



TUGAS AKHIR TF-181801

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC) PADA APLIKASI PENEREMAN *REGENERATIVE* MOBIL LISTRIK DENGAN MODEL *HALF CAR* SEBAGAI *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN SENSOR

DEA FAIZA FEBRIANTY
NRP. 02311640000153

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

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT TF-181801

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

DEA FAIZA FEBRIANTY
NRP. 02311640000153

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

DEPARTEMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dea Faiza Febrianty

NRP : 02311640000153

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul **“PERANCANGAN FAULT TOLERANT CONTROL (FTC) PADA APLIKASI Pengereman Regeneratif Mobil Listrik dengan Model Half Car sebagai Anti-Lock Braking System dengan Kesalahan 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, 22 Januari 2020
Yang membuat pernyataan,



Dea Faiza Febrianty
NRP. 02311640000153

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)*
PADA APLIKASI Pengereman *REGENERATIVE*
MOBIL LISTRIK DENGAN MODEL *HALF CAR* SEBAGAI
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM DENGAN KESALAHAN
SENSOR**

Oleh :

DEA FAIZA FEBRIANTY
NRP. 02311640000153

Surabaya, 22 Januari 2020
Mengetahui dan Menyetujui

Pembimbing



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



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)* PADA APLIKASI Pengereman *REGENERATIVE* MOBIL LISTRIK DENGAN MODEL *HALF CAR* SEBAGAI *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN SENSOR

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institute Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DEA FAIZA FEBRIANTY

Nrp. 02311640000153

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T. (Ketua Penguji)
3. Prof. Dr. Ir. Aulia. S. Aisjah, M.T (Penguji I)
4. Dyah Sawitri S.T., M.T (Penguji II)
5. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC (Penguji III)

SURABAYA
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
PADA APLIKASI Pengereman *REGENERATIVE*
MOBIL LISTRIK DENGAN MODEL *HALF CAR* SEBAGAI
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM DENGAN KESALAHAN
SENSOR**

Nama Mahasiswa : DEA FAIZA FEBRIANTY
NRP : 02311640000153
Departemen : Teknik Fisika FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Pada penelitian ini dilakukan perancangan *Fault Tolerant Control* yang diaplikasikan pada pengereman kendaraan listrik *half car model*, dengan motor bekerja secara *regenerative* sebagai *anti-lock braking system*, untuk mengkompensasi kesalahan yang ada pada sensor. Penelitian ini menggunakan kendaraan listrik dengan model *half car* sebagai plant. Terdapat 3 kontroler yang digunakan yaitu kontrol PI sebagai kontrol *slip ratio* yang mengatur agar *slip ratio* berada pada nilai 0,2, PI kontroler sebagai kontrol putaran roda, dan *hysteresis control*. Motor yang digunakan adalah *Brushless Direct Control* yang berfungsi sebagai penggerak (aktuator) pada kendaraan. Pada penelitian ini menggunakan mode generator pada motor, sehingga motor dapat menyimpan energy yang dihasilkan ketika terjadi pengereman. Dengan kesalahan sensor yang diberikan pada roda depan kendaraan, maka digunakan observer untuk mengestimasi kesalahan kemudian kesalahan tersebut akan dikompensasi oleh *Fault Tolerant Control*. Dari perancangan yang dilakukan, FTC mampu mengestimasi kesalahan aktual dengan karakteristik respon yaitu *maximum overshoot* 9,765%, *rise time* 0,00186 detik dan *time settling* 0,2954 detik. FTC juga mampu mengkompensasi kesalahan sensor berupa kesalahan bias hingga 50 rad/s dan kesalahan sensitivitas 75%.

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
HALF CAR MODEL OF ELECTRIC CAR WITH FAULTS
ON SENSOR**

Student's Name : ***DEA FAIZA FEBRIANTY***
NRP : ***02311640000153***
Departement : ***Teknik Fisika FTI - ITS***
Supervisors : ***Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.***

ABSTRACT

In this research, the design of the Fault Tolerant Control was applied to the braking of a half car model electric vehicle, with the motor working regeneratively as an anti-lock braking system, to compensate for errors in the sensor. This study uses an electric vehicle with a half car model as a plant. There are 3 controllers used, namely the PI controller as the slip ratio control which regulates the slip ratio to be 0.2, the PI controller as the wheel rotation control, and the hysteresis control. The motor used is the Brushless Direct Control which functions as an actuator on the vehicle. In this study using the generator mode on the motor, so the motor can store the energy produced when braking occurs. With the sensor error given to the front wheels of the vehicle, the observer is used to estimate the error then the error will be compensated by Fault Tolerant Control. From the design carried out, the FTC was able to estimate the actual error with response characteristics: maximum overshoot of 9.765%, rise time 0.00186 seconds and time settling 0.2954 seconds. The FTC is also able to compensate for sensor errors in the form of bias errors of up to 50 rad / s and sensitivity errors up to 75%.

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 APLIKASI PENEREMAN *REGENERATIVE MOBIL LISTRIK DENGAN MODEL *HALF CAR* SEBAGAI *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN 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 Dr. Suyanto S.T., M.T selaku Kepala Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama mengerjakan tugas akhir.
3. Bapak Ir.Harsono Hadi, N.T., Ph.D. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
4. Kedua orang tua (Bapak Sumarjito dan Ibu Daeny Damayanti) dan keluarga atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
5. Teman seperjuangan dalam mengerjakan tugas akhir, serta TA-wan Laboratorium Fisika Rekayasa.
6. Nuril Hidayati dan Raihan NP yang selalu menemani dan memberi dukungan, juga Mas Zanuar, Mas Ananta, dan Mas Haryo yang banyak membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir
7. Teman-teman PSDM HMTF ITS Beraksi-Asyik (Mas Cimit, Biran, Lina, Utom, Gopur, Tegar, Deaz, dll) yang selalu memberikan dukungan serta bantuan
8. Seluruh teman-teman asisten Laboratorium Pengukuran Fisis
9. Seluruh teman – teman *Thalassinus Fortis*
- 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, 22 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Half Car.....	5
2.2 Anti-Lock Braking System.....	6
2.3 Motor Brushless Direct Current.....	8
2.4 Regenerative Braking System.....	12
2.5 Kontroler PI.....	13
2.6 Hysteresis Control.....	14
2.7 Fault Tolerant Control System (FTCS).....	15
2.8 Observer	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Pemodelan Half Car Model	23
3.2 Pemodelan Motor.....	25
3.3 Perancangan Kontroler.....	26
3.4 Perancangan Observer.....	27
3.5 Perancangan Sistem Fault Tolerant Control untuk Kesalahan Sensor	30
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Uji Sistem Tanpa ABS.....	33

4.2	Uji Sistem Close Loop	35
4.3	Pengujian Observer	38
4.4	Pengujian Fault Tolerant Control dengan Kesalahan Bias.....	39
4.5	Pengujian Fault Tolerant Control dengan Kesalahan Sensitivitas.....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		61
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA.....		63
LAMPIRAN.....		67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gaya yang bekerja pada pengereman mobil	5
Gambar 2.2	Koefisien gesek antara roda-jalan terhadap slip rasio pada berbagai jenis jalan	7
Gambar 2.3	Ilustrasi motor BLD	9
Gambar 2.4	Six Step Inverter pada BLDC	10
Gambar 2.5	Operasi four quadrant	12
Gambar 2.6	Blok Diagram Kontroler PID	13
Gambar 2.7	Hysteresis Control pada BLDC	14
Gambar 2.8	Hysteresis Current Control	15
Gambar 2.9	Struktur FTCS	16
Gambar 2.10	Diagram blok sistem dan observer	19
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	22
Gambar 3.2	Diagram blok pengendalian sistem	23
Gambar 3.3	Skema Hysteresis Control	25
Gambar 3.4	Skema Motor	26
Gambar 3.5	Struktur Observer	27
Gambar 3.6	Diagram blok sistem dengan Fault Tolerant Control	31
Gambar 4.1	Respon Kecepatan Kendaraan dan Roda saat Pengereman	33
Gambar 4.2	Respon Slip Ratio saat Pengereman	34
Gambar 4.3	Pengujian SoC dari Baterai	34
Gambar 4.4	Respon RPM Roda Depan pada slave controller	35
Gambar 4.5	Respon RPM Roda Belakang pada Slave controller	36
Gambar 4.6	Respon slip rasio roda depan sistem close loop	36
Gambar 4.7	Respon slip rasio roda belakang sistem close loop	37
Gambar 4.8	Kecepatan roda dan mobil pada sistem close loop	38
Gambar 4.9	Perbandingan kesalahan aktual dengan kesalahan estimasi observer	38

Gambar 4.10	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s40
Gambar 4.11	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s40
Gambar 4.12	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s41
Gambar 4.13	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s41
Gambar 4.14	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s42
Gambar 4.15	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s42
Gambar 4.16	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan 5 rad/s.....43
Gambar 4.17	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan 5 rad/s43
Gambar 4.18	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s.....44
Gambar 4.19	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s.....44
Gambar 4.20	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s.....45
Gambar 4.21	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s45
Gambar 4.22	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s.....46
Gambar 4.23	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s.....46
Gambar 4.24	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s.....47
Gambar 4.25	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s47
Gambar 4.26	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s.....48
Gambar 4.27	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s.....48

Gambar 4.28	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s.....49
Gambar 4.29	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s49
Gambar 4.30	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%50
Gambar 4.31	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%51
Gambar 4.32	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%51
Gambar 4.33	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5% .52
Gambar 4.34	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%52
Gambar 4.35	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%53
Gambar 4.36	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%53
Gambar 4.37	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10% 54
Gambar 4.38	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%54
Gambar 4.39	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%55
Gambar 4.40	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%55
Gambar 4.41	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25% 56
Gambar 4.42	Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 50%56
Gambar 4.43	Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 50%57
Gambar 4.44	Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 50%57
Gambar 4.45	Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan 50%58

Gambar 4.46	Slip rasio dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75%	58
Gambar 4.47	Kecepatan roda dan mobil dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75%	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Friksi Jalan	7
Tabel 2.2	Kondisi saklar six step inverter.....	10
Tabel 3.1	Parameter gaya yang bekerja	23
Tabel 3.2	Parameter koefisien gesekan pada aspal kering	24
Tabel 3.3	Parameter kontroler PI cascade.....	27
Tabel 3.4	Parameter motor BLDC.....	29
Tabel 4.1	Performansi slave controller	36
Tabel 4.2	Performansi close loop sistem	37
Tabel 4.3	Performansi Observer ketika estimasi kesalahan.....	39

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan masyarakat pada alat transportasi yang aman dan nyaman, mendorong terus berkembangnya teknologi di bidang otomotif. Tingkat mobilisasi masyarakat yang tinggi menjadi alasan dibutuhkannya kendaraan yang aman dan nyaman. Kebutuhan mobilitas tersebut dipenuhi dengan perkembangan moda transportasi, khususnya mobil. Saat ini, masih banyak masyarakat yang menggunakan kendaraan dengan bahan bakar minyak atau fosil. Kebutuhan tersebut menyebabkan dampak yang serius seperti polusi udara, pemanasan udara, pemanasan global. Tingkat pencemaran udara di Indonesia semakin memprihatinkan. Bahkan menurut hasil survey yang dilakukan oleh *World Bank*, Indonesia menempati peringkat ke empat untuk negara dengan tingkat polusi tertinggi di dunia setelah Egypt, India dan China. Dari semua penyebab polusi udara yang ada, emisi transportasi terbukti sebagai penyumbang pencemaran udara tertinggi di Indonesia, yakni sekitar 85 persen. [1]

Salah satu perkembangan terkait upaya meminimalisir dampak negatif dari mobil berbahan bakar fosil adalah dengan pembuatan mobil berbasis listrik, baik *hybrid* ataupun *electric vehicle*. *Electric Vehicle* (EV) berada di popularitas antara pertengahan abad ke-19 dan awal abad ke-20, ketika listrik merupakan salah satu metode yang disukai untuk menggerakkan mobil, memberikan kenyamanan dan kemudahan dalam beroperasi. Selama beberapa decade terakhir, meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak lingkungan menyebabkan minat baru pada infrastruktur transportasi listrik [2].

Baik pada mobil listrik ataupun mobil konvensional, terdapat beberapa sistem yang saling berhubungan satu sama lain. Salah satu sistem terpenting dalam mobil, baik listrik maupun konvensional adalah sistem pengereman. Pengereman ini berfungsi untuk mengurangi kecepatan kendaraan. Kegagalan pada pengereman akan menyebabkan kecelakaan dan akan

membahayakan pengguna mobil. Kegagalan yang sering terjadi pada pengereman adalah terkuncinya roda ketika kendaraan masih berjalan. Hal ini dikarenakan gaya yang diberikan pengereman yang diberikan pada roda terlalu besar. Untuk menghindari kegagalan tersebut maka diaplikasikan sebuah *Anti-lock Braking System*. Saat ini, ABS menjadi sebuah standar yang diharuskan untuk diaplikasikan pada kendaraan. [3].

