



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN SISTEM *PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL* UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN SISTEM MOTOR DC BERBEBAN**

HANIFA  
NRP. 0231164000057

Dosen Pembimbing:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020



**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**PERANCANGAN SISTEM *PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL* UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN SISTEM MOTOR DC BERBEBAN**

HANIFA  
NRP. 02311640000057

Dosen Pembimbing:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
NIP. 19760523 200012 2 001

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***DESIGN PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL  
(PFTC) FOR SPEED CONTROL OF LOAD DC  
MOTOR SYSTEM***

HANIFA  
NRP. 02311640000057

Supervisors:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
NIP. 19760523 200012 2 001

*Department Of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Muhammad Ghofur R  
NRP : 02311640000030  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Optimisasi Kondisi Operasi dan Kontrol pada *Drilling* untuk Mengatasi Perubahan Massa Jenis Batuan dengan Metode Kontrol PID**” 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, 10 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Ghofur R  
NRP. 02311640000030

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL  
UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN SISTEM MOTOR DC  
BERBEBAN**

Oleh:

Hanifa

NRP. 0231164000057

Surabaya, 27 Juli 2020

Menyetujui,

Pembimbing I



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

NIP. 19760523 200012 2 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTIRS-ITS



Dr. Suwanto, S.T., M.T.

NIP. 19171113 199512 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# LEMBAR PENGESAHAN

## PERANCANGAN SISTEM PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN SISTEM MOTOR DC BERBEBAN

### TUGAS AKHIR

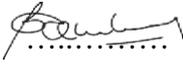
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**HANIFA**

**NRP. 02311640000057**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.  (Ketua Penguji)
3. Dr. Suyanto, S.T., M.T.  (Penguji I)
4. Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.  (Penguji II)
5. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC  (Penguji III)

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# PERANCANGAN SISTEM PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN SISTEM MOTOR DC BERBEBAN

Nama : Hanifa  
NRP : 02311640000057  
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

## ABSTRAK

Motor DC (*Direct Current*) atau motor arus searah merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dalam penerapannya, sistem motor DC diharapkan tidak pernah mengalami gangguan. Namun, gangguan bisa terjadi secara mendadak yang disebabkan oleh *disturbance* dan *noise*. Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan sistem *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) yang mampu bekerja ketika terdapat kesalahan pada aktuator dan sensor kecepatan pada pengendalian kecepatan sistem motor DC berbeban sehingga performansi sistem tetap terjaga. Langkah pertama yang dilakukan adalah merancang sistem kontrol *state feedback* yang mampu mengatasi gangguan torsi beban dan menghasilkan nilai *gain* controller sebesar 4.8915, 2.9864 dan 44.7214. Langkah berikutnya adalah merancang observer yang berfungsi mengestimasi kesalahan. Sistem PFTC bekerja dengan melakukan kompensasi terhadap sinyal kontrol dengan menggunakan hasil estimasi observer. Penerapan sistem PFTC menghasilkan nilai *maximum undershoot* dan nilai settling time lebih kecil dibandingkan dengan sistem tanpa PFTC yaitu 12,27% dan 7.8 detik.

**Kata Kunci:** Motor DC, Torsi Beban, kontrol *state feedback*, *Passive Fault Tolerant Control*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# ***DESIGN PASSIVE FAULT TOLERANT CONTROL (PFTC) FOR VELOCITY CONTROL OF LOAD DC MOTOR SYSTEM***

***Name*** : Hanifa  
***NRP*** : 02311640000057  
***Department*** : Engineering Physics FTIRS - ITS  
***Supervisors*** : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

*DC motor is an electromagnetic device that functions to convert electrical energy into mechanical energy. In its application, the DC motor system is expected to never get disturbance. However, disturbance can occur suddenly caused by disturbance from component errors and noise. This final project designed a system Passive Fault Tolerant Control (PFTC) that is capable of working when there is an error in the actuator and sensor in the speed control of load DC motor system so that the system performance is maintained. The first step is designing a state feedback control system that is able to resolve the load torque disturbance and generating a gain controller value of 4.8915, 2.9864 dan 44.7214. The next step is to design an observer that works to estimate the fault. The PFTC system works by compensating the control signal by using the observer estimation results. The implementation of PFTC system results in smaller value of maximum undershoot and settling time compared to system without PFTC that is 12.27% and 7.8 seconds.*

***Keywords: Motor DC, Torque load, State feedback control, Passive Fault Tolerant Control***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul “Perancangan *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) untuk Pengendalian Kecepatan Sistem Motor DC Berbeban”.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T selaku kepala departemen Teknik Fisika dan dosen penguji yang telah memberikan petunjuk, ilmu serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Departemen Teknik Fisika
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah sabar memberikan motivasi, petunjuk, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat dalam terselesainya tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. selaku dosen wali dan dosen penguji yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
4. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. dan Bapak Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC selaku dosen penguji yang memberikan bimbingan dan saran-saran untuk perbaikan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS atas segala ilmu, bimbingan, petunjuk, dan nasihat yang sangat bermanfaat.
6. Orang Tua saya (Alm. Bapak Halili dan Ibu Holifiyah) dan Keluarga. Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
7. Mbak Luluk dan Mbak Ajeng atas segala bantuannya dan kesabarannya dalam menjawab segala pertanyaan.
8. Seluruh teman Tugas Akhir, Yuli Mauliza, Kartini, Yoanne Ayuningtyas, Barakatul Khairat, Ikma Lailatul B., Chiara Arandani, Rachma Putri, terimakasih untuk semuanya.

9. Ryzqy Kumara Dhana selaku teman terdekat yang selalu menjadi tempat berkeluh kesah dan selalu memberikan dukungan, semangat, serta motivasi kepada penulis agar dapat menyelesaikan laporan ini.
10. Rosalina Dewi R., Silvia Dewi R., Restu Hary R., Zhulfikha Nurma G., Eldinia Alifaisya, Fuad Jauhari M, Inge Nandasari, Maulidya Iswara B., Anggi Kurnia Putri D., Mar'atus Salimah, Amalia, Fuziah Larasati, Danika H., selaku sahabat mulai SMP dan SMA yang terus memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
11. Teman-teman Teknik Fisika angkatan 2016 yang memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
12. Semua pihak yang telah mendukung dan memberikan doa yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tesis ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 19 Juli 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
COVER PAGE .....	iv
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	vi
LEMBAR PENGESAHAN .....	viii
LEMBAR PENGESAHAN .....	x
ABSTRAK.....	xii
ABSTRACT .....	xiv
KATA PENGANTAR.....	xvi
DAFTAR ISI .....	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xx
DAFTAR TABEL .....	xxii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Motor <i>Direct Current</i> (DC) .....	5
2.2 Sistem Kontrol <i>State Feedback</i> dengan <i>Integrator</i> .....	12
2.3 Observer.....	14
2.4 <i>Passive Fault Tolerant Control</i> (PFTC).....	17
2.5 Kesalahan pada Sistem Kontrol .....	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Studi literatur.....	22
3.2 Pemodelan Sistem Motor DC.....	22
3.3 Perancangan Sistem Kontrol <i>State Feedback</i> .....	23
3.4 Perancangan Observer.....	24
3.5 Implementasi Observer dengan PFTC.....	25
3.6 Uji Performansi PFTC.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	27
4.1 Uji <i>Tracking</i> Kontroler <i>State Feedback</i> .....	27
4.2 Uji Estimasi Observer.....	28
4.3 Uji Performansi Sistem PFTC .....	29
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA .....	41
LAMPIRAN .....	43
BIODATA PENULIS .....	47

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Motor DC (Hudaya, 2013) .....	6
<b>Gambar 2. 2</b> Rangkaian Motor DC (Ogata, 2004) .....	9
<b>Gambar 2. 3</b> Rangkaian Motor DC dengan Torsi Beban (DC Motor Control, 2020) .....	10
<b>Gambar 2. 4</b> Diagram Blok sistem kontrol <i>state feedback</i> dengan Integrator (Ogata, 1997) .....	12
<b>Gambar 2. 5</b> Analisa respon <i>steady state</i> (Ogata, 1997) .....	13
<b>Gambar 2. 6</b> Observer (Ogata, 1997) .....	15
<b>Gambar 2. 7</b> Skema Sistem AFTC (Dybkowski, 2017) .....	18
<b>Gambar 2. 8</b> Skema Sistem PFTC (Dybkowski, 2017) .....	19
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir .....	21
<b>Gambar 3. 2</b> Diagram Blok Sistem Pengendalian Kecepatan Motor .....	22
<b>Gambar 3. 3</b> Diagram blok pengendalian kecepatan motor DC dengan algoritma <i>state feedback</i> with integrator .....	23
<b>Gambar 3. 4</b> Diagram blok <i>Passive Fault Tolerant Control</i> pada Motor DC .....	26
<b>Gambar 4. 1</b> Respon uji kontroler .....	27
<b>Gambar 4. 2</b> Respon kontroller dengan $Tl$ 0.01 .....	28
<b>Gambar 4. 3</b> Respon kontroller dengan $Tl$ 0.1 .....	28
<b>Gambar 4. 4</b> Hasil estimasi dengan observer tanpa kesalahan .....	29
<b>Gambar 4. 5</b> Hasil estimasi dengan observer dengan kesalahan .....	29
<b>Gambar 4. 6</b> Hasil respon tanpa PFTC .....	30
<b>Gambar 4. 7</b> Hasil respon dengan PFTC .....	30
<b>Gambar 4. 8</b> Respon dengan $f_s$ 20% dan $Tl$ 0.01 Nm .....	31
<b>Gambar 4. 9</b> Respon dengan $f_s$ 50% dan $Tl$ 0.01 Nm .....	32
<b>Gambar 4. 10</b> Respon dengan $f_a$ 50% dan $Tl$ 0.01 Nm .....	32
<b>Gambar 4. 11</b> Respon dengan $f_a$ 50% dan $Tl$ 0.01 Nm .....	32
<b>Gambar 4. 12</b> Respon dengan $Fg_a$ 0.5 $Fg_s$ 0.5 $Tl$ 0.01 Nm .....	33
<b>Gambar 4. 13</b> Respon dengan $Fg_a$ 0.2 $Fg_s$ 0.3 $Tl$ 0.01 Nm .....	34
<b>Gambar 4. 14</b> Respon dengan $Fg_a$ 0.2 $Fg_s$ 0.5 $Tl$ 0.01 Nm .....	34
<b>Gambar 4. 15</b> Respon dengan $Fg_a$ 0.2 $Fg_s$ 0.8 $Tl$ 0.01 Nm .....	34

<b>Gambar 4. 16</b> Respon dengan $Fg_a 0.5 Fg_s 0.2 Tl 0.01$ Nm .....	35
<b>Gambar 4. 17</b> Respon dengan $Fg_a 0.8 Fg_s 0.2 Tl 0.01$ Nm .....	35

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4. 1</b> Perbandingan Karakteristik Respon dengan dan tanpa PFTC .....	31
<b>Tabel 4. 2</b> Perbandingan Karakteristik Respon dengan variasi $f_s$ .....	35
<b>Tabel 4. 3</b> Perbandingan Karakteristik Respon dengan variasi $f_a$ .....	36

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini penggunaan jenis motor semakin meningkat dan banyak sekali digunakan untuk bidang transportasi berbasis listrik. Salah satunya adalah mobil listrik. Komponen utama dari mobil listrik sendiri adalah motor DC. Motor DC (*Direct Current*) atau motor arus searah merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Selain digunakan pada bidang transportasi listrik, motor DC juga digunakan dalam bidang industri, peralatan rumah tangga dan komponen elektronik lainnya (Koksal, 2007).

Dalam penerapannya, sistem motor DC diharapkan tidak pernah mengalami gangguan. Namun, gangguan bisa terjadi secara mendadak yang disebabkan oleh *disturbance* dan *noise*. Saat terjadi gangguan pada motor DC, pengendali PID masih mampu untuk mengatasi gangguan tersebut. Namun, di sisi lain Kontroler PID yang umum digunakan memiliki kinerja yang buruk ketika terjadi perubahan beban atau dinamika motor (Rigatos, 2009). Pada kendaraan listrik, motor DC bekerja sebagai sistem Servo dengan kecepatan motor dipertahankan konstan meskipun terjadi perubahan torsi beban. Pada sistem kontrol ini, sensor dan aktuator yang digunakan sangat sensitif dan mudah rusak (Dybkowski, 2017). Untuk mengatasi hal tersebut, maka diperlukan sistem pengendali yang mampu mentolerir kerusakan komponen sehingga performa sistem tetap stabil pada batasan tertentu. Sistem pengendali yang mampu menoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen secara otomatis disebut *Fault Tolerant Control System* (FTCS).

*Fault Tolerant Control System* (FTCS) merupakan sistem pengendali yang dapat menoleransi kesalahan yang terjadi dan menjaga agar kinerja sistem dapat terjaga. Tujuan FTC adalah untuk memastikan sistem tetap berjalan dengan semestinya meskipun terjadi kesalahan. Secara umum terdapat dua metode dalam *Fault Tolerant Control* (FTC) yaitu *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) dan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) (Zhang & Jiang, 2003). Pada *Passive Fault*

*Tolerant Control* (PFTC) didesain untuk menjadikan sistem kontrol bersifat robust terhadap kesalahan tanpa memerlukan proses identifikasi kesalahan yang terjadi (Dybkowski, 2017). Pada awalnya teori robust tidak memperhitungkan kesalahan sensor dan aktuator, tetapi hanya memperhitungkan ketidakpastian (*uncertainty*). Perkembangan selanjutnya teori robust juga digunakan untuk mengatasi kesalahan pada komponen sensor dan aktuator. Salah satu kelebihan *Passive Fault Tolerant Control* adalah dia dapat bekerja dengan baik pada sistem yang memiliki ketidakpastian yang tinggi.

Pada penelitian sebelumnya mengenai *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) dijelaskan bahwa penelitian tersebut menggunakan kontroler yang robust terhadap kesalahan aktuator tanpa menggunakan observer (Sebe, 2012). Selain itu terdapat penelitian Tugas Akhir mengenai *Passive Fault Tolerant Control* pada pengendalian kecepatan Motor DC dengan kesalahan sensor (Fasya, 2018). Pengembangan penelitian selanjutnya pada tahun 2019 dengan menggunakan *Fault Tolerant Control* pada pengendalian *Speed Sensorless* Motor DC dan diberi penambahan beban sebesar 1 Nm dan 10 Nm (Karlina, 2019). Oleh karena itu pada tugas akhir ini dilakukan perancangan *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) pada pengendalian kecepatan sistem motor DC berbeban dengan kesalahan sensor dan kesalahan aktuator dengan menggunakan observer yang robust, sehingga penggunaan *Passive Fault Tolerant Control* pada sistem motor DC mampu menoleransi gangguan dari beban torsi, kesalahan sensor dan kesalahan aktuator yang terjadi pada sistem motor DC agar sistem dapat bekerja dengan stabil.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah dari penelitian tugas akhir sebagai berikut:

- a) Bagaimana mengatasi perubahan torsi beban terhadap sistem kontrol kecepatan Motor DC?
- b) Apakah sistem *Passive Fault Tolerant Control* dapat mengatasi perubahan torsi beban pada sistem Motor DC?

