



**TUGAS AKHIR TF-181801**  
**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR**

ZANUAR SURYANULLAH  
NRP. 0231154000012

Dosen Pembimbing  
Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2019

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



FINAL PROJECT TF-181801

***DESIGN OF FAULT TOLERANT CONTROL  
(FTC) ON REGENERATIVE ANTI-LOCK  
BRAKING SYSTEM WITH BLDC MOTOR OF  
ELECTRIC CAR WITH FAULTS ON SENSOR***

ZANUAR SURYANULLAH  
NRP. 0231154000012

Supervisors

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

Moh. Khamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC

DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2019

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Zanuar Suryanullah

NRP : 0231154000012

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul ***“PERANCANGAN FAULT TOLERANT CONTROL (FTC) PADA REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR”*** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Surabaya, 29 Juli 2019

Yang membuat pernyataan,



**Zanuar Suryanullah**  
**NRP. 0231154000012**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)*  
PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*  
DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL  
LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

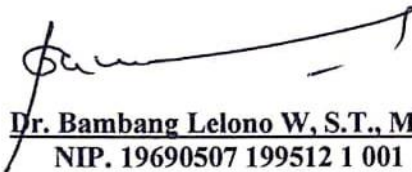
Oleh :


ZANUAR SURYANULLAH  
NRP. 0231154000012

Surabaya, 29 Juli 2019  
Mengetahui dan Menyetujui

Pembimbing I

Pembimbing II

  
Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T.  
NIP. 19690507 199512 1 001

  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC

Kepala Departemen,  
Departemen Teknik Fisika FTI-ITS  
  
Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D  
NIP. 19780902 200312 1 002  
DEPARTEMEN  
TEKNIK FISIKA

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Program Studi S-1 Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industry  
Institute Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ZANUAR SURYANULLAH**

Nrp. 0231154000012

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T. .... (Pembimbing I)
2. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC. .... (Pembimbing II)
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. .... (Ketua Penguji)
4. Ir. Ya'umar, M.T ..... (Penguji I)

**SURABAYA**  
**2019**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)*  
PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*  
DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL  
LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR**

**Nama Mahasiswa** : ZANUAR SURYANULLAH  
**NRP** : 0231154000012  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC

**ABSTRAK**

Penelitian dan pengembangan teknologi pada mobil listrik semakin pesat, termasuk dalam teknologi pengereman. Salah satu teknologi pengereman yang sudah sedang dikembangkan adalah pengereman *Regenerative* sebagai *Anti-Lock Braking System*. Seiring berjalannya waktu komponen pada sistem pengereman akan terjadi kerusakan, salah satunya adalah komponen sensor. Kerusakan yang terjadi pada sensor umumnya menyebabkan sensor mengalami kesalahan pembacaan berupa bias atau kehilangan sensitivitasnya. Kesalahan pembacaan sensor merupakan hal yang tidak diinginkan karena menyangkut keselamatan penumpang dan orang lain. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini dibuatlah sebuah rancangan *Fault Tolerant Control* pada *Regenerative Braking* sebagai *ABS* dengan kesalahan pada sensor. Dari perancangan yang dilakukan didapatkan hasil FTC mampu mengestimasi kesalahan sistem dengan karakteristik respon *max overshoot* 4,75%, *rise time* 0,0127 detik, dan *settling time* 0,2873 detik. FTC yang telah dirancang mampu mempertahankan kestabilan sistem dengan kesalahan bias pada sensor hingga 50 rad/s dan kesalahan sensitivitas hingga 50%.

**Kata Kunci** : *Anti-Lock Braking System, Fault Tolerant Control, Pengereman Regenerative, Sensor.*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**DESIGN OF FAULT TOLERANT CONTROL (FTC) ON  
REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM WITH  
BLDC MOTOR OF ELECTRIC CAR WITH FAULTS ON  
SENSOR**

**Student's Name** : ZANUAR SURYANULLAH  
**NRP** : 0231154000012  
**Departement** : Teknik Fisika FTI - ITS  
**Supervisors** : Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafiq, S.T., M.Sc. DIC

**ABSTRACT**

*Research and development of electric car technology increasing rapidly, including braking technology. One of braking technology that being developed is Regenerative Braking as Anti-Lock Braking System. Reliability of braking component will be decrease over time and will damage the component, one of damage that can be occurred in system is sensor damage. The damage occurred in sensor usually causes the sensor fail to measure because of bias error or loss of sensitivity. Sensor fault is undesirable because involves the safety of people. Because of that, this final project created a design of Fault Tolerant Control on Regenerative Braking as Anti-Lock Braking System with sensor fault. From the design, FTC was able to estimate system error with characteristic response : 4,75% max overshoot, 0.0127 s rise time, and 0,2873 s settling time. The FTC has been able to maintain stability of the system with up to 50 rad/s bias error of sensor and up to 50% lost of sensitivity sensor.*

**Keyword** : *Anti-Lock Braking System, Fault Tolerant Control, Regenerative Braking, Sensor.*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **“Perancangan *Fault Tolerant Control (FTC)* pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* dengan Motor BLDC untuk Aplikasi Mobil Listrik dengan Kesalahan pada Sensor”**.

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

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Bapak Dr. Bambang Lelono W., S.T, M.T. dan bapak Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama mengerjakan tugas akhir.
3. Ibu Katherin Indriawati selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama mengerjakan tugas akhir.
4. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (bapak Sumber dan ibu Emi Arifah) dan keluarga atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Ananta Paramananda selaku teman seperjuangan dalam mengerjakan tugas akhir, serta TA-wan Laboratorium Fisika Rekayasa.
7. Izdihar Salsabillah selaku *mood booster* yang selalu menemani dan memberikan dukungan.
8. Seluruh teman – teman asisten Laboratorium Pengukuran Fisis 18/19 (Zul, Kevin, Yesika, Bella, Gikano, Siti, Aji, Lathif, serta adik – adik 2016)
9. Seluruh teman – teman *Transcendent Frontier*, terima kasih untuk semuanya.

10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 25 Juli 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LEMBAR PENGESAHAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumuaan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	7
2.1 <i>Anti-Lock Braking System</i> .....	7
2.2 <i>Motor Brushless Dirrect Current</i> .....	9
2.3 <i>Regenerative Braking System</i> .....	12
2.4 Kontroler PID.....	13
2.5 <i>Hysterisis Control</i> .....	14
2.6 <i>Fault Tolerant Control System (FTCS)</i> .....	14
2.7 <i>Observer</i> .....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Pemodelan <i>Quarter Car Model</i> .....	23
3.2 Pemodelan <i>Wheel Speed Sensor</i> .....	25
3.3 Perancangan Kontroler.....	25
3.4 Perancangan <i>Observer</i> .....	26
3.5 Perancangan Sistem <i>Fault Tolerant Control</i> untuk Kesalahan pada Sensor.....	30
3.6 Pengujian Sistem <i>Fault Tolerant Control</i> .....	31
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	33

4.1	Uji Pemodelan <i>Regenerative Braking</i> .....	33
4.2	Uji Sistem <i>Closed Loop</i> .....	35
4.3	Hasil Estimasi <i>Observer</i> .....	37
4.4	Pengujian FTC dengan Kesalahan Bias.....	39
4.5	Pengujian FTC dengan Kesalahan Sensitivitas .....	46
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	55
5.1	Kesimpulan .....	55
5.2	Saran .....	55
	DAFTAR PUSTAKA.....	57
	LAMPIRAN.....	61

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Koefisien gesek antara roda-jalan terhadap slip rasio pada berbagai jenis jalan .....	8
<b>Gambar 2.2</b>	Ilustrasi motor BLDC .....	9
<b>Gambar 2.3</b>	Six Step Inverter pada BLDC .....	10
<b>Gambar 2.4</b>	Mode operasi pada motor BLDC.....	12
<b>Gambar 2.5</b>	Blok Diagram Kontroler PID.....	13
<b>Gambar 2.6</b>	Histerisis kontrol pada controller BLDC .....	14
<b>Gambar 2.7</b>	Struktur FTCS .....	15
<b>Gambar 2.8</b>	Skema <i>Reconfigurable Controller</i> .....	16
<b>Gambar 2.9</b>	Diagram blok sistem dan <i>observer</i> .....	17
<b>Gambar 2.10</b>	<i>Extended State Observer</i> .....	19
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian .....	22
<b>Gambar 3.2</b>	Gaya pengereman yang bekerja pada mobil .....	23
<b>Gambar 3.3</b>	Diagram blok pengendalian sistem.....	25
<b>Gambar 3.4</b>	Struktur <i>Observer</i> .....	27
<b>Gambar 3.5</b>	Diagram blok sistem dengan <i>FTC</i> .....	30
<b>Gambar 4.1</b>	Respon slip rasio pada <i>open loop</i> .....	33
<b>Gambar 4.2</b>	Kecepatan mobil dan roda pada <i>open loop</i> .....	34
<b>Gambar 4.3</b>	Pengujian SoC dari baterai .....	34
<b>Gambar 4.4</b>	Respon RPM roda pada <i>slave controller</i> .....	35
<b>Gambar 4.5</b>	Respon slip rasio sistem <i>closed loop</i> .....	36
<b>Gambar 4.6</b>	Kecepatan roda dan kecepatan mobil pada sistem <i>closed loop</i> .....	37
<b>Gambar 4.7</b>	Perbandingan kesalahan aktual dengan kesalahan estimasi <i>observer</i> .....	38
<b>Gambar 4.8</b>	Respon observer dengan kesalahan yang berubah	39
<b>Gambar 4.9</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s .....	40
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s.....	40
<b>Gambar 4.11</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s .....	41
<b>Gambar 4.12</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s.....	41

<b>Gambar 4.13</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s .....	42
<b>Gambar 4.14</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s.....	43
<b>Gambar 4.15</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s .....	44
<b>Gambar 4.16</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s.....	44
<b>Gambar 4.17</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s .....	45
<b>Gambar 4.18</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s.....	46
<b>Gambar 4.19</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 1% .....	47
<b>Gambar 4.20</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 1% .....	47
<b>Gambar 4.21</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5% .....	48
<b>Gambar 4.22</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5% .....	49
<b>Gambar 4.23</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10% .....	50
<b>Gambar 4.24</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10% .....	50
<b>Gambar 4.25</b>	Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25% .....	51
<b>Gambar 4.26</b>	Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25% .....	51
<b>Gambar 4.27</b>	Slip rasio dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 50% .....	52
<b>Gambar 4.28</b>	Kecepatan roda dan mobil dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 50% .....	53
<b>Gambar 4.29</b>	Slip rasio dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75% .....	53
<b>Gambar 4.30</b>	Kecepatan roda dan mobil dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75% .....	54

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Parameter Friksi Jalan .....	8
<b>Tabel 2.2</b>	Kondisi saklar six step inverter .....	10
<b>Tabel 3.1</b>	Parameter gaya yang bekerja saat pengereman .....	24
<b>Tabel 3.2</b>	Parameter koefisien gesekan pada aspal kering .....	24
<b>Tabel 3.3</b>	Parameter kontroler PI cascade .....	26
<b>Tabel 3.4</b>	Parameter motor BLDC .....	29
<b>Tabel 4.1</b>	Performansi <i>slave controller</i> .....	36
<b>Tabel 4.2</b>	Performansi <i>closed loop</i> sistem .....	37
<b>Tabel 4.3</b>	Performansi <i>Observer</i> ketika estimasi kesalahan .....	38
<b>Tabel 4.4</b>	Karakteristik respon sistem dengan bias 1 rad/s .....	41
<b>Tabel 4.5</b>	Karakteristik respon sistem dengan bias 5 rad/s .....	42
<b>Tabel 4.6</b>	Karakteristik respon sistem dengan bias 10 rad/s .....	43
<b>Tabel 4.7</b>	Karakteristik respon sistem dengan bias 25 rad/s .....	45
<b>Tabel 4.8</b>	Karakteristik respon sistem dengan bias 50 rad/s .....	46

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di era yang modern ini, kebutuhan manusia akan mobilitas semakin tinggi. Kebutuhan mobilitas tersebut dipenuhi dengan perkembangan moda transportasi, khususnya mobil. Pada umumnya manusia sekarang masih menggunakan mobil dengan bahan bakar fosil [1]. Namun, besarnya jumlah mobil yang beredar di masyarakat juga diikuti dengan masalah yang serius. Polusi udara, pemanasan global, sumber energi fosil yang tidak bisa diperbarui merupakan contoh dampak buruk yang dihasilkan dari tingginya pertumbuhan kendaraan. Maka dari itu dilakukan pengembangan dan penelitian yang lebih lanjut untuk meminimalisir dampak negatif yang ditimbulkan [2] [3].

Salah satu perkembangan terkait upaya meminimalisir dampak negatif dari mobil berbahan bakar fosil adalah dengan pembuatan mobil berbasis listrik, baik *hybrid* ataupun *Electric Vehicle*. Mobil listrik merupakan kendaraan yang digerakkan oleh motor listrik, dan motor tersebut ditenagai oleh daya yang tersimpan dalam baterai [4]. Mobil listrik dapat memenuhi tuntutan mobilitas yang lebih ramah lingkungan dikarenakan mobil listrik tidak mengeluarkan emisi gas buang. Selain itu, mobil listrik juga memiliki banyak keuntungan, antara lain tidak menimbulkan suara, lebih efisien energy, maintenance yang lebih jarang karena hanya menggunakan sedikit sekali komponen yang bergerak didalamnya [5].

Dalam mobil listrik ataupun mobil konvensional, terdapat beberapa sistem sistem yang saling berhubungan satu sama lain. Salah satu sistem penting dalam mobil, baik mobil listrik maupun konvensional adalah sistem pengereman [6]. Sistem pengereman mempunyai fungsi untuk mengurangi kecepatan dari mobil sekaligus mempertahankan kontrol pengemudi terhadap kendaraan. Jika sistem pengereman ini tidak berfungsi dengan baik maka dapat terjadi kecelakaan yang bisa membahayakan nyawa dari manusia. Kegagalan yang sering terjadi dalam pengereman

adalah terjadinya *lock* pada roda kendaraan diakibatkan gaya yang diberikan pada roda terlalu besar ketika pengereman di permukaan jalan yang licin. Terjadinya *lock* ini mengakibatkan mobil tergelincir dan membuat pengereman menjadi tidak efektif dan pengemudi kehilangan kontrol dari mobil. Oleh sebab itu untuk mengurangi terjadinya *lock* diaplikasikan sebuah *Anti-Lock Braking System* pada mobil [7].

Ketika pengereman terjadi, sebagian besar energi terbuang menjadi panas akibat gesekan antara kampas rem dengan roda [6]. Permasalahan energi yang terbuang ini menjadi permasalahan penting terutama pada mobil listrik. Hal ini dikarenakan pada mobil listrik, energi yang tersimpan dalam baterai sangatlah terbatas [8]. Kendala yang muncul ini akan sangat terasa akibatnya apabila mobil listrik digunakan untuk menempuh jarak yang jauh. Oleh karena itu dibuat sebuah sistem regenerasi energi saat pengereman (*Regenerative Braking System*). Pada sistem ini, saat terjadi pengereman energi kinetik dari mobil listrik tidak berubah menjadi panas yang terbuang, melainkan dikonversi menjadi energi listrik untuk disimpan lagi kedalam baterai sehingga efisiensi energi dari kendaraan listrik bertambah [9].

Salah satu komponen yang penting dalam sistem adalah sensor. Kesalahan pada sensor sangat mungkin terjadi karena sensor merupakan komponen sistem yang langsung berhubungan dengan lingkungan [10]. Sensor diharapkan tidak mengalami kerusakan atau kesalahan pembacaan, karena sensor dalam *Regenerative Anti-Lock Braking System* ini memiliki peran yang sangat penting sebagai pemberi informasi kepada kontroler.