Ketika pengereman terjadi, sebagian besar energi terbuang menjadi panas akibat gesekan antara kampas rem dengan roda. Permasalahan energi yang terbuang ini menjadi permasalahan penting terutama pada mobil listrik. Pengereman *regenerative* memungkinkan kendaraan listrik untuk menggunakan motor sebagai generator ketika rem diterapkan, untuk memompa energi kendaraan dari rem ke perangkat penyimpanan energi atau battery. Pengereman *regenerative* adalah pendekatan yang efektif untuk memperpanjang rentang berjalannya *Electric Vehicle* dan dapat menghemat dari 8% hingga 25% dari total energi yang digunakan oleh kendaraan, tergantung pada siklus mengemudi dan bagaimana ia dikemudikan [2]. Salah satu hal yang dapat meminimalisir hal tersebut adalah dengan mengaplikasikan sebuah sistem regenerasi energi saat pengereman (*Regenerative Braking System*).

Salah satu komponen terpenting dalam pengereman adalah sensor. Ketika sensor gagal atau terjadi kesalahan, maka sensor akan gagal membaca pembacaan pada roda dan akan menyebabkan kegagalan pada seluruh sistem, sehingga akan terjadi kecelakaan [4]. Salah satu cara untuk menghindari kejadian tersebut, dirancanglah sebuah sistem yang mampu mengkompensasi kesalahan yang ada pada sensor.

Dari latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka pada tugas akhir ini dilakukan perancangan FTC pada sistem pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* kendaraan listrik dengan kesalahan (fault) pada komponen sensor menggunakan *software* MATLAB2014.

1.2 Rumusan Masalah

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

- a. Bagaimana pengaruh kesalahan sensor terhadap pengereman *Regeneratif Anti-Lock Braking System*?
- b. Bagaimana mengatasi kesalahan sensor terhadap pengereman *Regeneratif Anti-Lock Braking System*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan di atas, sehingga tujuan dari tugas akhir ini yaitu merancang sistem *Fault Tolerant Control (FTC)* pada aplikasi pengereman *regenerative* mobil listrik sebagai *anti-lock braking system* dengan kesalahan sensor untuk mengetahui pengaruh kesalahan sensor dan cara mengatasi kesalahan tersebut.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini diantaranya:

- a. Simulasi pengereman mobil pada jalan lurus dan datar.
- b. Jenis jalan yang diterapkan saat pengereman adalah jenis aspal kering dengan *slip ratio* diatur pada 0,2 sesuai dengan grafik *slip ration-friction coeff*
- c. Jenis motor yang digunakan adalah motor BLDC (*Brushless Motor Direct Current*).
- d. Komponen pada motor dan inverter dianggap ideal
- e. Sistem charging baterai hanya menggunakan diode untuk menyearahkan tegangan balik dari motor tanpa adanya kontrol arus dan voltase.
- f. Algoritma kontrol pada pengereman adalah PI
- g. Kesalahan yang diberikan pada sistem berupa kesalahan bias dan sensitifitas sensor.
- h. Kesalahan hanya diberikan pada roda depan

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.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Half Car

Half Car yang digunakan pada penelitian kali ini menggunakan dua roda yaitu roda depan dan roda belakang. Pemilihan roda depan dan roda belakang dikarenakan hal tersebut cukup merepresentasikan kendaraan penuh (*full car*). Pemodelan *half car model* dilakukan dengan melihat persamaan-persamaan matematis yang ada ketika mobil sedang mengalami pengereman.



Gambar 2.1 Gaya yang bekerja pada pengereman mobil

Pemodelan ini adalah pemodelan gaya pengereman mobil hanya pada dua roda saja yaitu roda depan dan roda belakang. Gaya – gaya pengereman yang dimaksud ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Peristiwa pengereman pada *half car model* sesuai dengan Hukum Newton II yang berbunyi “Jumlah vektor dari gaya-gaya yang berlaku pada sebuah objek adalah sama dengan massa dari objek tersebut dikalikan dengan akselerasi dari objek tersebut”, dan ditunjukkan dengan persamaan (3.1)

$$\Sigma F = m \cdot a \quad (2.1)$$

$$-2(F_w + F_s + F_a + F_x) = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.2)$$

Dimana v merupakan kecepatan kendaraan, F_a merupakan gaya aerodinamis, F_s merupakan *slope friction*, F_w merupakan gaya resistansi putaran roda, dan F_x merupakan gaya gesek roda. Dengan nilai masing – masing gaya yaitu:

$$F_w = c_t \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2.3)$$

$$F_a = 0,5 \cdot c_r \cdot \delta \cdot A_f \cdot v^2 \quad (2.4)$$

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (2.6)$$

2.2 Anti-Lock Braking System

Anti-lock braking system merupakan sistem keamanan yang paling penting untuk sebuah kendaraan. ABS dapat meningkatkan keamanan sebuah kendaraan pada keadaan yang ekstrim selama dan telah menjadi peralatan yang standar untuk seluruh kendaraan di semua wilayah [3]. Ketika terjadi pengereman darurat atau mendadak, kendaraan yang dikendalikan oleh ABS akan tetap stabil dikarenakan jarak kendaraan ketika berhenti akan berkurang dan kontrol kemudi juga meningkat [5]. Pengereman dikatakan terkunci ketika pengemudi memberikan torsi maksimum pada roda, roda terkunci sehingga kendaraan meluncur pada permukaan jalan dan biasanya pengemudi akan kehilangan kendali sehingga perlu digunakan *Anti-lock braking system*. *Anti-lock braking system* berguna untuk menunjang keselamatan pengemudi, terutama saat melakukan pengereman pada jalanan licin.

Pada tiap-tiap roda terdapat sensor yang digunakan untuk mendeteksi kecepatan putaran roda tersebut. Roda dikatakan atau mengalami *slip* apabila kecepatan roda berada dibawah kecepatan kendaraan, dengan demikian kontroler akan memberikan aksi berupa pengurangan gaya pengereman pada roda sehingga roda dapat mengikuti pergerakan kecepatan kendaraan.

Saat kendaraan mengalami pengereman, terdapat gaya antara roda mobil dengan permukaan jalan. Gaya ini disebut dengan gaya gesek F_x . Gaya gesek dipengaruhi oleh massa kendaraan m , gaya gravitasi g dan juga koefisien gesek μ .

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (2.7)$$

Koefisien gesek dapat ditentukan melalui grafik hubungan gaya gesek dan *slip* ratio atau dapat dituliskan dalam persamaan

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.8)$$

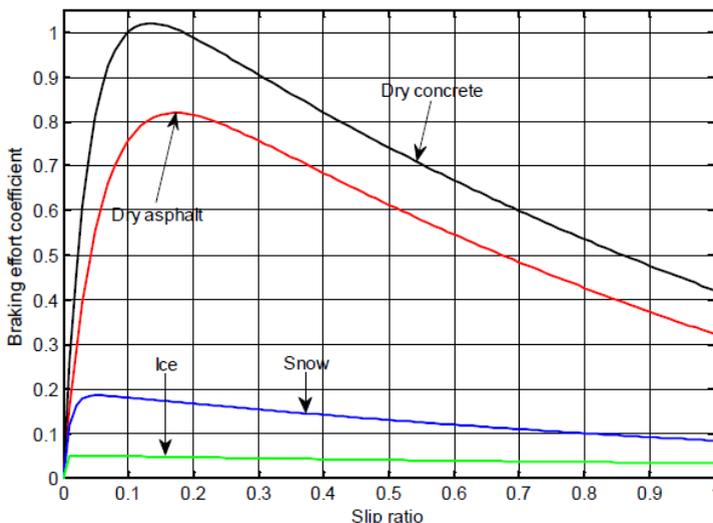
Dimana:

C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan

C_2 = Bentuk kurva gesekan

C_3 = Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan

pada saat $\lambda = 1$
 C_4 = nilai karakteristik kebasahan jalan



Gambar 2.2 Koefisien gesek antara roda-jalan terhadap slip rasio pada berbagai jenis jalan [3]

Pada Gambar 2.2 menunjukkan nilai *slip ratio* dari berbagai permukaan jalan. Pada aspal kering, nilai gaya pengereman paling besar terjadi pada slip ratio 0,2 sehingga pada sistem ABS ini menjaga agar *slip ratio* bernilai 0,2 agar gaya gesek yang dihasilkan maksimal.

Tabel 2.1 Parameter Friksi Jalan [6]

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

Nilai parameter C_1, C_2, C_3 , dan C_4 untuk jenis jalan yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Selama terjadi pengereman, slip rasio dari kendaraan didapat dari persamaan 2.3

$$\lambda = \frac{v - \omega R}{v} \quad (2.9)$$

Dimana :

ω = Kecepatan angular roda (rad/s)

R = Jari – jari roda (m)

v = Kecepatan kendaraan (m/s)

Hubungan antara kecepatan angular roda dan torsi dapat ditunjukkan melalui persamaan *Tire Model*, seperti pada persamaan 2.4.

$$F_x \cdot r - T_b = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.10)$$

Dengan:

r = Jari-jari roda (m)

Tb = Torsi Pengereman (Nm)

2.3 Motor *Brushless Direct Current*

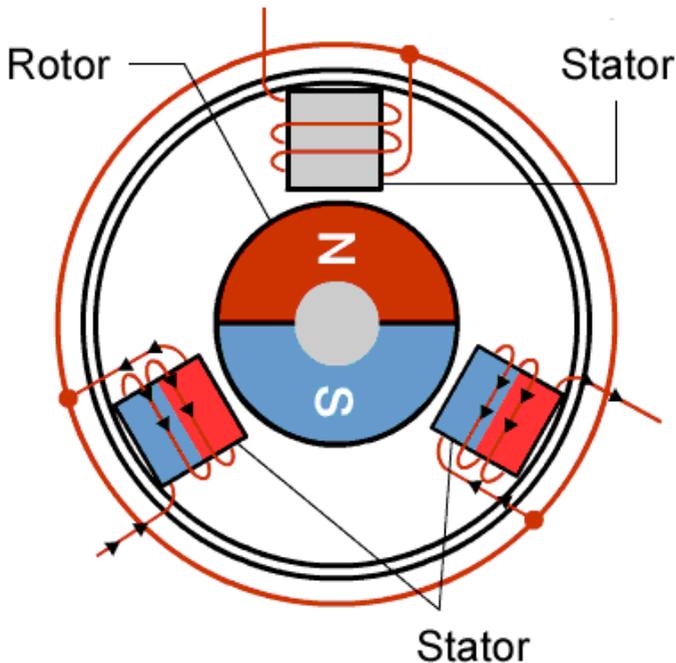
Motor berguna untuk mengkonversi energi elektrik menjadi energi mekanik. Banyak tipe motor yang sering digunakan, salah satunya adalah motor *Brushless Direct Current* (BLDC). Motor BLDC adalah sistem penggerak dengan sumber arus listrik DC. Kelebihan dari motor BLDC memiliki efisiensi yang tinggi, range kecepatan yang lebih tinggi dan lebih sedikit noise [7].

Motor BLDC banyak digunakan dalam bidang industry seperti otomotif, *aerospace*, medis, peralatan otomasi dan instrumentasi. Seperti namanya, BLDC tidak menggunakan sikat sebagai commutator. Motor BLDC ini termasuk dalam tipe *synchronous* motor, dimana medan magnet dihasilkan oleh stator dan rotasi motor. Motor BLDC yang paling banyak digunakan adalah motor 3 fasa, akan tetapi motor ini disebut BLDC karena implementasinya yang menggunakan sumber DC sebagai sumber utamanya yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter* 3 fasa [8].

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa bagian utama dari motor BLDC adalah rotor yang berputar dan stator yang diam. Ketika

stator diberikan tegangan 3 fasa, maka akan tercipta medan magnet yang berubah-ubah dan akan menarik rotor.

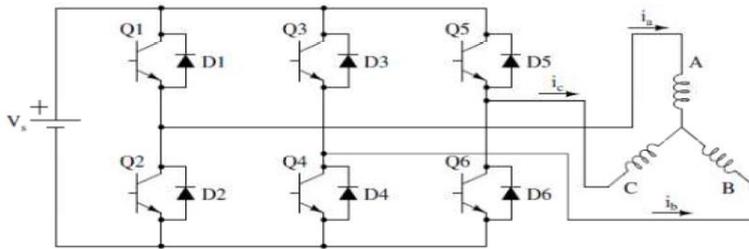
Hal yang membedakan *brushed* DC dan BLDC motor adalah komutasi pada BLDC motor dikendalikan secara elektronik. Posisi rotor harus diketahui menggunakan sensor *hall effect* yang ada pada stator untuk menentukan kumparan mana yang dialirkan listrik. Setiap kali kutub magnet melewati sensor *hall effect*, sensor akan memberikan sinyal *high* atau *low* [9]. Pada BLDC motor, posisi rotor dipandu oleh saklar elektronik yang memastikan terjadinya komutasi yang tepat dan motor berputar. Motor BLDC menggunakan *six step inverter* untuk mengatur aliran arus yang masuk ke motor.



