari Gambar 4.17 dan 4.18 dapat dilihat pada kecepatan 1000 RPM bahwa hasil perbandingan respon bahwa Adaptif PID juga memberikan performansi yang lebih baik. Nilai *rise time* dan *settling time* dapat diraih dengan waktu yang lebih cepat.

Seperti yang tertera juga pada Tabel 4.5 hingga Tabel 4.8 nilai *settling time* pada pengendali PID senilai 30.4335 detik pada keadaan tanpa beban dan 31.6918 detik pada keadaan dengan beban. Sedangkan pada pengendali Adaptif PID memiliki nilai 24.4738 detik pada keadaan tanpa beban dan 26.3027 detik pada keadaan dengan beban. Nilai *rise time* pada pengendali PID senilai 12.8505 detik pada keadaan tanpa beban dan 13.4345 detik pada keadaan dengan beban, sedangkan pada pengendali Adaptif PID memiliki nilai 4.2228 detik pada keadaan tanpa beban dan 4.3507 detik pada keadaan dengan beban.

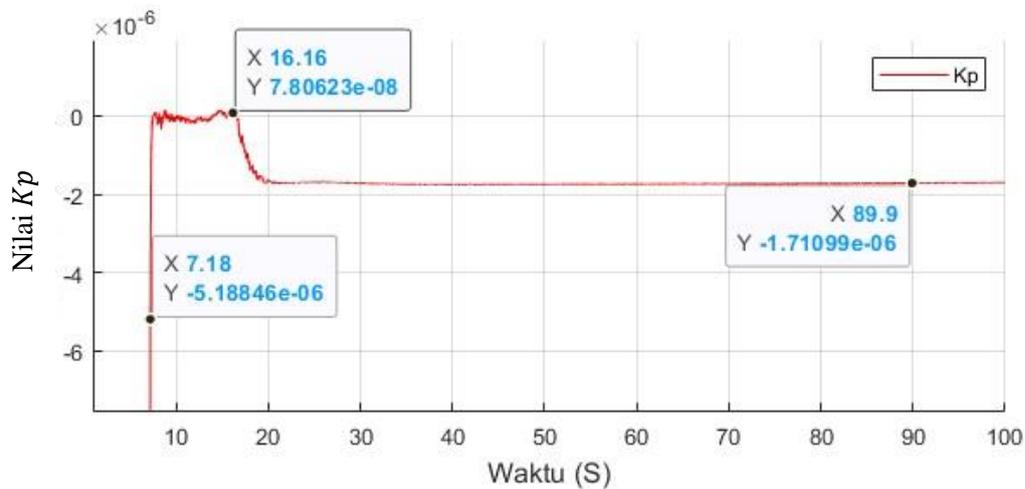
Nilai *settling time* juga mengalami peningkatan akibat adanya beban yang diberikan pada sistem. Pengendali Adaptif PID dapat memberikan respon yang lebih baik ditandai dengan nilai parameter performansi yang lebih kecil dibanding dengan pengendali PID pada kecepatan 1000 RPM.

Tabel 4. 11 Perbandingan Performansi PID dan Adaptif PID kecepatan 1000 RPM

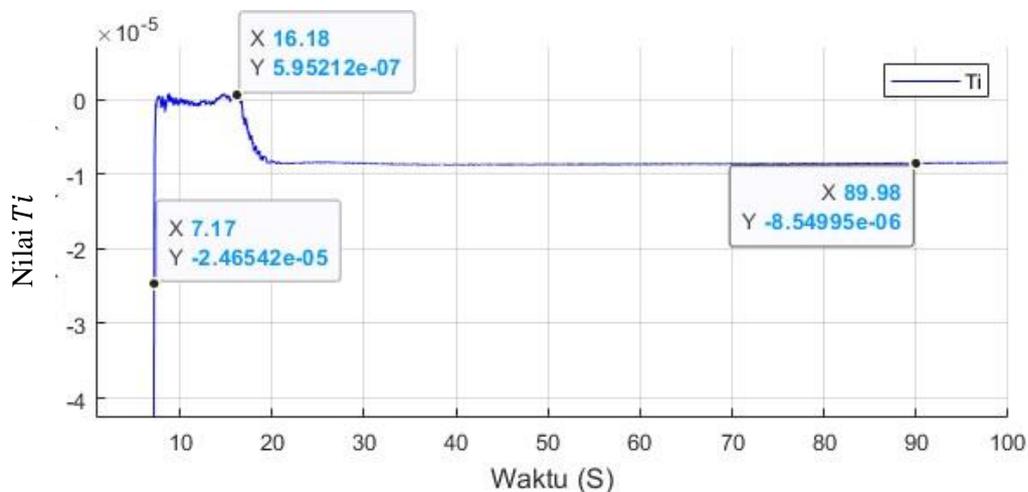
Parameter Performansi	Tanpa Beban		Dengan Beban	
	PID	Adaptif PID	PID	AdaptifPID
<i>Rise time</i> (s)	12.8595	4.2228	13.4345	4.3507
<i>Settling time</i> (s)	30.4335	24.4738	31.6918	26.3027
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	0.2662	6.7991	0.2662	7.5701
<i>Steady-state error</i> (%)	0.5842	0.1785	0.9900	0.2273