Satu dari sekian banyak sensor yang tertanam pada sistem *Anti-Lock Braking System* adalah sensor *hall effect*. Sensor *hall effect* digunakan untuk membaca kecepatan putaran dari roda serta kecepatan kendaraan. Kecepatan yang telah terbaca dari sensor ini kemudian akan diproses oleh kontroler untuk menentukan berapakah arus yang harus dikeluarkan kontroler untuk menggerakkan motor. Apabila sensor *hall effect* ini mengalami kegagalan dalam pembacaan kecepatan roda akan menyebabkan kegagalan kontrol untuk menentukan aksi kontrol dan akan



berakibat pada kegagalan sistem secara total sehingga *Regenerative Anti-Lock Braking System* tidak dapat bekerja dengan optimal.

Untuk mencegah kesalahan pada sensor berakibat fatal pada sistem, maka diperlukan perancangan sistem kendali yang mampu mentoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen secara otomatis. Sistem ini dinamakan *Fault Tolerance Control System* (FTCS). Oleh karena itu, tugas akhir ini dilakukan untuk merancang *Fault Tolerant Control (FTC)* pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* dengan Motor BLDC untuk aplikasi mobil listrik dengan kesalahan pada sensor.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh kesalahan sensor terhadap *Regeneratif Anti-Lock Braking System* dengan motor BLDC?
- Bagaimana mengatasi kesalahan sensor terhadap *Regeneratif Anti-Lock Braking System* dengan motor BLDC?

## 1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, tujuan dari tugas akhir ini yaitu merancang *Fault Tolerant Control* (FTC) pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* dengan Motor BLDC untuk aplikasi mobil listrik dengan kesalahan pada sensor.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini diantaranya:

- Plant yang digunakan yaitu sistem pengereman *regenerative* sebagai ABS dalam *Quarter Car Model* (QCM).

- Kesalahan yang diberikan pada sistem berupa kesalahan bias dan sensitifitas sensor.
- Mekanisme kontrol yang digunakan pada ABS dan kecepatan motor adalah kontrol PI.
- Jenis jalan yang digunakan adalah aspal kering.
- Slip ratio mobil dijaga pada nilai 0,2 sesuai dengan grafik *slip ratio-friction coefficient*.
- Simulasi pengereman mobil pada jalan lurus dan datar.
- Jenis motor yang digunakan adalah motor BLDC (*Brushless Motor Direct Current*).
- Komponen pada motor dan inverter dianggap ideal
- Sistem charging baterai hanya menggunakan diode untuk menyearahkan tegangan balik dari motor tanpa adanya kontrol arus dan voltase.

### 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab I ini terdiri dari latar belakang dilakukannya penelitian pada tugas akhir, batasan masalah, rumusan masalah, dan tujuan dari penelitian yang dilakukan, serta sistematika laporan.

- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori dari *regenerative braking*, *anti-lock braking system*, *Brushless DC Motor*, kontrol PID, observer, dan fault tolerant control.

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan dalam bentuk diagram alir beserta penjabaran dari metode dan langkah-langkah dalam penelitian yang telah dilakukan.

- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**  
Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan sistem *Fault Tolerant Control* dibandingkan dengan hasil sistem tanpa FTC.
- **BAB V PENUTUP**  
Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB II TEORI PENUNJANG

### 2.1 *Anti-Lock Braking System*

*Anti-lock braking system* adalah salah satu sistem keamanan yang telah diterapkan dalam dunia otomotif. Sistem keamanan pada pengereman ini bertujuan untuk mencegah terjadinya *wheels lock* atau roda terkunci pada saat dilakukan pengereman secara mendadak. Ketika terjadi *wheels lock* maka biasanya pengemudi kehilangan kendali dan ban menjadi tidak normal sehingga kecelakaan tidak dapat dihindari. Tujuan dari diterapkannya sistem ini antara lain mengurangi *stopping distance* dan meningkatkan stabilitas mobil serta mempertahankan kontrol pengemudi terhadap mobil ketika terjadi pengereman mendadak.

Pengereman pada kendaraan sangat dipengaruhi oleh gesekan yang terjadi antara roda dengan permukaan jalan. Gaya gesek yang terjadi antara roda dan jalan ini sangat dipengaruhi oleh koefisien gesek yang besarnya bergantung pada slip rasio dari kendaraan. Selama terjadi pengereman, slip rasio dari kendaraan didapat dari persamaan 2.1

$$\lambda = \frac{v - \omega R}{v} \quad (2.1)$$

Dimana :  $\omega$  = Kecepatan angular roda (rad/s)

$R$  = Jari – jari roda (m)

$v$  = Kecepatan kendaraan (m/s)

Hubungan antara slip rasio yang didapat dari persamaan (2.1) dengan koefisien gesek dapat dituliskan sebagai berikut

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.2)$$

Dimana:  $C_1$  = nilai maksimum kurva

$C_2$  = koefisien bentuk kurva

$C_3$  = perbedaan nilai maksimum kurva dan  $\lambda = 1$

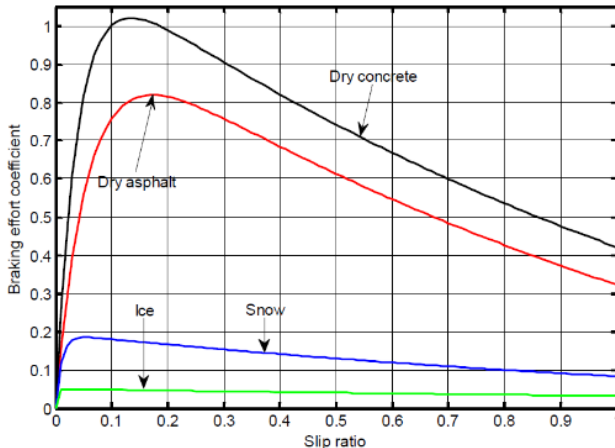
$C_4$  = koefisien karakteristik jalan

Nilai dari parameter  $C_1, C_2, C_3,$  dan  $C_4$  didapat berdasarkan jenis jalan. Contoh parameter friksi beberapa jenis jalan ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Parameter Friksi Jalan [11]

Kondisi Jalan	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
Aspal Basah	1.029	17.16	0.523	0.03
Basah	1.1973	25.168	0.5373	0.03
Salju	0.1946	94.129	0.0646	0.03
Es	0.05	306.39	0	0.03

Apabila nilai keempat parameter berbeda pada table (2.1) diatas diaplikasikan pada persamaan (2.2). maka akan terbentuk kurva antara slip rasio dengan koefien gesek seperti pada Gambar 2.1.

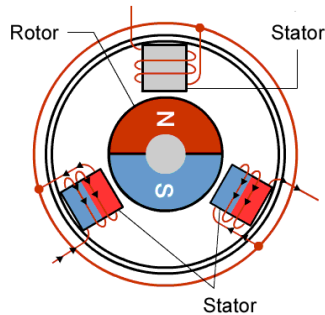
**Gambar 2.1** Koefisien gesek antara roda-jalan terhadap slip rasio pada berbagai jenis jalan [11]

Gambar 2.1 menunjukkan nilai slip rasio pada berbagai permukaan jalan sangat berpengaruh terhadap gaya pengereman yang terjadi pada kendaraan. Nilai slip rasio 0,2 merupakan nilai yang optimal untuk berbagai permukaan jalan. Oleh sebab itu, ABS mengatur agar nilai slip rasio konstan pada nilai 0,2 agar gaya gesek yang dihasilkan mencapai nilai maksimalnya.

## 2.2 Motor *Brushless Direct Current*

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) adalah sistem penggerak dengan sumber arus listrik DC. BLDC motor sangat banyak digunakan pada otomotif, *aerospace*, dan sistem otomasi pada Industri. Seperti namanya, BLDC motor tidak memiliki sikat sebagai *commutator*. BLDC memiliki beberapa kelebihan dibanding brushed DC motor dan motor induksi, antara lain: karakteristik torsi-kecepatan yang lebih baik, efisiensi tinggi, range kecepatan yang lebih tinggi, serta lebih sedikit *noise*.

Ilustrasi dari irisan melintang motor BLDC seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.2 berikut:

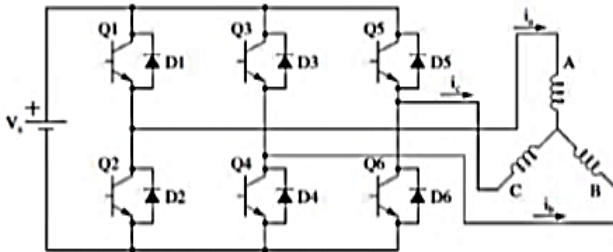


**Gambar 2.2** Ilustrasi motor BLDC [12]

Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, yakni, *rotor*, bagian yang bergerak, yang terbuat dari permanen magnet dan *stator*, bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada implementasinya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter* 3 fasa. Tujuan dari pemberian tegangan 3 fasa pada *stator* BLDC adalah menciptakan medan magnet yang berubah ubah pada *stator* untuk menarik magnet *rotor*.

Tanpa adanya brush pada motor BLDC, diperlukan komutasi yang tepat untuk menjaga torsi dan kecepatan motor konstan. Komutasi pada motor BLDC dikendalikan oleh kontroler secara

elektronik. Kontroler menentukan kumparan mana yang akan dialiri arus dengan referensi dari sensor *hall effect* yang terdapat pada stator. Sensor *hall effect* ini membaca posisi rotor dengan cara mengirim sinyal *high* atau *low* yang menandakan lokasi dari kutub magnet yang dimiliki rotor tersebut [13]. Aliran arus yang menuju ke motor diatur oleh inverter yang menerima perintah dari kontroler. Jenis inverter yang digunakan untuk mengatur BLDC adalah jenis six step inverter yang ditunjukkan pada Gambar 2.3



**Gambar 2.3** Six Step Inverter pada BLDC [14]

Komutasi six step inverter mengatur agar tiap kondisi hanya terdapat dua kumparan aktif dengan arah arus yang saling berkebalikan. Satu putaran motor terdiri dari 6 step, yang berarti masing – masing step aktif tiap  $60^\circ$ . Skema switching komutasi ditunjukkan pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Kondisi saklar six step inverter [14]

Posisi rotor (derajat)	H1	H2	H3	Switch on	Phase		
					A	B	C
0-60	1	0	0	Q1 Q4	+	-	0
60-120	1	1	0	Q1 Q6	+	0	-
120-180	0	1	0	Q3 Q6	0	+	-
180-240	0	1	1	Q3 Q2	-	+	0
240-300	0	0	1	Q5 Q2	-	0	+
300-360	1	0	1	Q5 Q4	0	-	+

Model matematis dari motor BLDC dapat ditarik dari skematik motor yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 dengan beberapa asumsi untuk mengurangi kompleksitas dari BLDC.



Asumsi yang dibuat antara lain: Jumlah lilitan masing – masing fasa sama, tidak ada saturasi magnetic, tidak ada losses dari hysteresis, induktansi mutual diabaikan, dan reaksi dari armature diabaikan [15]. Sehingga didapatkan pemodelan dari BLDC:

$$\begin{cases} V_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (2.3)$$

Dengan :  $V_a, V_b, V_c$  = Voltase tiap fasa (V)

$i_a, i_b, i_c$  = Arus stator tiap fasa (i)

$e_a, e_b, e_c$  = back EMF tiap fasa (V)

L = induktansi tiap fasa (H)

R = resistansi tiap fasa ( $\Omega$ )

Back Emf dari BLDC berbeda fasa sebesar 120 pada masing – masing fasa nya, dan dapat dinyatakan dalam persamaan (2.4)

$$\begin{cases} e_a = K_e f(\theta_e) \omega_m \\ e_b = K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \omega_m \\ e_c = K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \omega_m \end{cases} \quad (2.4)$$

Dengan:  $\omega_m$  = rotor speed (rad/s)

$K_e$  = konstanta *back emf* (V/rad.s<sup>-1</sup>)

$f(\theta_e)$  = fungsi trapezoidal

$\theta_e$  = posisi sudut rotor (rad)

Salah satu parameter yang penting dari sebuah motor BLDC adalah besarnya torsi elektromagnetik dari motor. Dengan menggunakan penyederhanaan yang telah disebutkan sebelumnya, secara matematis torsi elektromagnetik dari BLDC dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2.5)$$

atau

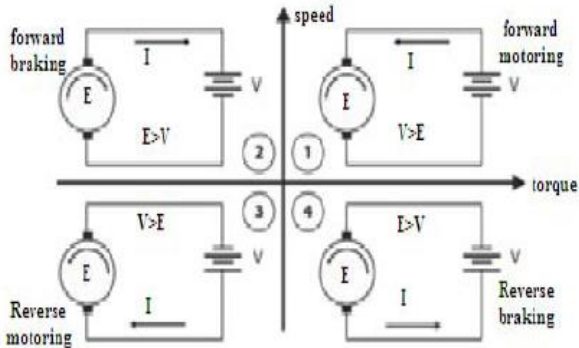
$$T_e = K_t \left[ f(\theta_e) i_a + f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.6)$$

Dengan :  $T_e$  = torsi elektromagnetik (Nm)

$K_t$  = konstanta torsi (Nm/A)

### 2.3 Regenerative Braking System

Brushless DC motor memiliki empat mode operasi atau biasa disebut dengan *four quadrant operation* seperti pada Gambar 2.4. Mode operasi pada motor BLDC ini berdasarkan kecepatan dan torsi beban dari motor. Ketika motor beroperasi pada kuadran pertama dan ketiga, motor berada dalam mode motoring, yaitu motor melakukan akselerasi maju (kuadran 1) atau akselerasi mundur (kuadran 3). Proses motoring ini mengharuskan tegangan pada sumber memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *back emf* dari motor. Sedangkan pada kuadran kedua dan keempat, motor terjadi pengereman. Pada kondisi ini *back emf* dari motor lebih besar daripada tegangan sumber [16].



**Gambar 2.4** Mode operasi pada motor BLDC [17]

*Regenerative braking system* adalah suatu metode pengereman dimana energi mekanik akibat putaran motor akan dikonversi menjadi energi listrik dan dikembalikan ke baterai. Pengereman regeneratif dapat diwujudkan ketika motor dalam keadaan deselerasi. Pada saat torsi motor bernilai positif, maka motor akan mengambil daya dari baterai dan ketika torsi motor bernilai negatif, maka motor akan bekerja layaknya generator yaitu mengisi daya dari baterai. Pengisian baterai tersebut disebabkan oleh adanya tegangan balik pada motor atau dikenal dengan *back EMF* (*electromagnetic force*). Untuk menghindari kerusakan pada

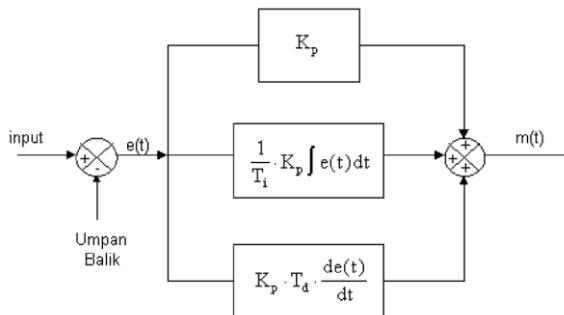
baterai akibat arus yang besar dari *back EMF* maka diperlukan pengendalian pada proses pengereman regeneratif [18].

## 2.4 Kontroler PID

Didalam suatu sistem kontrol kita mengenal adanya beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral dan aksi kontrol derivative. Masing-masing aksi kontrol ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kontrol proporsional mempunyai keunggulan rise time yang cepat, aksi kontrol integral mempunyai keunggulan untuk memperkecil error, dan aksi kontrol derivative mempunyai keunggulan untuk memperkecil error atau meredam overshoot/undershoot. Untuk itu agar kita dapat menghasilkan output dengan risetime yang cepat dan error yang kecil kita dapat menggabungkan ketiga aksi kontrol ini menjadi aksi kontrol PID. Algoritma pengendalian PID dirumuskan sebagai :

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.7)$$

Dengan  $y$  adalah variable proses yang diukur,  $r$  adalah variable referensi dan  $u$  adalah sinyal control dan  $e$  adalah kesalahan control. Sehingga  $e = y_{sp} - y$ .