Gambar 2.3 Ilustrasi motor BLDC [7]

Dalam operasi *six step* inverter, hanya dua kumparan yang diberikan energi pada satu waktu sehingga hanya terdapat dua

kumpulan aktif dengan arah arus yang saling berkebalikan. Satu putaran motor terdiri dari 6 step, yang berarti masing – masing step aktif tiap 60° . Skema switching komutasi ditunjukkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.4 Six Step Inverter pada BLDC [10]

Tabel 2.2 Kondisi saklar six step inverter [10]

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	-	+

Terdapat beberapa asumsi yang dibuat untuk mengurangi kompleksitas matematis dari motor 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 [11]. Sehingga didapatkan pemodelan dari BLDC:

$$\begin{cases} V_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (2.11)$$

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 (Ω)

Back Emf pada motor BLDC berbeda fasa sebesar 120 pada masing – masing fasa nya, dan dapat dinyatakan dalam persamaan (2.12)

$$\begin{cases} e_a = K_e f(\theta_e) \omega_m \\ e_b = K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \omega_m \\ e_c = K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \omega_m \end{cases} \quad (2.12)$$

Dengan:

ω_m = rotor speed (rad/s)

K_e = konstanta *back emf* (V/rad.s⁻¹)

$f(\theta_e)$ = fungsi trapezoidal

θ_e = posisi sudut rotor (rad)

Torsi elektomagnetik yang dihasilkan oleh motor BLDC dapat dilihat pada persamaan (2.7)

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2.13)$$

atau

$$T_e = K_t \left[f(\theta_e) i_a + f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.14)$$

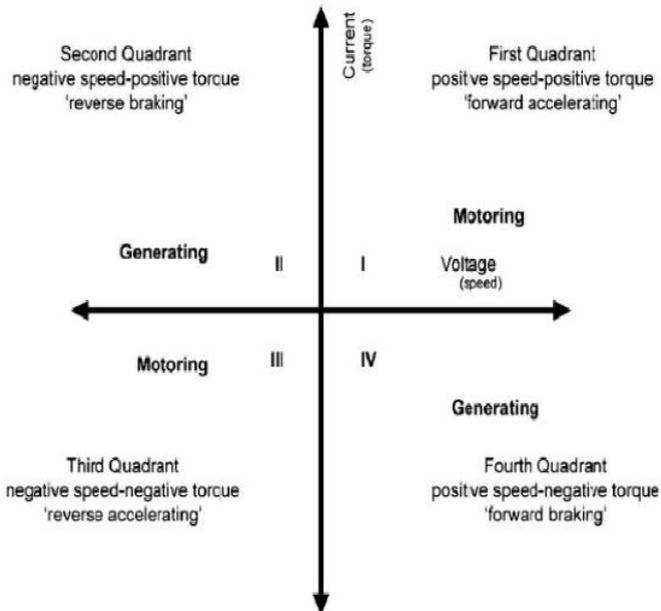
Dengan :

T_e = torsi elektomagnetik (Nm)

K_t = konstanta torsi (Nm/A)

2.4 Regenerative Braking System

Regenerative braking merupakan suatu mekanisme mengembalikan daya kepada baterai dengan mengfungsikan motor menjadi generator ketika pengereman terjadi, kemudian akan menyimpan energy hasil pengereman tersebut ke tempat penyimpanan atau baterai [2]. Pengereman *regenerative* terjadi ketika motor dalam keadaan deselerasi. Ketika torsi motor bernilai positif, maka motor akan mengambil daya dari baterai dan ketika motor bernilai negatif maka motor akan bekerja seperti generator yaitu mengisi daya dari baterai. Energi elektrik tersebut dapat di simpan di dalam baterai atau digunakan ketika kendaraan berjalan. Dengan metode ini, daya dapat digunakan kembali sebagai propulsi dari kendaraan, sehingga meningkatkan efisiensi dari kendaraan listrik.

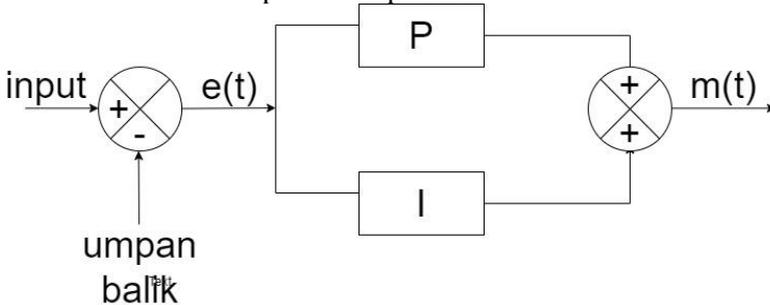


Gambar 2.5 Operasi *four quadrant* [9]

Brushless DC motor memiliki empat mode operasi atau biasa disebut dengan *four quadrant operation*. Mode operasi pada motor BLDC ini berdasarkan kecepatan dan torsi beban dari motor. Ketika motor BLDC beroperasi pada kuadran satu (akselerasi maju) dan tiga (akselerasi mundur), maka motor berada dalam mode motoring, dan tegangan sumber bernilai lebih besar dibandingkan *back emf*. Ketika motor beroperasi pada kuadran dua dan empat, motor berada dalam mode pengereman, dimana *back emf* dari motor lebih besar dibandingkan tegangan sumber.

2.5 Kontroler PI

Kontrol PI merupakan salah satu mekanisme yang paling banyak digunakan untuk melakukan kontrol secara *feedback*. Kontrol ini membaca nilai *error* yang merupakan selisih dari *setpoint* yang diinginkan dengan pengukuran dari variable proses dari loop kontrol. Kontrol PI memanfaatkan fungsi kontrol proporsional, integral yang memiliki keunggulan masing-masing. Kontrol proporsional memiliki keunggulan mempercepat *rise time*, integral memiliki keunggulan memperkecil error. Parameter-parameter pada kontrol PI diperoleh dengan metode tuning [12]. Ilustrasi kontrol PI dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Blok Diagram Kontroler PI [13]

y adalah variable proses yang diukur, r adalah variable referensi dan u adalah sinyal control dan e adalah kesalahan control. Sehingga $e = y_{sp} - y$. Algoritma dari PI didefinisikan sebagai berikut:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (2.15)$$

Dimana:

$u(t)$ = sinyal error

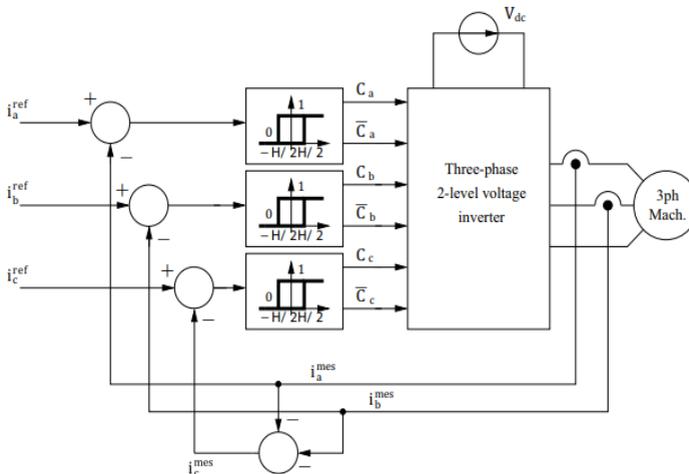
$e(t)$ = error

K_c = gain controller

T_i = integral time

2.6 Hysteresis Control

Histerisis menunjukkan perbedaan nilai *output* pembacaan saat menggunakan nilai *input* naik (dari rendah ke tinggi), dengan nilai *output* pembacaan saat menggunakan nilai *input* turun (dari tinggi ke rendah). *Hysteresis Control* merupakan jenis kontrol non-optimal yang berupa kontrol switch secara langsung. Salah satu contoh penggunaan kontroler ini adalah kontrol arus pada *driver* motor BLDC dengan struktur yang ditunjukkan pada Gambar 2.7



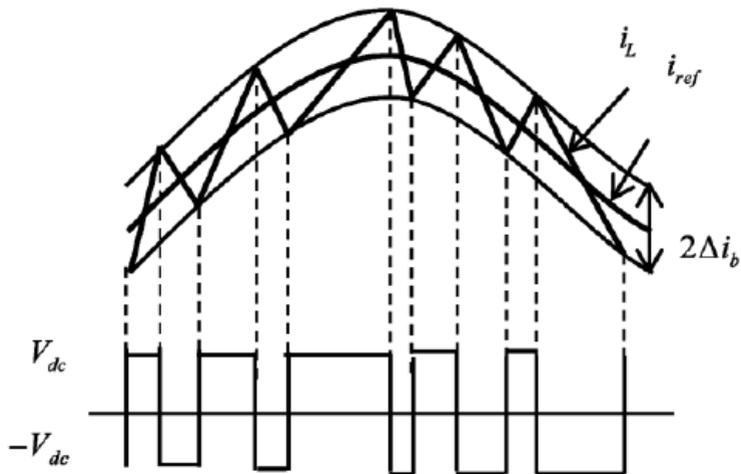
Gambar 2.7 Hysteresis Control pada BLDC [14]

Kontroler histerisis bekerja secara intuitif, menerapkan fungsi switching dengan nilai 1 untuk menaikkan arus dan nilai 0 untuk mengurangi arus apabila arus yang melewati telah melebihi set

point yang ditentukan. Metode kontrol ini sangatlah dinamis, tetapi *ripple* arus yang dihasilkan bergantung pada lebar hysteresis dan frekuensi switching meningkat ketika *bandwidth* histerisis diperkecil [14]. Persamaan batasan histerisis dapat dilihat pada persamaan 2.16.

$$\Delta i_b > \max \left(\frac{di_{ref}}{dt} \right) \frac{1}{f_{sp}} \quad (2.16)$$

Nilai *bandwidth* arus ditetapkan pada nilai tertentu Δi_b . Tidak akan terjadi *switching* ketika arus terukur i_L berada di antara batas atas dan batas bawah. Switch S_1 akan off, dan S_2 akan on ketika keluaran arus terukur berada di batas atas pita hysteresis ($i_{ref} + \Delta i_b$), dan arus keluaran akan meluruh. Juga ketika arus terukur berada di batas bawah pita hysteresis ($i_{ref} - \Delta i_b$) maka S_1 on dan S_2 off kemudian arus keluaran akan mulai meningkat. Pergerakan arus dapat dilihat pada Gambar 2.8.



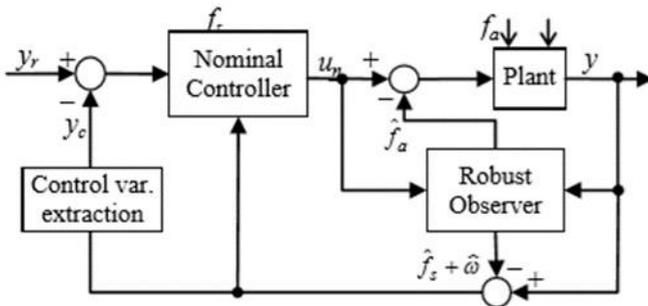
Gambar 2.8 Hysteresis Current Control [16]

2.7 Fault Tolerant Control System (FTCS)

Fault Tolerant Control merupakan sebuah sistem yang mampu untuk mempertahankan kestabilan dan performansi sistem pada

saat terjadi kesalahan pada komponen. FTC ini dapat menoleransi kerusakan komponen sehingga performansi dan kestabilan sistem tetap terjaga serta dapat mencapai kondisi yang optimal.

Tahapan dalam sistem *Fault Tolerant Control* adalah yang pertama yaitu mendeteksi kesalahan yang diberikan yang ada pada sistem. Kemudian kesalahan tersebut diestimasi berdasarkan model matematik oleh *observer*. Kesalahan yang telah terestimasi kemudian di kompensasi. Rekonfigurasi kontrol berfungsi untuk memperbaiki kesalahan agar sistem tetap berjalan secara optimal.



Gambar 2.9 Struktur FTCS [15]

2.8 Observer

Observer digunakan dalam sebuah skema *fault tolerant control* untuk mendeteksi kesalahan sistem berdasarkan model dari sistem. *Observer* merupakan suatu algoritma yang berfungsi untuk mengestimasi state pada suatu sistem berdasarkan model matematis sistem tersebut. Algoritma tersebut dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan pada sistem [13]. *Observer* direpresentasikan dengan persamaan-persamaan berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.17)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.18)$$

Dengan:

A = matriks keadaan

B = matriks kontrol input

C = matriks pengukuran

D = matrik nilai keluaran

x = vektor keadaan

u = vector nilai input

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:

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

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.20)$$

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:

$$x_f(t) = \alpha x(t) + \beta \quad (2.21)$$

$$f(t) = x_f(t) - x(t) \quad (2.22)$$

Dengan:

α = Kesalahan sensitifitas

β = Kesalahan bias

x_f = State dengan penambahan kesalahan kesalahan

f = Kesalahan yang terjadi

x = State tanpa kesalahan

Ekspansi dilakukan untuk memperoleh gain observer sehingga diperoleh persamaan baru sehingga dapat diketahui pengaruh kesalahan pada sensor terhadap *state* sistem.

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

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

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

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \quad (2.25)$$

$$y_a(t) = C_a x_a(t) \quad (2.26)$$

Aa, Ba, dan Ca merupakan matriks baru hasil dari ekspansi. Matriks dari *state space* yang telah di ekspansi didapatkan menggunakan persamaan (2.12)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z \cdot F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$y_t(t) = \begin{bmatrix} 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Persamaan keadaan dan persamaan keluaran yang mengandung sensor digunakan untuk merancang persamaan *observer* yang dituliskan:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_a \hat{x}(t) + B_a u(t) + E_a \hat{f}(t) + K_e (y - \hat{y}) \quad (2.29)$$

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

Kemudian ditambahkan state yang untuk mengestimasi kesalahan sensor

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

Persamaan tersebut diubah menjadi bentuk sebagai berikut:

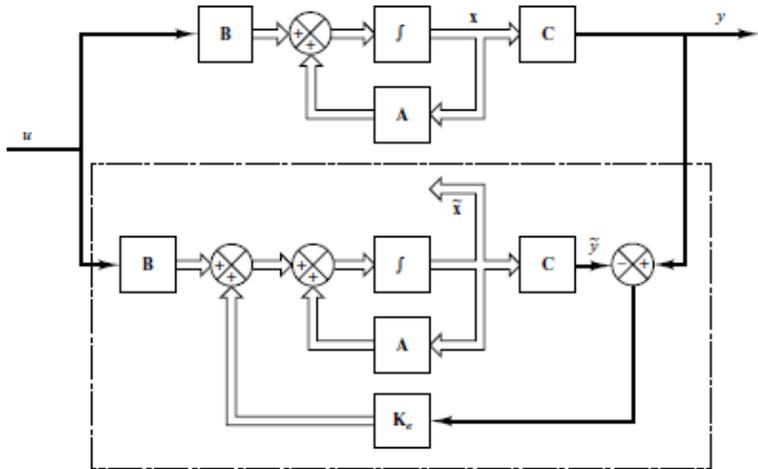
$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{f}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ 0 \end{bmatrix} u + K_e (y - \hat{y}) \quad (2.31)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} C_a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{f} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

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*.