Dalam pengujian Adaptif PID juga diambil contoh grafik perubahan parameter kontrol *gain proportional* (K_p), *time integral* (T_i), dan *time derivative* (T_d) pada kecepatan 1000 RPM seperti pada Gambar 4.18 hingga 4.19. Nilai K_p mengalami kenaikan pada awal sistem berjalan dengan nilai $7.80623e-08$ dan mengalami sedikit penurunan ketika sistem mencapai keadaan stabil dengan nilai $-1.7099e-06$. Nilai T_i juga mengalami kenaikan pada awal sistem berjalan dengan nilai $5.95212e-07$ dan mengalami sedikit penurunan ketika sistem mencapai keadaan stabil dengan nilai $-8.54995e-06$. Sedangkan nilai T_d mengalami sedikit lonjakan pada awal sistem dari nilai -2.36169 hingga 0.635251 dan kemudian juga mengalami penurunan ketika sistem mencapai keadaan stabil.

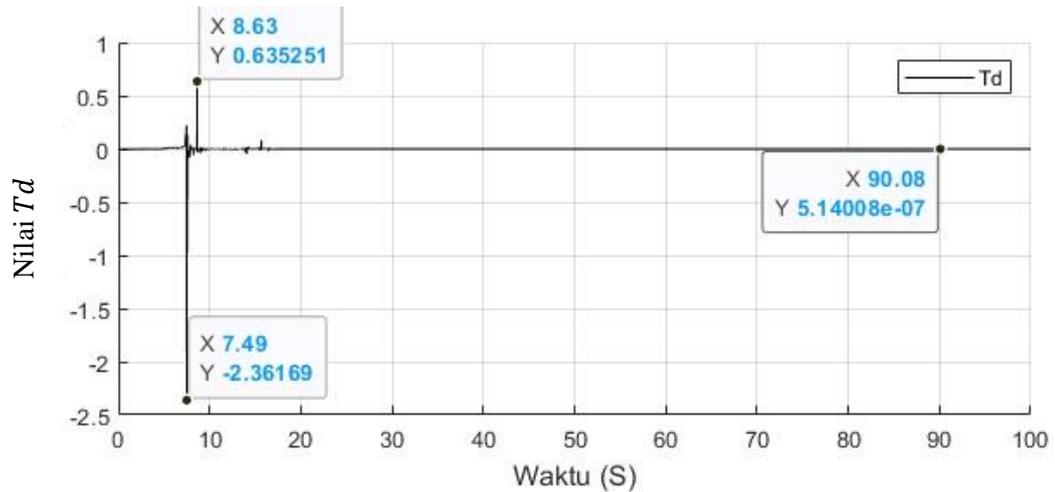
Dapat dilihat bahwa semua parameter PID tersebut memiliki nilai yang sangat kecil hingga mendekati 0 ketika keadaan stabil. Hal ini disebabkan nilai *error* yang masuk ke kontroler sudah mendekati 0 juga.