### 1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah, tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah merancang sistem pengendalian kecepatan pada sistem motor DC menggunakan *Passive Fault Tolerant Control* yang mampu menangani perubahan torsi beban sehingga performansi sistem dapat terjaga.

### 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

- a) Komponen aktuator yang digunakan adalah *servo amplifier* dan komponen sensor yang digunakan adalah *tachometer*.
- b) Adanya penambahan beban (*torque load*)
- c) Kesalahan yang terjadi adalah kesalahan minor berupa kesalahan *bias* dan *loss of effectiveness*.

### 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut :

#### a) BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.

#### b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori motor DC, sistem kontrol *state feedback*, observer dan sistem *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC).

#### c) BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.

#### d) BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan sistem *Passive Fault Tolerant Control*.

e) BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

## **BAB II**

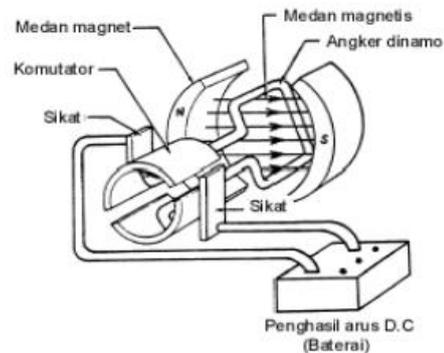
### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Motor *Direct Current* (DC)**

Motor DC atau motor arus searah merupakan sebuah mesin listrik yang prinsip kerjanya mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang dihasilkan merupakan energi gerak putar pada poros motor. Konversi energi tersebut dilakukan dalam waktu yang cepat dan merupakan implementasi hukum lorenz, yaitu hukum yang berlaku untuk aliran listrik pada kawat penghantar yang berada didalam medan magnet (Koksal, 2007). Jenis Motor DC lebih banyak digunakan dibandingkan dengan Motor AC karena kecepatan motor – motor DC mudah diatur serta banyaknya metode – metode yang dapat diterapkan. Penggunaan motor DC sebagai aktuator sangat luas mulai dari bidang transportasi sampai bidang industri. Bahkan motor DC digunakan sebagai penggerak utama pada berbagai kebutuhan peralatan rumah tangga seperti, pompa, mesin jahit, kipas angin, hingga mainan anak – anak.

Motor DC magnet permanen terdiri atas beberapa bagian yaitu kumparan jangkar (*armature*), magnet permanen, komutator (*commutator*), dan sikat (*brush*). Stator adalah bagian yang tidak bergerak (*statis*) dan rotor adalah bagian yang berputar. Prinsip kerja sistem motor DC yaitu magnet permanen sebagai stator tersusun dari dua magnet yang memiliki kutub berbeda yang saling berhadapan yang mempunyai fungsi untuk menghasilkan medan magnet . Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam medan magnet maka akan timbul tegangan yang berubah – ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga dapat disebut tegangan bolak balik. Komutator merupakan bagian dari rotor yang terletak pada kedua ujung kumparan jangkar. Komutator sendiri berfungsi untuk mengumpulkan arus induksi dari jangkar kemudian mengubahnya menjadi arus searah. Sedangkan sikat (*brush*) berfungsi untuk menyalurkan arus listrik dari sumber di luar motor ke dalam kumparan jangkar. Kumparan jangkar (*armature*) adalah sebuah kawat yang memiliki bentuk persegi panjang dan berfungsi untuk merubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk gerak putar. Dalam hal ini kumparan jangkar

berperan sebagai rotor motor. (Electric Motors and Variable Frequency Drives Handbook)



**Gambar 2. 1** Motor DC (Hudaya, 2013)

Sumber tegangan DC pada gambar 2.1 diilustrasikan dengan baterai yang memiliki kutub positif dan kutub negatif. Baterai akan terhubung dengan sikat karbon. Kemudian baterai dari kutub positif akan mengalirkan arus menuju sikat karbon yang selanjutnya menuju komutator, kemudian arus menuju kumparan jangkar (*armature*), dan kembali lagi ke komutator, setelah itu menuju ke sikat karbon dan terakhir ke kutub negatif baterai. Pada bagian kumparan jangkar akan menghasilkan fluks dari kutub utara ke kutub selatan. Didalam kumparan jangkar terdapat arus yang terletak pada medan magnet yang mengandung fluks, maka menghasilkan suatu gaya yang biasa disebut dengan gaya Lorentz ( $F$ ), selanjutnya gaya tersebut akan menggerakkan kumparan jangkar untuk berputar. Komponen komutator yang selalu ikut berputar dengan rotor dan sikat karbon yang selalu diam, menjadi komponen yang akan menjaga arah arus listrik untuk selalu tetap yakni mengalir dari sisi kiri kawat ke sisi kanan kawat. Dari sinilah arah arus listrik akan selalu tetap di setiap setengah putaran rotor yang dapat membuat rotor motor listrik selalu berputar selama masih ada arus listrik yang mengalir ke kumparan jangkar (Setyaningrum, 2012). Sensor yang digunakan pada sistem servo motor DC berupa sensor *tachometer* dan aktuator yang digunakan berupa *servoamplifier*.

### 2.1.1 Tachometer

Pada sistem pengendalian motor DC sensor kecepatan yang umum digunakan adalah *tachometer*. *Tachometer* merupakan suatu perangkat elektronik yang

mengubah energi mekanik ke energi listrik. Sensor ini bekerja sebagai pembangkit tegangan dengan tegangan keluaran sebanding dengan magnituda kecepatan sudut dari bahan masukan. *Tachometer* jenis DC lebih banyak digunakan pada sistem pengendalian. *Tachometer* ini biasanya menampilkan *revolutions per-minute* (RPM) pada sebuah pengukur skala analog, namun yang versi tampilan digital juga sudah semakin populer (Sari, 2009).

*Tachometer* ini mempunyai kelebihan yaitu untuk menjaga inersia turun yang dapat diatasi dengan penggunaan sikat. Namun kelemahan dari *tachometer* ini adalah penggunaan sikat untuk menjaga inersia dapat aus. Rangkaian *tachometer* ini mempunyai nilai keluaran berupa sinyal frekuensi diubah menjadi tegangan oleh rangkaian pengubah frekuensi menjadi tegangan. Jika respon dinamik sensor jauh lebih cepat dibandingkan dengan respon proses, maka konstanta waktu (*time constan*) dan *death time* pada sensor dapat diabaikan, sehingga fungsi alih sensor dapat didekati dengan penguatan (*gain* saja). Sehingga *gain* dari *tachometer* adalah

$$E = K\omega_m \quad (2.1)$$

Dimana:

$E$ = tegangan keluaran dari *tachometer* (volt)

$K$ = gain

$\omega_m$ = kecepatan putar motor(rpm)

Kesalahan yang terjadi pada sensor *tachometer* dapat dibagi menjadi dua yaitu kesalahan minor dan kesalahan mayor. Kesalahan sensor dibedakan berdasarkan tingkat keparahan. Tingkat kerusakan yang dimaksud ditinjau dari dampak yang ditimbulkan pada performansi sistem. Kesalahan dengan tingkat keparahan yang kecil disebut dengan kesalahan minor. Dengan kesalahan minor sistem masih dapat bekerja dengan performa yang diijinkan. Kesalahan minor yang biasanya terjadi pada sensor adalah adanya kesalahan pembacaan akibat perubahan sensitivitas dan adanya zero bias serta kalibrasi yang buruk. Sedangkan kesalahan mayor adalah kesalahan yang dapat mengakibatkan sistem tidak dapat mempertahankan performanya. Kesalahan *bias* dan sensitivitas dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut :

$$y = y_0 + \beta \quad (2.2)$$

$$y = y_0\alpha \quad (2.3)$$

Dimana:

$y$  = sinyal kontrol input residual (sinyal kontrol input yang masuk pada sensor setelah diberi pembebanan berupa gain kesalahan)

$y_0$  = sinyal kontrol input (sinyal kontrol input sebelum diberi pembebanan berupa gain kesalahan)

$\alpha$  = gain kesalahan sensitifitas

$\beta$  = gain kesalahan bias

### 2.1.2 Servo Amplifier

Aktuator yang digunakan untuk menggerakkan motor DC adalah *Servo amplifier*. Servo amplifier juga merupakan sebuah penguat yang mengolah sinyal *error* untuk mengoreksi perbedaan antara sinyal input (referensi) dengan sinyal umpan balik (*feedback*) sehingga menghasilkan output yang diharapkan. *Servo amplifier* terdiri dari comparator yang mengolah sinyal eror dan *power amplifier* yang menguatkan sinyal agar mampu menggerakkan servomotor (Setyaningrum, 2012).

Penyimpangan yang tak diinginkan dari sifat karakteristik atau parameter sistem disebut dengan suatu kesalahan. Kesalahan pada aktuator, sensor, maupun proses tetap dapat terjadi pada sistem kontrol. Kesalahan aktuator dapat terjadi karena suplai tegangan, penurunan kinerja *amplifier* dan penyumbatan. Kesalahan tersebut berkaitan dengan kesalahan *loss of effectiveness* (hilangnya sebagian tekanan hidrolik atau pneumatik) dan kesalahan bias pada aktuator (Lee & Lyou, 2001).

Kesalahan *bias* dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut,

$$b = b + \omega^b \quad (2.4)$$

Kemudian kesalahan aktuator dapat dituliskan sebagai berikut,

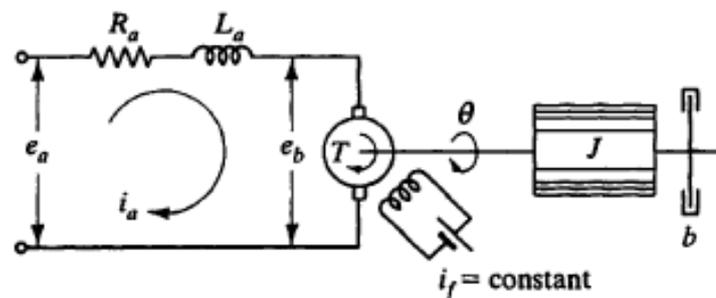
$$B(f)u = Bu + Fb \quad (2.5)$$

Dimana  $F=B$  menunjukkan pengaruh matriks kesalahan aktuator pada vektor keadaan.

### 2.1.3 Pemodelan Motor DC

Sistem merupakan suatu susunan dari bermacam-macam komponen yang saling berhubungan dalam menjalankan suatu aksi untuk mencapai tujuan yang diinginkan. Motor DC sendiri merupakan suatu sistem yang termasuk dalam sistem komponen elektro-mekanik.

Salah satu syarat pada kebanyakan strategi yang dipergunakan dalam membangun suatu sistem kendali adalah kemampuan dalam memodelkan secara matematika dari sistem yang akan dikendalikan. Model matematika dari suatu sistem dapat berupa persamaan diferensial, fungsi alih atau persamaan ruang keadaan (Ogata, 1997).



**Gambar 2. 2** Rangkaian Motor DC (Ogata, 2004)

Berdasarkan Gambar 2.2, tegangan ( $V$ ) untuk sistem motor DC adalah masukan yang dipasang pada armatur ( $R$ ,  $L$ ,  $\theta$  motor). Tegangan tersebut diubah oleh motor menjadi gerak putar, gerak putar yang dimaksudkan adalah keluaran sistem dan sebagai kecepatan rotasi dari motor. Secara umum, arus medan ( $i$ ) dan nilai fluks konstan yang menyebabkan torsi memiliki arah sesuai arus kumparan jangkar

$$T = Kt \cdot i_a \quad (2.6)$$

Dimana  $Kt$  adalah konstanta torsi dan  $i$  adalah arus kumparan jangkar. Sedangkan, ketika gaya dibangkitkan akan timbul gaya gerak listrik  $e_b$  yang berbanding lurus dengan kecepatan rotasi motor  $\omega$ , sehingga

$$e_b = Kb \cdot \omega \quad (2.7)$$

dimana  $e_b$  adalah emf balik dan  $Kb$  adalah konstanta emf balik. Dalam unit SI, konstanta torsi motor dan gaya gerak listrik emf balik adalah sama, sehingga  $Kt = Kb$ ; dengan demikian dapat digunakan konstanta  $K$  untuk menyatakan keduanya.