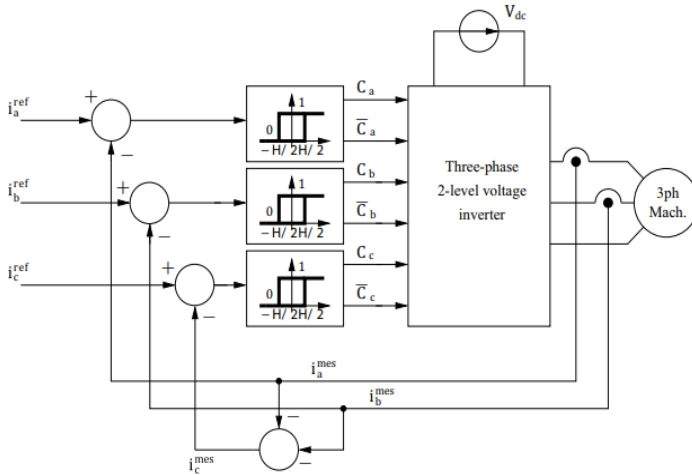
**Gambar 2.5** Blok Diagram Kontroler PID [19]

Parameter pengontrol dari PID adalah gain proporsional  $K$ , waktu *integral*  $T_i$ , dan waktu turunan  $T_d$ . Seperti pada persamaan (2.7) dan Gambar 2.5 sinyal control PID merupakan penjumlahan dari 3 yaitu : P-term (sebanding dengan kesalahan), I (sebanding

dengan *integral* dari kesalahan), dan D-term (sebanding dengan turunan dari kesalahan).

## 2.5 Hysteresis Control

*Hysteresis control* adalah salah satu tipe dari *non-optimal* kontrol. Salah satu contoh penggunaan kontroler ini adalah kontroler arus pada *driver* motor BLDC dengan struktur yang ditunjukkan pada Gambar 2.6



**Gambar 2.6** Histerisis kontrol pada controller BLDC [20]

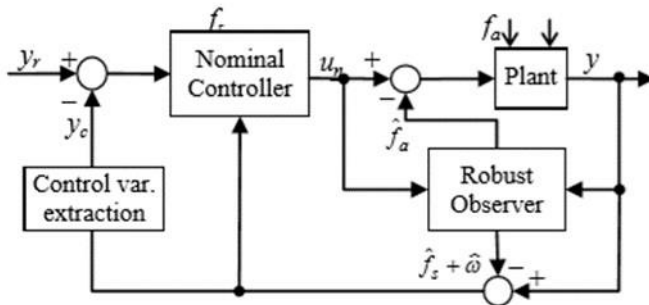
Kontroler histerisis berperilaku secara intuitif, menerapkan fungsi switching 1 untuk menaikkan arus yang dibutuhkan oleh line dan nilai 0 untuk mengurangi arus apabila arus yang melewati telah melebihi set point yang ditentukan. Metode kontrol ini sangatlah dinamis, dengan *ripplr* arus yang dihasilkan bergantung pada lebar hysteresis dan frekuensi switching meningkat ketika *bandwidth* histerisis diperkecil. [20]

## 2.6 Fault Tolerant Control System (FTCS)

Dalam suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen yang saling bekerja sama, terdapat potensi kegagalan atau kerusakan dari masing – masing komponen penyusun sistem tersebut. Untuk

meminimalisir resiko akan terjadinya failure sistem akibat kesalahan salah satu komponen penyusunnya, maka diperlukan suatu sistem kontrol yang mampu mengatasi malfungsi komponen sistem sambil tetap mempertahankan tingkat stabilitas sistem. Salah satu sistem kontrol yang mampu untuk melaksanakan tugas ini adalah *Fault Tolerant Control System*.

Tujuan utama FTCS adalah untuk merancang sebuah sistem kontrol dengan struktur yang mampu mencapai kestabilan sistem, baik ketika komponen sistem bekerja normal ataupun terjadi kesalahan.

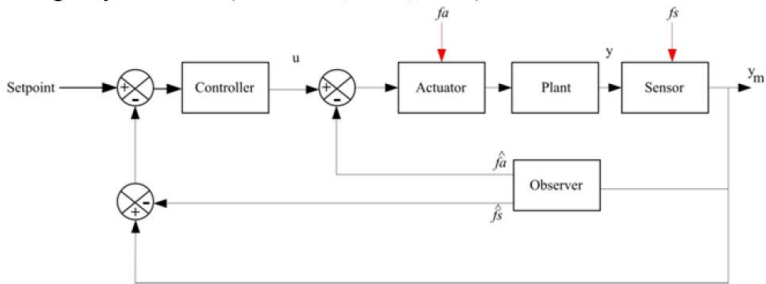


**Gambar 2.7** Struktur FTCS [21]

Struktur fault tolerant control secara umum adalah adanya *Fault Detection and Diagnosis Scheme* (FDD) dan *Reconfigurable Control* (RC). FDD adalah tahapan untuk mendeteksi *fault* atau kesalahan yang terjadi pada sistem dengan cara mengestimasi *state* yang tidak terukur pada sistem. Ada tiga tahapan yang perlu dilakukan dalam FDD, yaitu mendeteksi kesalahan pada sistem dan selang waktu terjadinya kesalahan, mengisolasi kesalahan, dan terakhir mengidentifikasi kesalahan yang terjadi [22]. Salah satu jenis FDD yang bekerja untuk mengestimasi kesalahan berdasarkan model matematik dari sistem adalah *Observer* [21].

*Reconfiguration control* berfungsi untuk memperbaiki kesalahan yang terjadi agar performansi sistem tetap pada nilai yang diinginkan dan mencegah terjadinya penurunan performa sistem setelah terjadi kesalahan. Perancangan sistem kendali yang

dapat tahan terhadap kesalahan actuator atau sensor dilakukan dengan cara merekonfigurasi ulang sinyal pengendali. *Reconfigurable control* akan memperbaiki kesalahan sistem berdasarkan nilai estimasi kesalahan yang diperoleh dari FDD.



**Gambar 2.8** Skema *Reconfigurable Controller* [23]

Gambar 2.8 menunjukkan bahwa *observer* bekerja sebagai FDD dengan mendapat masukan dari sinyal kontrol dan sinyal hasil pengukuran. Nilai kesalahan yang terukur kemudian akan digunakan untuk merekonfigurasi sinyal bacaan pada sensor apabila terdeteksi kesalahan pembacaan pada sensor, atau merekonfigurasi sinyal kontrol apabila terdeteksi terjadi kesalahan pada actuator.

## 2.7 Observer

*Observer* adalah suatu algoritma yang memiliki fungsi untuk mengestimasi *state* dari sistem berdasarkan model matematis sistem. Selain itu algoritma ini juga bisa digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem yang diamati [19]. Observer haruslah mengamati suatu *matrix state space*

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.8)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.9)$$

Dengan: A = matriks state

B = matriks control input

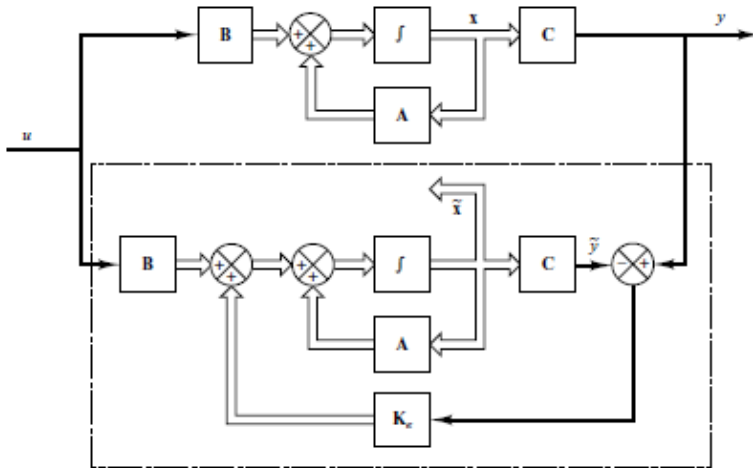
C = matriks pengukuran

D = matrik nilai keluaran

$x$  = vektor keadaan

$u$  = vector nilai input

Ketika terjadi kesalahan pada sensor atau aktuator, *observer* akan mengestimasi perbedaan antara keluaran yang diukur sensor dengan estimasi dari observer. Gambar 2.9 menunjukkan diagram blok dari sistem dan *observer*.



**Gambar 2.9** Diagram blok sistem dan *observer* [19]

Pada dasarnya, struktur diagram blok sistem dan *observer* sangatlah mirip, hanya terdapat satu blok yang menjadi pembeda, yaitu blok  $K_e$ . Blok ini merupakan *gain observer* yang berfungsi untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran aktual *plant* ( $y$ ) dan keluaran estimasi dari observer ( $\hat{y}$ ). Error ini dapat digunakan untuk estimasi state yang tidak terukur (tidak terpasang sensor). Parameter yang mempengaruhi nilai *gain observer* adalah nilai pole dari sistem.

Untuk mengkompensasi kesalahan pada sensor dan aktuator pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru [23]. Efek dari kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui, sehingga bentuk state space dari sistem yang terdapat kesalahan adalah sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.8)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.9)$$

Dengan:  $F_a$  = Matriks kesalahan aktuator

$F_s$  = Matriks kesalahan sensor

$f_a$  = Kesalahan aktuator

$f_s$  = Kesalahan sensor

Kesalahan pada sensor dan aktuator sendiri dituliskan:

$$x_f(t) = \alpha x(t) + \beta \quad (2.10)$$

$$f(t) = x_f(t) - x(t) \quad (2.11)$$

Dengan:  $\alpha$  = Kesalahan sensitifitas

$\beta$  = Kesalahan bias

$x_f$  = State dengan penambahan kesalahan kesalahan

$f$  = Kesalahan yang terjadi

$x$  = State tanpa kesalahan

Untuk mengetahui pengaruh kesalahan pada sensor terhadap *state* sistem, dilakukan ekspansi *state space* dengan sebuah *state* baru yang didefinisikan sebagai berikut

$$\dot{z}(t) = A_z[y(t) - z(t)] \quad (2.12)$$

$$\dot{z}(t) = A_z[Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.13)$$

$A_z$  merupakan matriks identitas ( $I$ ). Persamaan *state space* yang sudah di ekspansi sebagai berikut:

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \quad (2.14)$$

$$y_a(t) = C_a x_a(t) \quad (2.15)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.12) maka didapatkan matriks dari *state space* yang telah di ekspansi sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z \cdot F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$y_t(t) = [0 \quad C] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Sehingga didapat

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_a = [0 \quad C], E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z \cdot F_s \end{bmatrix}$$

Setelah matriks *extended state space* didapatkan, persamaan keadaan dan persamaan keluaran yang mengandung sensor digunakan untuk merancang persamaan *observer* yang dituliskan:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_a \hat{x}(t) + B_a u(t) + E_a \hat{f}(t) + K_e (y - \hat{y}) \quad (2.18)$$



$$\hat{y}(t) = C_a \hat{x}(t) \quad (2.19)$$

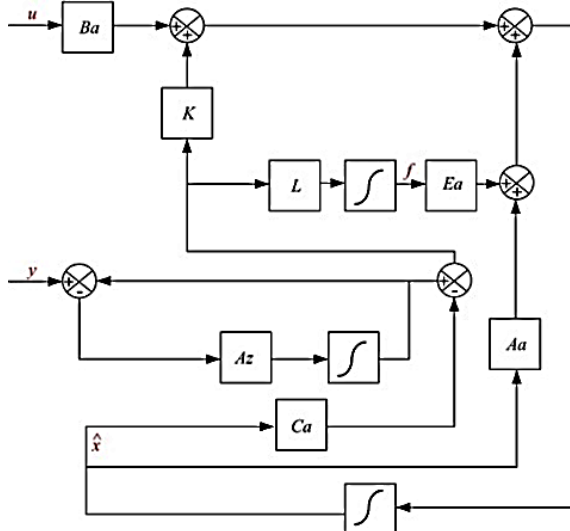
Kemudian ditambahkan state yang untuk mengestimasi kesalahan sensor

$$\dot{\hat{f}} = K_e e(t) \quad (2.20)$$

Persamaan (2.18), (2.19), dan (2.20) diubah menjadi bentuk yang lebih kompak menjadi sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{f}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ 0 \end{bmatrix} u + K_e (y - \hat{y}) \quad (2.21)$$

$$\hat{y} = [C_a \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$



**Gambar 2.10** *Extended State Observer* [23]

Dari persamaan (2.21) dan (2.22) dapat dirubah menjadi persamaan keluaran *observer*, sebagai berikut:

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A} \hat{x} + \hat{B} u + K_e (y - \hat{y}) \quad (2.23)$$

$$\hat{y} = \hat{C} \hat{x} \quad (2.24)$$

Penentuan *gain observer* bisa dilakukan dengan menggunakan formula *Auckerman* apabila menggunakan metode pole placement. Atau menggunakan metode LQR. Sehingga skema dari *extended state space observer* ditunjukkan oleh Gambar 2.10.

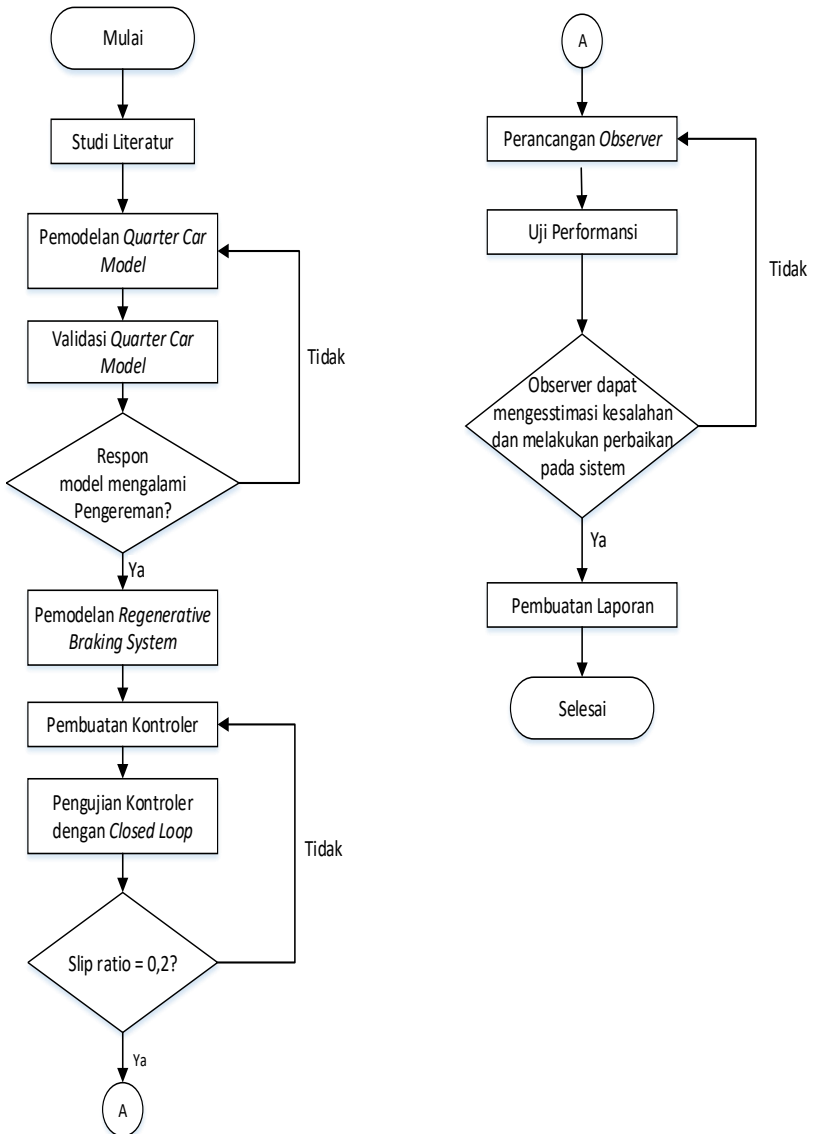
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

### **BAB III**

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Bab metodologi penelitian ini membahas mengenai prosedur penelitian yang telah dilakukan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir seperti yang dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap – tahap penelitian sebagai berikut:

- a. Studi literatur diperlukan pada penyusunan tugas akhir ini untuk dijadikan referensi dalam melakukan pengerjaan dan penyusunan laporan tugas akhir karena diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai pengereman regeneratif, *Anti-Lock Braking System*, dan *Fault Tolerant Control System*. Studi literature dilakukan dengan mencari sumber referensi melalui buku dan jurnal penelitian yang sudah dilakukan.
- b. Pemodelan dari *Quarter Car Model* didapatkan dari studi literature yang telah dilakukan sebagai plant yang akan dikontrol dibuat simulasi dengan perangkat lunak MATLAB.
- c. Setelah dilakukan pemodelan QCM kemudian dilanjutkan dengan memodelkan motor BLDC, sistem kontrol, inverter, serta baterai pada software MATLAB. Kemudian model regeneratif diaplikasikan pada QCM yang sudah dibuat sebelumnya sebagai plant yang akan di control
- d. Setelah dilakukan pemodelan plant *Regenerative Braking System* maka dilakukan perancangan controller PID yang bertujuan untuk menentukan nilai parameter yang mampu menghasilkan respon yang baik pada sistem.
- e. Perancangan *Observer* dilakukan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sensor. Nilai matriks *state space* untuk perancangan *observer* diperoleh dari pemodelan plant *Regenerative Braking System*. Perancangan observer dilakukan dengan menentukan *gain observer* dibantu dengan software MATLAB.