Gambar 4. 19 Contoh grafik perubahan K_p pada kecepatan 1000 RPM



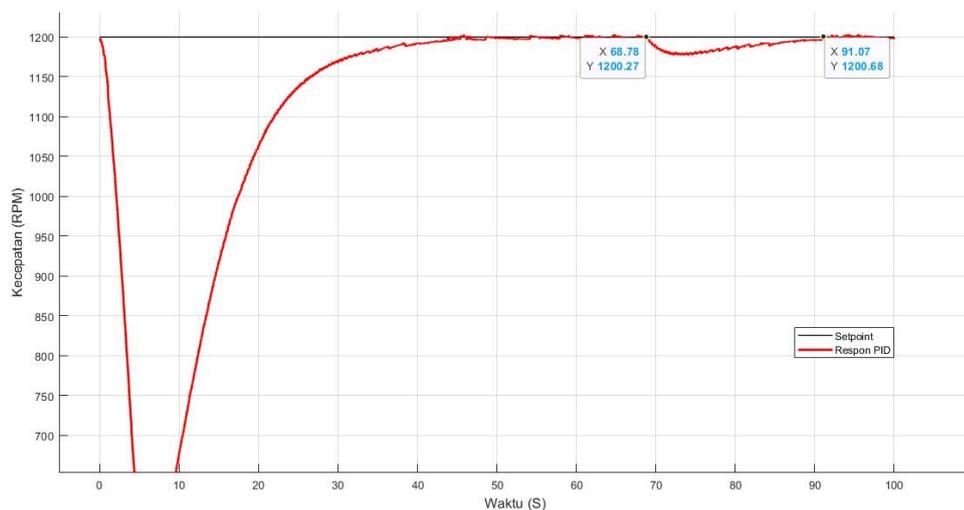
Gambar 4. 20 Contoh grafik perubahan T_i pada kecepatan 1000 RPM



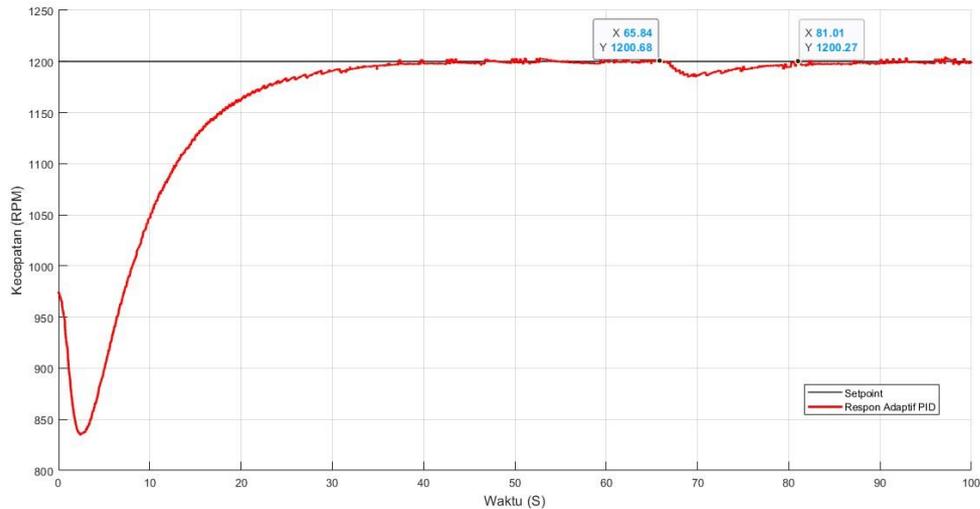
Gambar 4. 21 Contoh grafik perubahan Td pada kecepatan 1000 RPM

4.5 Pengujian Respon Penambahan Beban ketika Keadaan Stabil

Pengujian penambahan beban ketika keadaan stabil diperlukan untuk melihat respon perubahan kecepatan dan mengembalikannya menjadi keadaan stabil lagi. Pengambilan data dilakukan dengan mengatur *set point* pada 1200 RPM agar mendapat respon beban yang lebih besar dan menambahkan beban pada detik ke 60-70. Adapun respon yang diberikan oleh pengendali PID dan Adaptif PID adalah sebagai berikut