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 (\tilde{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. Penentuan *gain observer* bisa dilakukan dengan menggunakan metode LQR. Penggunaan LQR ini dikarenakan adanya sifat dualitas pada kontroler dan *observer*. Dualitas disini dartikan bahwa sifat-sifat yang ada dala keterkontrolan bisa diperoleh dari sifat-sifat yang ada dalam keterkontrolan bisa diperoleh dari sifat-

sifat yang ada dalam *observer* dengan menggunakan konsep dualitas dan sebaliknya juga berlaku demikian. Dualitas antara kontroler dan observer memungkinkan untuk dengan mudah menyelesaikan masalah estimasi setelah masalah kontrol diselesaikan, dan sebaliknya [18]

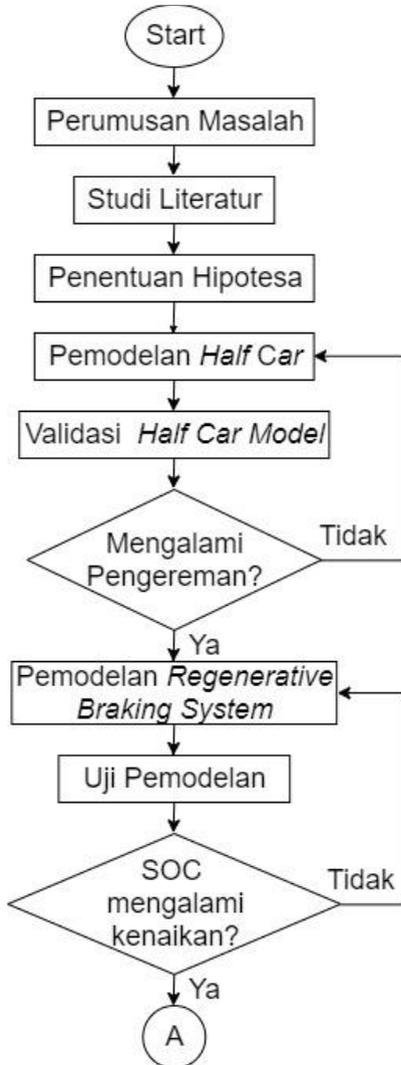


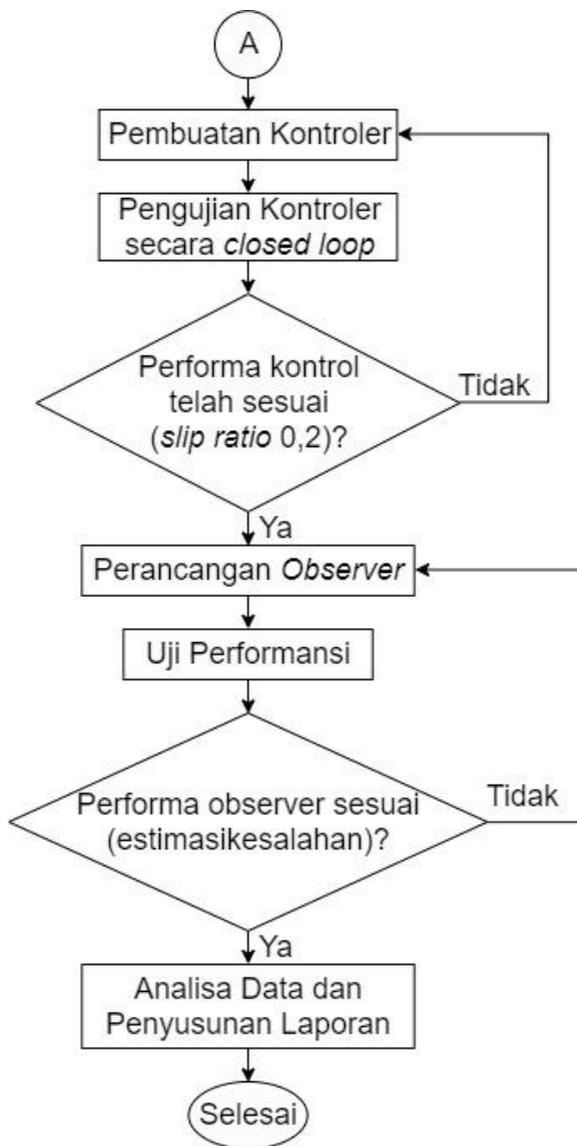
Gambar 2.10 Diagram blok sistem dan *observer* [13]

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

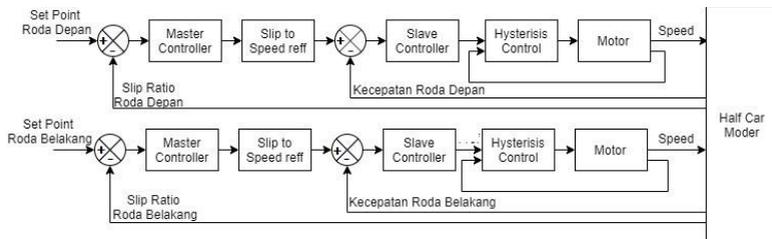
Pengerjaan tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan diagram alir sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Perancangan sistem dimulai dengan pemodelan *half car* terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan pemodelan motor *regenerative braking system*. Apabila kendaraan telah mengalami pengereman, dan *state of charge* naik, maka dilanjutkan dengan pembuatan kontroler. Kontroler diaplikasikan pada tiap roda, dimana tiap roda terdapat 3 kontroler yaitu adalah *master controller*, *slave controller*, dan *hysteresis current control*. Dan dilanjutkan dengan pemberian kesalahan pada sensor beserta observernya yang kemudian kesalahan tersebut akan dikompensasi. Diagram blok pengendalian sistem dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Diagram blok pengendalian sistem [17]

3.1 Pemodelan *Half Car Model*

Pemodelan *half car* dilakukan menggunakan persamaan 2.2 hingga 2.6 dengan mensubstitusikan parameter kendaraan yang akan digunakan pada Tabel 3.1..

Tabel 3.1 Parameter gaya yang bekerja [16]

Parameter	Deskripsi	Nilai
M	Massa mobil	1298,9 kg
A_f	Luas area	3.1 m^2
c_r	Koefisien resistansi aerodinamik	0.3
c_t	Koefisien resistansi putaran	0.01
g	Gaya gravitasi	9.8 m/s^2
δ	Densitas udara	1.225 kg/m^3
r	Jari-jari roda	0.325 m

Nilai koefisien gesek μ didapatkan dari persamaan dibawah ini:

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (3.1)$$

Dimana v merupakan kecepatan kendaraan. λ merupakan nilai *slip ratio*, dan koefisien gesekan pada aspal kering yaitu nilai maksimum kurva gesekan C_1 , bentuk kurva gesekan C_2 , perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat lambda C_3 , dan nilai karakteristik kebasahan jalan C_4 yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter koefisien gesekan pada aspal kering [17]

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

Untuk melakukan kontrol *anti-lock braking system*, nilai *slip ratio* λ yang akan digunakan adalah 0,2. *Slip ratio* diperoleh dari persamaan berikut [18]:

$$\lambda = \frac{v_v - R \cdot v_w}{v_v} \quad (3.2)$$

Dimana V_v merupakan kecepatan linear kendaraan dan V_w merupakan kecepatan linear roda.

Dengan mensubstitusikan parameter yang ada kedalam persamaan gaya yang bekerja ketika pengereman kendaraan sehingga didapatkan persamaan:

$$F_w = 0,01. 1298,9. 98. \cos 0 \quad (3.3)$$

$$F_a = 0,5. 0,3. 1,2. 3,1. v^2 \quad (3.4)$$

$$F_x = \mu. 1298,9. 9,8 \quad (3.5)$$

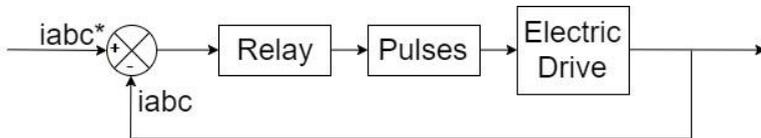
$$F_s = 1298,9. 9,8. \sin 0. \quad (3.6)$$

Permukaan jalan dianggap lurus sehingga nilai α dianggap 0 sehingga F_s bernilai 0.

3.2 Pemodelan Motor

Motor yang digunakan pada pemodelan ini adalah motor BLDC yang berfungsi sebagai penggerak dari kendaraan. Pemodelan motor dapat dikatakan valid apabila dapat melakukan pengereman pada kendaraan hingga kendaraan tersebut benar-benar berhenti dengan nilai slip ratio $\lambda = 1$.

Pemodelan pada *hysteresis control* dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.4. Dimana i_{abc}^* merupakan arus referensi, i_{abc} merupakan arus terukur. Dan output yang dihasilkan adalah sebuah 6 pulsa yang kemudian dijadikan sebagai input inverter.



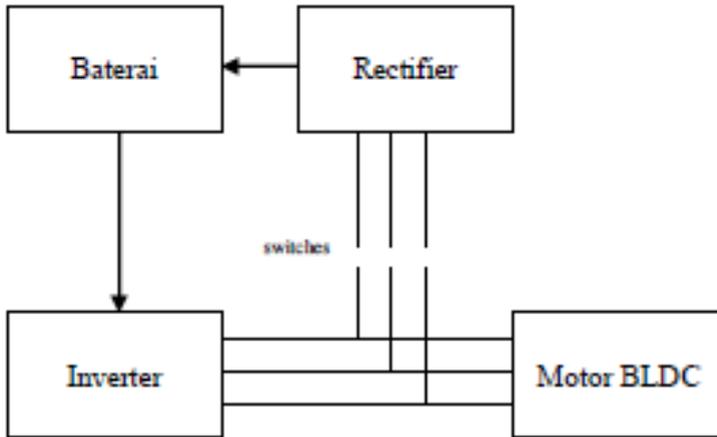
Gambar 3.3 Skema *Hysteresis Control*

Pada sistem ini juga menggunakan pengereman *regenerative*, sehingga pada pemodelan motor ini dapat ditunjukkan melalui *state of charge* pada baterai yang memiliki penurunan lebih sedikit apabila dibandingkan dengan pengereman *non-regenerative*.

Pemodelan yang dilakukan terhadap motor yaitu *Permanent Magnet Synchronous Motor*, *Inverter* sebagai driver motor, *rectifier*, dan *power supply* berupa baterai.

Baterai sebagai suplai utama pada motor mengirimkan daya kepada *inverter*. *Inverter* menerima masukan gate PWM dan akan mengalirkan sumber 3-fasa pada motor ketika mode motoring, atau mengalirkan daya kepada *rectifier* ketika mode generator sehingga dapat melakukan pengecasan pada baterai. Skema pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3.3. Juga terdapat pemodelan *wheel speed sensor* yang berfungsi untuk mengukur kecepatan roda. Sensor yang digunakan diasumsikan memiliki respon orde 0, sehingga memiliki fungsi transfer dengan nilai penyebut dan pembilang adalah 1. Respon orde 0 bersifat langsung yaitu semua input yang diterima sensor langsung diproses menjadi output saat

itu juga. Dimana keluaran sensor merepresentasikan nilai kecepatan angular roda yang terukur.



Gambar 3.4 Skema Motor

3.3 Perancangan Kontroler

Pada sistem pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* ini menggunakan kontroler berupa *PI cascade*.

Master Controller berfungsi untuk mengatur *slip ratio* pada nilai 0,2 sehingga dapat menghasilkan gaya gesek yang maksimal seperti grafik yang ada pada Gambar 2.1. Selain itu juga terdapat *Slave Controller* yaitu kontrol kecepatan rpm untuk motor. Input dari kontrol slave ini adalah nilai selisih dari master kontrol sebagai rpm referensi dan output sensor sebagai feedback dari controller.

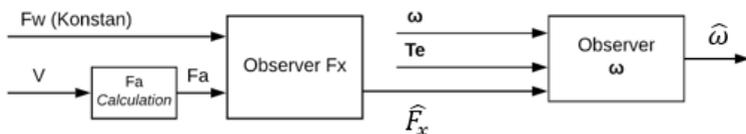
Parameter yang digunakan untuk melakukan tuning pada controller dilakukan secara *trial and error* untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Pada slave kontroler menggunakan set point berupa kecepatan motor saat pengereman normal yaitu 200 rpm. Kemudian master kontroler disambungkan dengan slave kontroler, set point yang digunakan untuk master kontroler adalah *slip ratio* 0,2. Perancangan kontroler dikatakan valid apabila kontroler mampu mengatur PV agar sesuai dengan set point yang diberikan dengan performa yang baik.