Untuk bagian mekanik, momen inersia rotor ( $J$ ) dan gesekan viskositas ( $b$ ) menghasilkan torsi dengan persamaan sebagai berikut,

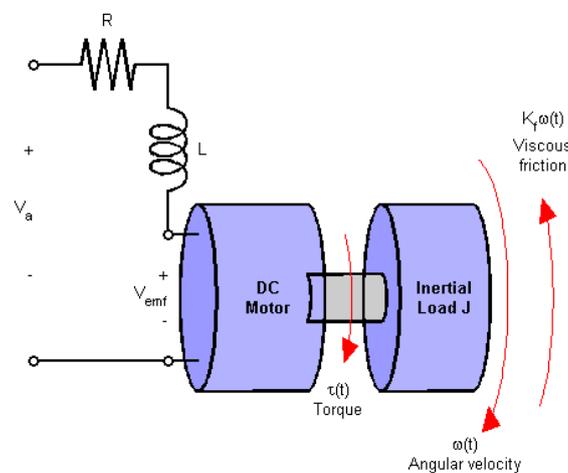
$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega + TL = K \cdot i_a \quad (2.8)$$

Kecepatan kumparan jangkar servomotor DC dikendalikan oleh tegangan kumparan jangkar  $e_a$ , sehingga agar kumparan jangkar dapat bergerak,  $e_a$  melewati rangkaian jangkar yang terdiri dari hambatan jangkar ( $R$ ) dan induktansi jangkar ( $L$ ), sehingga persamaan diferensial rangkaian kumparan jangkar adalah,

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_b = e_a \quad (2.9)$$

Jika persamaan (2.7) dimasukkan kedalam persamaan (2.9), menjadi

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = V - K \cdot \omega \quad (2.10)$$



**Gambar 2. 3** Rangkaian Motor DC dengan Torsi Beban (DC Motor Control, 2020)

Persamaan (2.8) dan (2.10) dapat dituliskan kedalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state-space*) untuk kecepatan motor DC dengan memilih kecepatan rotasi dan arus motor yang mengalir sebagai variabel keadaan, dan tegangan sebagai masukan serta kecepatan rotasi sebagai keluaran:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-b}{J} & \frac{K}{J} \\ \frac{-K}{L} & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

dengan :

$b$  = koefisien gesekan viskos ekivalen dari motor atau beban pada poros motor  
(N-m/rad/s)

$\Psi$  = Fluks

$K_f$  = konstanta fluks

$i_f$  = arus fluks (ampere)

$TL$  = Torsi Load (N-m)

$Kt$  = Konstanta torsi motor

$Kb$  = konstanta emf balik

$R$  = Tahanan kumparan jangkar, (ohm)

$J$  = Momen inersia eqivalen dari motor, (Kg.m<sup>2</sup>)

$\omega$  = Kecepatan rotasi, (rpm)

$V$  = Tegangan input servo, (Volt)

$ea$  = Tegangan yang dikenakan pada jangkar (volt)

$eb$  = Gaya gerak listrik balik (volt)

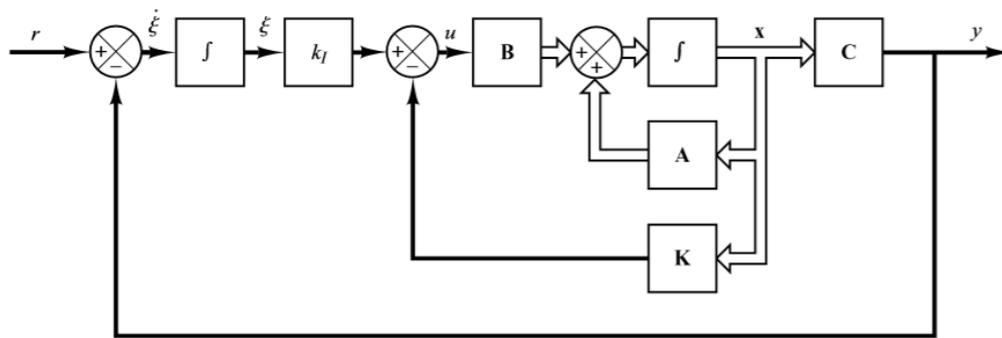
$L$  = Induktansi kumparan jangkar (henry)

$i_a$  = Arus kumparan jangkar (ampere)

## 2.2 Sistem Kontrol *State Feedback* dengan *Integrator*

Sistem pengendalian adalah gabungan dari kerja suatu komponen yang digunakan untuk mempertahankan variabel yang dikendalikan (*process variable*) pada suatu nilai tertentu (*set point*) sehingga sistem dapat dikatakan stabil. Sistem pengendalian kecepatan pada sistem motor DC menggunakan sistem kontrol *state feedback* dengan integrator.

Sistem kontrol *state feedback* merupakan sinyal keluaran sistem yang dibandingkan dengan sinyal referensi. Ketika terjadi perbedaan atau penyimpangan antara sinyal keluaran dengan sinyal referensi maka sinyal tersebut dikoreksi sehingga dapat memperbaiki sinyal masukan sistem selanjutnya. Penambahan integrator dilakukan guna menghilangkan *error steady state*.



**Gambar 2. 4** Diagram Blok sistem kontrol *state feedback* dengan Integrator (Ogata, 1997)

Berdasarkan Gambar 2.4, kontrol *state feedback* dengan integrator dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut,

$$u = Kp \cdot x + Ki \int e \, dt \quad (2.13)$$

Dimana,

$u$  = input motor DC

$Kp$  = gain proportional

$Ki$  = gain integral

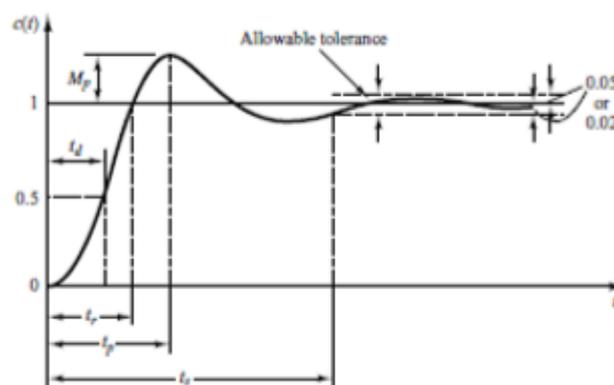
$x$  = state

Terdapat beberapa karakteristik respon dalam pengendali *state feedback* antara lain yaitu, *maximum overshoot*, *settling time*, *rise time*, *delay time*, dan *peak time*.

1. *Maximum (%) overshoot* adalah nilai puncak tertinggi respon sistem pengukuran terhadap keadaan yang diinginkan. Jika nilai *steady state* dari respon berbeda dengan nilai yang diinginkan, umumnya menggunakan *maximum % overshoot* dengan persamaan

$$\text{Maximum percent overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.14)$$

2. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh respon sistem untuk mencapai dan tetap dalam kisaran keadaan yang diinginkan biasanya direntang  $\pm 5\%$  atau  $\pm 2\%$ .
3. *Delay time* adalah waktu yang diperlukan untuk mencapai setengah dari respon keadaan yang diinginkan.
4. *Rise time* adalah waktu yang diperlukan respon naik dari 10 % menjadi 90 %, 5 % menjadi 95 %, atau 0 % hingga 100%. Sistem dengan respon underdamped, waktu rise time biasanya sekitar 0 % hingga 100 %. Sedangkan, sistem dengan respon overdamped memiliki waktu rise time sekitar 10 % hingga 90 %.
5. *Error steady state* adalah nilai error yang dihasilkan dari keadaan *steady* ketika belum mencapai *set point* yang diinginkan.



**Gambar 2. 5** Analisa respon *steady state* (Ogata, 1997)

### 2.3 Observer

Observer adalah suatu algoritma yang digunakan untuk mengestimasi keadaan (*state*) berdasarkan model dinamik sistem. Observer juga dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada suatu sistem jika kesalahan tersebut masuk dalam pemodelan. Suatu sistem umumnya dimodelkan dalam bentuk *state space*, yang dapat didefinisikan secara umum seperti persamaan sistem dalam bentuk diskrit dibawah ini (Ogata, 1987):

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.15)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (2.16)$$

Dengan;

$A$  = Matriks keadaan (*state*)

$B$  = Matriks kendali

$C$  = Matriks keluaran

$D$  = Matriks gangguan

$u(k)$  = Masukan kendali

$x(k + 1)$  = Turunan vektor keadaan

$y(k)$  = Vektor keluaran

$x(k)$  = Vektor keadaan (*state*)

Model matematis dari observer sama seperti model matematis pada sistem dengan ditambahkan  $K_e$  (*observer gain matrix*) menjadi persamaan sebagai berikut

$$\hat{x}(k + 1) = A \cdot \hat{x}(k) + B \cdot u(k) + K_e (y(k) - \hat{y}(k)) \quad (2.17)$$

$$\hat{y}(k) = C \hat{x}(k) \quad (2.18)$$

dengan :

$\hat{x}(k + 1)$  = Estimasi *state*  $x(k + 1)$

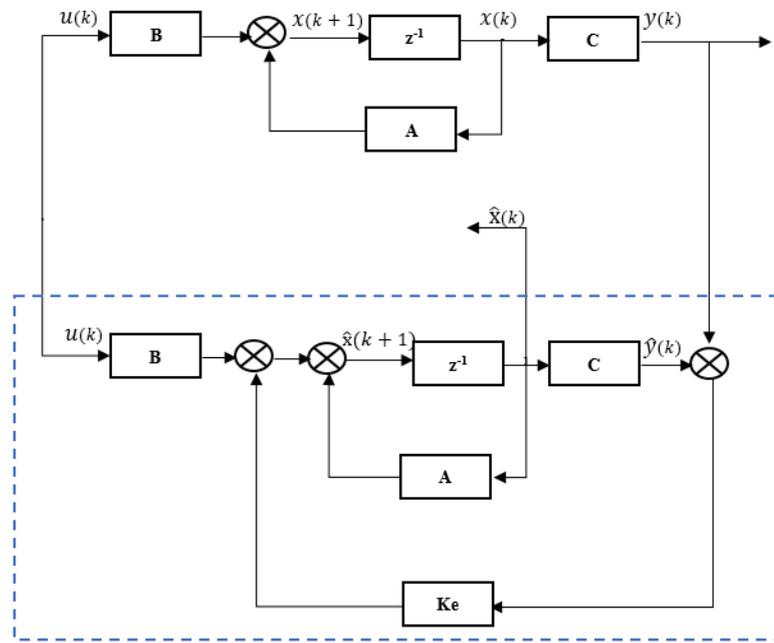
$K_e$  = *Gain Observer*

$\hat{x}(k)$  = Estimasi *state*  $x(k)$

$\hat{y}(k)$  = Estimasi  $y(k)$

Struktur observer ditunjukkan pada Gambar 2.6. *Gain* observer merupakan matriks konstan untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran  $y$  aktual dan  $y$  estimasi

sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state*. Menggunakan prinsip dualisme, gain observer dapat ditentukan seperti halnya gain kontroler pada skema kontrol robust. Dengan demikian, penentuan gain observer selanjutnya dapat diturunkan sebagai *problem* optimisasi.



**Gambar 2. 6** Observer (Ogata, 1997)

### 2.3.1 Extended State Observer

Pada sistem PFTC digunakan sebuah *extended state* observer untuk mengestimasi keadaan (*state*) dari variabel yang tidak terukur berdasarkan model matematis sistem, sehingga observer juga dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada suatu sistem jika kesalahan tersebut masuk dalam pemodelan. Suatu sistem umumnya dimodelkan dalam bentuk *state space*, yang dapat didefinisikan secara umum seperti persamaan sistem dibawah ini (Ogata, 1997):

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.19)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.20)$$

dengan

$A$  = matriks keadaan (state)

$B$  = matriks kendali

$C$  = matriks keluaran

$D$  = matriks gangguan

$x$  = vektor keadaan (state)

$u$  = sinyal kontrol

$y$  = vektor keluaran

Model matematis observer sama seperti model matematis pada sistem sehingga observer dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Untuk mengkompensasi pengaruh kesalahan yang terjadi pada motor DC pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma observer baru, algoritma tersebut dibentuk oleh (Katherin Indriawati, 2015). Konsep *robust extended state* observer menambahkan sinyal kesalahan sebagai variabel keadaan sistem tambahan sehingga didapatkan sebuah *extended state*. Sinyal kesalahan atau gangguan direpresentasikan sebagai ketidakpastian. State kesalahan sensor dan aktuator masing masing disimbolkan dengan  $f_a$  dan  $f_s$ . Persamaan ruang keadaan yang mengandung kesalahan aktuator dan sensor dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\dot{x} = Ax + Bu + F_a f_a \quad (2.21)$$

$$y = Cx + F_s f_s \quad (2.22)$$

Penambahan state baru diperlukan untuk memindahkan sinyal  $f_s$  ke persamaan keadaan. Variabel baru tersebut didefinisikan sebagai berikut,

$$\dot{z} = A_z(y - z) \quad (2.23)$$

$$\dot{z} = A_z(Cx + F_s f_s - z) \quad (2.24)$$

Persamaan (2.22) disubstitusi dengan persamaan (2.23) sehingga diperoleh persamaan,

$$\dot{z} = A_z Cx - A_z z + A_z F_s f_s \quad (2.25)$$

Untuk  $A_z$  merupakan matriks identitas ( $I$ ), sedangkan matriks dari kesalahan aktuator didefinisikan sebagai  $f = f_a$  dan matriks dari kesalahan sensor didefinisikan sebagai  $f = f_s$ .

Kemudian persamaan (2.21) dan persamaan (2.25) dapat diubah menjadi *state space* seperti berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z F_s \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$y = \dot{z} = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Dengan

$$x_a = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}, \quad A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z C & -A_z \end{bmatrix}, \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_a = [0 \quad 1], \quad E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z F_s \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai dari *gain* observer maka diperlukan ekspansi matriks melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan pada persamaan (2.29),

$$\dot{\hat{x}}_a = A_a \hat{x} + B_a u + E_a |\hat{f}| + L_x (y - \hat{y}) \quad (2.28)$$

$$|\hat{f}| = L_f (y - \hat{y}) \quad (2.29)$$

$$\hat{y} = C_a \hat{x} \quad (2.30)$$

Apabila kedua persamaan (2.29) dan (2.31) dinyatakan dalam bentuk persamaan ruang keadaan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_a \\ \dot{\hat{f}}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_a \\ \hat{f}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} L_x \\ L_f \end{bmatrix} (y - \hat{y}) \quad (2.31)$$

$$\hat{y} = [C_a \quad 1] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

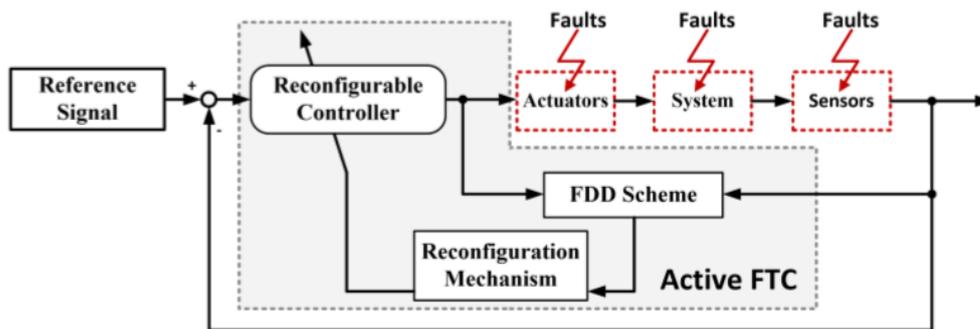
Dengan  $\hat{x}_a$ ,  $\hat{f}_a$ ,  $\hat{y}$  berturut turut adalah hasil estimasi *state*, kesalahan dan *output*.  $L_x$  adalah *gain proporsional* dari observer dan  $L_f$  adalah *gain integral* dari observer. *Gain* observer ini digunakan untuk menjamin kestabilan dinamik dari eror estimasi.

#### 2.4 *Passive Fault Tolerant Control (PFTC)*

Suatu sitem yang dapat mendeteksi kegagalan komponen secara otomatis dengan mendesain ulang kontrol sedemikian rupa agar tetap bekerja secara optimal adalah sistem *Fault Tolerant Control (FTC)*. Sistem FTC dirancang untuk mengakomodasi kesalahan sehingga ketika terjadi kesalahan minor pada komponen tidak menyebabkan sistem tersebut mengalami kegagalan. Performa sistem secara

keseluruhan dapat diperbaiki oleh sistem FTC karena sistem akan terus beroperasi dalam durasi yang lama dengan persyaratan performa yang telah ditetapkan.