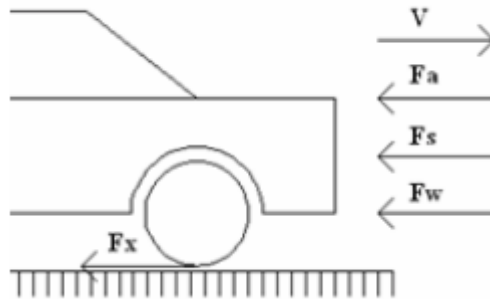


**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

- f. Setelah dilakukan perancangan observer dan *FTC* selanjutnya dilakukan uji performansi sistem dengan memberikan bias pada sensor. Performansi dari sistem dilihat dari grafik respon sistem yang kemudian akan dibandingkan antara sistem dengan menggunakan *FTC* dan sistem tanpa menggunakan *FTC*.

### 3.1 Pemodelan *Quarter Car Model*

Pemodelan matematis dari *Anti-Lock Braking System* ada tiga jenis, yaitu *quarter car*, *half car*, dan *full car model*. Dalam tugas akhir ini pemodelan matematis yang digunakan adalah model *quarter car*, dimana pmodelan ini adalah pemodelan gaya pengereman mobil hanya pada satu roda saja. Gaya – gaya pengereman yang dimaksud ditunjukkan pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Gaya pengereman yang bekerja pada mobil [18]

Sistem dimodelkan dengan menggunakan Hukum Newton II yang ditunjukkan pada persamaan (3.1). Hukum Newton II menyatakan bahwa percepatan yang dialami suatu benda berbanding lurus dengan gaya yang bekerja pada benda dan berbanding terbalik dengan massa benda. Pada sistem pengereman terdapat empat gaya yang bekerja, yaitu *rolling resistance* ( $F_w$ ), gaya aerodinamis ( $F_a$ ), *slope friction* ( $F_s$ ), dan gaya gesek roda ( $F_x$ ).

$$m \cdot a = \Sigma F \quad (3.1)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -4(F_w + F_s + F_a + F_x) \quad (3.2)$$

Dengan nilai masing – masing gaya antara lain:

$$F_w = c_t \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (3.3)$$

$$F_a = 0,5 \cdot c_r \cdot \delta \cdot A_f \cdot v^2 \quad (3.4)$$

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3.5)$$

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.6)$$

Parameter gaya dari pemodelan QCM ini ditunjukkan pada Tabel 3.1

**Tabel 3.1** Parameter gaya yang bekerja saat pengereman [18]

Parameter	Deskripsi	Nilai
M	Massa mobil	425 kg
$A_f$	Luas area	$3.1 \text{ m}^2$
$c_r$	Koefisien resistansi aerodinamik	0.3
$c_t$	Koefisien resistansi putaran	0.01
J	Momen inersia roda	$0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
g	Gaya gravitasi	$10 \text{ m/s}^2$
$\delta$	Densitas udara	$1.2 \text{ kg/m}^3$
R	Jari-jari roda	0.325 m

Gaya gesek terdapat nilai koefisien gesek  $\mu$  sebagai fungsi dari kecepatan dan slip rasio dengan persamaan sebagai berikut

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (3.7)$$

$\lambda$  diatas merupakan nilai slip rasio yang ditunjukkan pada persamaan (3.8). Sedangkan parameter dari koefisien gesekan  $C_1, C_2, C_3,$  dan  $C_4$  ditunjukkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Parameter koefisien gesekan pada aspal kering

Parameter	Nilai
$C_1$	1,2801
$C_2$	23,99
$C_3$	0,52
$C_4$	0,3

$$\lambda = \frac{v_v - R.v_w}{v_v} \quad (3.8)$$

Permukaan jalan dianggap lurus sehingga nilai  $\alpha$  dianggap 0 sehingga  $F_s$  bernilai 0. Dengan menggunakan parameter – parameter yang disebutkan pada Table 3.1 dan 3.2 dan persamaan (3.3) sampai (3.6) menghasilkan persamaan :

$$F_w = 0,01.425.10. \cos 0 \quad (3.9)$$

$$F_a = 0,5.0,3.1,2.3,1. v^2 \quad (3.10)$$

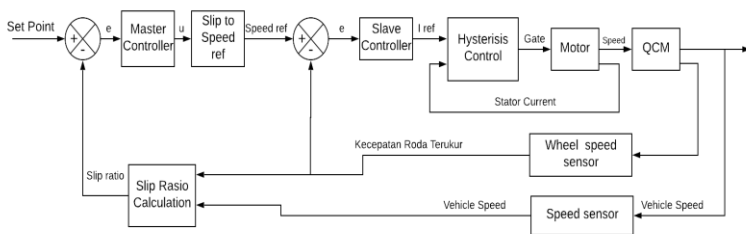
$$F_x = \mu. 425.9,8 \quad (3.11)$$

### 3.2 Pemodelan *Wheel Speed Sensor*

Sensor yang digunakan untuk mengukur kecepatan roda pada *electric vehicle* adalah AD22157. Sensor dianggap memiliki respon orde 0, dimana semua input yang diterima sensor langsung diproses menjadi output saat itu juga. Sehingga fungsi transfer dari sensor memiliki nilai penyebut dan pembilang 1. Dimana keluaran sensor merepresentasikan nilai kecepatan angular roda yang terukur.

### 3.3 Perancangan Kontroler

Sistem *pengereman regenerative* sebagai *anti-lock braking system* ini menggunakan sistem kontrol PI *cascade* dengan diagram blok pengendalian seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut



**Gambar 3.3** Diagram blok pengendalian sistem

Kontrol master pada sistem ini mengatur slip rasio dari kendaraan pada nilai 0,2 sehingga dapat menghasilkan gaya gesek yang maksimal seperti grafik pada Gambar 2.1. Sedangkan kontrol

slave digunakan untuk mengontrol rpm dari motor, kontrol slave menggunakan nilai outputan dari master kontrol sebagai rpm referensi dan outputan sensor sebagai feedback controller.

Tuning dari kedua controller dilakukan dengan menggunakan *trial and error*. Tuning PI pertama dilakukan pada slave controller yang merupakan kontroler rpm, tuning dilakukan dengan melepas slave kontrol dari master kontrol dan memberikan set point sebesar 200 rpm. Set point ini dipilih karena merupakan kecepatan motor saat penggunaan normal. Hasil tuning slave controller didapatkan parameter terbaik  $K_p=0,5$  dan  $T_i=8,74s$ .

Tuning selanjutnya dilakukan dengan menyambungkan slave controller dengan master controller dan memasang set point berupa slip rasio 0,2. Kemudian dilakukan *trial and error* hingga mendapat respon terbaik ketika  $K_p=1$  dan  $T_i=0,04s$ . Parameter controller yang didapat dapat dilihat pada Tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Parameter controller PI cascade

Kontroller	Parameter	Nilai
Master	Proporsional	1
	Integral	0,04
Slave	Proporsional	0,5
	Integral	8,74

Kontrol dari motor BLDC sendiri tidak langsung dilakukan oleh sinyal kontrol outputan dari PI controller, melainkan dengan menggunakan outputan dari PI kontrol ke *current controller* yang bertugas untuk mengkonversi *torque* outputan menjadi sinyal drive untuk menjalankan inverter. *Current controller* sendiri menggunakan prinsip *Hysteresis control* dengan menggunakan bandwidth 0,1A.

### 3.4 Perancangan *Observer*

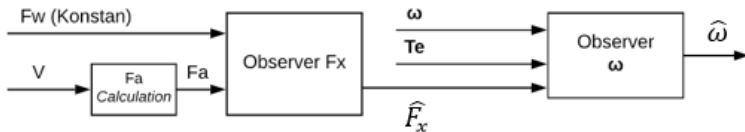
Perancangan *observer* dilakukan untuk mengestimasi kesalahan (*fault*) pada sistem. Kesalahan yang dimasukkan pada penelitian ini adalah kesalahan pada sensor berupa kesalahan Bias



dan sensitifitas. Perancangan observer dilakukan dengan metode extended state space.

Observer yang digunakan pada sistem ini ada dua, satu observer untuk mengestimasi nilai gaya gesek ( $F_x$ ) dan observer kedua untuk mengestimasi kecepatan roda. Estimasi nilai  $F_x$  perlu dilakukan karena nilai  $F_x$  juga terimbas dari kesalahan pada pembacaan kecepatan roda serta nilai  $F_x$  tidak didapatkan dari pembacaan sensor. Nilai  $F_x$  yang telah diperoleh kemudian digunakan sebagai input pada observer kedua untuk mengestimasi state kecepatan angular roda sehingga kesalahan yang terjadi dapat diketahui dengan membandingkan nilai bacaan sensor dengan kecepatan estimasi.

Struktur dari *Observer* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut:



**Gambar 3.4** Struktur *Observer*

Perancangan masing – masing observer diuraikan pada subbab 3.4.1 dan 3.4.2.

### 3.4.1. *Observer F<sub>x</sub>*

Terlebih dahulu disusun matriks dari observer pertama dengan menggunakan persamaan (3.2) yang disubstitusi oleh persamaan (3.9) sampai (3.11) hingga didapatkan persamaan

$$\dot{v} = \frac{-4(F_w + F_a + F_x)}{m} \quad (3.12)$$

Dengan parameter dari  $F_w$ ,  $F_a$ ,  $F_x$ , dan  $m$  sudah diketahui sehingga persamaan  $\dot{v}$  menjadi persamaan sebagai berikut

$$\dot{v} = -(0,00941 \cdot F_w + 0,00941 \cdot F_a + 0,00941 \cdot F_x) \quad (3.13)$$

Dari persamaan (3.13) dijadikan state space berdasar persamaan (2.8) dengan  $F_a$  dan  $F_w$  sebagai input dan  $F_x$  sebagai kesalahan yang akan diestimasi, sehingga matriks dari sistem menjadi persamaan (3.15)

$$\dot{v} = [0]v + [-0,00941 \quad -0,00941] \begin{bmatrix} F_a \\ F_w \end{bmatrix} + E_1 \quad (3.14)$$

Dengan  $E_1$  adalah state kesalahan  $F_x$  yang mempunyai nilai  $E_1 = [-0,00941]F_x$

Nilai  $F_x$  estimasi didapat dengan ekspansi matrix (3.14) sesuai dengan persamaan (2.14) menjadi bentuk

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{F}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0,00941 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ F_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,00941 & -0,00941 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_w \end{bmatrix} + K \cdot \hat{e} \quad (3.15)$$

Penyelesaian observer pertama ini dilakukan dengan penentuan gain menggunakan metode LQR dengan nilai R dan Q yang didapatkan dengan metode *trial and error* hingga mendapat respon observer optimal pada nilai:

$$R = 0,001 \text{ dan } Q = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 \\ 0 & 10^{15} \end{bmatrix}$$

Dengan fungsi LQR pada matlab, nilai R dan Q diatas akan menghasilkan nilai K sebagai gain estimator sebagai berikut

$$K = [4451,9 \quad -10^9]$$

### 3.4.2. Observer $\omega$

Langkah selanjutnya adalah merancang observer kedua, yaitu observer kecepatan motor. Persamaan dinamika motor didapat dari [24] sebagai berikut:

$$T_e - T_l = j \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + \beta \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3.16)$$

Dengan :  $T_e$  = Torsi elektromekanik (Nm)

$T_l$  = Torsi beban (Nm)

$j$  = Inersia motor (Kgm<sup>2</sup>)

$\beta$  = Koefisien redaman motor (Nms)

$\theta_m$  = Posisi sudut rotor. (rad)

Torsi beban yang bekerja pada motor mempunyai nilai yang sebanding dengan besarnya torsi pada roda dan rasio dari *gearbox*, maka dari itu dapat dituliskan

$$T_l = \frac{F_x \cdot r}{n} \quad (3.17)$$

Dengan :  $n$  = rasio *gearbox*

$r$  = jari – jari roda (m)

Adapun parameter dari motor dan *gearbox* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.4 berikut

**Tabel 3.4** Parameter motor BLDC

Parameter	Deskripsi	Nilai
J	Inersia motor	0,075 Kgm <sup>2</sup>
$\beta$	Koefisien redaman motor	0,0003035 Nms
$K_t$	Konstanta torsi	0.57176 Nm/A
n	Rasio <i>Gearbox</i>	5

Dengan mensubstitusi persamaan (3.17) kedalam persamaan (3.16) dan memasukkan parameter motor sesuai Tabel 3.4 didapatkan persamaan:

$$\dot{\omega} = -0,203\omega - 4,33F_x + 66,615 T_e \quad (3.18)$$

Apabila persamaan (3.18) dirubah menjadi persamaan state space dengan kesalahan menjadi persamaan berikut

$$\dot{\omega} = [-0,0203]\omega + [-4,33 \quad 66,615] \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$y = [1]\omega + [-4,33 \quad 66,615] \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} + [1]F_s \quad (3.20)$$

Dengan :  $F_s$  = Kesalahan pada sensor

Kemudian bentuk *state space* diperluas dengan *extended state space* untuk memindahkan state kesalahan pada sensor [21] sesuai dengan persamaan (2.16) sehingga persamaan state space menjadi

$$x_a = \begin{bmatrix} -0,0203 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4,33 & 66,615 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} E_a \quad (3.21)$$

$$y_a = z(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \omega \\ z \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Setelah mendapatkan *extended state space*, langkah selanjutnya adalah merancang *observer* dengan estimasi kealahan, *state space* ini didapat dengan cara mengekspansi *state space* dari persamaan (3.21) sesuai dengan persamaan (2.21) dan (2.22) berikut

$$\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} -0,02303 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{z} \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4,33 & 66,615 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} + K_e e \quad (3.23)$$

$$\hat{y} = [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{z} \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Atau dapat dituliskan

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -0,02303 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} -4,33 & 66,615 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{C} = [0 \quad 1 \quad 0]$$

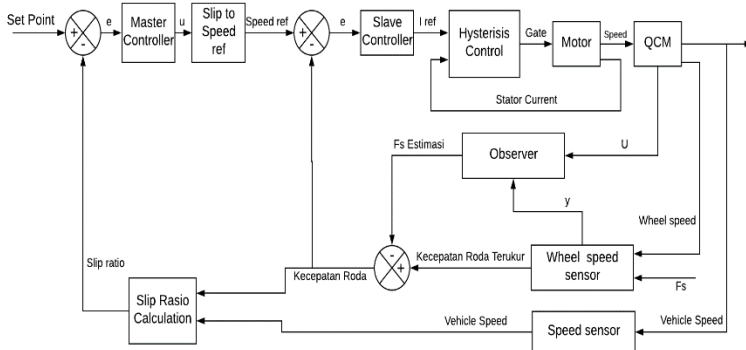
Langkah terakhir dari perancangan observer ini adalah dengan menentukan gain observer. Gain observer didapat dengan metode LQR secara *trial and error* hingga didapatkan respon terbaik pada nilai R dan Q:

$$R = [0,1] \text{ dan } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 10^8 \end{bmatrix}$$

Dengan fungsi LQR pada matlab, nilai R dan Q diatas akan menghasilkan nilai K sebagai gain estimator sebagai berikut

$$K = [0,00015809 \quad 269,64 \quad 31622,8]$$

### 3.5 Perancangan Sistem *Fault Tolerant Control* untuk Kesalahan pada Sensor



**Gambar 3.5** Diagram blok sistem dengan *Fault Tolerant Control*

Perancangan FTC bertujuan untuk mengkompensasi kesalahan yang telah diestimasi oleh observer. Pada Gambar 3.5 dapat dilihat bahwa sistem ditambahkan sebuah blok observer dengan input berupa  $u$  yaitu input untuk observer dan  $y$  yang merupakan output plant.