Gambar 4. 22 Pengujian beban dalam keadaan stabil pada pengendali PID

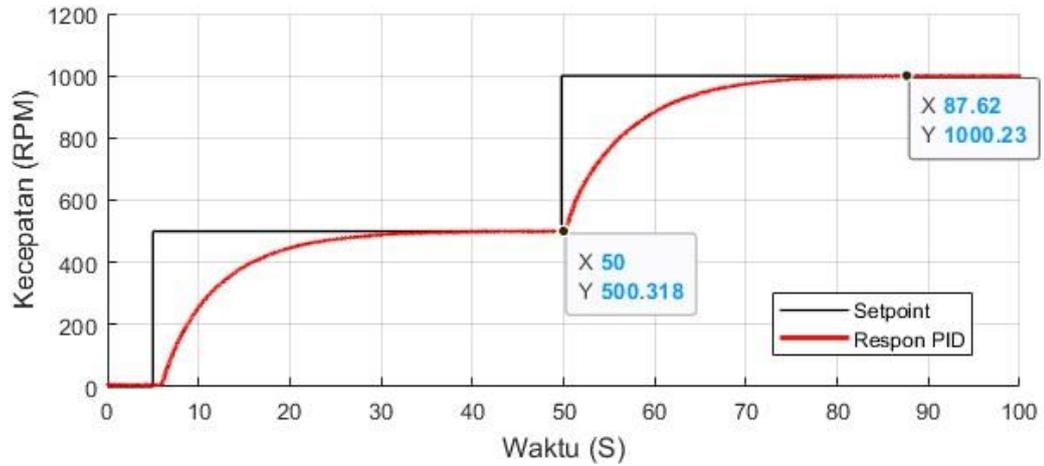


Gambar 4.23 Pengujian beban dalam keadaan stabil pada pengendali PID

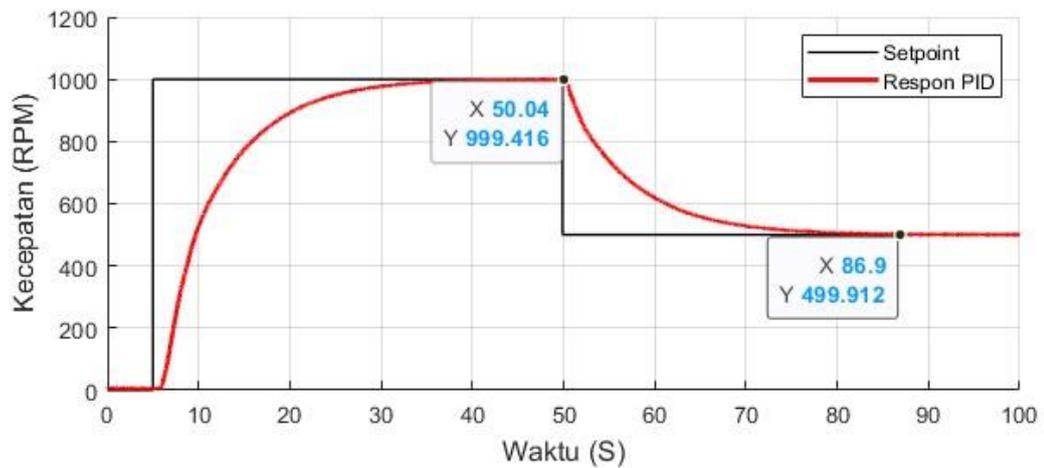
Dapat dilihat pada gambar bahwa beban memberikan efek perubahan kecepatan ketika dinyalakan pada keadaan stabil. Beban yang diberikan pada kecepatan 1200 RPM adalah 476.1 *watt*. Beban tersebut terhitung kecil jika dibandingkan dengan motor induksi yang digunakan yaitu 1500 *watt* oleh karena itu menghasilkan respon yang kecil. Penurunan kecepatan dapat dikendalikan oleh kedua pengendali yang digunakan. Pada pengendali PID kecepatan mulai menurun pada detik 68.78 dan kembali stabil pada detik 91.07 sedangkan pada pengendali Adaptif PID kecepatan mulai menurun pada detik 65.84 dan kembali stabil pada detik 81.01. Pengendali PID memerlukan waktu 22.29 detik untuk mengembalikan kecepatan stabil. Adaptif PID memerlukan waktu lebih cepat dengan 15.17 detik. Hasil tersebut membuktikan bahwa Adaptif PID mampu mengendalikan perubahan lebih baik daripada pengendali PID.