Tabel 3.3 Parameter kontroler PI cascade

Roda	Kontroler	Parameter	Nilai
Depan	Master	P	1.2
		I	0.04
	Slave	P	0.3
		I	2.3
Belakang	Master	P	1.2
		I	0.04
	Slave	P	0.3
		I	2.3

3.4 Perancangan *Observer*

Perancangan *observer* dilakukan untuk mengesetimasi kesalahan yang diberikan pada sistem. Kesalahan yang digunakan kali ini yaitu kesalah yang ada pada sensor berupa kesalahan sensitifitas dan kesalahan bias. Pada perancangan *observer* menggunakan metode *extended state observer* untuk menentukan gain observer yang sesuai sehingga *observer* mampu untuk mengesetimasi kesalahan yang diberikan.

**Gambar 3.5** Struktur *Observer* [18]

Pada sistem ini, terdapat dua *observer* yang digunakan. *Observer* yang pertama berfungsi untuk mengesetimasi gaya gesek (F_x), dikarenakan nilai F_x juga mendapatkan efek dari kesalahan yang diberikan pada pembacaan kecepatan roda. Kemudian nilai F_x yang dapat mengesetimasi kesalahan digunakan sebagai input pada *observer* kedua yaitu mengesetimasi kecepatan angular pada roda sehingga kesalahan yang terjadi dapat diketahui. *Observer*

dikatakan valid apabila telah mampu mengestimasi kesalahan yang diberikan.

3.4.1. *Observer* F_x

Pada *observer* F_x menggunakan persamaan (2.2) yang disubstitusikan dengan persamaan (3.3) hingga (3.6). Kemudian didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{v} = \frac{-2(F_w + F_a + F_x)}{m} \quad (3.7)$$

Nilai F_w, F_a, F_x , dan m telah diketahui sehingga persamaan \dot{v} menjadi

$$\dot{v} = -(0,00154 \cdot F_w + 0,00154 \cdot F_a + 0,00154 \cdot F_x) \quad (3.8)$$

Persamaan (3.8) dijadikan state space berdasarkan persamaan (2.19) dengan matriks A berupa kesalahan yang akan diestimasi yaitu F_x , dan matriks B berupa input yaitu F_a dan F_w . Sehingga didapatkan matriks sebagai berikut:

$$\dot{v} = [0]v + [-0,00154 \quad -0,00154] \begin{bmatrix} F_a \\ F_w \end{bmatrix} + E_1 \quad (3.9)$$

Dengan E_1 adalah state kesalahan F_x yang mempunyai nilai $E_1 = [-0,00154]F_x$

Nilai F_x estimasi didapat dengan ekspansi matriks (3.9) sesuai dengan persamaan (2.19) menjadi bentuk

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{F}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0,00154 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ F_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,00154 & -0,00154 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_w \end{bmatrix} + K \cdot \hat{e} \quad (3.10)$$

Nilai gain didapatkan melalui nilai R dan Q pada *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan metode *trial and error* hingga dapat menghasilkan respon *observer* yang optimal. Kali ini didapatkan nilai R dan Q yaitu:

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

Nilai R dan Q akan menghasilkan gain K yang difungsikan sebagai gain *Observer* melalui fungsi matlab dan didapatkan nilai K sebagai berikut:

$$K = [2 \times 10^3 \quad -10^9]$$

3.4.2. *Observer* ω

Pada *Observer* ω menggunakan persamaan dinamika motor [21] yaitu:

$$T_e - T_l = j \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + \beta \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3.11)$$

Dengan T_e merupakan torsi elektromekanik (Nm), T_l merupakan torsi beban (Nm), j merupakan inersia motor (Kgm^2), β merupakan koefisien redaman motor (Nms), dan θ_m merupakan posisi sudut rotor (rad). Parameter motor yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Parameter motor BLDC

Parameter	Deskripsi	Nilai
J	Inersia motor	0,075 Kgm^2
β	Koefisien redaman motor	0,0003035 Nms
K_t	Konstanta torsi	0.57176 Nm/A
N	Rasio <i>Gearbox</i>	5

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

$$T_l = \frac{F_x \cdot r}{n} \quad (3.12)$$

Dengan n merupakan rasio *gearbox* dan r merupakan jari-jari roda (m).

Persamaan (3.12) disubstitusikan kedalam persamaan (3.11) dan dengan menggunakan parameter pada Tabel 3.4, maka didapatkan persamaan berikut:

$$\dot{\omega} = -0,203\omega - 4,33F_x + 66,615 T_e \quad (3.14)$$

Persamaan (3.19) diubah menjadi persamaan *state space* dengan kesalahan

$$\dot{\omega} = [-0,0203]\omega + [-4,33 \quad 66,615] \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$y = [1]\omega + [-4,33 \quad 66,615] \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} + [1]F_s \quad (3.16)$$

Dengan F_s merupakan kesalahan sensor yang diberikan. Kemudian bentuk *state space* diperluas dengan *extended state space* untuk memindahkan state kesalahan pada sensor [15] sesuai dengan persamaan (2.7) sehingga persamaan *state space* menjadi

$$x_a = \begin{bmatrix} -0,0203 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4,33 & 66,615 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} E_a \quad (3.17)$$

$$y_a = z(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ z \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Kemudian dirancang *observer* dengan estimasi kesalahan. Persamaan (3.17) diekspansi sesuai dengan persamaan (2.31) dan (2.32) sehingga didapatkan state space sebagai berikut: $\hat{x} =$

$$\begin{bmatrix} -0,02303 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{z} \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4,33 & 66,615 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_e \end{bmatrix} + K_e e \quad (3.19)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{z} \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Atau dapat dituliskan

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

Nilai gain didapatkan melalui nilai R dan Q pada *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan metode *trial and error* hingga dapat menghasilkan respon *observer* yang optimal. Kali ini didapatkan nilai R dan Q yaitu:

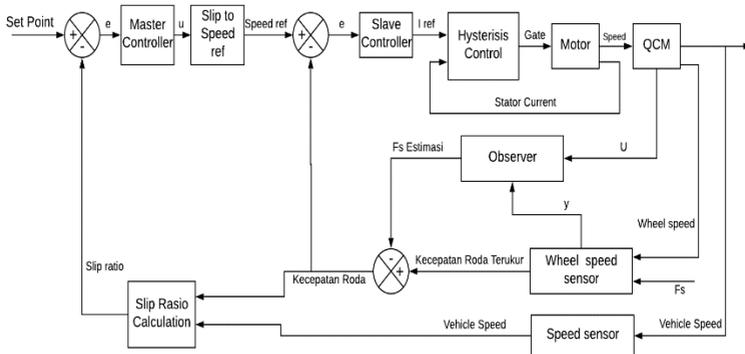
$$R = [0,1] \text{ dan } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{11} \end{bmatrix}$$

Nilai R dan Q akan menghasilkan gain K yang difungsikan sebagai gain *Observer* melalui fungsi matlab dan didapatkan nilai K sebagai berikut:

$$K = [4,99 \times 10^{-6} \quad 1,45 \times 10^3 \quad 10^6]$$

3.5 Perancangan Sistem *Fault Tolerant Control* untuk Kesalahan Sensor

Kesalahan yang telah berhasil diestimasi oleh *observer* akan dikompensasi oleh FTC. Dengan demikian, FTC akan mempertahankan sistem agar berjalan sesuai set point.



Gambar 3.6 Diagram blok sistem dengan *Fault Tolerant Control*

Pada Gambar 3.7 dapat dilihat bahwa sinyal pembacaan sensor ditambahkan dengan nilai kesalahan yang telah terestimasi, sehingga menghasilkan kecepatan roda yang terukur atau dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\omega_{meas} = \omega_{aktual} + \hat{f}_s \quad (3.26)$$

Keluaran yang dihasilkan oleh *observer* yaitu berupa kesalahan yang terestimasi, kemudian keluaran sinyal pembacaan sensor dikurangi dengan nilai kesalahan yang telah terestimasi, dan menghasilkan nilai ω_{est} yang digunakan sebagai feedback pada slave kontroler, dan master kontroler berupa slip ratio.

Setelah dilakukan perancangan FTC, maka dilakukan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui apakah sistem yang dirancang telah mampu mengkompensasi kesalahan yang diberikan pada sensor. Pengujian FTC dilakukan dengan memberikan kesalahan sensor berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas. Kesalahan tersebut disimulasikan pada roda depan saja dengan menambahkan sinyal bacaan dari sensor kecepatan roda pada waktu 0,4 detik. Kesalahan bias yang diuji sebesar 1 rad/s, 5rad/s, 10rad/s, 25rad/s, dan 50rad/s. Kesalahan sensitivitas yang diberikan sebesar 5%, 10%, 25%, 50%, dan 75%.

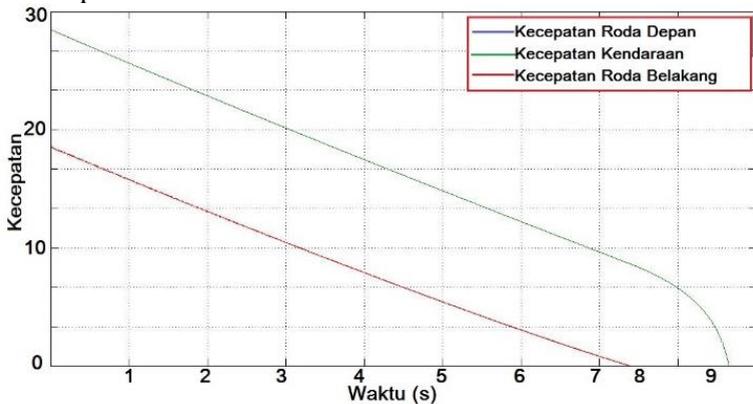
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pengerjaan *Fault Tolerant Control* pada pengereman *regenerative* mobil listrik sebagai *anti-lock braking system* ini menggunakan *software* MATLAB Simulink 2014a mulai dari pemodelan sistem hingga penerapan *Fault Tolerant Control* (FTC). Pengujian dan validasi pada sistem dilakukan untuk memastikan pemodelan yang telah dibuat telah merepresentasikan sistem baik, kontroler dapat bekerja secara optimal, *observer* dapat mengestimasi kesalahan, dan *Fault Tolerant Control* (FTC) dapat mengkompensasi kesalahan yang ada.

4.1 Uji Sistem Tanpa ABS

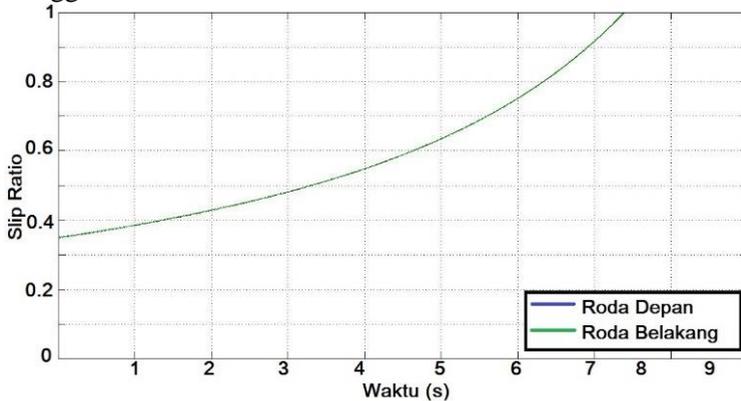
Dilakukan pengujian untuk pemodelan *Regenerative Braking* untuk memastikan apakah pemodelan tersebut telah merepresentasikan sistem dengan baik. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1 Respon Kecepatan Kendaraan dan Roda saat Pengereman

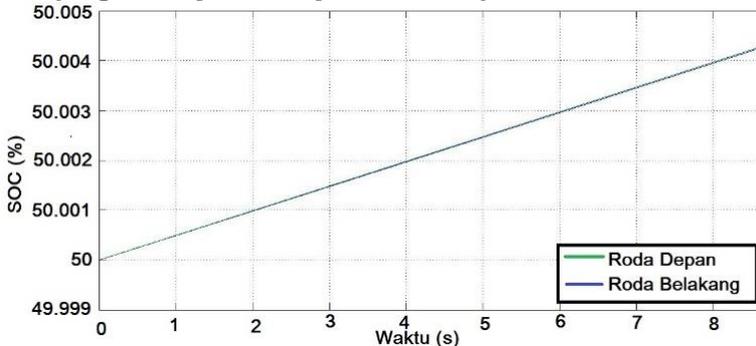
Gambar 4.1 menunjukkan bahwa model mampu melakukan pengereman dari kecepatan awal 27,78 m/s hingga berhenti. Dapat dilihat bahwa kedua kecepatan roda berhenti pada detik ke 7,46

juga kecepatan kendaraan menurun dan berhenti pada detik 8,67. Dengan adanya perbedaan waktu berhenti antara roda dan kendaraan dapat diartikan bahwa terjadi *slip* atau terkuncinya roda, sehingga mobil akan sulit untuk dikendalikan.



Gambar 4.2 Respon *Slip Ratio* saat Pengereman

Pada Gambar 4.2 menunjukkan nilai *slip ratio* yang terus naik dan mencapai nilai 1 pada detik ke 7,42 dan berhenti pada detik ke 8,67 yang menunjukkan terjadi terkuncinya roda.