Untuk kesalahan berupa kesalahan bias ataupun sensitivitas, sinyal bacaan dari sensor ditambahkan dengan estimasi kesalahan  $\hat{f}_s$  seperti persamaan (3.25)

$$\omega_{meas} = \omega_{aktual} + \hat{f}_s \quad (3.25)$$

Sehingga untuk mencari kesalahan residual,  $\hat{f}_s$ , sinyal pengukuran awal dengan kesalahan dikurangi dengan hasil estimasi *observer* seperti persamaan (3.26)

$$\hat{f}_s = \omega_{est} - \omega_{meas} \quad (3.26)$$

Cara lain untuk mengkompensasi kesalahan adalah dengan mengganti sinyal pengukuran dari sensor yang masuk ke kontroler dengan state estimasi dari *observer*.

### 3.6 Pengujian Sistem *Fault Tolerant Control*

Pengujian sistem *Fault Tolerant Control* bertujuan untuk dapat mengetahui apakah sistem yang dirancang sudah mampu untuk mengkompensasi kesalahan yang terjadi pada sensor. Kompensasi dari *fault tolerant control* yang dilakukan adalah dengan mengurangi nilai bacaan sensor yang mengandung kesalahan dengan nilai estimasi kesalahan yang dihitung oleh *observer*. Pengujian *FTC* dilakukan dengan pemberian kesalahan pada sensor dengan kesalahan bias dan sensitivitas.

Kesalahan bias disimulasikan dengan menambahkan sinyal bacaan dari sensor kecepatan roda dengan sebuah konstanta. Pemberian kesalahan dilakukan pada detik ke 0,4 karena respon sistem telah stabil pada detik ke 0,4. Besarnya kesalahan bias yang diujikan pada sensor sebesar 1 rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s, 25 rad/s dan 50 rad/s.

Sedangkan Kesalahan sensitivitas disimulasikan dengan mengalikan sinyal bacaan dari sensor kecepatan roda dengan konstanta sensitivitas. Sama seperti kesalahan bias, pemberian kesalahan sensitivitas dilakukan pada detik ke 0,4. Besarnya kesalahan sensitivitas yang diujikan sebesar 5%, 10%, 25%, 50%, dan 75%.

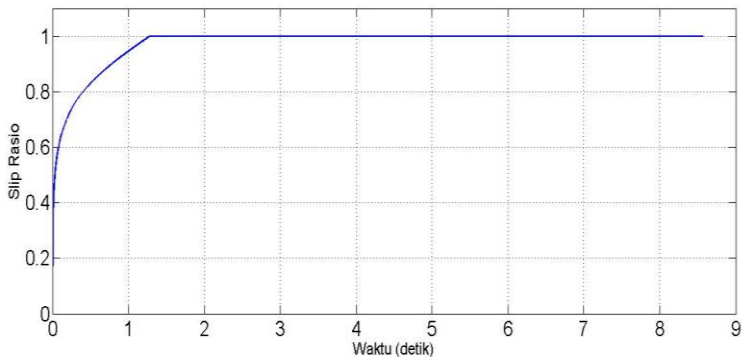
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

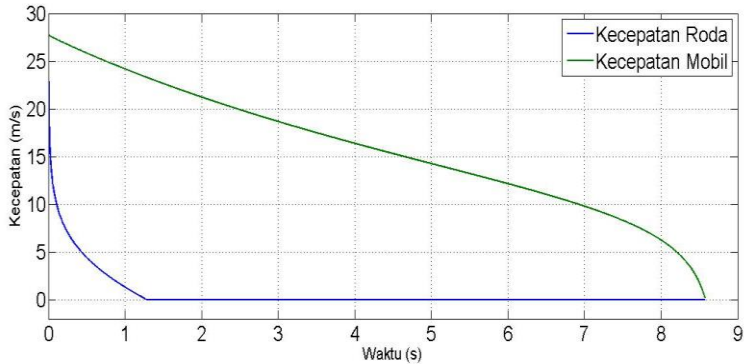
Bab IV menjelaskan mengenai hasil dari perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC) pada sistem pengereman *regenerative* sebagai *Anti-Lock Braking System* yang telah dilakukan pada perangkat lunak Matlab Simulink 2014a yang dimulai dari pemodelan sistem hingga perancangan *Fault Tolerant Control*. Pengujian dan validasi dilakukan untuk memastikan model yang telah dibuat dapat merepresentasikan sistem dengan baik, parameter kontrol telah menghasilkan respon yang optimal, dan observer serta FTC dapat mengestimasi dan mengkompensasi kesalahan yang terjadi pada sistem.

### 4.1 Uji Pemodelan *Regenerative Braking*

Pemodelan dari *Regenerative Braking* perlu dilakukan pengujian untuk memastikan apakah model yang telah dibuat sudah merepresentasikan sistem dengan baik. Pengujian dilakukan dengan pengereman *regenerative open loop* sistem tanpa ABS seperti pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 berikut



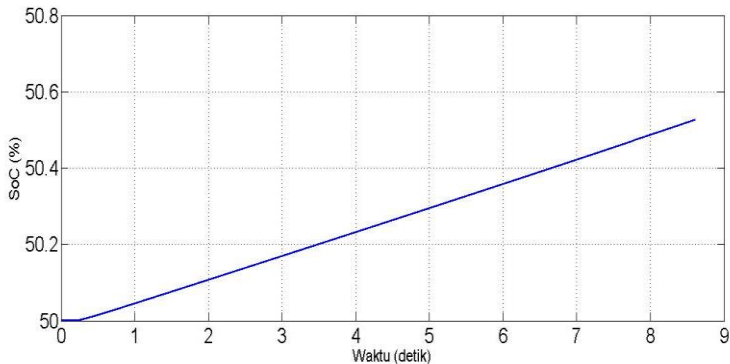
**Gambar 4.1** Respon slip rasio pada *open loop*



**Gambar 4.2** Kecepatan mobil dan roda pada *open loop*

Hasil respon pada Gambar 4.1 menunjukkan nilai slip rasio terus naik hingga bernilai 1 saat di detik pertama, hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.2 dimana pada saat terjadi pengereman, roda akan berhenti berputar(terkunci) pada detik pertama namun ketika roda terkunci mobil masih terus berjalan hingga kecepatan mobil menjadi 0 pada detik ke 8,5.

Selain pengujian dari respon pengereman dilakukan juga pengujian sistem regenerative. Dengan hasil seperti pada Gambar 4.3



**Gambar 4.3** Pengujian SoC dari baterai

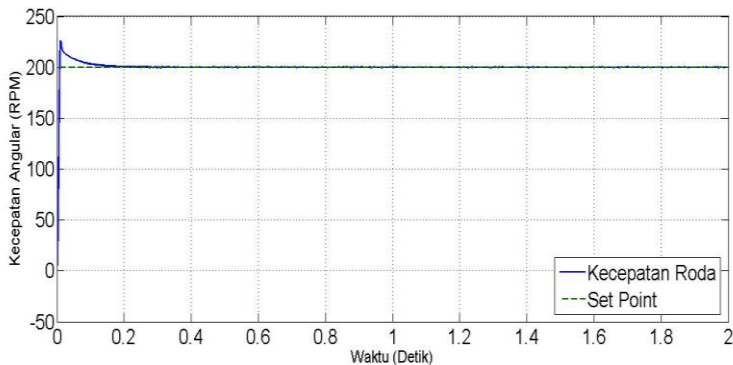


Pengujian sistem regenerative dilakukan dengan cara melihat *State of Charge (SOC)* dari baterai tersebut selama terjadi pengereman. Gambar 4.3 menunjukkan bahwa saat terjadi pengereman pada mobil, motor melakukan *charging* pada baterai. Hal ini terbukti dari naiknya SoC baterai dari 50% menjadi 50,53%. Kenaikan SoC dari baterai memang sangatlah kecil karena kapasitas baterai yang digunakan sebesar 15kWh.

#### 4.2 Uji Sistem *Closed Loop*

Uji *closed loop* dilakukan untuk meninjau apakah parameter kontrol yang dipilih mampu menghasilkan respon sistem yang stabil di *set point* yang dikehendaki. Pengujian *close loop* ini terdiri dari dua tahap, yaitu pengujian *slave controller* yang mengontrol rpm dari roda dan pengujian *master controller* yang mengontrol slip ratio dari sistem.

Pengujian *slave controller* dilakukan dengan memberikan rpm reference sebesar 200 rpm sebagai *setpoint* dan menggunakan parameter kontrol PI dengan metode *trial and error* hingga didapat nilai Kp dan Ki terbaik berturut-turut 0,5 dan 8,74. Sehingga dari simulasi didapatkan respon seperti pada Gambar 4.4



**Gambar 4.4** Respon RPM roda pada *slave controller*

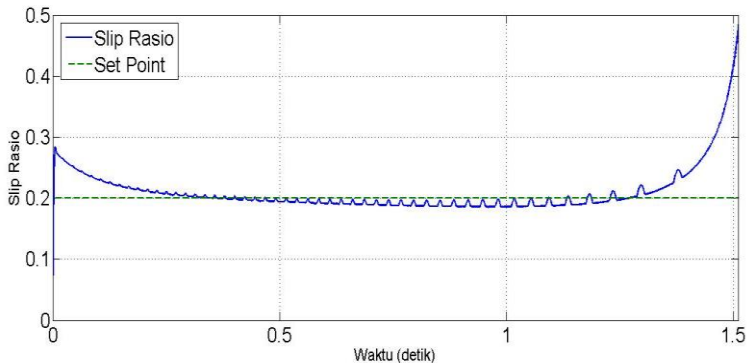
Respon dari sistem seperti ditunjukkan Gambar 4.4 menunjukkan kontrol *slave controller* mampu membuat sistem

mencapai set point dengan parameter seperti yang ditunjukkan table 4.1.

**Tabel 4.1** Performansi *slave controller*

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	13,36%
<i>Rise Time</i>	0,0051 detik
<i>Settling Time</i>	0,0919 detik

Langkah selanjutnya adalah pengujian *master controller* dengan memberi *set point* slip ratio sebesar 0,2, dan menggunakan output kontroler sebagai *set point* bagi *slave controller*. Parameter kontrol PI didapatkan melalui metode *trial and error* dengan nilai  $K_p = 1$  dan  $K_i = 0,04$ . Sehingga simulasi yang dilakukan memiliki respon seperti pada Gambar 4.5



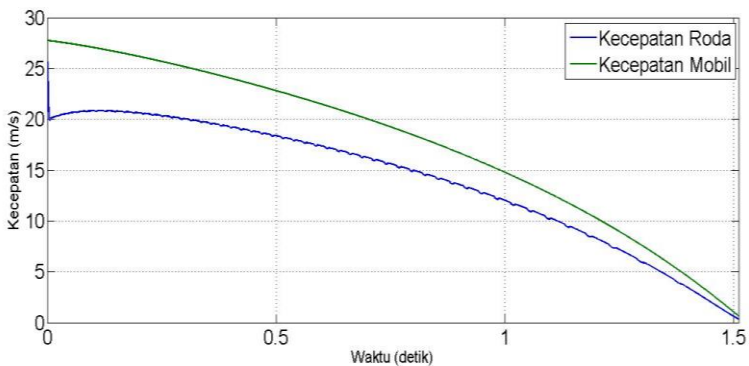
**Gambar 4.5** Respon slip ratio sistem *closed loop*

Respon dari sistem yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa selama mobil melakukan pengereman slip ratio dapat dijaga pada nilai 0,2 oleh kontroler dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada detik ke 1,4. Performansi sistem ditunjukkan oleh tabel 4.2

**Tabel 4.2** Performansi *closed loop* sistem

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	41,84%
<i>Rise Time</i>	0,0016 detik
<i>Settling Time</i>	0,1705 detik

Respon selanjutnya yang perlu ditinjau adalah respon kecepatan kendaraan dan roda pada saat pengujian *close loop*. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.6

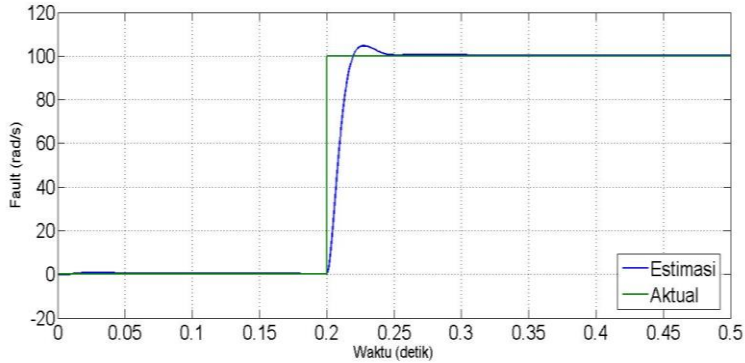
**Gambar 4.6** Kecepatan roda dan mobil pada sistem *closed loop*

Dari Gambar 4.6 diatas dapat dilihat bahwa selama pengereman selama 1,52 detik, roda tidak mengalami penguncian. Roda sempat mengalami penurunan kecepatan yang signifikan pada saat awal terjadi pengereman, namun kontroler mampu mengembalikan kecepatan roda agar sesuai dengan slip rasio yang diinginkan hingga mobil berhenti pada jarak 26,5 meter.

### 4.3 Hasil Estimasi *Observer*

Estimasi dari *observer* perlu ditinjau untuk menganalisa apakah *observer* yang sudah dirancang dapat mengestimasi kesalahan yang diberikan kepada sensor sesuai dengan nilai sebenarnya. Pengujian estimasi dari *observer* ini dilakukan dengan memberikan kesalahan pada detik ke 0,2 pada sensor, kesalahan

yang diberikan berupa fungsi step dengan amplitudo sebesar 100 rad/s. Hasil dari simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.7.



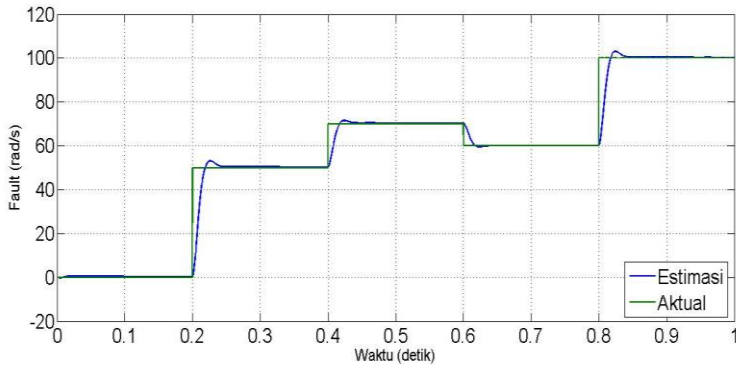
**Gambar 4.7** Perbandingan kesalahan aktual dengan kesalahan estimasi *observer*

Gambar 4.7 dapat dilihat ketika sistem diberi kesalahan, *observer* yang telah dirancang mampu mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sensor dengan parameter respon seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3

**Tabel 4.3** Performansi *Observer* ketika estimasi kesalahan

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	4,87%
<i>Rise Time</i>	0,0127 detik
<i>Settling Time</i>	0,2383 detik

Dari performansi diatas dapat dilihat bahwa *observer* memiliki respon yang baik saat mengestimasi kesalahan. Untuk memastikan apakah *observer* bisa mengestimasi kesalahan apabila kesalahan yang terjadi lebih dari sekali, dilakukan pengujian dengan merubah – rubah kesalahan tiap 0,2 detik. Sehingga didapatkan hasil simulasi seperti pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Respon observer dengan kesalahan yang berubah

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa ketika observer diberi kesalahan yang berubah, observer tetap mampu mengikuti *tracking* dari fault yang diberikan.