4.6 Pengujian *Set point Tracking*

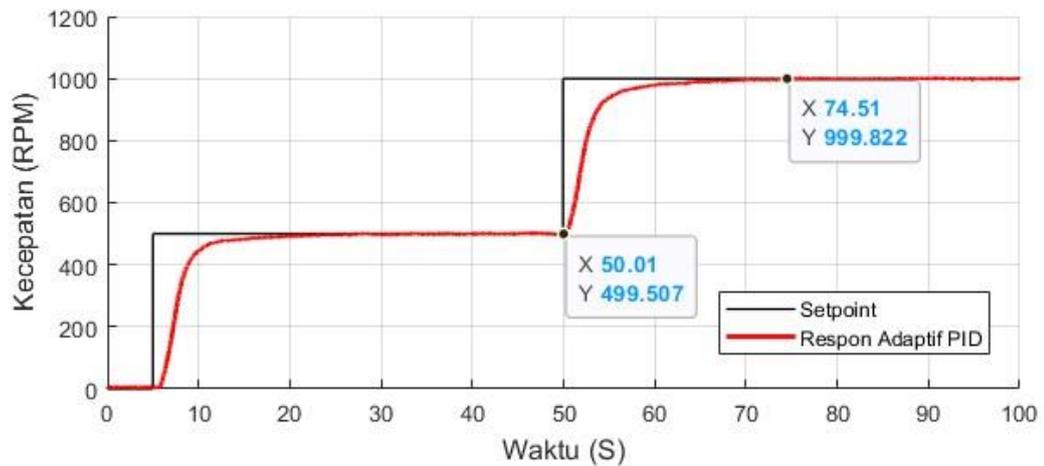
Pengujian lainnya yang dilakukan untuk mengetahui bagaimana respon pengendali PID dan Adaptif PID terhadap perubahan *set point* ketika sedang berjalan. Pengaturan *set point* yaitu 500 RPM untuk 50 detik pertama kemudian dinaikkan menjadi 1000 RPM untuk 50 detik selanjutnya. Hasil respon untuk pengujian *set point tracking* pada pengendali PID dan Adaptif PID tanpa beban adalah sebagai berikut.



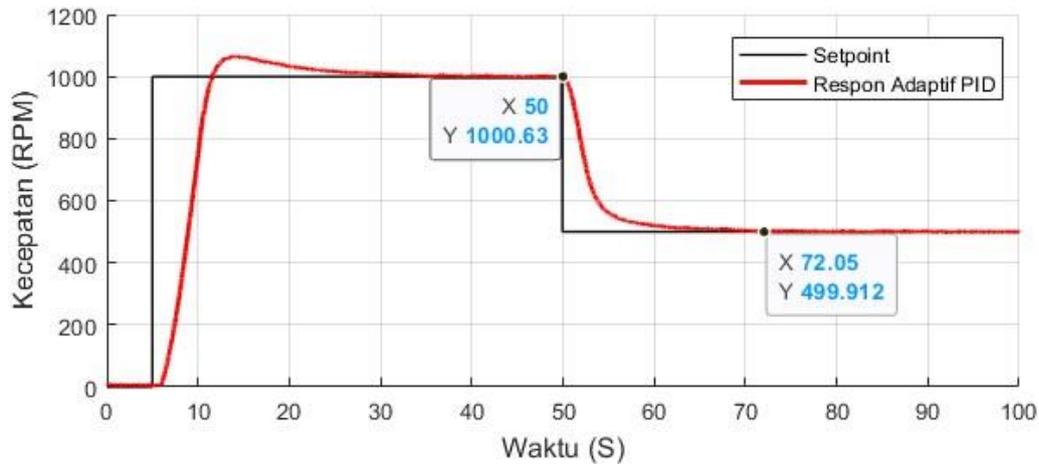
Gambar 4. 24 Grafik respon kenaikan *set point* pada pengendali PID



Gambar 4. 25 Grafik respon penurunan *set point* pada PID



Gambar 4. 26 Grafik respon kenaikan *set point* pada Adaptif PID



Gambar 4. 27 Grafik respon penurunan *set point* pada Adaptif PID

Pada Gambar 4.21, setelah dilakukan kenaikan *set point* pada detik ke-50 pengendali PID mampu mencapai keadaan stabil pada waktu 87.62 detik yang artinya membutuhkan waktu 27.62 detik untuk mencapai keadaan stabil. Pada Gambar 4.22, setelah dilakukan penurunan *set point* pada detik ke-50 pengendali PID mampu mencapai keadaan stabil pada waktu 86.90 detik yang artinya membutuhkan waktu 26.90 detik untuk mencapai keadaan stabil. Pada Gambar 4.22, setelah dilakukan kenaikan *set point* pada detik ke-50 pengendali Adaptif PID mampu mencapai keadaan stabil pada waktu 74.51 detik yang artinya membutuhkan waktu 14.51 detik untuk mencapai keadaan stabil. Pada Gambar 4.23, setelah dilakukan perubahan *set point* pada detik ke-50 pengendali Adaptif PID mampu mencapai keadaan stabil setelah dilakukan perubahan *set point* pada waktu 72.05 detik yang artinya membutuhkan waktu 12.05 detik untuk mencapai keadaan stabil.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.:

- Inverter Toshiba VF-nC3 dapat digunakan dalam pengendalian kecepatan secara *open loop* dan *close loop* menggunakan sinyal input eksternal dengan input berupa sinyal elektronik analog yang mengatur variabel frekuensi. Inverter tersebut digunakan sebagai sumber tegangan 3-fasa dan sudah memiliki pengendali rasio antara tegangan dan frekuensi (V/f kontrol). Kendali yang dapat diatur hanya variabel frekuensi. Oleh karena itu untuk metode pengendalian yang menggunakan parameter selain frekuensi perlu dilakukan modifikasi pada *loop* kontrol agar dapat menggunakan inverter TOSHIBA VF-nC3
- Rancangan Adaptif PID diawali dengan menentukan permodelan sistem plant orde 2 secara diskrit untuk mengetahui parameter apa saja yang akan diestimasi. Estimator yang digunakan yaitu *Recursive Least Square* (RLS) untuk menghitung nilai kuadrat *error* dari selisih input dan output. Kemudian melakukan perancangan kontroler PID diskrit dan menentukan hubungan variabel kontrol dan variabel estimasi sesuai performa yang diinginkan. Hasil keluaran kontroler menunjukkan nilai mendekati 0 ketika keadaan stabil sesuai dengan nilai error yang diterima kontroler.
- Performansi pengendali Adaptif PID sudah sangat baik jika dibandingkan dengan kendali PID konvensional. Parameter performansi menghasilkan nilai yang lebih baik seperti nilai *rise time* pada kecepatan 200, 600, dan 1000 RPM yaitu 4.9206, 3,7017, dan 4.228 detik pada keadaan tanpa beban. Dan juga pada keadaan dengan beban, Adaptif PID tetap mampu menghasilkan respon yang lebih baik dengan nilai *rise time* pada kecepatan 200, 600, dan 1000 RPM yaitu 4.5066, 3.3602, dan 4.3507 detik. Nilai tersebut jauh lebih kecil dari pengendali PID yang memiliki nilai lebih dari 10 detik. Nilai *settling time* juga Adaptif PID mendapatkan performansi yang lebih baik yaitu dengan nilai lebih rendah dari pengendali PID. *Settling time* lebih rendah menandakan bahwa sistem lebih cepat mencapai keadaan stabil.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat saran yang dapat diberikan untuk mengatasi masalah yang dialami sebagai berikut:

- Pemilihan generator DC harus sesuai dengan kecepatan putar yang akan diuji dan memiliki daya yang sama dengan motor induksi agar beban yang mempengaruhi putaran motor lebih dapat dilihat pengurangannya.
- Penggunaan sensor kecepatan dapat dipertimbangkan memilih yang lebih bagus agar pengujian dalam kecepatan tinggi dapat dilakukan dan untuk mengurangi noise.

DAFTAR PUSTAKA

- Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559–576. <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.847331>
- Åström, K. J. (Karl J., Hägglund, Tore., & Åström, K. J. (Karl J. (1995). *PID controllers*. International Society for Measurement and Control.
- Astrom, K. J., & Wittenmark, B. (2013). *Adaptive control: Second Edition*. Dover Publications.
- Bose, B. K. (2002). *Modern power electronics and AC drives*.
- Chan, T. F., & Shi, K. (n.d.). *Applied intelligent control of induction motor drives*. John Wiley & Sons (Asia) Ptc Ltd.
- Chau K. T. (2015). *ELECTRIC VEHICLE MACHINES AND DRIVES*.
- Hughes, Austin., & Drury, Bill. (2013). *Electric motors and drives : fundamentals, types and applications*. Elsevier.
- Loannou Petros, & Fidan Baris. (2006). *Adaptive Control Tutorial*.
- Mudia, H., Rusdhiyanto Effendie, I. A., & dan Eka Iskandar, M. (n.d.). *Prosiding SENTIA 2015-Politeknik Negeri Malang PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KONTROLER PID ADAPTIF PADA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA*.
- Ogata, Katsuhiko. (2010). *Modern control engineering*. Prentice-Hall.
- Olarinoye, G. A., Akinropo, C., Atuman, G. J., & Abdullahi, Z. M. (n.d.). *Speed Control of a Three Phase Induction Motor using a PI Controller*.
- Perveen, R., Sinha, S. K., & Pandey, A. S. (2020). Speed Control of PWM Inverter fed Induction Motor: An ANN and Vector Control Based Approach. *International Journal of Advance Science and Technology*, 29(10S), 2138–2146.
- Sukabumi, P., Rizkiana Mulyawan, N., Yahya, S., Rafi Al Tahtawi, A., Teknik Otomasi Industri, P., Teknik Elektro, J., Negeri Bandung Jalan Gegerkalong Hilir, P., & Bandung Barat, K. (2020). *Prosiding SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan) Pemodelan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Proportional Integral Anti Wind Up (Pi-Aw)*.
- Trzynadlowski, A. M. (2001). *CONTROL OF INDUCTION MOTORS*.