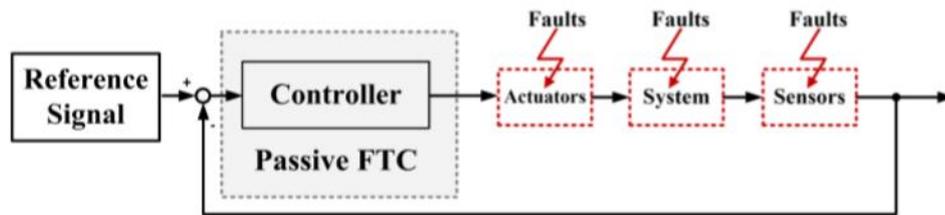
FTC dapat dibagi menjadi dua, yaitu *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) dan *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC). AFTC merupakan suatu sistem kontrol yang dirancang ulang dengan menggunakan informasi kesalahan secara on line dalam rangka mempertahankan performa serta kestabilan yang telah ditetapkan atau pada kondisi terparah dapat mencapai performa yang diijinkan. Untuk skema sistem AFTC dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2. 7** Skema Sistem AFTC (Dybkowski, 2017)

Sedangkan, PFTC merupakan suatu sistem kontrol yang bekerja dengan kontroler yang telah ditetapkan dan dirancang menggunakan teknik kontrol robust yang mengakibatkan sistem *closed loop* tidak sensitif terhadap kesalahan tertentu. Pendekatan dengan metode PFTC tidak membutuhkan informasi kesalahan secara online serta rekonfigurasi kontroler seperti pada pendekatan metode aktif. Perbedaan antara sistem PFTC dan AFTC adalah terletak pada perancangan *Reconfigurable Control* (RC) dan *Fault Detection and Isolation* (FDI) dimana perancangan tersebut diperlukan dalam sistem AFTC sedangkan sistem PFTC tidak memerlukan perancangan tersebut. PFTC memiliki kelebihan yaitu tidak membutuhkan waktu *delay* – yang dibutuhkan oleh FDI – seperti AFTC. Selain itu unjuk kerja PFTC tidak lagi bergantung pada kesalahan deteksi yang mungkin terjadi. Kelebihan sistem PFTC yang lain adalah besarnya kesalahan ditentukan sebelumnya sehingga sistem dapat didesain menjadi pengendali yang robust terhadap kesalahan. Namun penerapan metode pasif sangat terbatas karena hanya

dapat menangani kesalahan yang menimbulkan dampak kecil saja. (Zhang & Jiang, 2003). Untuk sistem PFTC ditunjukkan pada Gambar 2.8.



**Gambar 2. 8** Skema Sistem PFTC (Dybkowski, 2017)

## 2.5 Kesalahan pada Sistem Kontrol

Kesalahan dan kegagalan digunakan untuk menyatakan tingkat degradasi suatu sistem. Kesalahan merupakan suatu bentuk penyimpangan yang tidak diinginkan dari kondisi standar yang biasa diterima. Sedangkan kerusakan secara permanen atas kemampuan sistem untuk melakukan fungsi yang diperlukan pada kondisi operasi tertentu disebut dengan kegagalan. Sifat kerusakan yang ditimbulkan oleh kegagalan lebih berat daripada kesalahan.

Kesalahan dapat terjadi pada aktuator maupun sensor. Kesalahan pada sensor dapat diakibatkan karena buruknya proses kalibrasi dan adanya perubahan karakteristik dinamik atau perubahan sensitivitas yang menyebabkan *error* pada keluaran atau pembacaan sensor. Sedangkan, kesalahan pada aktuator berkaitan dengan *loss of effectiveness*. Suplai tegangan, penurunan kinerja amplifier dan penyumbatan merupakan penyebab terjadinya kesalahan pada aktuator (Lee & Lyou, 2001).

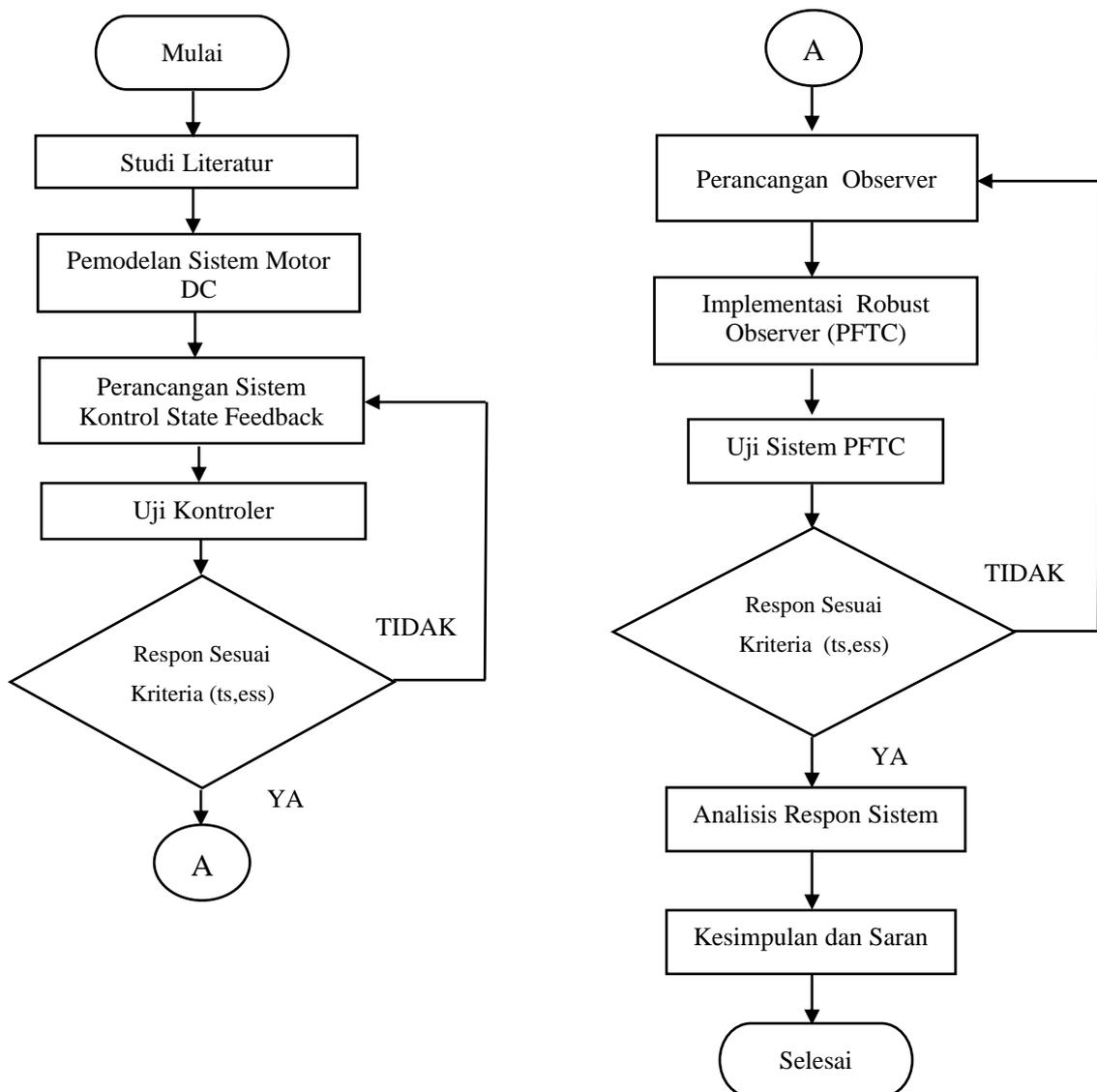
Kesalahan pada sensor dan aktuator dapat dibedakan menjadi dua yaitu kesalahan minor dan kesalahan mayor. Tingkat kerusakan dapat diukur berdasarkan dampak yang terjadi pada sistem. Kesalahan dengan tingkat keparahan yang kecil disebut dengan kesalahan minor. Ketika terjadi kesalahan minor, sistem masih dapat bekerja dengan performa yang diijinkan. Bentuk kesalahan minor pada sensor adalah kesalahan pembacaan akibat perubahan sensitivitas dan munculnya zero bias. Sedangkan, kesalahan minor pada aktuator adalah munculnya *loss of*

*effectiveness*. Kesalahan mayor merupakan kesalahan yang menyebabkan sistem tidak dapat mempertahankan performa yang telah ditetapkan. (Noura, 2000)

Ketidakpastian (*uncertainty*) pada model matematik dari suatu sistem terjadi karena sistem fisik secara khusus mengalami gangguan yang bervariasi. Ketidakpastian dibagi menjadi dua yaitu tak-terstruktur (*unstructured*) apabila bentuk yang diketahui hanya batas atas (*upper*) dan batas bawah (*lower*) dan dikatakan terstruktur (*structured*) apabila diketahui model rinci. Variasi *parametric* dalam dinamika *plant* seperti variasi *pole* dan *zero* fungsi transfer *plant* merupakan contoh dari ketidakpastian terstruktur. Sedangkan contoh untuk ketidakpastian tak terstruktur meliputi ketidakpastian yang bergantung pada frekuensi, seperti mode frekuensi tinggi yang biasanya kita abaikan dalam peodelan dinamika *plant* (Oliveira, 2006).

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan rencana penelitian dalam tugas akhir ini ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut ini:

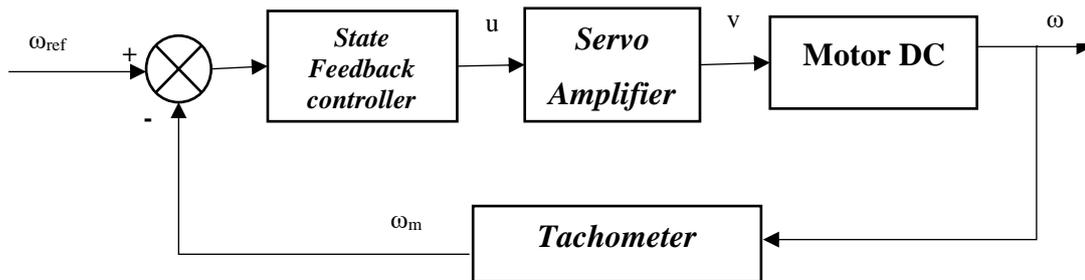


**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

### 3.1 Studi literatur

Tahap studi literatur pada tugas akhir ini dimaksud untuk membangun pemahaman awal sampai mendalam secara teoritis terhadap materi yang mendukung penelitian tugas akhir ini dengan mengumpulkan literatur dan referensi yang relevan mengenai Sistem Motor DC, *Sistem Passive Fault Tolerance Control*, sistem kontrol *state feedback*, dan *robust observer*.

### 3.2 Pemodelan Sistem Motor DC



**Gambar 3. 2** Diagram Blok Sistem Pengendalian Kecepatan Motor

Dari persamaan (2.11) diperoleh model matematik dari motor DC dengan nilai parameter motor DC didapatkan dari jurnal, dimana nilai parameter motor yang digunakan (Katherin Indriawati, 2015) :

$$J = 0.01 ; b = 0.1 ; K = 0.01 ; R = 1 ; L = 0.5$$

Dengan,

$J$  = Momen inersia ekuivalen dari motor, (Kg.m<sup>2</sup>)

$b$  = Koefisien gesekan viskos ekuivalen dari motor dan beban pada poros motor (N.m/rad.dt)

$K$  = Konstanta torsi motor

$R$  = Tahanan kumparan jangkar (ohm)

$L$  = Induktansi kumparan jangkar (henry)

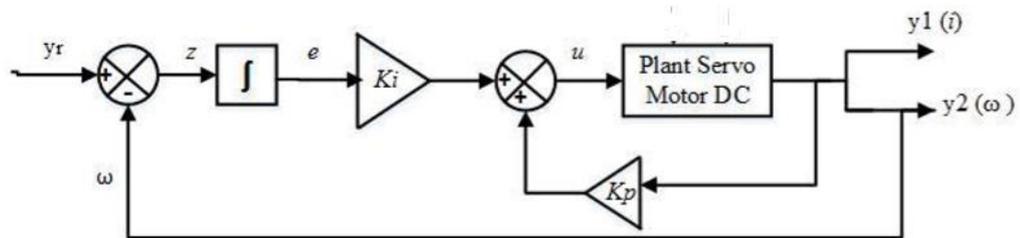
Dari parameter motor DC tersebut, dimasukkan ke dalam bentuk persamaan ruang keadaan untuk sistem servo motor DC sesuai dengan persamaan (2.12) dan (2.13) menjadi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 1 \\ -0.02 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -0.01 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} T_L \quad (3.3)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.3 Perancangan Sistem Kontrol *State Feedback*

Sistem kontrol *state feedback* dengan integerator digunakan pada sistem pengendalian kecepatan pada motor DC. Penambahan integrator pada suatu sistem bertujuan agar dapat menghilangkan *error steady state*. Secara sistem *close loop* dapat ditunjukkan dengan diagram blok seperti berikut,



**Gambar 3. 3** Diagram blok pengendalian kecepatan motor DC dengan algoritma *state feedback* with integrator

Persamaan *state space* yang digunakan untuk perancangan sistem kontrol *state feedback* dengan integerator sebagai berikut,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.5)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.6)$$

Dimana, *set point* pada sistem motor DC ini berupa kecepatan ( $\omega$ ) dan arus ( $i$ ) sehingga dapat ditulis sebagai berikut

$$x = \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Sedangkan *output* yang diinginkan mengikuti *set point* adalah kecepatan sehingga,

$$y_r = C_r \cdot x = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} = \omega \quad (3.8)$$

Didefinisikan *error tracking* adalah perbedaan antara *set point* dengan pengukur yang dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\dot{e} = \omega_{ref} - \omega \quad (3.9)$$

$$\dot{e} = \omega_{ref} - Cr \cdot x \quad (3.10)$$

$$\dot{e} = -\omega_{ref} + Cr \cdot x \quad (3.11)$$

Dengan menggabungkan persamaan (3.5) dan (3.10) maka dibentuk persamaan *state space* baru sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \omega_{ref} \quad (3.12)$$

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u + D_c \omega_{ref} \quad (3.13)$$

Dengan,  $u = K_c x_c$  maka dari persamaan (3.13) dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\dot{x}_c = (A_c + B_c K_c) x_c + D_c \omega_{ref} \quad (3.14)$$

$$K_c = [K_p \quad K_i] \quad (3.15)$$

Dimana  $K_c$  adalah *gain* kontroler.