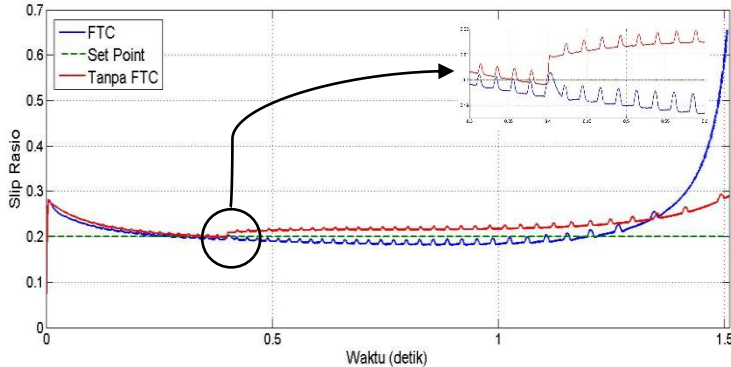
#### 4.4 Pengujian *Fault Tolerant Control* dengan Kesalahan Bias

Kesalahan bias merupakan kesalahan dimana nilai yang terukur oleh sensor mengalami penyimpangan yang konstan terhadap nilai actual. Secara matematis, pembacaan sensor dengan kesalahan bias dapat dituliskan  $\omega_{meas} = \omega_{real} + \beta$ . Pengujian kesalahan bias pada sistem dilakukan dengan cara menambahkan fungsi step pada detik ke 0,4 dimana sensor dianggap terjadi kesalahan ketika sistem sudah mencapai kestabilan. Nilai kesalahan bias yang diberikan pada pengujian ini yaitu sebesar 1rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s, 25 rad/s, 50 rad/s.

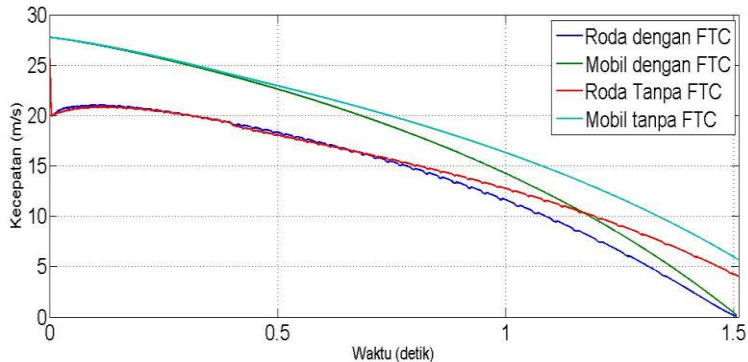
##### 4.4.1. Kesalahan Bias 1 rad/s

Respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 1 rad/s yang ditambahkan pada pembacaan sensor dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10. Sistem dengan FTC mampu mengembalikan kestabilan sistem.4 meskipun sempat terjadi kenaikan slip rasio hingga 0,21 ketika sensor diberi kesalahan. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang stabil namun kontroler tidak bisa membuat slip rasio sistem tetap

pada nilai 0,2 tetapi naik ke 0,22. Pada kesalahan bias 1 rad/s tidak terjadi penguncian pada roda, baik pada sistem dengan FTC atau tanpa FTC seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.10.



**Gambar 4.9** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s



**Gambar 4.10** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s

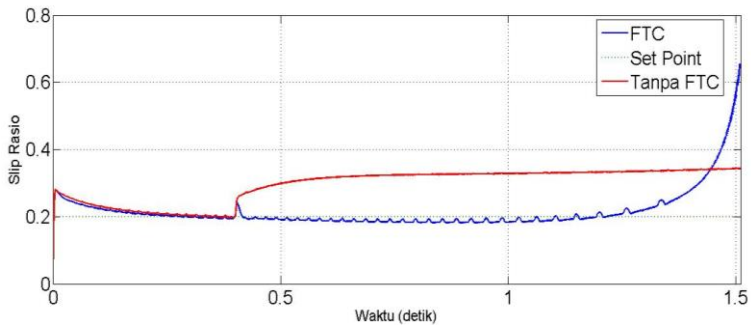
Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan berupa bias pembacaan sebesar 1 rad/s. Karakteristik respon dari sistem dengan FTC ketika diberikan kesalahan ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4.4** Karakteristik respon sistem dengan bias 1 rad/s

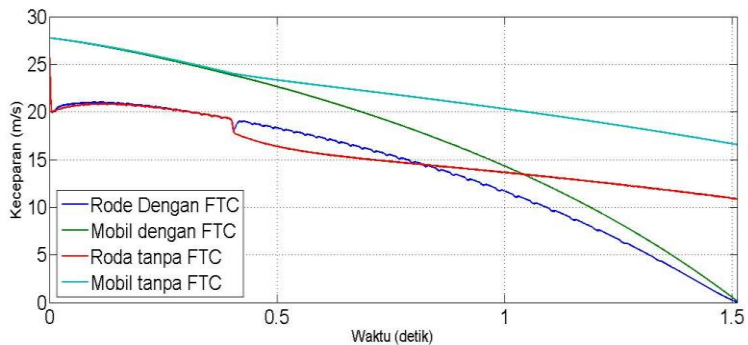
Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	3,10 %
<i>Rise Time</i>	0,7759 detik
<i>Settling Time</i>	1,2479 detik

#### 4.4.2. Kesalahan Bias 5 rad/s

Respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 5 rad/s yang ditambahkan pada pembacaan sensor dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12



**Gambar 4.11** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s



**Gambar 4.12** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s

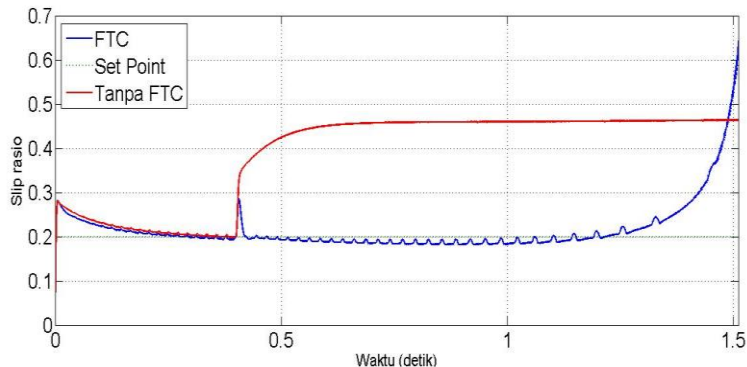
Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan berupa bias pembacaan sebesar 5 rad/s. Sistem dengan FTC mampu mengembalikan kestabilan sistem dengan karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 4.5 meskipun sempat terjadi kenaikan slip rasio hingga 0,25 ketika sensor diberi kesalahan. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil dimana kontroler tidak bisa membuat slip rasio sistem tetap pada nilai 0,2 tetapi naik ke 0,3 dan terus bertambah. Pada kesalahan bias 5 rad/s tidak terjadi penguncian pada roda, baik pada sistem dengan FTC atau tanpa FTC seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12.

**Tabel 4.5** Karakteristik respon sistem dengan bias 5 rad/s

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	14,499 %
<i>Rise Time</i>	0,0265 detik
<i>Settling Time</i>	1,2474 detik

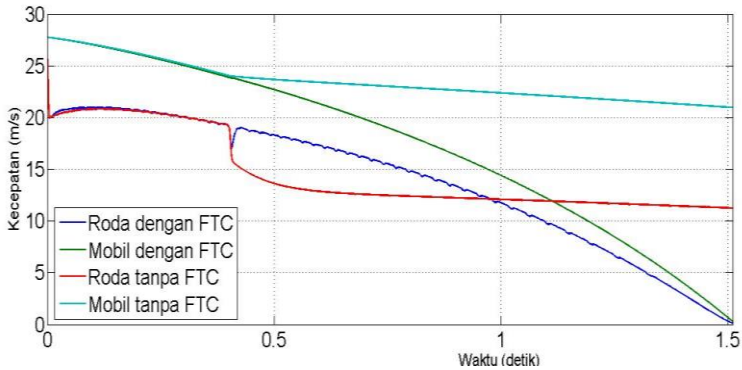
#### 4.4.3. Kesalahan Bias 10 rad/s

Respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 10 rad/s yang ditambahkan pada pembacaan sensor dapat dilihat pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14



**Gambar 4.13** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s





**Gambar 4.14** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s

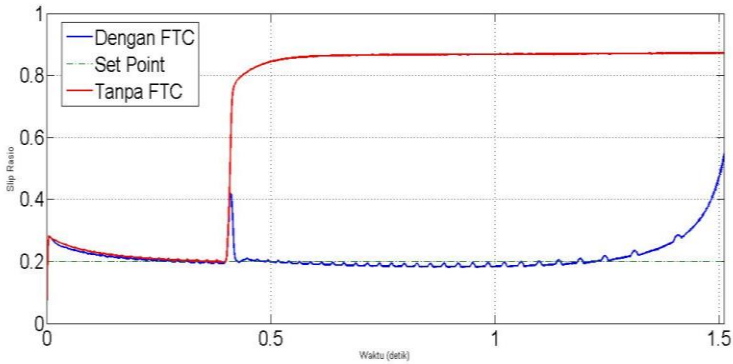
Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan berupa bias pembacaan sebesar 10 rad/s. Sistem dengan FTC mampu mengembalikan kestabilan sistem dengan karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 4.6 meskipun sempat terjadi kenaikan slip rasio hingga 0,3 ketika sensor diberi kesalahan. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil dimana kontroler tidak bisa membuat slip rasio sistem tetap pada nilai 0,2 tetapi naik ke 0,35 dan terus bertambah. Pada kesalahan bias 10 rad/s tidak terjadi penguncian pada roda, baik pada sistem dengan FTC atau tanpa FTC seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14.

**Tabel 4.6** Karakteristik respon sistem dengan bias 10 rad/s

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	32,94 %
<i>Rise Time</i>	0,0267 detik
<i>Settling Time</i>	1,249 detik

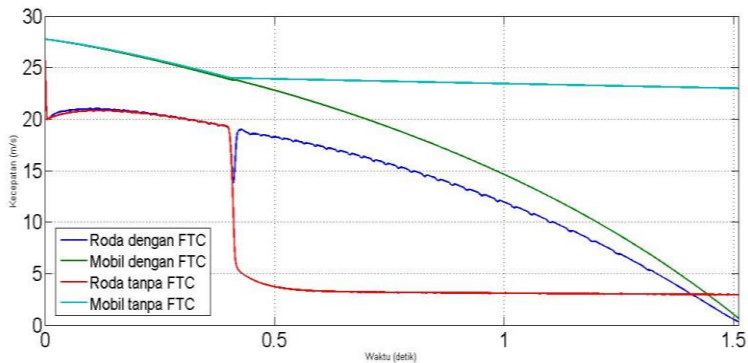
#### 4.4.4. Kesalahan Bias 25 rad/s

Respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 25 rad/s yang ditambahkan pada pembacaan sensor dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.



**Gambar 4.15** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s

Gambar 4. 15 dan Gambar 4.16 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan berupa bias pembacaan sebesar 25 rad/s. Sistem dengan FTC mampu mengembalikan kestabilan sistem dengan karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 4.7 meskipun sempat terjadi kenaikan slip rasio hingga 0,42 ketika sensor diberi kesalahan. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil dimana kontroler tidak bisa membuat slip rasio sistem tetap pada nilai 0,2 tetapi naik ke 0,8 dan terus bertambah.



**Gambar 4.16** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s

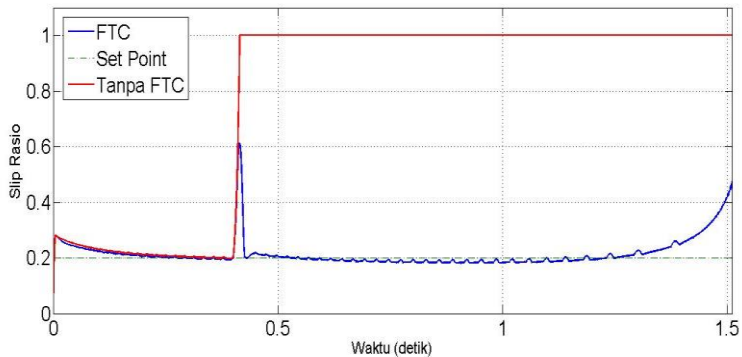
Pada kesalahan bias 25 rad/s tidak terjadi penguncian pada roda, baik pada sistem dengan FTC seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.16. Sedangkan sistem tanpa FTC hampir mengalami penguncian roda pada detik ke 0,6.

**Tabel 4.7** Karakteristik respon sistem dengan bias 25 rad/s

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	98,95 %
<i>Rise Time</i>	0,0266 detik
<i>Settling Time</i>	1,2465 detik

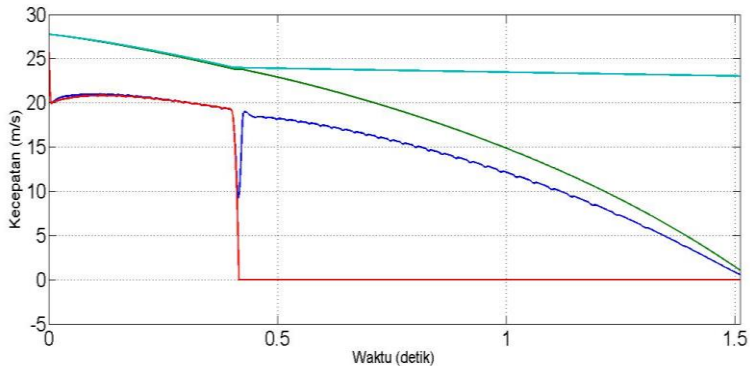
#### 4.4.5. Kesalahan Bias 50 rad/s

Respon sistem terhadap kesalahan bias sebesar 50 rad/s yang ditambahkan pada pembacaan sensor dapat dilihat pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18.



**Gambar 4.17** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s

Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan berupa bias pembacaan sebesar 50 rad/s. Sistem dengan FTC mampu mengembalikan kestabilan sistem dengan karakteristik yang ditunjukkan pada tabel 4.8 meskipun sempat terjadi kenaikan slip rasio hingga 0,61 ketika sensor diberi kesalahan.



**Gambar 4.18** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s

Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil dimana pada saat diberi kesalahan slip rasio naik menjadi 1 yang berarti roda terkunci, terbukti dari Gambar 4.18 pada saat terjadi kesalahan kecepatan roda seketika turun menjadi 0 sehingga kontroler tidak mampu mempertahankan mobil agar tidak tergelincir saat terjadi kesalahan bias sebesar 50 rad/s.