- Wach, P. (2011). Brushless DC Motor Drives (BLDC). In *Dynamics and Control of Electrical Drives* (pp. 281–380). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20222-3_4
- Yu, J., Zhang, T., & Qian, J. (2011). Modern control methods for the induction motor. In *Electrical Motor Products* (pp. 147–172). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857093813.147>

LAMPIRAN

A. Bagian Plant Motor Induksi



Gambar A.1 Inverter Toshiba VF-nC3



Gambar A.2 Motor Induksi Alliance A-Y3A



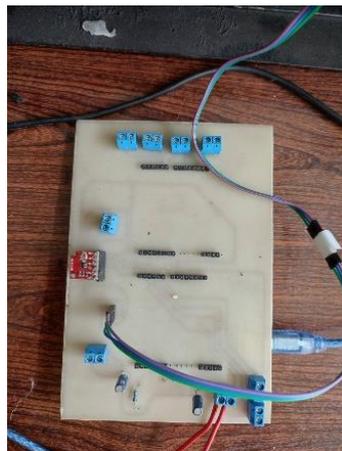
Gambar A.3 Generator DC JKEXER HN1010B



Gambar A.4 DAQ NI-6001



Gambar A.5 Resistor paralel 100 Ω



Gambar A.6 Pengubah tegangan kecepatan



Gambar A.8 Tachometer

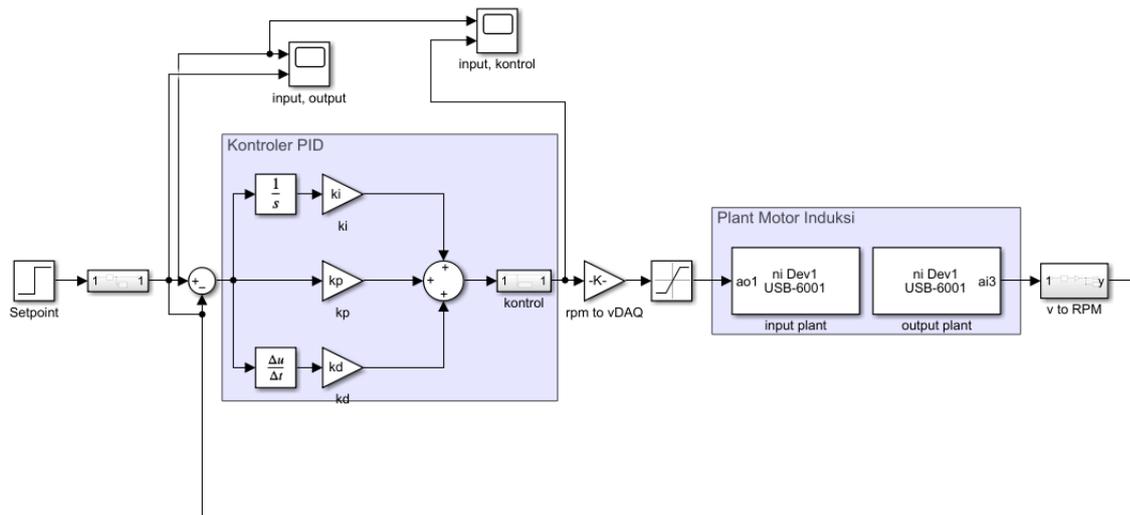


Gambar A.9 Clampmeter

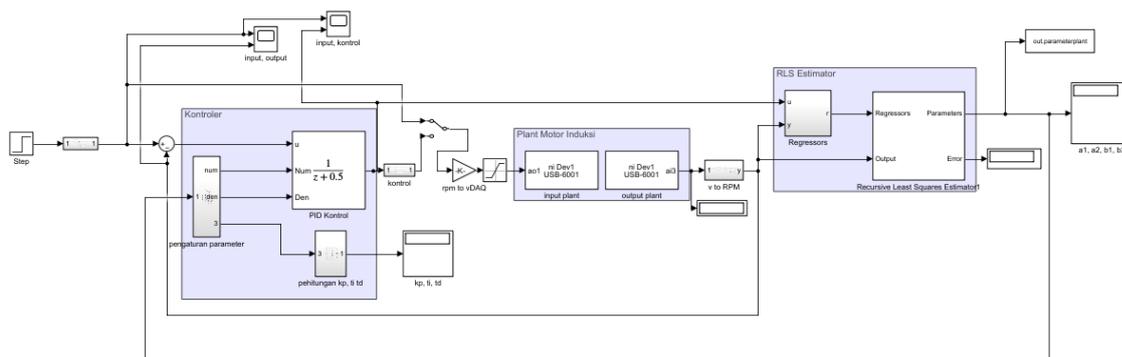


Gambar A.10 Set up keseluruhan plant

B. Blok Simulink



Gambar B.1 Diagram blok kontroler PI



Gambar B.2 Diagram blok Adaptif PID

C. Kode MATLAB

1. Parameter kontrol

$T_s = 0.01;$

$\tau = 5;$

$m_{cov} = 5;$

$k_p = 0.3626 ;$

$k_i = 0.1449;$

$k_d = 0.02268;$

$gain_{rpm} = 315.7895;$

$gain_{daq} = 1/150;$

2. Plot dan Perhitungan

```
time    = out.tout();
sp      = PI(:,1);
respon  = PI(:,2);
kontrol = PI(:,3);
respon2 = Adaptif(:,3);

figure(1)
hold on
grid on
plot(time,sp,'k','linewidth',0.5)
plot(time,respon,'r','linewidth',2)
plot(time, respon2,'g','linewidth', 2)
legend('Set point','Respon PI','Respon Adaptif PID')

ylim([-100, 1000]);

stepinfo(respon,time,sp(end))
stepinfo(respon2,time,sp(end))

steady_state_error=abs(respon(end)-sp(end));
disp('steady_state_error')
disp(steady_state_error)

steady_state_error_kontrol=abs(kontrol(end)-sp(end));
disp('steady_state_error_kontrol')
disp(steady_state_error_kontrol)
```

D. Kode Arduino

1. Pengambilan data RPM

```
int led_pin = 6;

const int dataIN = 2; //IR sensor INPUT
unsigned long prevmillis; // To store time
unsigned long duration; // To store time difference