Penentuan gain kontroler dilakukan dengan menggunakan metode LQR. Untuk simulasi, nilai  $K_c$  diperoleh dengan memberikan nilai matriks LQR sebagai berikut,

$$K_{lqr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}$$

Maka diperoleh nilai gain pengendali state feedback sebagai berikut,

$$K_c = [4.8915 \quad 2.9864 \quad 44.7214]$$

Sehingga nilai gain proportional dan integral adalah

$$K_p = [4.8915 \quad 2.9864]$$

$$K_i = [44.7214]$$

### 3.4 Perancangan Observer

Observer merupakan metode yang digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang ada, dengan cara mengembangkan persamaan ruang keadaan sistem atau *state space*. Sinyal kesalahan atau gangguan direpresentasikan sebagai ketidakpastian. Persamaan ruang keadaan yang mengandung kesalahan aktuator dan kesalahan sensor dituliskan sebagai berikut,

$$\dot{x} = Ax + Bu + F_a f_a \quad (3.16)$$

$$y = Cx + F_s f_s \quad (3.17)$$

Penambahan state diperlukan untuk memindahkan sinyal  $f_s$  ke persamaan keadaan baru sebagai berikut,

$$\dot{z} = A_z (y - z) \quad (3.18)$$

$$\dot{z} = A_z (Cx + F_s f_s - z) \quad (3.19)$$

Persamaan (3.18) disubstitusi dengan persamaan (3.19) sehingga diperoleh persamaan,

$$\dot{z} = A_z Cx - A_z z + A_z F_s f_s \quad (3.20)$$

Untuk  $A_z$  merupakan matriks identitas ( $I$ ), sedangkan matriks dari kesalahan aktuator didefinisikan sebagai  $f = f_a$  dan matriks dari kesalahan sensor didefinisikan sebagai  $f = f_s$ .

Kemudian persamaan (3.16) dan persamaan (3.20) dapat diubah menjadi *state space* seperti berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z F_s \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$y = z = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Dengan

$$x_a = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}, \quad A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z C & -A_z \end{bmatrix}, \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_a = [0 \quad 1], \quad E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z F_s \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh nilai dari gain observer maka diperlukan persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan pada persamaan (2.29),

$$\dot{\hat{x}}_a = A_a \hat{x} + B_a u + E_a |f| + L(y - \hat{y}) \quad (3.23)$$

$$\hat{y} = C_a \hat{x} \quad (3.24)$$

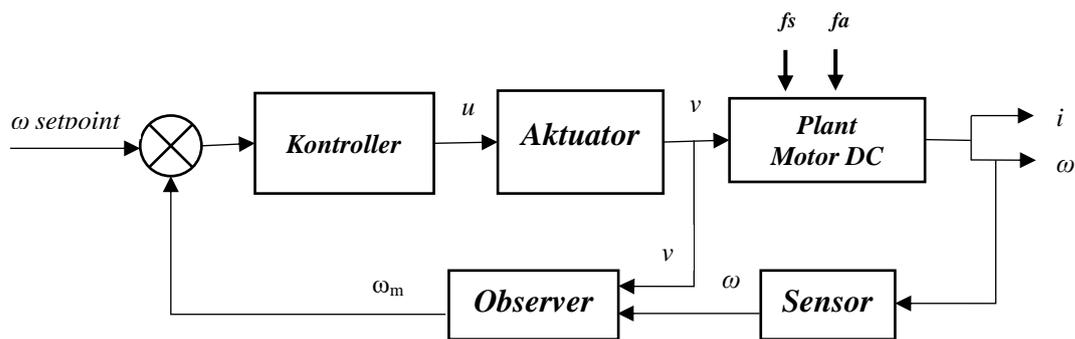
Dari persamaan (3.23)  $L$  merupakan hasil gain observer. Gain observer ini digunakan untuk menjamin kestabilan dinamik dari eror estimasi. Sehingga diperoleh nilai gain observer sebagai berikut,

$$L = \begin{bmatrix} 0.2058 & 0.8578 \\ -0.3218 & 9.014 \\ 9.878 & 0.0801 \\ -0.02875 & 9.892 \\ -0.04191 & 9.252 \\ 9.869 & -0.466 \end{bmatrix}$$

### 3.5 Implementasi Observer dengan PFTC

Implementasi dilakukan dengan menggabungkan *gain controller* dan *gain observer* pada perancangan sistem PFTC.  $f_a$  dilambangkan sebagai kesalahan aktuator, sedangkan besaran kesalahan sensor dilambangkan dengan  $f_s$ . Untuk

mengkompensasi kesalahan yang terjadi pada plant motor DC digunakan sistem PFTC. PFTC merupakan metode kompensasi yang berfungsi untuk menghapus sinyal kesalahan yang terjadi sehingga dapat menjamin plant yang mengalami kesalahan tetap memiliki performansi yang stabil dalam menghadapi perubahan input referensi dan gangguan. Gambar 3.4 menjelaskan diagram blok dari perancangan PFTC. Perancangan PFTC ini menggunakan observer. Pada awalnya observer dirancang untuk mengestimasi kecepatan, setelah itu baru diperluas dengan memberikan penambahan kesalahan berupa adanya kesalahan aktuator dan kesalahan sensor.



**Gambar 3. 4** Diagram blok *Passive Fault Tolerant Control* pada Motor DC

### 3.6 Uji Performansi PFTC

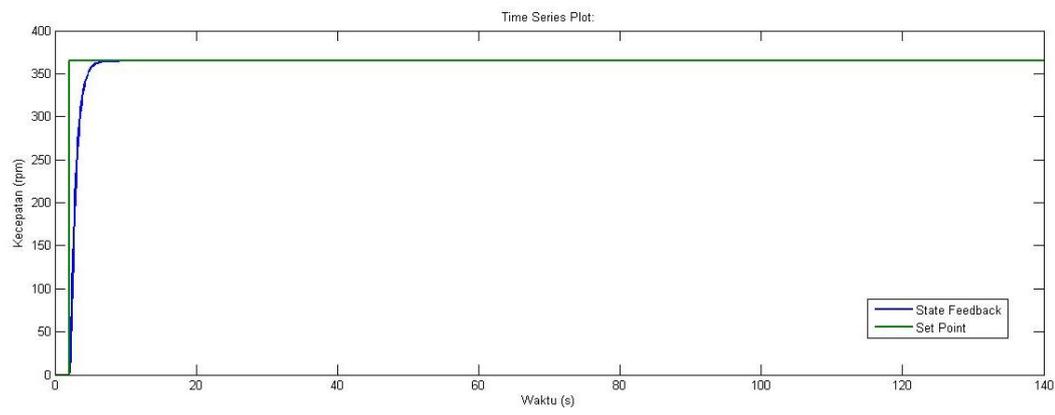
Setelah dilakukan integrasi atau penggabungan observer dengan sistem kontrol (PFTC) diperlukan uji performansi PFTC. Pada sistem PFTC besarnya kesalahan sudah ditentukan terlebih dahulu saat tahap perancangan sistem. Pengujian dilakukan dengan memberikan pengaruh torsi beban sebagai gangguan sistem motor DC serta kesalahan aktuator dan sensor kecepatan. Kemudian dilakukan uji performansi berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas yang diberikan pada simulasi PFTC. *Passive Fault Tolerant Control* dikatakan memiliki respon baik jika nilai *maximum overshoot*  $\leq 5\%$  dan *error steady state*  $\leq 5\%$ . Uji performansi yang dilakukan pada sistem adalah uji kontroller, uji observer, dan uji kesalahan secara simulasi. Uji kesalahan secara simulasi dilakukan menggunakan bantuan *software* Matlab.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Uji *Tracking* Kontroler *State Feedback*

Pada persamaan (3.15) didapatkan nilai dari *gain* kontroler yang digunakan untuk mengetahui respon yang dihasilkan dari kontroler tersebut. Pengujian kontroler ini dilakukan untuk mengetahui respon dari *gain* kontroler apakah bisa *tracking* saat ada perubahan *set point*. Hasil dari respon kontroler ditunjukkan pada gambar berikut ini

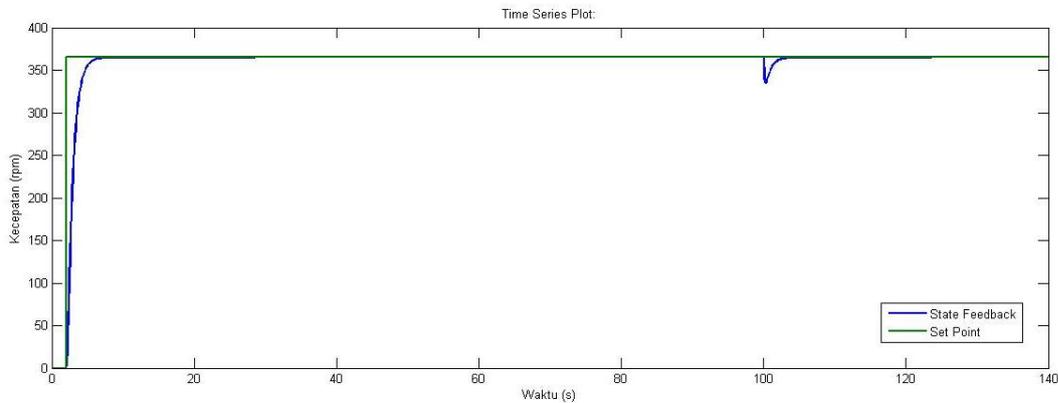


**Gambar 4. 1** Respon uji kontroler

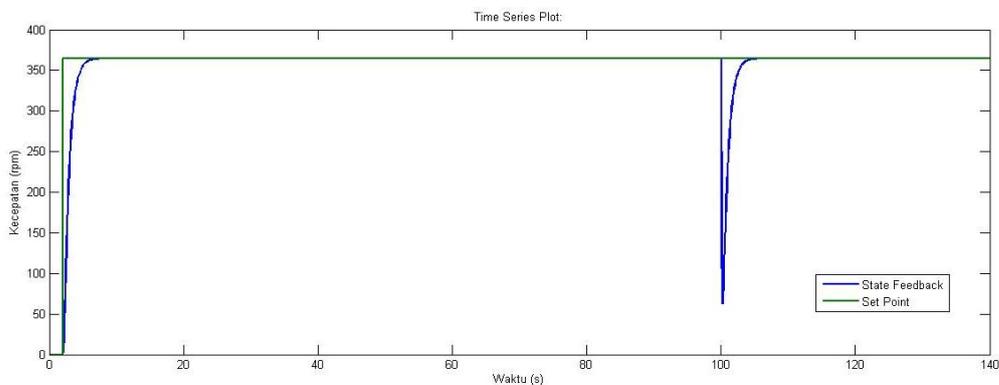
Gambar 4.1 menunjukkan dua grafik yaitu grafik berwarna hijau yang menunjukkan nilai set point dan grafik berwarna biru menunjukkan hasil respon kontroler. Dari grafik terlihat bahwa respon *state feedback* dapat *tracking* ketika set point sebesar 365 rpm. Hal ini membuktikan bahwa diketahui bahwa kontroler yang dirancang dapat bekerja dengan baik karena mampu mencapai mengikuti nilai set point . Hasil respon menunjukkan karakteristik respon nilai maximum overshoot ataupun maximum undershoot dan error steady state sebesar 0% sedangkan nilai *settling time* sebesar 7.6 detik.

Sistem kontrol *state feedback* dapat menjaga performansi ketika kontroller diberikan penambahan beban sebesar 0.01 Nm dan 0.1 Nm pada detik ke 100. Hasil respon pada penambahan torsi beban 0.01 Nm menunjukkan karakteristik respon nilai maximum undershoot sebesar 8.1% dengan *time settling* sebesar 3.7 detik.

Sedangkan untuk nilai torsi 0.1 Nm menunjukkan nilai maximum undershoot sebesar 82.7% dan *time settling* sebesar 5.3 detik. Dari kedua respon tersebut terlihat bahwa pada silmulasi ini hanya dapat mengatasi penambahan beban sebesar 0.01 Nm. Hal ini terjadi karena jenis motor DC yang digunakan cukup kecil.



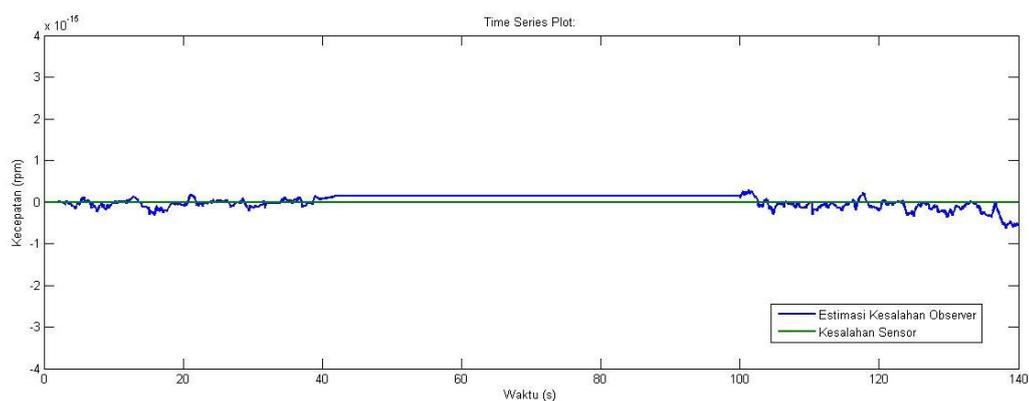
**Gambar 4. 2** Respon controller dengan  $T_I$  0.01



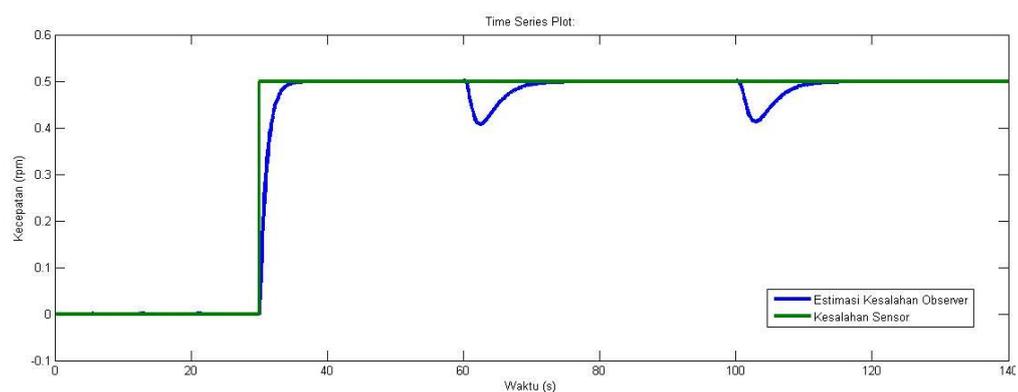
**Gambar 4. 3** Respon controller dengan  $T_I$  0.1