**Tabel 4.8** Karakteristik respon sistem dengan bias 50 rad/s

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	212,02 %
<i>Rise Time</i>	0,0017 detik
<i>Settling Time</i>	1,2462 detik

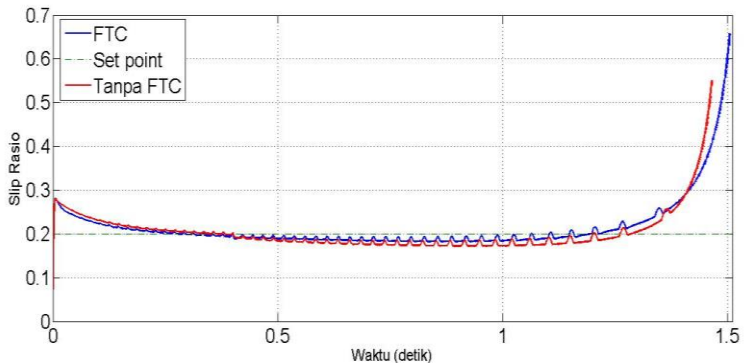
#### 4.5 Pengujian *Fault Tolerant Control* dengan Kesalahan Sensitivitas

Kesalahan sensitivitas merupakan kesalahan dimana sensor kehilangan kepekaan sensor dalam menanggapi perubahan fisis yang terjadi, hal ini mengakibatkan nilai yang terukur oleh sensor mengalami pengurangan yang proporsional terhadap nilai aktual. Secara matematis, kesalahan sensitivitas dapat dituliskan  $\alpha_s \omega_m$ . Pengujian kesalahan sensitivitas pada sistem dilakukan dengan cara mengalikan sinyal yang diterima oleh sensor dengan konstanta

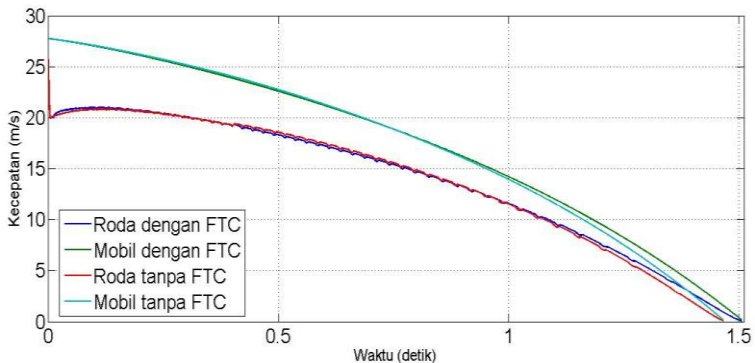
sebesar  $(1-\alpha_s)$  pada detik ke 0,4 dimana sensor dianggap kehilangan sensitivitasnya pada saat sistem sudah stabil. Nilai kesalahan sensitivitas yang diberikan pada pengujian ini yaitu sebesar 5%, 10%, 25%, 50%, dan 75%.

#### 4.5.1. Kesalahan sensitivitas 1%

Respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas 1% yang dialami sensor dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 berikut:



**Gambar 4.19** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 1%

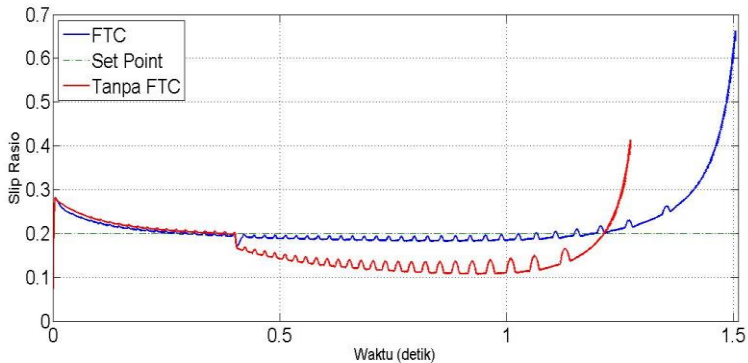


**Gambar 4.20** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 1%

Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan kehilangan sensitivitas sebesar 1%. Sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat mengembalikan kestabilan sistem meskipun sempat terjadi penurunan slip rasio ke nilai 0,18 pada saat sensor kehilangan sebagian sinyal hasil pembacaannya. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang stabil pada nilai 0,19. Kontroler yang telah dirancang mampu mempertahankan kestabilan sistem yang telah diberi kesalahan sensitivitas 1%.

#### 4.5.2. Kesalahan sensitivitas 5%

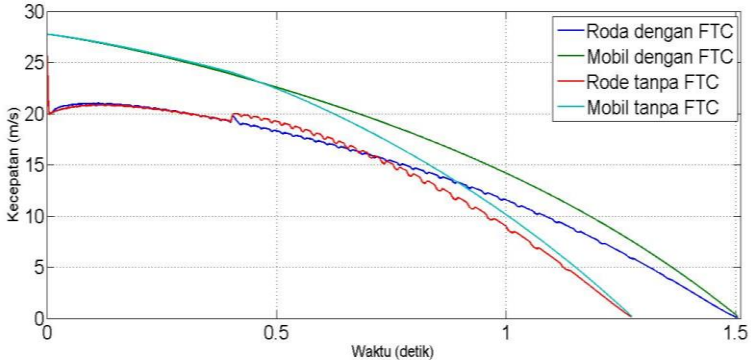
Respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas 5% yang dialami sensor dapat dilihat pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22.



**Gambar 4.21** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%

Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan kehilangan sensitivitas sebesar 5%. Sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat mengembalikan kestabilan sistem meskipun sempat terjadi penurunan slip rasio ke nilai 0,18 pada saat sensor kehilangan sebagian sinyal hasil pembacaannya. Sedangkan sistem

tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang stabil pada nilai 0,15 namun kontroler tidak mampu membuat slip rasio sistem kembali menuju nilai set point.



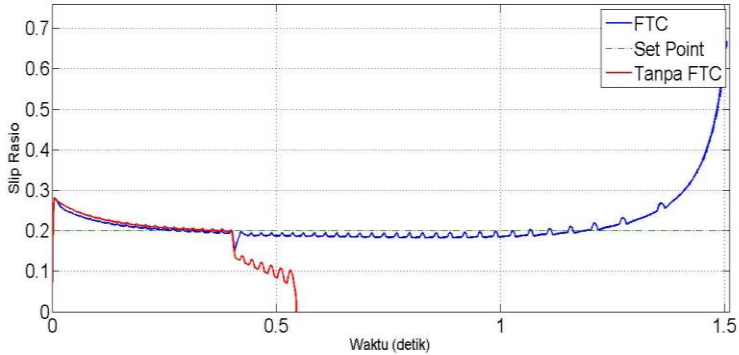
**Gambar 4.22** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%

Respon sistem tanpa FTC menunjukkan bahwa kendaraan berhenti lebih cepat meskipun slip rasio tidak pada set point yang diinginkan, hal ini dapat dijelaskan dari Gambar 2.1 dimana nilai maksimum kurva slip rasio-koefisien gesek tidak tepat pada nilai 0,2 pada jalan aspal kering. Tetapi diantara nilai 0,1 dan 0,2.

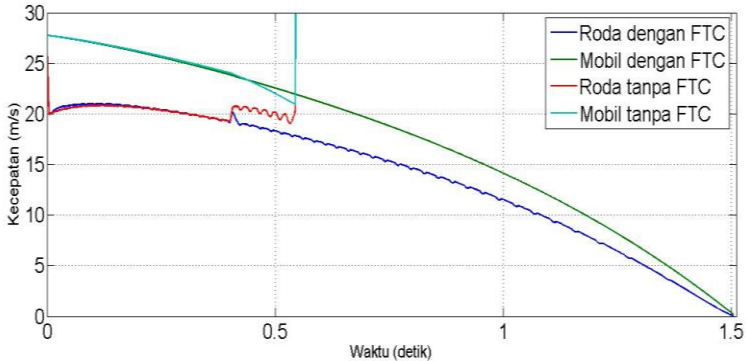
#### 4.5.3. Kesalahan sensitivitas 10%

Respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas 10% yang dialami sensor dapat dilihat pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24. Sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat mengembalikan kestabilan sistem meskipun sempat terjadi penurunan slip rasio ke nilai 0,15 pada saat sensor kehilangan sebagian sinyal hasil pembacaannya. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil dilihat dari nilai slip rasio yang turun ketika sensor kehilangan sensitivitasnya hingga pada detik ke 0,58 sistem tidak mampu lagi mempertahankan kestabilannya dimana pada simulasi

ditandai dengan adanya error pada *Simulink* dan nilai slip ratio mencapai nol.



**Gambar 4.23** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%

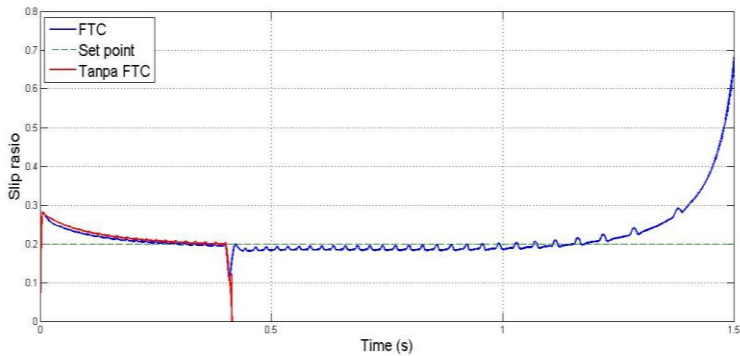


**Gambar 4.24** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%

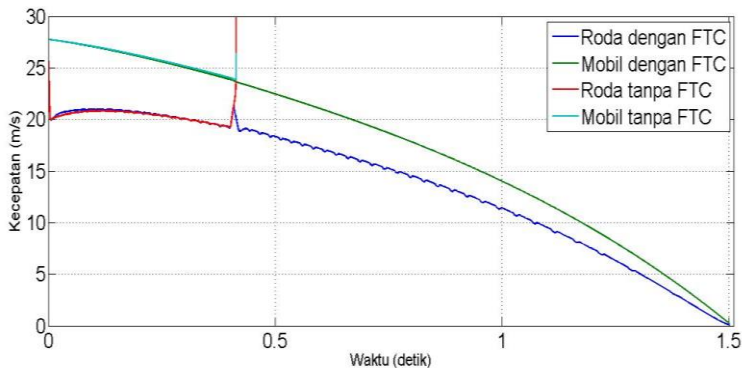
#### 4.5.4. Kesalahan sensitivitas 25%

Respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas 25% yang dialami sensor dapat dilihat pada Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 berikut:





**Gambar 4.25** Perbandingan slip rasio dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%



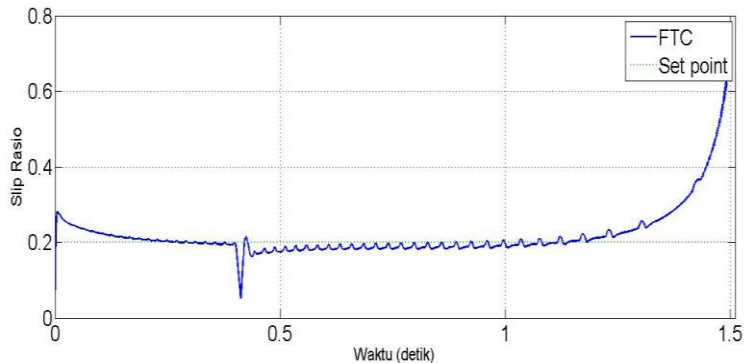
**Gambar 4.26** Perbandingan kecepatan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%

Gambar 4.25 dan Gambar 4.26 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan kehilangan sensitivitas sebesar 25%. Sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat mengembalikan kestabilan sistem meskipun sempat terjadi penurunan slip rasio ke nilai 0,125 pada saat sensor kehilangan sebagian sinyal hasil pembacaannya. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil

dilihat dari nilai slip rasio yang turun ketika sensor kehilangan sensitivitasnya hingga pada detik ke 0,41 sistem tidak mampu lagi mempertahankan kestabilannya dimana pada simulasi ditandai dengan adanya error pada *Simulink* dan nilai slip ratio mencapai nol.

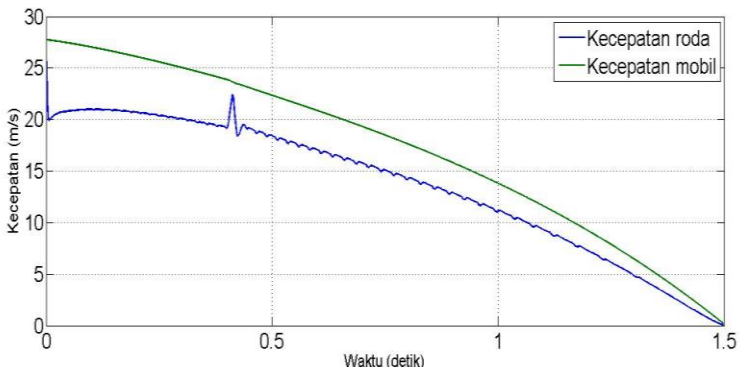
#### 4.5.5. Kesalahan sensitivitas 50%

Pengujian sensitivitas 50% hanya dilakukan pada sistem dengan *Fault Tolerant Control* karena pada dua pengujian sebelumnya respon sistem yang tidak diberi FTC tidak dapat ditunjukkan karena terjadi error pada simulasi. Respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas 50% yang dialami sensor dapat dilihat pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 berikut:



**Gambar 4.27** Slip rasio dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 50%

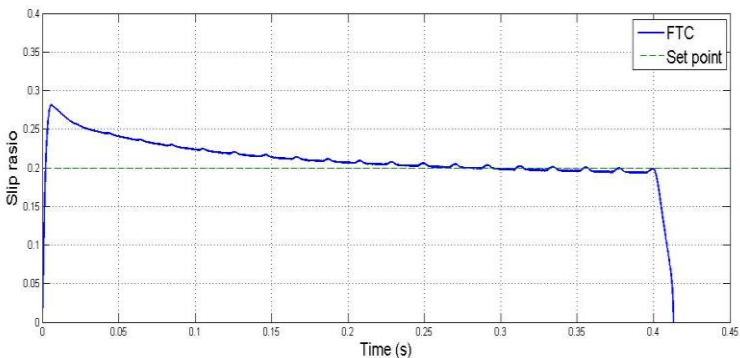
Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan kehilangan sensitivitas sebesar 50%. Sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat mengembalikan kestabilan sistem meskipun sempat terjadi penurunan slip rasio ke nilai 0,05 pada saat sensor kehilangan sebagian sinyal hasil pembacaannya dan slip rasio dari sistem lebih berfluktuatif ketika slip rasio pada nilai 0,2 namun masih dalam batas yang bisa ditoleransi.



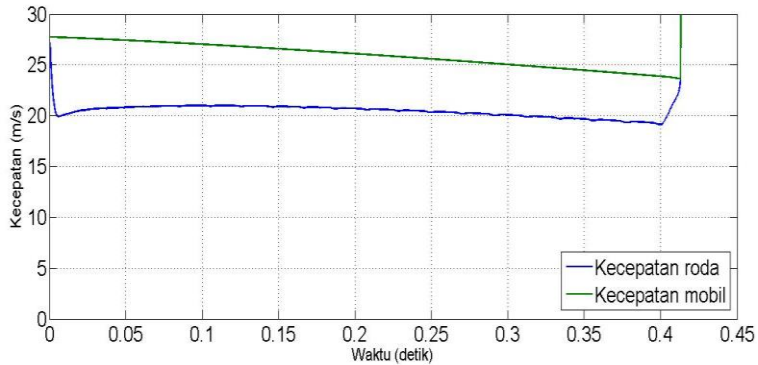
**Gambar 4.28** Kecepatan roda dan mobil dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 50%

#### 4.5.6. Kesalahan sensitivitas 75%

Pengujian sensitivitas 75% hanya dilakukan pada sistem dengan *Fault Tolerant Control* seperti pengujian pada kesalahan sensitivitas 50%. Respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas 75% yang dialami sensor dapat dilihat pada Gambar 4.29 dan Gambar 4.30 berikut:



**Gambar 4.29** Slip ratio dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75%



**Gambar 4.30** Kecepatan roda dan mobil dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75%

Gambar 4.29 dan Gambar 4.30 menunjukkan ketika sensor diberi kesalahan pada detik ke 0,4 berupa sensitivitas nya hilang sebesar 75% sistem tidak dapat mempertahankan kestabilannya. Hal ini ditunjukkan oleh kecepatan roda tidak mengalami penurunan namun terus mengalami kenaikan yang signifikan. FTC yang telah dirancang tidak mampu mempertahankan kestabilan sistem dengan kesalahan sensitivitas 75%.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa data yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan dari tugas akhir mengenai Perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC) pada Pengereman *Regenerative* Mobil Listrik Sebagai *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan pada sensor adalah sebagai berikut:

- Sistem pengereman *Regenerative* sebagai ABS yang diranccang mampu mempertahankan kestabilan mobil saat terjadi pengereman mendadak dengan waktu pengereman 1,52 detik dan jarak pengereman 26,5 meter.
- *Observer* yang dirancang mampu merepresentasikan keadaan plant yang ideal sehingga bisa digunakan sebagai *Fault Estimator*. Nilai estimasi yang diberikan oleh *Fault Estimator* dapat dikatakan sudah merepresentasikan nilai kesalahan aktual yang terjadi, dilihat dari respon *estimator* yang mendekati nilai kesalahan aktual yang telah diberikan dengan parameter respon *max overshoot* 4,75%, *rise time* 0,0127 detik, dan *settling time* 0,2873 detik.
- Sistem dengan *Fault Tolerant Control* yang telah dirancang mampu mengkompensasi kesalahan yang ada di sensor pada plant dengan kesalahan bias sebesar 1 rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s, 25 rad/s dan 50 rad/s. Serta kesalahan sensitivitas sensor sebesar 1%, 5%, 10%, 25%, 25%, dan 50%. Pada kesalahan sensitivitas 75% sistem dengan FTC sudah tidak mampu mempertahankan kestabilan sistem.