Gambar 4.3 Pengujian SoC dari Baterai

Selain itu terdapat pengujian *regenerative* yang ditunjukkan dengan naiknya *State of Charge (SOC)* pada baterai yang dapat dilihat pada Gambar 4.3. Gambar 4.3 menunjukkan adanya

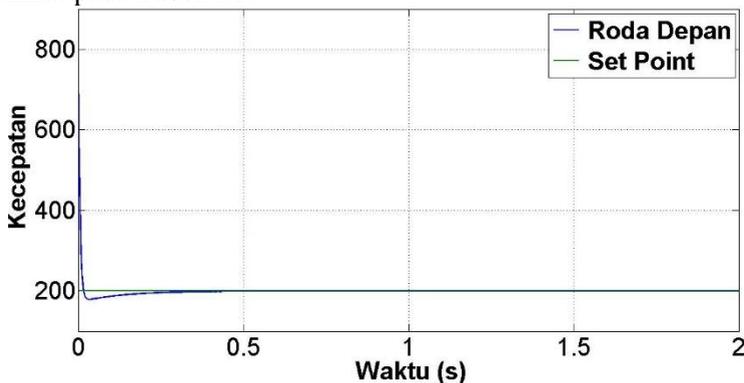
kenaikan SOC yang bermula 50% menjadi 50,005% hingga kendaraan berhenti.

4.2 Uji Sistem *Close Loop*

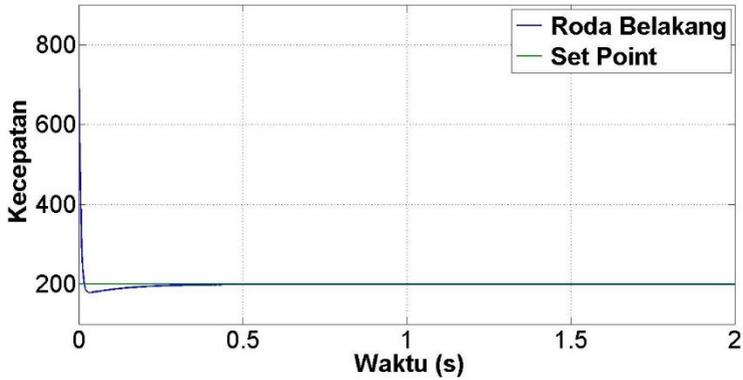
Pengujian kontroler dilakukan dengan uji *close loop* pada sistem. Kontroler digunakan untuk mengatur agar sistem berjalan sesuai dengan *set point*. Pada sistem ini menggunakan masing-masing 2 kontroler pada tiap roda. 2 kontroler tersebut disusun secara cascade, dengan *master controller* untuk mengendalikan *slip ratio* dan *slave controller* untuk mengendalikan kecepatan roda. Tuning pada kontroler dilakukan secara *trial and error*.

Kontroler yang pertama diuji ada *slave kontroler* dengan memberikan *set point* 200 rpm yang merupakan rpm referensi. Hasil dari uji kontroler rpm dapat dilihat pada Gambar 4.4. dan Gambar 4.5.

Respon dari sistem seperti ditunjukkan Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan kontrol *slave controller* mampu mengendalikan kecepatan roda sesuai dengan set point yang diberikan. Parameter tuning yang dihasilkan pada kedua roda tersebut adalah $P = 0,3$ dan $I = 2,3$ dengan performansi respon dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.4 Respon RPM Roda Depan pada *slave controller*

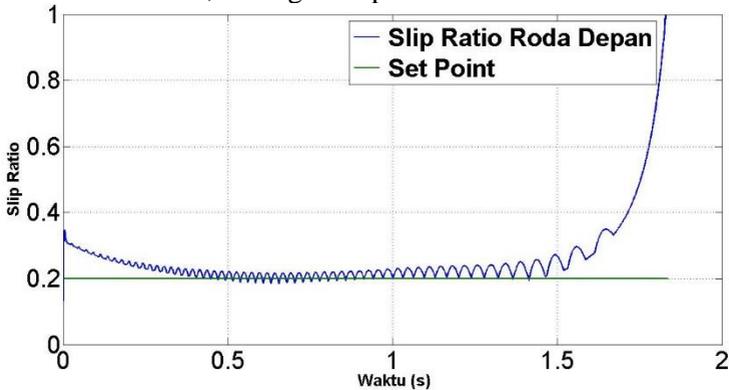


Gambar 4.5 Respon RPM Roda Belakang pada *Slave controller*

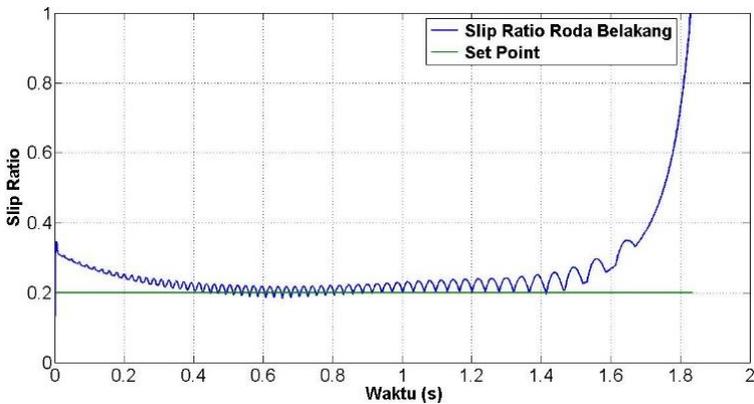
Tabel 4.1 Performansi *slave controller*

Roda	Karakteristik	Nilai
Depan	<i>Maximum Overshoot</i>	0,45%
	<i>Rise Time</i>	0,0165 detik
	<i>Settling Time</i>	0,1360 detik
Belakang	<i>Maximum Overshoot</i>	0,36%
	<i>Rise Time</i>	0,0165 detik
	<i>Settling Time</i>	0,1360 detik

Selanjutnya adalah pengujian pada kontroler *slip ratio* dengan memberikan nilai 0,2 sebagai set point.



Gambar 4.6 Respon slip rasio roda depan sistem *close loop*



Gambar 4.7 Respon slip rasio roda belakang sistem *close loop*

Parameter kontrol PI pada kedua roda didapatkan melalui metode *trial and error* dengan nilai $P = 1,2$ dan $I = 0,08$. Sehingga simulasi yang dilakukan memiliki respon seperti pada Gambar 4.6 dan 4.7. Pada Gambar 4.6 dan 4.7 dapat dilihat bahwa controller telah mampu menjaga nilai *slip ratio* sesuai dengan *set point* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti. Performansi sistem ditunjukkan pada Tabel 4.2.

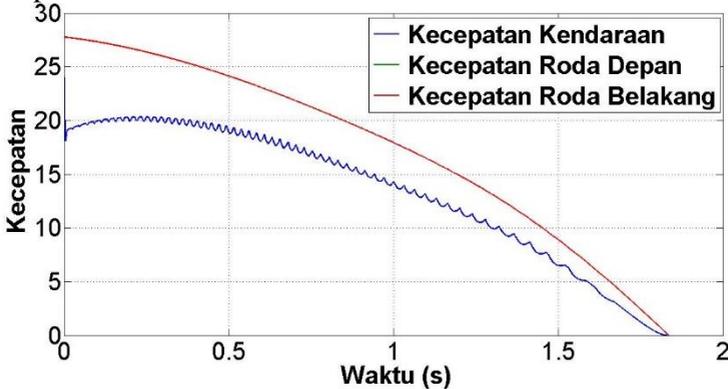
Tabel 4.2 Performansi *close loop* sistem

Roda	Karakteristik	Nilai
Depan	<i>Maximum Overshoot</i>	14,6%
	<i>Rise Time</i>	0,00083 detik
	<i>Settling Time</i>	0,3799 detik
Belakang	<i>Maximum Overshoot</i>	14,6%
	<i>Rise Time</i>	0,00083detik
	<i>Settling Time</i>	0,3799 detik

Pengujian selanjutnya adalah meninjau respon kecepatan kendaraan dan roda saat pengujian *close loop*. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa kecepatan roda dan kecepatan kendaraan berhenti pada waktu yang sama yaitu 1,83

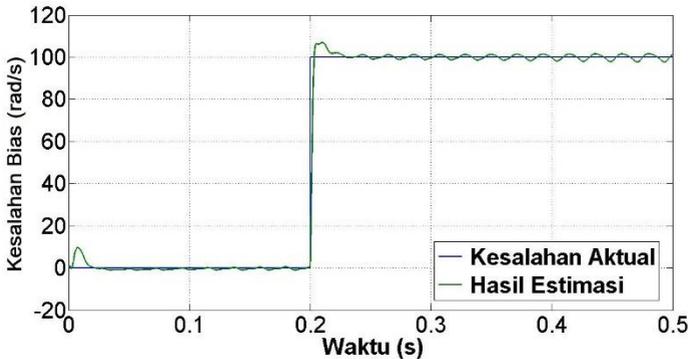
detik tanpa adanya roda yang terkunci dengan jarak pengereman 32 meter. Pada detik ke 0,1 roda mengalami penurunan yang drastic, akan tetapi dapat diatasi oleh ABS sehingga sistem mampu kembali ke *slip ratio* 0,2 sehingga kecepatan roda dapat mengikuti kecepatan kendaraan.



Gambar 4.8 Kecepatan roda dan mobil pada sistem *close loop*

4.3 Pengujian *Observer*

Pengujian pada *observer* yang telah dirancang dirasa perlu untuk menentukan apakah nilai yang dihasilkan mampu mengestimasi nilai sebenarnya. Pengujian yang dilakukan adalah dengan memberikan kesalahan pada sensor roda depan.



Gambar 4.9 Perbandingan kesalahan aktual dengan kesalahan estimasi *observer*

Kesalahan yang diberikan berupa fungsi step dengan nilai amplitude sebesar 100 rad/s pada detik ke 0,2. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa ketika diberi kesalahan sensor, *observer* mampu mengestimasi kesalahan yang terjadi di sensor. Hasil respon dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Performansi *Observer* ketika estimasi kesalahan

Karakteristik	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	9,765%
<i>Rise Time</i>	0,00186 detik
<i>Settling Time</i>	0,2954 detik

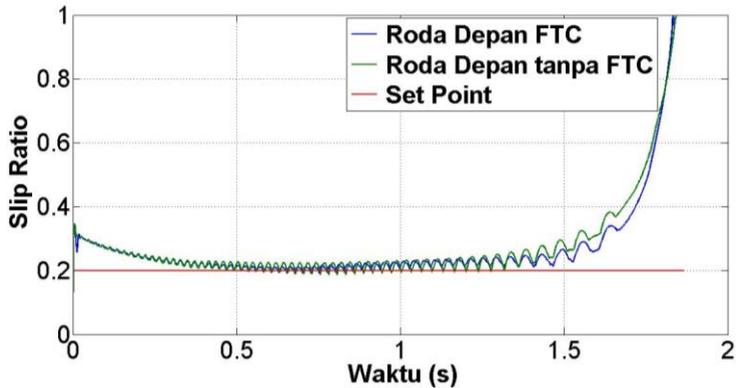
Dari performansi diatas dapat dilihat bahwa *observer* memiliki respon yang baik saat mengestimasi kesalahan.

4.4 Pengujian *Fault Tolerant Control* dengan Kesalahan Bias

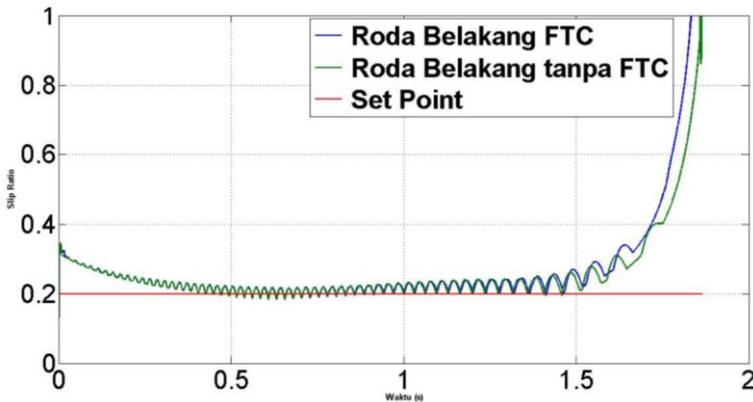
Kesalahan bias adalah kesalahan pembacaan pada sensor yang menyimpang dari nilai aktualnya. Pengujian kesalahan bias dilakukan dengan menambahkan nilai step pada waktu ke 0,4 detik dengan nilai 1 rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s, 25 rad/s, dan 50 rad/s. Hasil dari simulasi akan dijelaskan pada subbab dibawah ini.

4.4.1. Kesalahan Bias 1 rad/s

Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan adanya perubahan slip ratio ketika adanya kesalahan pada sensor dan bagaimana perbandingan antara sistem dengan adanya FTC dan tanpa FTC. Pada Gambar 4.10, sistem dengan FTC memiliki nilai slip ratio yang lebih mendekati dengan 0,2 akan tetapi sistem tanpa FTC mengalami kenaikan 0,002 sehingga slip ratio sedikit jauh dari set point dibandingkan dengan sistem tanpa FTC. Kemudian pada Gambar 4.11, menunjukkan bahwa kesalahan juga mempengaruhi slip rasio yang ada pada roda belakang. Pada roda belakang, sistem tanpa FTC terdapat slip pada detik-detik terakhir, juga nilai slip rasio yang sedikit jauh dari set point. Akan tetapi, sistem dengan FTC memiliki nilai slip rasio yang sesuai atau mendekati set point yaitu 0,2.