unsigned long refresh; // To store time for refresh of reading

int rpm; // RPM value
boolean currentstate; // Current state of IR input scan
boolean prevstate; // State of IR sensor in previous scan

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(dataIN, INPUT);
  prevmillis = 0;
  prevstate = LOW;
  pinMode(led_pin, OUTPUT);
}

}
```

```

void loop(void) {

  float vinputdaq = rpm;
  float nilairpmtosimulink = vinputdaq * 0.17 ; //1494*1.1707=255
  analogWrite(led_pin, nilairpmtosimulink);

  // RPM Measurement
  currentstate = digitalRead(dataIN); // Read IR sensor state
  if ( prevstate != currentstate) // If there is change in input
  {
    if ( currentstate == HIGH ) // If input only changes from LOW to HIGH
    {
      duration = ( micros() - prevmillis ); // Time difference between
revolution in microsecond
      rpm = (60000000 / duration); // rpm = (1/ time
millis)*1000*1000*60;
      if (rpm > 2000 )
      {
        rpm = 0;
      }
      if (rpm < 0 )
      {
        rpm = 0;
      }
      prevmillis = micros(); // store time for next revolution
calculation
    }
  }
  prevstate = currentstate; // store this scan (prev scan) data for next
scan

  // LCD Display
  if ( ( millis() - refresh ) >= 100 )
  {
    Serial.println(rpm);
  }
}

```

BIODATA PENULIS



Khalish Maududy dengan nama panggilan, Khalis. Penulis lahir di Lhokseumawe, pada tanggal 17 Oktober 2000 sebagai anak dari pasangan Bapak Saifuddin dan Ibu Rahmayani. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh yaitu tingkat dasar di SDN Arun lulus pada tahun 2012, tingkat menengah pertama di MTs Swasta YAPENA lulus pada tahun 2015, tingkat menengah atas di SMA Negeri Modal Bangsa Arun lulus pada tahun 2018. Mengawali masa perkuliahan di tahun 2018 sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika Institusi Teknologi Sepuluh Nopember. Kritik dan saran sangat diterima atau ingin dikusi tentang topik tugas akhir ini dapat menghubungi melalui *email*: khalishmaududi@gmail.com