#### **5.2 Saran**

Dari tugas akhir yang telah dilaksanakan ini terdapat beberapa saran yang diberikan oleh penulis untuk dilakukan pada penelitian selanjutnya antara lain:

- Mengimplementasikan sistem *Fault Tolerant Control* yang telah dibuat pada mobil listrik.

- Memodelkan sistem pengereman yang telah dibuat dengan *half car model* atau *full car model*.
- Mendesain sistem *Fault Tolerant Control* dengan kesalahan pada sensor dan actuator yang terjadi secara bersamaan.
- Mendesain sistem dengan menggunakan Algoritma kontrol lain, seperti *fuzzy* atau *Sliding Mode Control*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Statista, "statista," 2018. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/>. [Accessed 8 January 2019].
- [2] E. Eckerman, *World History of the Automobile*, Troy: SAE International, 2001.
- [3] A. Faiz, C. S. Weaver and M. P. Waish, *Air Pollution from Motor Vehicle: Standards and Technologies for Controlling Emission*, Washington: World Bank Publication, 1996.
- [4] R. C. Bansal, *Electric Vehicle*, Pilani: Birla Institute of Technology and Science, 2018.
- [5] D. Anair and A. Mahmssani, *State of Charge Electric Vehicle's Global Warming Emission and Fuel-Cost Saving across the United State*, Cambridge: UCS Publication, 2012.
- [6] S. Shi, "Automobile Brake System," Savonia University of Applied Sciences, Kuopio, 2016.
- [7] y. A. Aly, E.-S. Zeidan, A. Hamed and F. Salem, "An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review," *Intelligent Control and Automation*, no. 2, pp. 186-195, 2011.
- [8] T. Bruen, J. Marco and M. Gama, "Model Based Design of Balancing System for Electric Vehicle Battery Pack," *International Federation of Automatic Control*, vol. XLVII, no. 15, pp. 395-402, 2015.
- [9] A. A. Fahmi, M. Ashari and H. Suryoatmojo, "Sistem Pengeraman Elektris Brushless DC Motor Menggunakan Bidirectional Inverter untuk Aplikasi Kendaraan Listrik," *Proseding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS*, 2013.
- [10] K. Nishida and N. Nihanda, "Apparatus for Determining a Failure of Wheel Speed Sensors". US Patent US6480771B2, 12 11 2002.

- [11] J. Guo, X. Jian and G. Lin, "Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller," *Energies*, vol. XII, no. 10, pp. 6459-6476, 2014.
- [12] R. Electronic, "What are Brushless DC motor," Renesas Electronic Corporation, [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html>. [Accessed 16 Mei 2019].
- [13] P. Yedamale, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Arizona: Microchip Technology, 2003.
- [14] C. P. K. S. Singh, "State-space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control Using Fuzzy PID Controller," *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*, vol. 2, pp. 359-369, 2012.
- [15] C. L. Cham and Z. B. Samad, "Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing," *Electro Engineering Technology*, vol. IX, pp. 742 - 748, 2014.
- [16] R. Maia, M. Silva, R. Araujo and U. Nunes, "Electrical Vehicle Modeling: A Fuzzy Logic Model for Regenerative Braking," *Expert Systems With Applications*, 2015.
- [17] T. Murali and C. R. Chandran, "Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor without Loss of Power," in *International Conference on circuit Power and Computing Technologies*, 2017.
- [18] O. TUR and O. USTUN, "An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-Lock Braking System," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Istanbul, 2007.
- [19] K. Ogata, Modern Control Engineering 5th Edition, Boston: Prentice Hall, 2001.
- [20] N. Patin, "DC/AC Converter," *Power Electronic Applied to Industrial System and Transport*, vol. II, pp. 35-101, 2015.

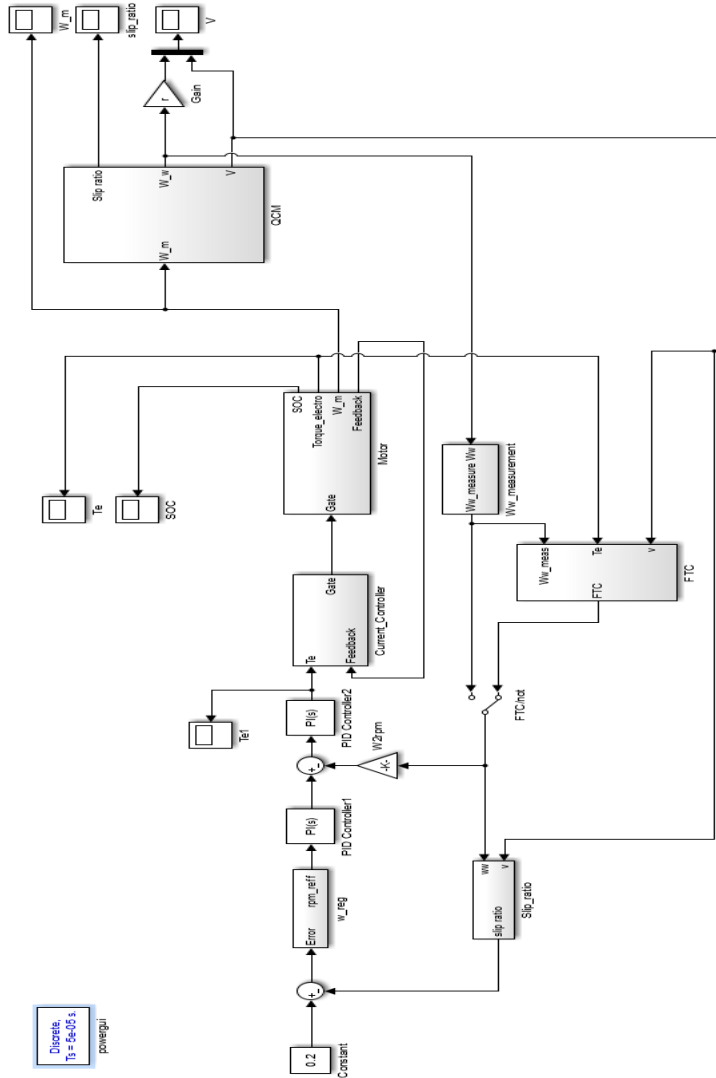


- [21] K. Indriawati, "Robust Fuzzy Observer-based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear System with Simultaneous Actuator and Sensor Fault: Application to a DC Series Motor Speed Drive," *Praize Worthy Prize*, pp. 375-385, 2016.
- [22] Jiang and J, "Fault-Tolerant Control System - An Introductory Overview," *Acta Automatica Sinica*, vol. 31, no. 1, pp. 161-174, 2005.
- [23] K. Indriawati, T. Agustinah, Jazidie and A., "Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linear System with Actuator and Sensor Faults," in *Internatiolah Conference of Control System, Computing, and Engineering*, Penang, 2013.
- [24] A. Tashakori, M. Ektesabi and N. Hosseinzadeh, "Modeling of BLDC Motor with Ideal Back-EMF for Automotive Application," in *World Congress on Engineering*, London, 2011.
- [25] Y. Zhang and J. Jiang, "Fault Tolerant Control System Design with Explicit Consideration of Performance Degradation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. XXXIX, no. 3, pp. 838 - 848, 2013.

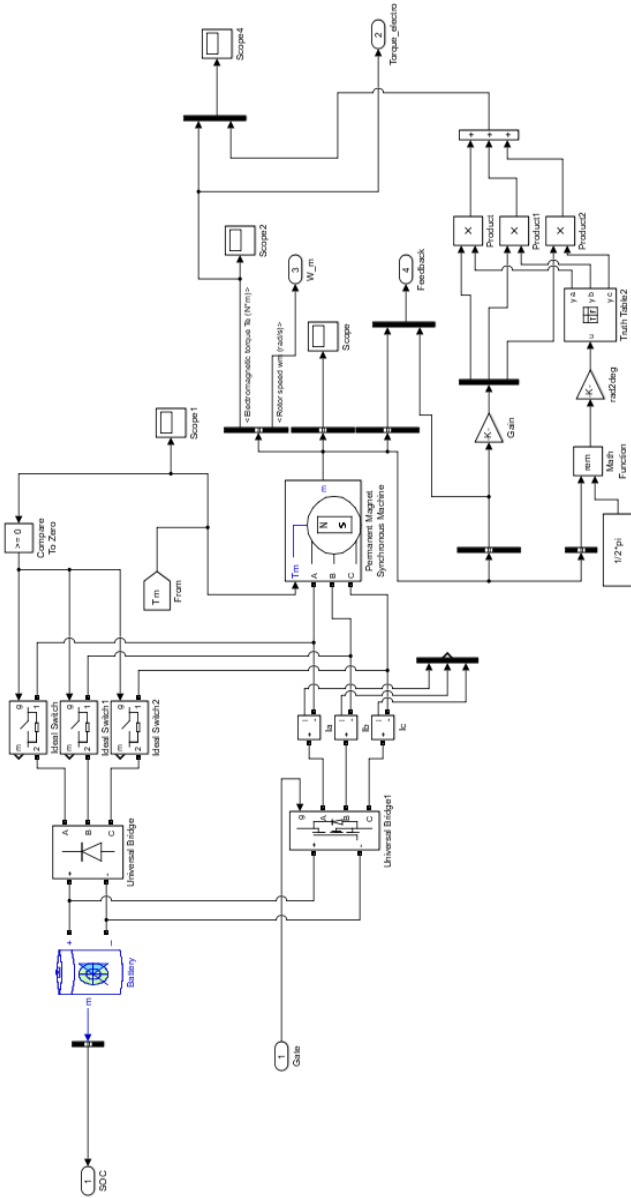
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN

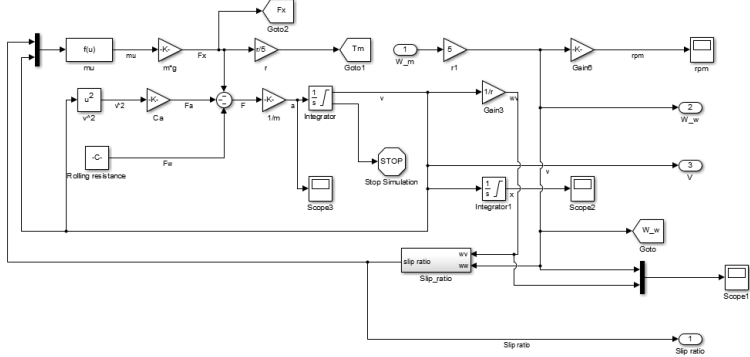
### 1. Desain sistem FTC pada RB sebagai ABS dengan *Simulink*



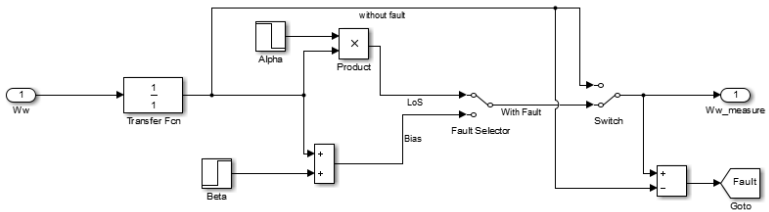
### 2. Pemodelan aktuator motor pada *Simulink*



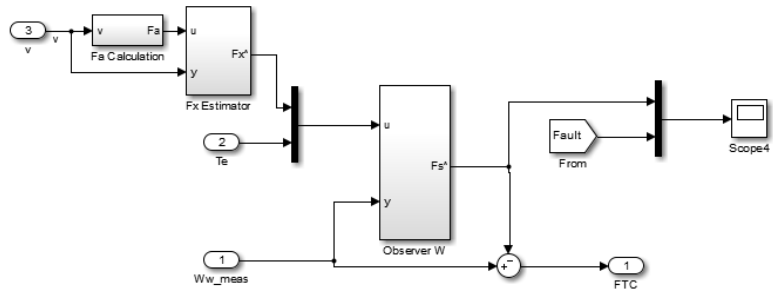
### 3. Pemodelan *Quarter Car Model* pada *Simulink*



### 4. Pemodelan sensor dengan kesalahan pada *Simulink*



### 5. Observer pada *Simulink*



## 6. Kode Matlab

```
%% motor model
clear;
m= 425;
r= 0.325;
Af= 3.1;
c1= 1.2801;
c2= 23.99;
c3= 0.52;
c4= 0.3;
Cr= 0.3;
Ct= 0.01;
J= 0.5;
sigma= 1.225;
g= 9.8;
V0= 27.778;

%% current control
freq_max = 20000;
h = 1e-15;
Ts_vect = 5e-5;

%% state space speed
Av = [0];
Bv = [-0.00941 -0.00941];
Cv = [1];
Dv = 0;
Fv = [-0.00941];

%% Observer Fx
Avtilt = [Av Fv;0 0];
Bvtilt = [Bv;0 0];
Cvtilt = [Cv 0];
Qv = [1e3 0;
      0 1e15];
Rv = [1e-3];
Kv = lqr(Avtilt',Cvtilt',Qv,Rv);

%% state space motor
```

```
A=[-0.0203];
B=[-4.33 66.615];
C=[1];
D=[0 0];
Fs = [1];

%% observer
Abar = 1;
n = length(A);
p = size (C,1);
mu = size (B,2);
Aa = [A zeros(n,p);Abar*C -eye(n)];
Ba = [B; zeros(p,mu)];
Ca = [zeros(p,n) eye(n)];
Fa = [zeros(n,1); Fs];
f = size(Fa,2);

Atilt = [Aa Fa;zeros(f,n+p) zeros(f)];
Btilt = [Ba; zeros(f,mu)];
Ctilt = [Ca zeros(p,f)];
Dtilt = [zeros(size(Ctilt,1),size(Btilt,2))];
obser = obsv (Atilt,Ctilt);

%% LQR
Q =eye(3);
Q(1,1) = 1;
Q(2,2) = 1e3;
Q(3,3) = 1e8;
R = [1e-1];
Ktilt = lqr(Atilt',Ctilt',Q,R);
```

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BIODATA PENULIS



Zanuar Suryanullah dilahirkan di Jombang, tanggal 19 Januari 1997. Penulis telah menempuh pendidikan di SDN Podoroto I pada tahun 2003 sampai 2009, SMP Negeri 1 Kesamben pada tahun 2009 sampai 2012, SMA Negeri 2 Jombang pada tahun 2012 sampai 2015, dan sedang menempuh pendidikan di departemen Teknik Fisika ITS semenjak 2015 hingga sekarang. Pada bulan Juli 2019 penulis telah menyelesaikan Tugas

Akhir dengan judul **PERANCANGAN FAULT TOLERANT CONTROL (FTC) PADA REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR.** Bagi pembaca yang ingin berdiskusi lebih lanjut, dapat menghubungi penulis melalui *email: [zan.surya@gmail.com](mailto:zan.surya@gmail.com)*