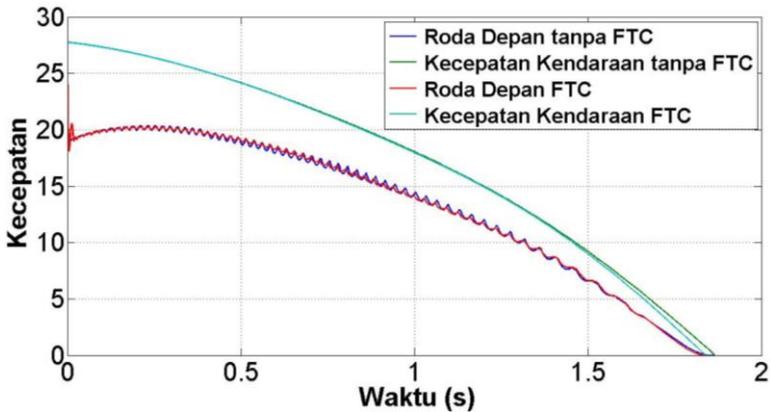


Gambar 4.10 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s

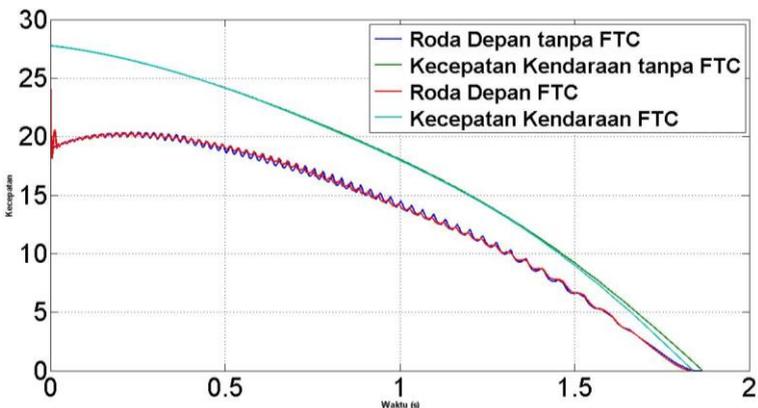


Gambar 4.11 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s

Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan bahwa sistem dengan FTC tidak terjadi adanya penguncian roda atau *slip* sehingga sistem dengan FTC mampu menjaga kestabilan sistem dan sistem dapat bekerja dengan optimal. Sistem tanpa FTC memiliki waktu pengereman sedikit lebih lama dan juga mengalami slip pada roda depan dan belakang dengan waktu 0,3 detik.



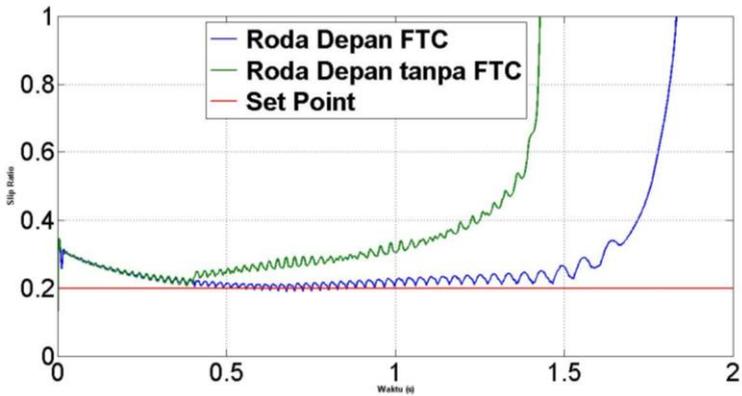
Gambar 4.12 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s



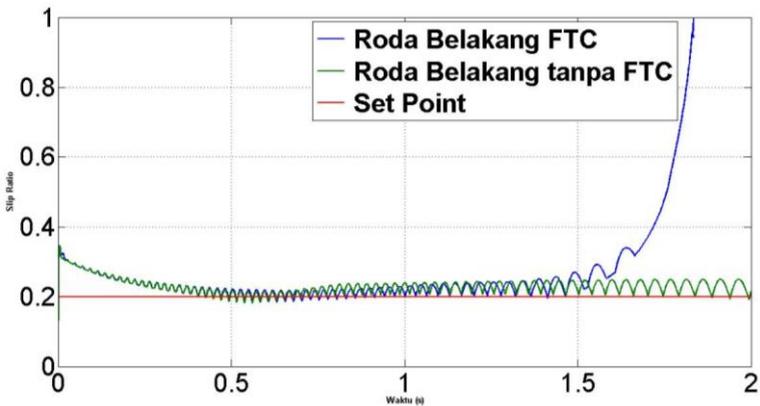
Gambar 4.13 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 1 rad/s

4.4.2. Kesalahan Bias 5 rad/s

Gambar 4.14 hingga Gambar 4.17 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan bias yang diberikan kepada sensor sebesar 5 rad/s.

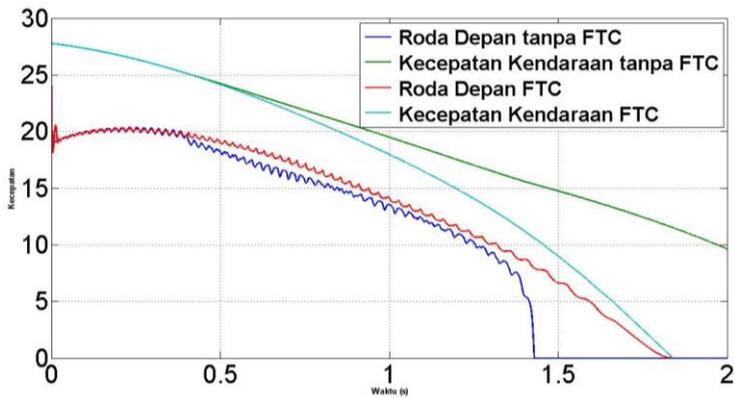


Gambar 4.14 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s

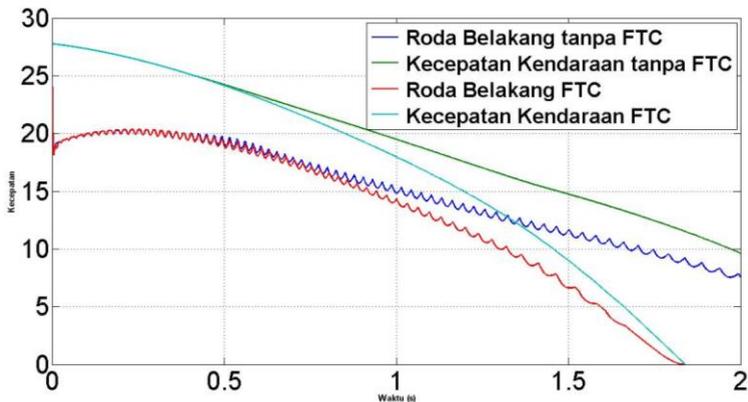


Gambar 4.15 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 5 rad/s

Pada Gambar 4.14, sistem dengan FTC dapat menjaga nilai slip ratio 0,2 akan tetapi sistem tanpa FTC mengalami kenaikan 0,0205 sehingga slip ratio sedikit jauh dari set point dan juga mengalami slip pada detik ke 1,43. Kemudian pada Gambar 4.15, menunjukkan bahwa kesalahan juga mempengaruhi slip ratio yang ada pada roda belakang.



Gambar 4.16 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan 5 rad/s

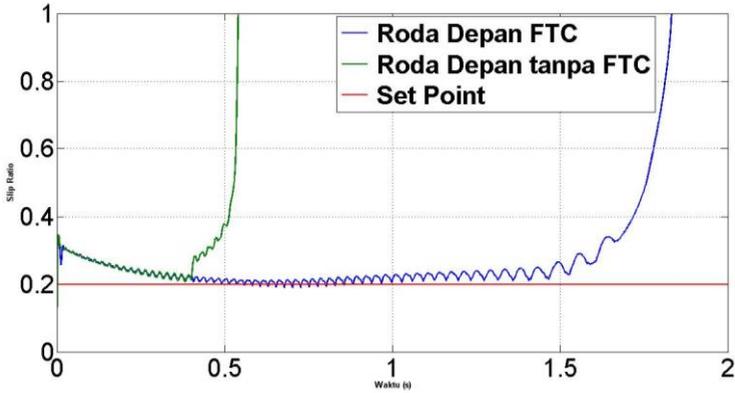


Gambar 4.17 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan 5 rad/s

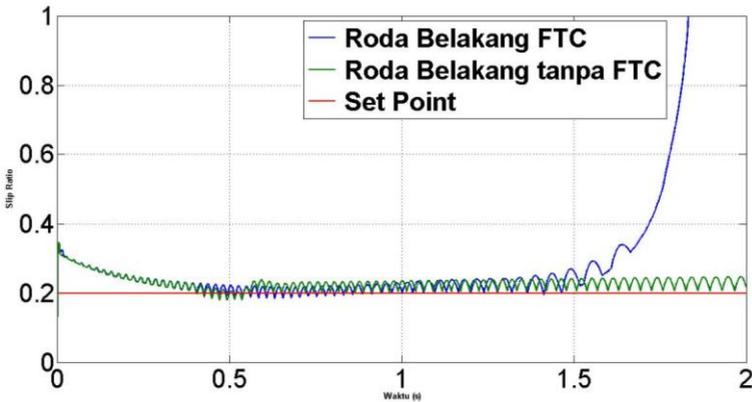
Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 menunjukkan bahwa sistem dengan FTC tidak terjadi adanya penguncian roda atau *slip*, dengan demikian dapat dikatakan bahwa sistem FTC mampu mengkompensasi kesalahan dan sistem tetap bekerja secara optimal. Sistem tanpa FTC terjadi peristiwa slip dimana roda depan berhenti pada detik ke 1,43 memiliki dan memiliki waktu pengereman lebih lama ditunjukkan pada roda belakang.

4.4.3. Kesalahan Bias 10 rad/s

Gambar 4.18 hingga Gambar 4.21 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan bias yang diberikan kepada sensor sebesar 10 rad/s.



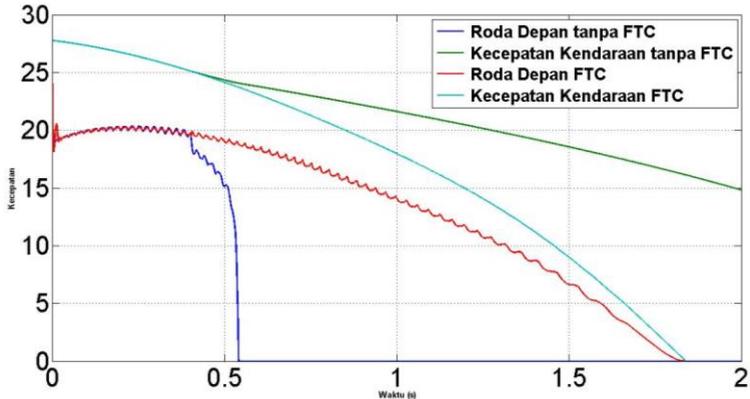
Gambar 4.18 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s



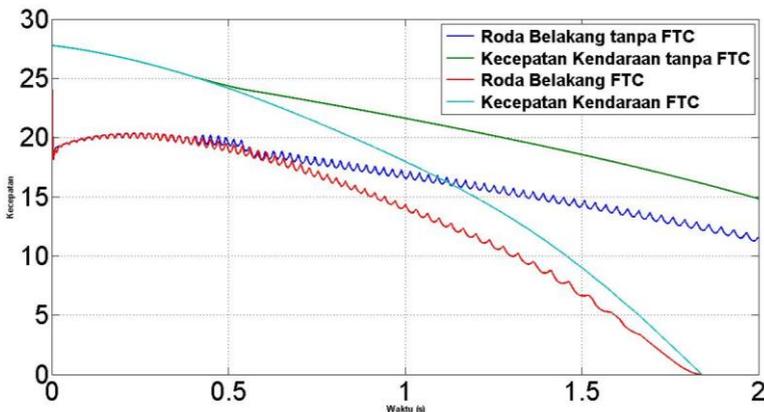
Gambar 4.19 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s

Pada Gambar 4.18, sistem dengan FTC dapat menjaga nilai slip ratio 0,2 akan tetapi sistem tanpa FTC mengalami kenaikan

0,056 dan juga mengalami slip pada detik ke 0,54. Kemudian pada Gambar 4.19, menunjukkan bahwa kesalahan juga mempengaruhi slip ratio yang ada pada roda belakang. Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 menunjukkan bahwa sistem dengan FTC tidak terjadi adanya penguncian roda atau *slip* dan sistem tanpa FTC terjadi peristiwa slip dimana roda depan berhenti pada detik ke 0,54 memiliki waktu pengereman lebih lama.