#### 4.2 Uji Estimasi Observer

Pada tahapan uji hasil observer bertujuan untuk membuktikan bahwa observer yang dirancang mampu bekerja dengan diberikan kesalahan yang terjadi pada sistem. Uji estimasi observer ini dilakukan dengan sistem tanpa diberikan kesalahan dan sistem dengan diberikan kesalahan, sehingga didapatkan respon sebagai berikut :



**Gambar 4. 4** Hasil estimasi dengan observer tanpa kesalahan



**Gambar 4. 5** Hasil estimasi dengan observer dengan kesalahan

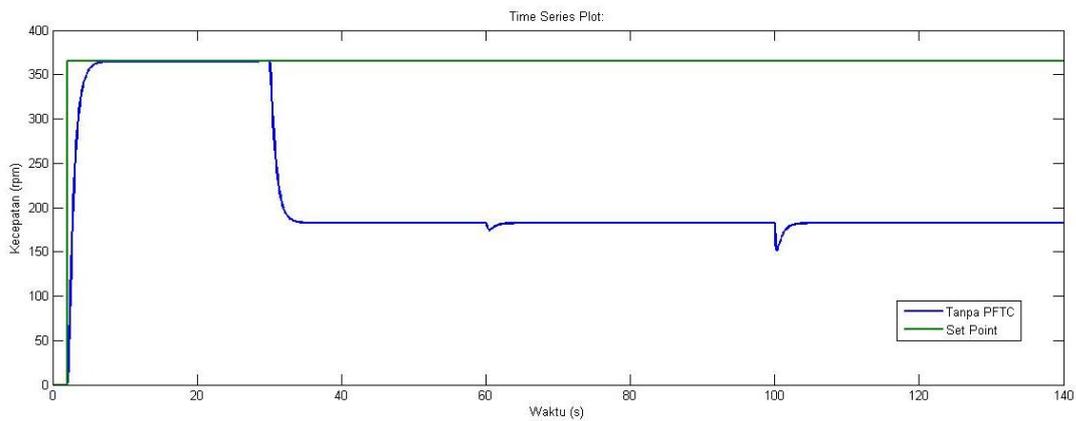
Gambar 4.4 dan 4.5 menunjukkan hasil estimasi kesalahan sensor dengan *observer* ketika tidak terjadi kesalahan dan ketika terjadi kesalahan. Garis hijau menunjukkan kesalahan aktual dari sensor dan garis biru menunjukkan estimasi kesalahan *observer*. Pada sistem tanpa kesalahan maupun dengan pemberian kesalahan diketahui bahwa hasil estimasi kesalahan aktuator mengikuti kesalahan aktualnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *observer* sudah bekerja dengan benar untuk mengestimasi besarnya kesalahan.

### 4.3 Uji Performansi Sistem PFTC

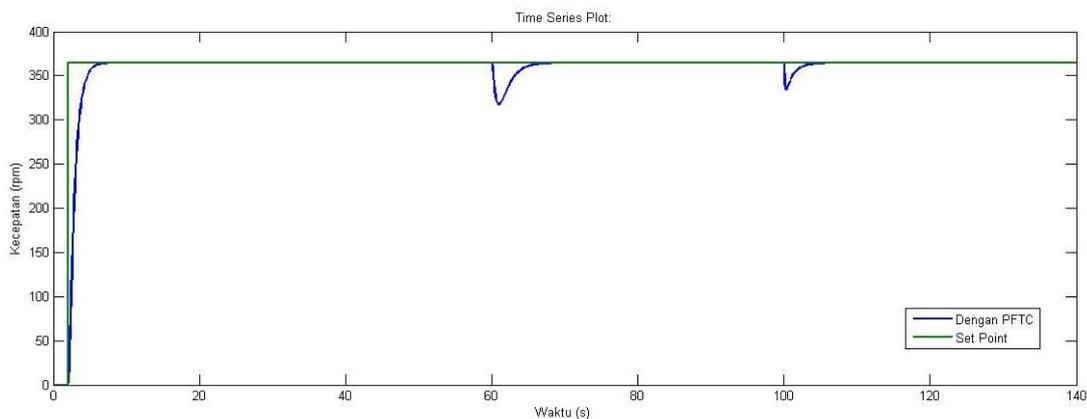
Uji performansi dilakukan untuk mengetahui Sistem *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) yang telah dibuat dapat bekerja dengan baik atau tidak ketika sistem diberikan kesalahan. Pertama simulasi dilakukan dengan membandingkan respon hasil simulasi sistem dengan PFTC dan tanpa PFTC. Setelah itu, Sistem

PFTC diuji dengan memberikan besaran kesalahan aktuator, kesalahan sensor dan penambahan torsi beban yang sudah ditentukan pada awal perancangan. Terdapat beberapa variasi nilai kesalahan dari kesalahan aktuator dan sensor yang dapat diterapkan pada sistem motor DC. Untuk torsi beban ditambahkan pada nilai 0.01 Nm untuk setiap percobaannya. Uji kesalahan secara simulasi dilakukan dengan memberikan kesalahan pada komponen aktuator dan sensor. Gain kesalahan yang diberikan pada aktuator dan sensor sebesar 0.3, 0.5, 0.8. Perubahan nilai kesalahan yang diberikan pada aktuator dan sensor dapat mengakibatkan perbedaan respon dari sistem.

#### 4.3.1 Perbandingan Respon Dengan dan Tanpa PFTC



**Gambar 4. 6** Hasil respon tanpa PFTC



**Gambar 4. 7** Hasil respon dengan PFTC

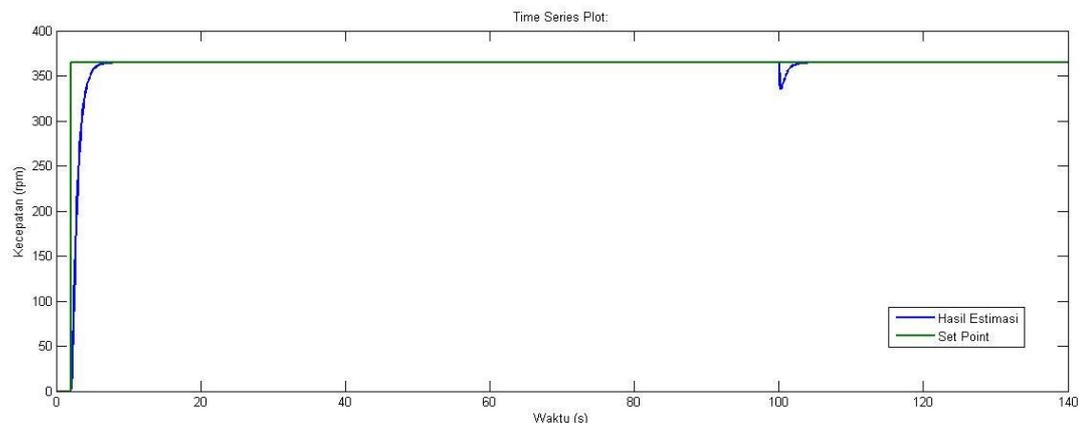
Dari hasil respon tersebut dapat dilihat bahwa garis hijau menunjukkan kesalahan aktual dan garis biru menunjukkan respon sistem PFTC dengan kesalahan. Gambar 4.6 merepresentasikan hasil respon pembacaan sebenarnya

berbeda dengan hasil respon pembacaan estimasi dan menyebabkan respon menghasilkan *error steady state* sebesar 57.28%. Perbedaan tersebut karena tidak adanya PFTC yang ditambahkan seperti pada hasil respon Gambar 4.7. PFTC digunakan untuk menoleransi ketika terjadi kesalahan pada sensor, aktuator atau komponen sistem terjadi. Pada Gambar 4.7 kesalahan pada sensor diberikan pada detik ke 30 dan kesalahan pada aktuator diberikan pada detik ke 60. Pada detik ke 100 ditambahkan juga gangguan torsi beban. Dapat dilihat bahwa respon sistem sudah mampu mengestimasi kesalahan pada sensor maupun aktuator. Setelah dikenai kesalahan pada aktuator dan sensor respon akan kembali ke posisi set point. Hal tersebut mengakibatkan performansi sistem tetap terjaga meskipun dikenai kesalahan. Berdasarkan Gambar 4.7 maka dapat disimpulkan bahwa PFTC dapat bekerja dengan baik untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sensor dan aktuator serta gangguan torsi beban.

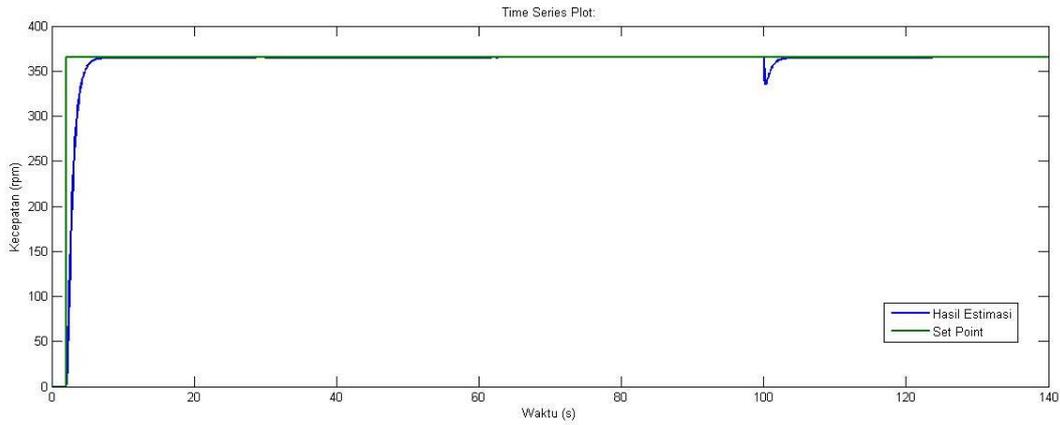
**Tabel 4. 1** Perbandingan Karakteristik Respon dengan dan tanpa PFTC

Parameter	Desain Sistem	
	Tanpa PFTC	Dengan PFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	57.28%	12.27%
<i>Peak Time</i>	100.5 detik	60.7 detik
<i>Settling time</i>	-	7.8 detik

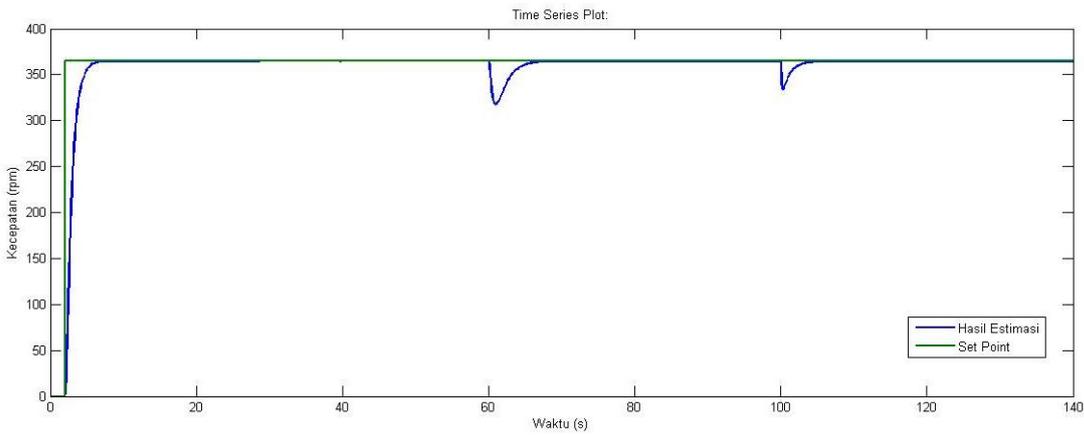
#### 4.3.2 Uji Kesalahan Sensor dan Aktuator



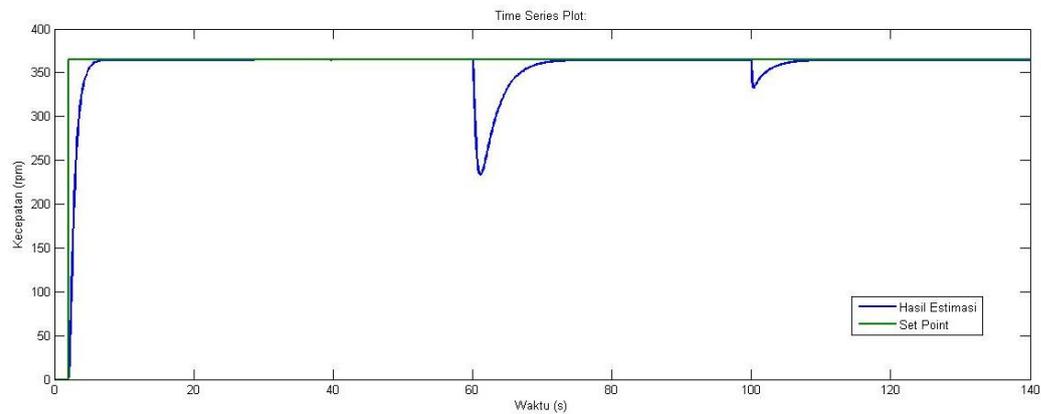
**Gambar 4. 8** Respon dengan  $f_s$  20% dan  $Tl$  0.01 Nm



**Gambar 4. 9** Respon dengan  $f_s$  50% dan  $Tl$  0.01 Nm



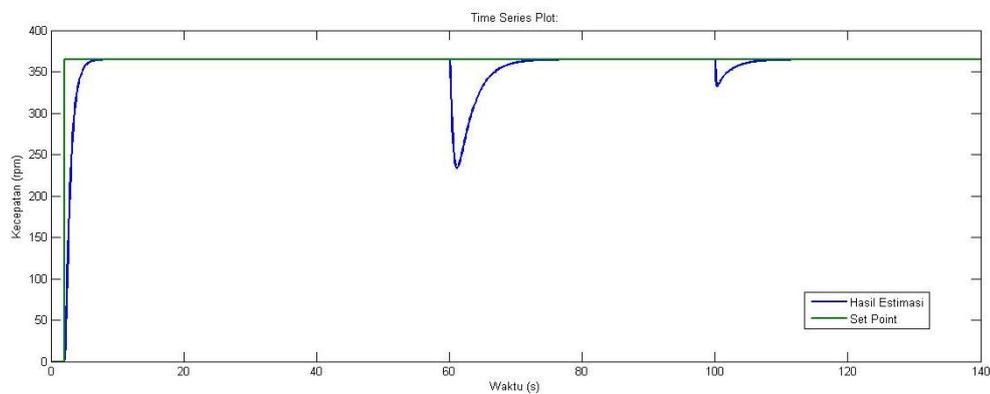
**Gambar 4. 10** Respon dengan  $f_a$  50% dan  $Tl$  0.01 Nm



**Gambar 4. 11** Respon dengan  $f_a$  50% dan  $Tl$  0.01 Nm

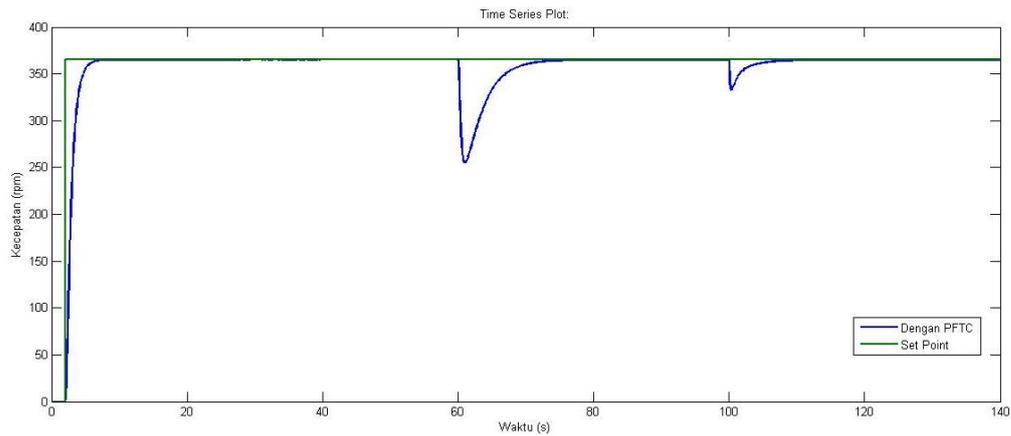
Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan respon sistem ketika diberikan kesalahan pada sensor pada detik ke 30 dan torsi beban pada detik ke 100 dengan masing- masing kesalahan sensor sebesar 20% dan 50% serta torsi beban 0.01.

Sedangkan Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 adalah grafik yang merepresentasikan respon sistem ketika terjadi kesalahan pada aktuator di detik 60 dan torsi beban pada detik ke 100 dengan kesalahan aktuator sebesar 20% dan 50% serta torsi beban 0.01. Berdasarkan kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan kasus satu kesalahan serta diberikan nilai kesalahan yang sama tetapi memiliki respon yang berbeda. Sistem PFTC cenderung lebih dapat mengestimasi kesalahan sensor daripada kesalahan aktuator ketika salah satu komponennya berjalan normal. Hal ini terjadi karena kesalahan sensor sudah diatasi oleh PFTC. Pada komponen aktuator dengan diberikan kesalahan 50%, sistem PFTC masih dapat mengestimasi kesalahan aktuator namun mempunyai nilai *maximum undeshoot* yang besar yaitu 58% sedangkan pada kesalahan aktuator 20% nilai *maximum undershoot* sebesar 12%.

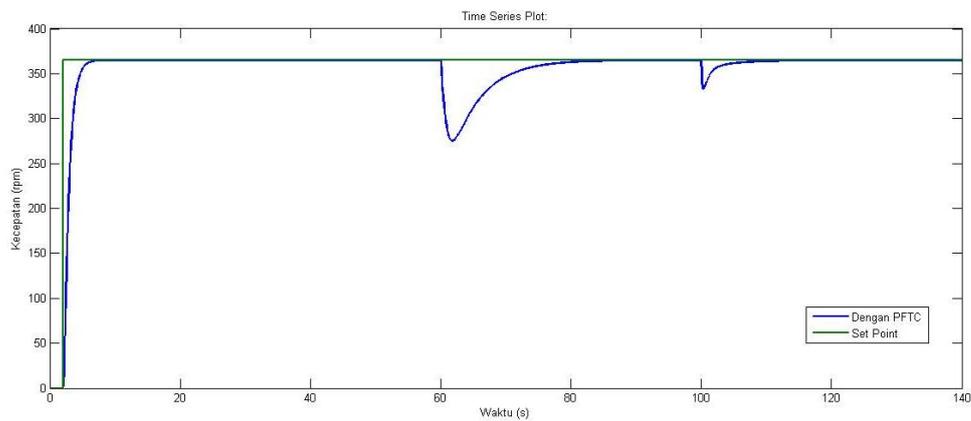


**Gambar 4. 12** Respon dengan  $Fg_a$  0.5  $Fg_s$  0.5  $Tl$  0.01 Nm

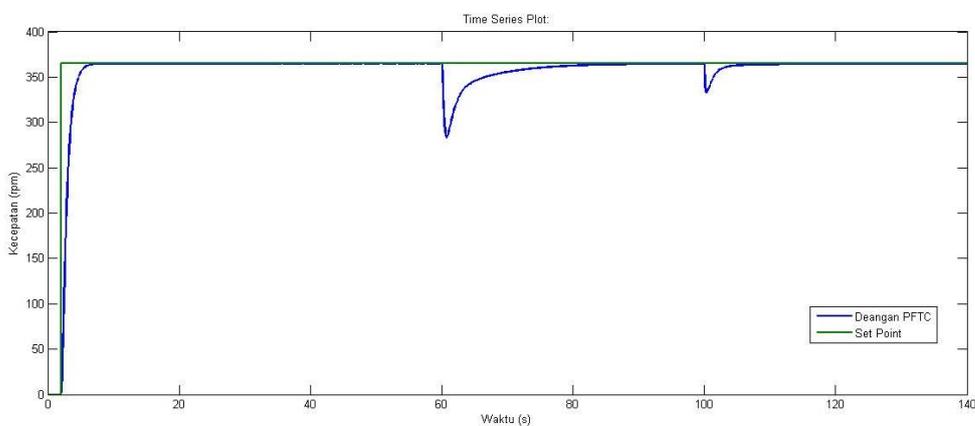
Gambar 4.12 menunjukkan respon sistem ketika diberikan kesalahan pada aktuator, kesalahan sensor dan torsi beban. Besaran kesalahan yang diberikan adalah sebesar 50% pada masing – masing komponen aktuator dan sensor serta 0.01 untuk torsi beban. Kesalahan pada aktuator diberikan pada detik 60, kesalahan sensor diberikan pada detik ke 30 dan torsi beban pada detik ke 100.



**Gambar 4. 13** Respon dengan  $F_{g_a}$  0.2  $F_{g_s}$  0.3  $Tl$  0.01 Nm



**Gambar 4. 14** Respon dengan  $F_{g_a}$  0.2  $F_{g_s}$  0.5  $Tl$  0.01 Nm



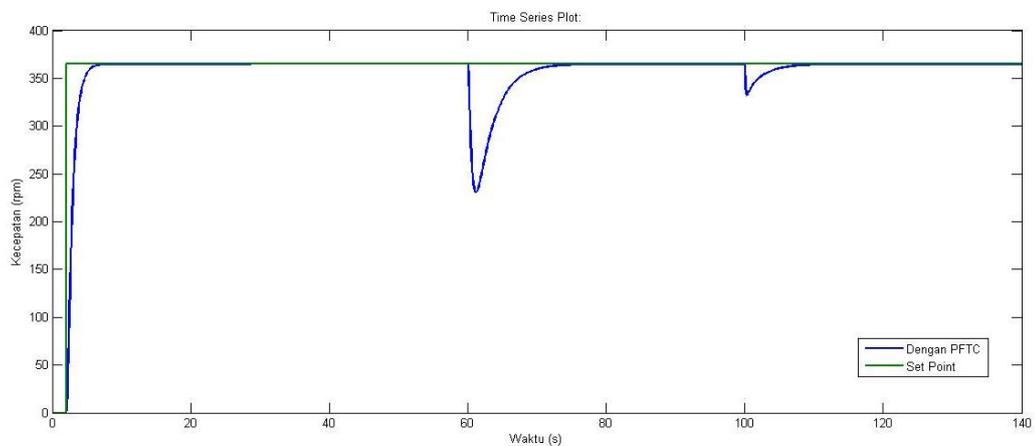
**Gambar 4. 15** Respon dengan  $F_{g_a}$  0.2  $F_{g_s}$  0.8  $Tl$  0.01 Nm

Berdasarkan Gambar 4.13, Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 nilai  $F_{g_a}$  dan  $Tl$  dibuat tetap sedangkan nilai  $F_{g_s}$  diubah-ubah dengan kesalahan aktuator dan

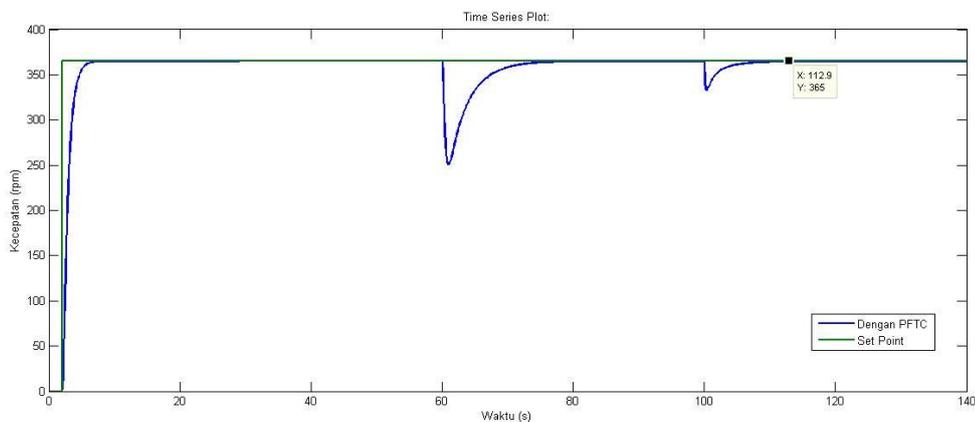
kesalahan sensor masing – masing 50% dan Torsi beban 0.01 Nm. Perubahan nilai gain kesalahan pada sensor ( $Fg_s$ ) yang diberikan adalah sebesar 0,3, 0,5 dan 0,8. Karakteristik respon sistem dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 4. 2** Perbandingan Karakteristik Respon dengan variasi  $f_s$

Sistem PFTC	Parameter			
	Maximum Undershoot	Maximum Overshoot	Peak Time	Settling Time
$Fg_a=0.2;Fg_s=0.3$	29.7%	0%	61.2 s	9.5 s
$Fg_a=0.2;Fg_s=0.5$	24.3%	0%	62.1 s	16.5 s
$Fg_a=0.2;Fg_s=0.8$	21.2%	0%	61 s	18.4 s



**Gambar 4. 16** Respon dengan  $Fg_a$  0.5  $Fg_s$  0.2  $Tl$  0.01 Nm



**Gambar 4. 17** Respon dengan  $Fg_a$  0.8  $Fg_s$  0.2  $Tl$  0.01 Nm

Variasi nilai  $Fg_a$  diamati pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 sedangkan nilai  $Fg_s$  dibuat tetap. Perubahan nilai  $Fg_a$  sebesar 0,3, 0,5, dan 0,8. Secara keseluruhan dengan perubahan nilai  $Fg_s$  mengakibatkan respon yang berbeda. Kesalahan aktuator terjadi pada detik ke 60, sedangkan kesalahan sensor terjadi pada detik ke 30 dengan besar nilai kesalahan masing – masing 50%. Karakteristik respon sistem dapat dilihat pada tabel berikut,

**Tabel 4. 3** Perbandingan Karakteristik Respon dengan variasi  $f_a$

Sistem PFTC	Parameter			
	Maximum Undershoot	Maximum Overshoot	Peak Time	Settling Time
$Fg_a=0.3;Fg_s=0.2$	31.9%	0%	60.9 s	9.4 s
$Fg_a=0.5;Fg_s=0.2$	36.1%	0%	61.4 s	12 s
$Fg_a=0.8;Fg_s=0.2$	30.8%	0%	60.8 s	12.9 s

Berdasarkan hasil respon dengan variasi nilai  $Fg_a$  dan  $Fg_s$ , perubahan salah satu nilai dapat mengakibatkan perubahan grafik respon. Pada Gambar 4.13 nilai  $Fg_s$  sebesar 0,3 mengakibatkan munculnya *maximum undershoot* dibandingkan grafik respon pada Gambar 4.15 dengan nilai  $Fg_s$  sebesar 0,8. Hal tersebut juga terjadi pada gambar 4.16 dengan nilai  $Fg_a$  sebesar 0,5 mengakibatkan munculnya *maximum undershoot* dibandingkan dengan grafik respon pada Gambar 4.17 dengan nilai  $Fg_s$  0.8.

Ketika terjadi *maximum undershoot* pada kesalahan di tengah (kesalahan aktuator) menyebabkan *error* antara model dengan sistem menjadi lebih besar yang dapat berdampak pada estimasi kesalahan pada torsi beban dan waktu *settling time* sistem tersebut. Variasi nilai  $Fg_a$  dan  $Fg_s$  perlu diamati, perubahan nilai dapat mempengaruhi hasil respon satu dengan yang lainnya. Waktu terjadinya kesalahan antara kesalahan sensor dan kesalahan aktuator juga dapat mempengaruhi hasil respon.

Kesalahan *bias* pada sensor kecepatan dapat berupa adanya *zero bias*, yaitu perubahan nilai *zero* kecepatan pada sensor *tachometer*, sedangkan kesalahan *bias*

pada aktuator dapat berupa gangguan yang menghambat tegangan atau arus dari *servoamplifier* untuk masuk kedalam motor DC. Hal tersebut disebabkan karakteristik dari sistem motor DC yang bersifat non linier, sehingga ketika kesalahan aktuator terjadi dapat mengakibatkan *error* antara model dengan sistem menjadi lebih besar. Sehingga berdampak pada estimasi kesalahan sensor dan kesalahan aktuator. Pada Gambar 4.9 ketika kesalahan sensor diberi kesalahan sebesar 50% respon sistem menunjukkan seperti tidak terjadi kesalahan. Hal itu terjadi karena ketika terjadi kesalahan sensor, nilai *error* antara model dengan sistem tidak besar. Selain itu, sistem kontrol *feedback* juga berperan besar dalam mengatasi kesalahan sehingga sistem dapat kembali ke nilai setpoint lebih baik daripada ketika terjadi kesalahan aktuator.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan dari tugas akhir mengenai perancangan *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) pada pengendalian kecepatan sistem motor DC dengan gangguan torsi beban dan kesalahan pada sensor adalah sebagai berikut :

- Sistem *Passive Fault Tolerant Control* untuk pengendalian kecepatan pada sistem motor DC berbeban dirancang menggunakan kontrol *state feedback* dengan *integrator* yang mampu *tracking set point* dengan nilai K (*gain*) sebesar 4.8915, 2.9864 dan 44.7214.
- Sistem kontrol *state feedback* dengan *integrator* sudah mampu mengatasi perubahan torsi beban dengan nilai penambahan beban sebesar 0.01 Nm sampai 0.1Nm untuk nilai *undershoot* dibawah 100%.
- Perancangan sistem PFTC secara simulasi sudah mampu menjaga performansi ketika terjadi perubahan torsi beban dan dapat mengatasi kesalahan aktuator dan sensor. Pada sistem PFTC mempunyai nilai *settling time* yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem tanpa PFTC yaitu sebesar 7.8 detik. Selain itu sistem tanpa PFTC menghasilkan *error steady state* karena tidak dapat kembali ke nilai *setpoint* asli dengan *error steady state* sebesar 57.28%.

#### **5.2 Saran**

Dari tugas akhir ini terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yaitu pengembangan algoritma PFTC dapat dilakukan secara *real time* pada *miniplant* dengan berbagai macam penggunaan strategi kontrol.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

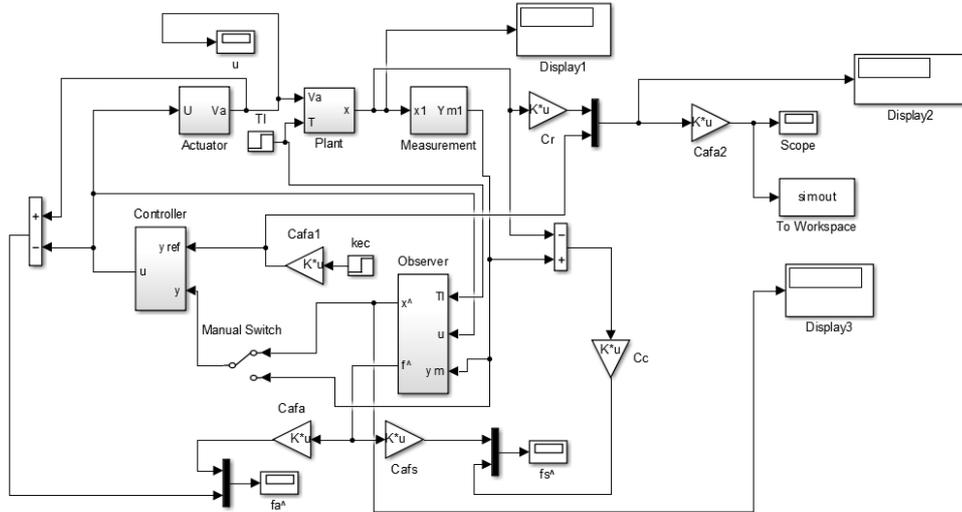
## DAFTAR PUSTAKA

- DC Motor Control*. (2020, Juni 4). Retrieved from Mathworks: <https://www.mathworks.com/help/control/examples/dc-motor-control.html>
- Dybkowski, K. K. (2017). A Fault Tolerant Control Structure for an Induction Motor Drive System. *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 638–647.
- Electric Motors and Variable Frequency Drives Handbook*. (n.d.). (n.d.) (Vol. 4). .
- Fasya, A. Z. (2018). *Perancangan Passive Fault Tolerant Control pada Pengendalian Kecepatan Motor DC dengan Kesalahan Sensor*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Hudaya, C. (2013). *Motor DC*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Karlina, D. L. (2019). *Perancangan Fault Tolerant Control pada Pengendalian Speed Sensorless Motor DC*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Katherin Indriawati, T. A. (2015). Robust Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Linear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Motor System. *Praise Worthy Praise*, 420-417.
- Koksal, M. (2007). Position Control of a Permanent Magnet DC Motor by Model Reference Adaptive Control. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 112-117). IEEE.
- Lee, J. H., & Lyou, J. (2001). Fault Diagnosis And Fault Tolerant Control Of Dc Motor Driving System. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* . Taejon.
- Noura, H. S. (2000). Fault-tolerant control in dynamic systems: application to a winding machine. *IEEE Control Systems Magazine*, 33-49.
- Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control Systems*. USA: Prentice-Hall, Inc.
- Ogata, K. (1997). *Modern Control Engineering 3rd ed*. London: Prentice Hall International.
- Ogata, K. (2004). *System Dynamics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Oliveira, V. (2006). Robust Conroller Enhanced With Design and Implementasi. *IEEE*, 3.

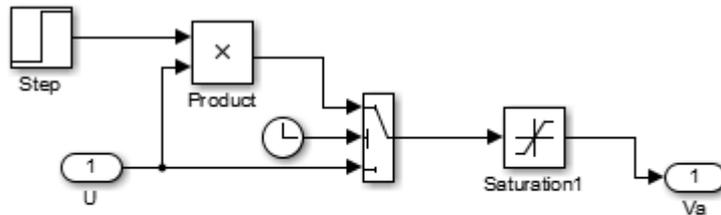
- Rigatos, G. G. (2009). Adaptive fuzzy control of DC motors using state and output feedback. *Electric Power Systems Research*, 1579–1592.
- Sari, R. (2009). *Penalaan Parameter Kontrol PID dengan Metode Heuristic , Aplikasi: Sistem Pengendalian Kecepatan Motor DC*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sebe, N. (2012). Fault Tolerant Servo Systems against Actuator Failures. *IFAC*. Denmark.
- Setyaningrum, D. (2012). *Desain dan Implementasi Model Reference Adaptive Control untuk Pengaturan Tracking Optimal Posisi Motor DC*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sugiono, D. (2015). *Model Matematik Motor DC*. Malang: PPPP TK VEDC.
- Zhang, Y., & Jiang, J. (2003). Bibliographical Review on Reconfigurable Fault - Tolerant Control Systems. *IFAC* (pp. 265–276). Washington DC: Supervision and safety of Technical Processes.

# LAMPIRAN

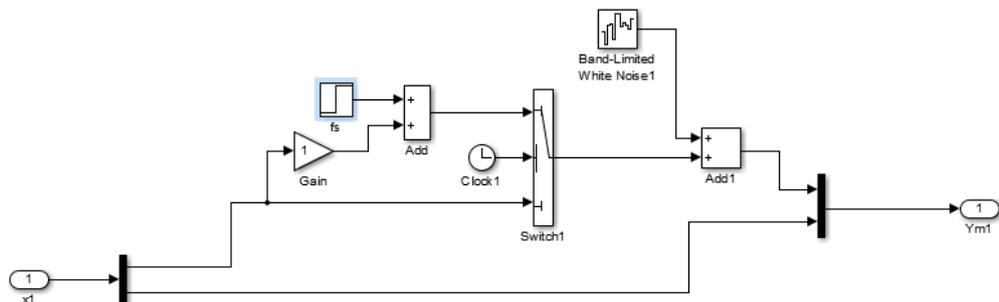
## A. Simulink Sistem pada Pengendalian Kecepatan Motor DC



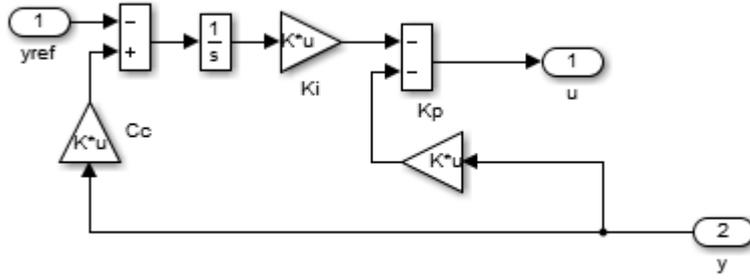
## B. Simulink Aktuator



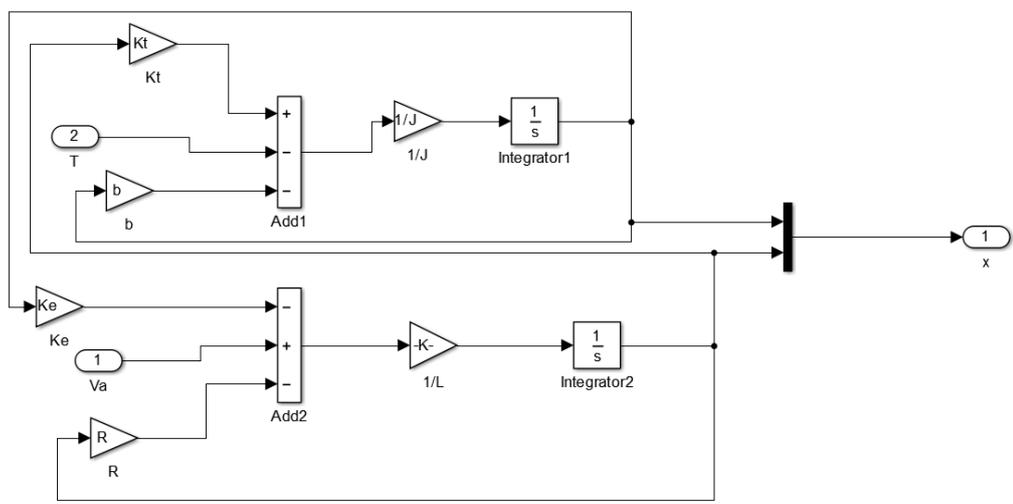
## C. Simulink Measurement



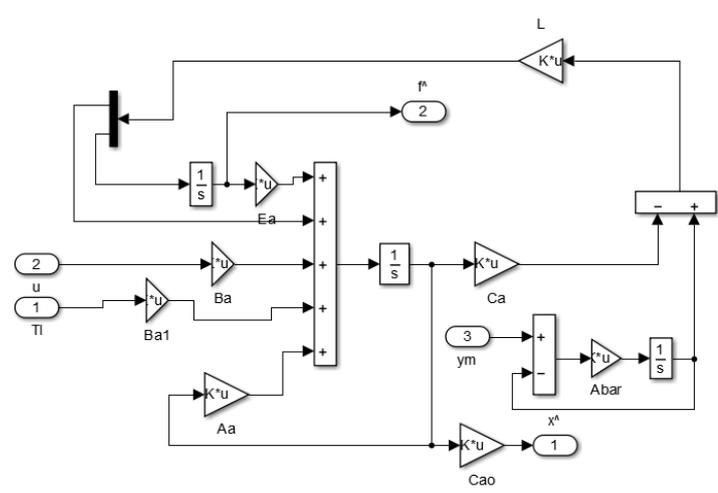
**D. Simulink Controller**



**E. Simulink Plant**



**F. Simulink Observer**



## G. Kode Matlab

```
J = 0.01;
b = 0.1;
Ke = 0.01;
Kt = 0.01;
R = 1;
Lin = 0.5;

A = [-b/J   Ke/J
      -Ke/Lin -R/Lin];
B = [0
      1/Lin];
C = [1   0; 0   1];
Cr = [1   0];
D = 0;

nx=size(A,1);
ny=size(C,1);
nu=size(B,2);
nr=1;      % number of reference inputs

% design State Feedback controller
Ac = [A, zeros(nx,nr); C(1:nr,:), zeros(nr)];
Bc = [B; 0];
Kc = lqr(Ac,Bc,[1 0 0; 0 0.1 0; 0 0 20],0.01);
Kp = Kc(1:2);
Ki = Kc(3);

Dd = [-1/J 0; 0 -0.2];
Dw = [1; 0];
F = [1; 0];
E = [0; 1/Lin];

nw = size(Dw,2);
nd = size(Dd,2);
nfs = size(F,2);
nfa = size(E,2);

Abar = 1*eye(ny);
Aa = [A zeros(nx,ny); Abar*C -Abar*eye(ny)];
Ba = [B; zeros(ny,nu)];
Ea = [E zeros(nx,nfs); zeros(ny,nfa) Abar*F];
%Fa = [zeros(nx,nw); Dw];
%Fa = [Dd; zeros(ny,nd)];
Fa = [Dd zeros(nx,nw); zeros(ny,nd) Abar*Dw];
Ca = [zeros(ny,nx) eye(ny)];
Cao = [C zeros(ny)]; %
Cafa = [ones(1,nfa) zeros(1,nfs)];
%Bo = [zeros(n+p,fa+fs); eye(fa+fs)];
Bo = [Fa zeros(nx+ny,nfa+nfs); zeros(nfa+nfs,nd+nw) eye(nfa+nfs)];
```

```

%%% FTC against actuator and/or sensor failure
Aas=[Aa Ea; zeros(nfa+nfs,nx+ny) zeros(nfa+nfs)];
Cas=[Ca zeros(ny,nfa+nfs)];

R4=eye(ny);
Q4=eye(nx+ny+nr*2)*1e2;
L4=lqr(Aas',Cas',Q4,R4);

L=L4';

Lqr=L4';

addpath inputs101

ws1=tf([0.72,0.3],[1,1e-2]); % weight function for tracking
performance
nn=4; % number of generalized plants
ps=struct('sys',cell(1,nn),'spec','hinf','Fopt',1,'bound',0);

% generalized plant (normal case)
Fga = 1 ; Fgs = 1;
[ta,tb,tc,td]=linmod2('clsysApril17a');
ps(1).sys=ss(ta,tb,tc,td);

% generalized plant (actuator failure case)
Fga = 0.5 ; Fgs = 1;
[ta,tb,tc,td]=linmod2('clsysApril17a');
ps(2).sys=ss(ta,tb,tc,td);

%generalized plant (sensor failure case)
Fga = 1 ; Fgs = 0.5;
[ta,tb,tc,td]=linmod2('clsysApril17a');
ps(3).sys=ss(ta,tb,tc,td);

%generalized plant (both failure case)
Fga = 0.5 ; Fgs = 0.5;
[ta,tb,tc,td]=linmod2('clsysApril17a');
ps(4).sys=ss(ta,tb,tc,td);

lcm=100; % maxum iteration
L_init=ss([],[],[],Lqr);
[gg,ga,Lopt]=multiobjective101(ps,L_init,[],100);

gg
Lopt

L=Lopt.d;

```

## BIODATA PENULIS



HANIFA merupakan nama lengkap penulis dengan nama panggilannya Hanif. Penulis dilahirkan di Banyuwangi 09 April 1998 sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara. Riwayat pendidikan penulis adalah MI Islamiyah Rogojampi (2003-2010), SMP Bustanul Makmur Genteng (2010-2013), SMAN 1 Genteng (2013-2016), Program Studi S1 Teknik Fisika ITS (2016-2020). Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS dengan fokus pada bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol serta mengambil topik penelitian metode *Passive Fault Tolerant Control* yang diaplikasikan pada plant Motor DC.

Pada bulan Juli 2020 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Perancangan *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) Untuk Pengendalian Kecepatan Sistem Motor DC Berbeban. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui email [hanifanirwana@gmail.com](mailto:hanifanirwana@gmail.com)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*