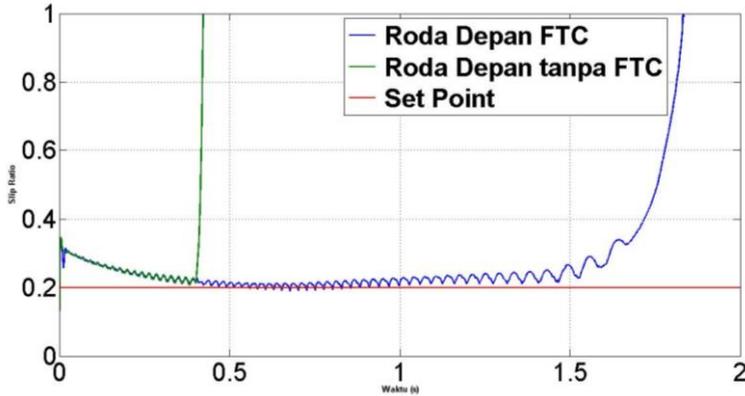
Gambar 4.20 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s



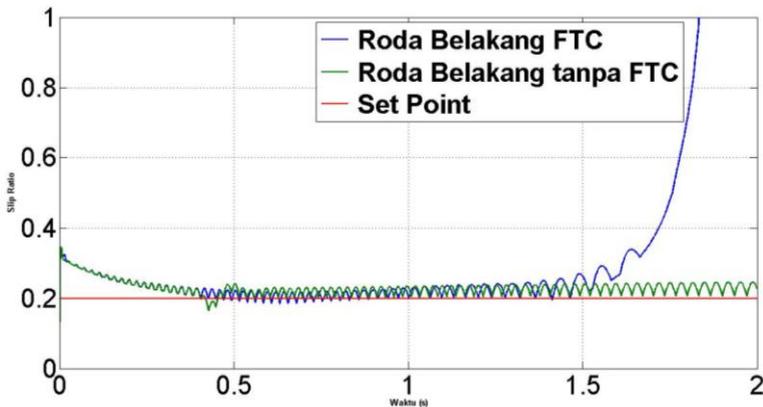
Gambar 4.21 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 10 rad/s

4.4.4. Kesalahan Bias 25 rad/s

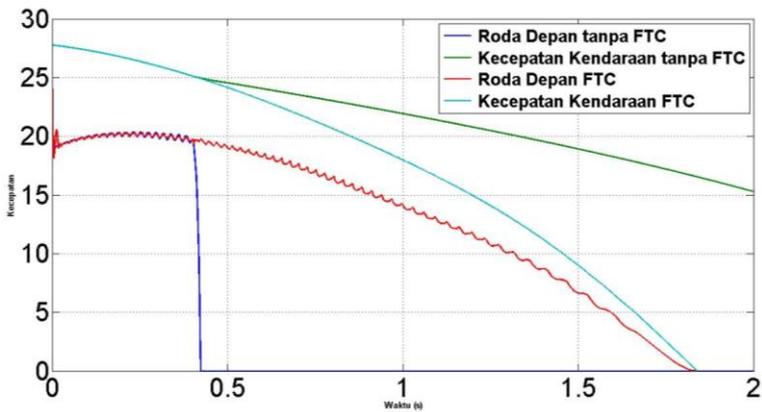
Gambar 4.22 hingga Gambar 4.25 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan bias yang diberikan kepada sensor sebesar 25 rad/s.



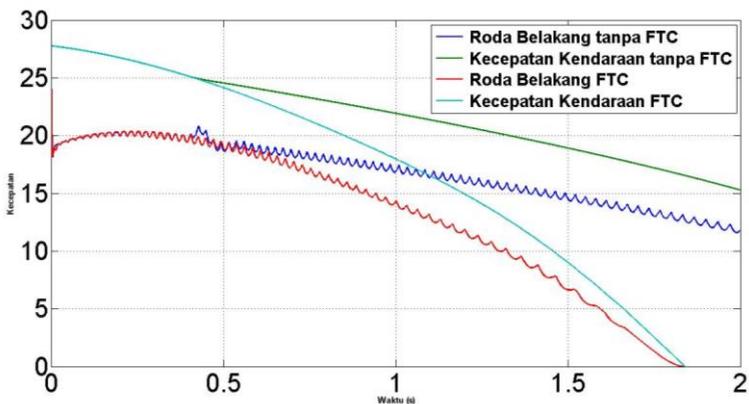
Gambar 4.22 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s



Gambar 4.23 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s



Gambar 4.24 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s



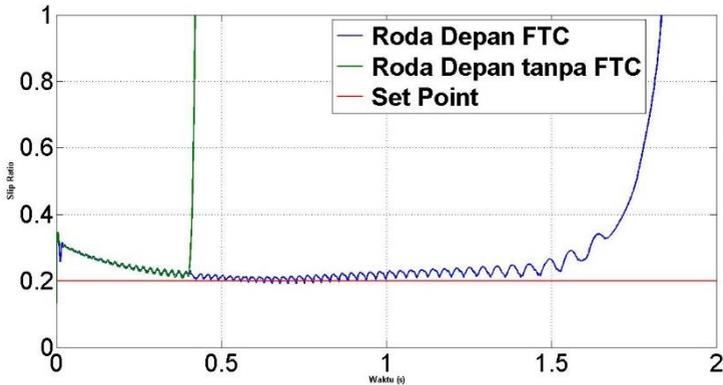
Gambar 4.25 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 25 rad/s

Pada Gambar 4.22, sistem dengan FTC dapat menjaga nilai slip ratio 0,2 akan tetapi sistem tanpa FTC mengalami kenaikan hingga mencapai 1 pada detik ke 4. Kemudian pada Gambar 4.23, menunjukkan bahwa kesalahan juga mempengaruhi slip ratio yang ada pada roda belakang akan tetapi tetap pada nilai 0,2. Gambar 4.24 dan Gambar 4.25 menunjukkan bahwa sistem

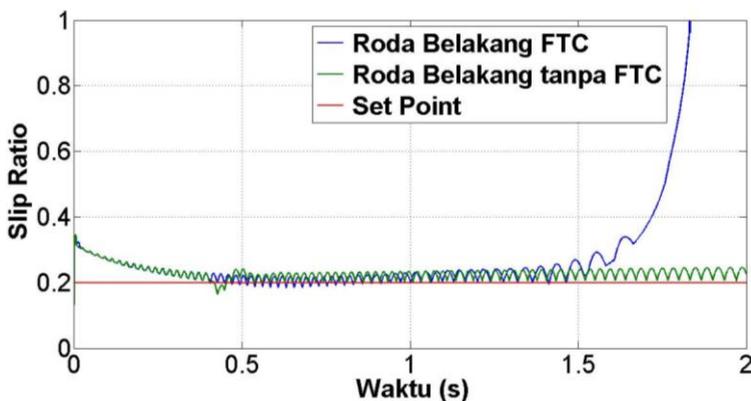
dengan FTC tidak terjadi adanya penguncian roda atau *slip* dan sistem tanpa FTC terjadi peristiwa slip dimana roda depan berhenti pada detik ke 0,4 dan memiliki waktu pengereman lebih lama.

4.4.5. Kesalahan Bias 50 rad/s

Gambar 4.26 hingga Gambar 4.29 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan bias yang diberikan kepada sensor sebesar 50 rad/s.

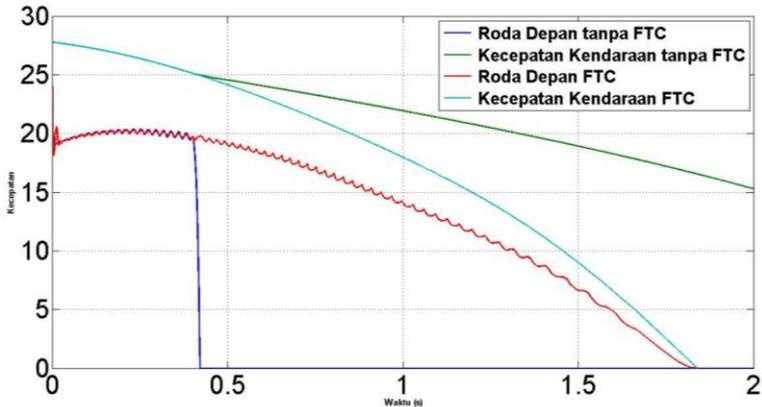


Gambar 4.26 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s

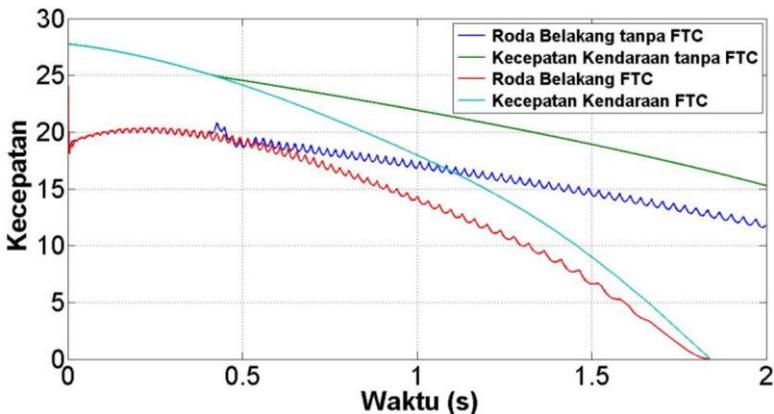


Gambar 4.27 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s

Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 menunjukkan pada detik ke 0,4 ketika sensor diberi kesalahan berupa bias pembacaan sebesar 50 rad/s. Sistem dengan FTC mampu menjaga nilai slip ratio tetap pada 0,2 pada kedua roda. Sistem tanpa FTC, pada roda depan slip ratio mengalami kenaikan hingga 1 pada detik ke 0,4 dan pada roda belakang terjadi penurunan slip ratio pada detik ke 0,4 sebesar 0,044 akan tetapi kembali lagi ke nilai 0,2 pada detik ke 0,47.



Gambar 4.28 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s



Gambar 4.29 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan bias 50 rad/s

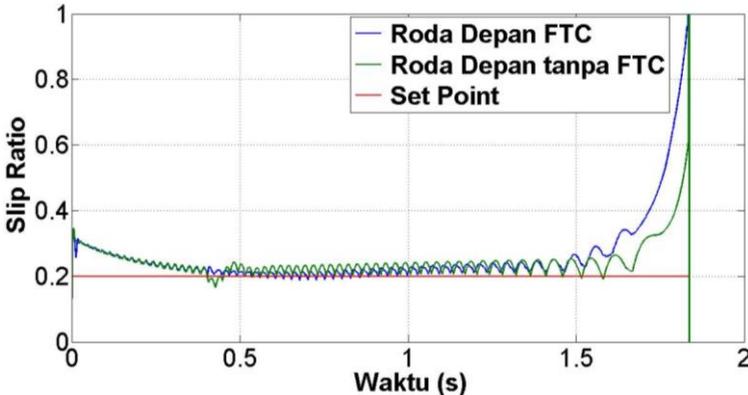
Pada Gambar 4.28 dan 4.29 menunjukkan respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan. Pada sistem dengan FTC, tidak terjadi slip dikarenakan kecepatan roda dan kecepatan kendaraan berhenti pada waktu yang sama. Sedangkan sistem tanpa FTC menunjukkan respon sistem yang tidak stabil dimana pada saat diberi kesalahan kecepatan roda berhenti pada detik ke 0,4 menjadi 0 juga sistem tanpa FTC memiliki waktu pengereman lebih lama.

4.5 Pengujian *Fault Tolerant Control* dengan Kesalahan Sensitivitas

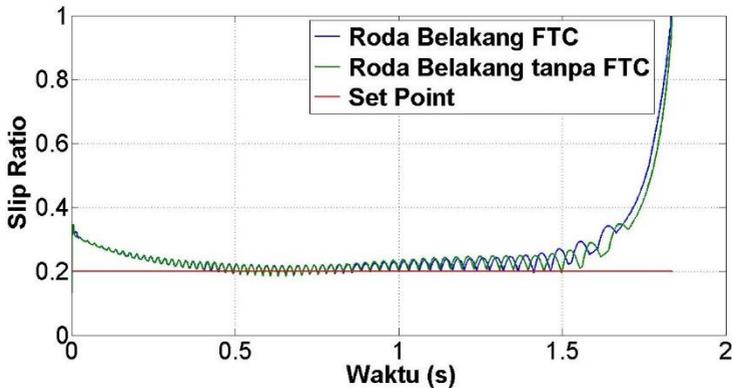
Kesalahan sensitivitas merupakan kesalahan pada sensor dimana sensor mengalami kehilangan kepekaan sehingga tidak mampu untuk menerima perubahan yang terjadi. Nilai kesalahan sensitivitas yang diberikan pada pengujian ini yaitu sebesar 5%, 10%, 25%, 50%, dan 75% pada detik ke 0,4.

4.5.1. Kesalahan sensitivitas 5%

Gambar 4.30 hingga Gambar 4.31 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas yang diberikan kepada sensor sebesar 5%.

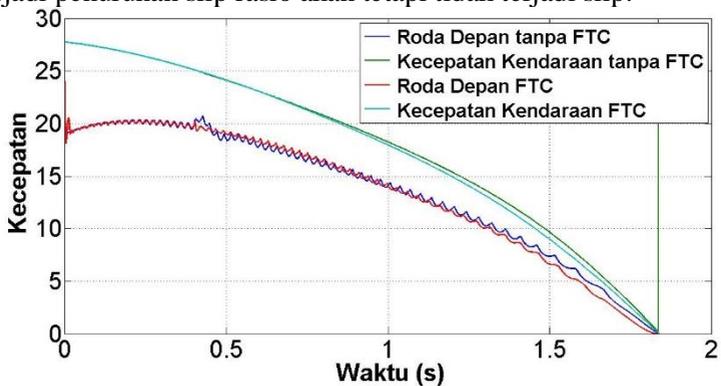


Gambar 4.30 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%

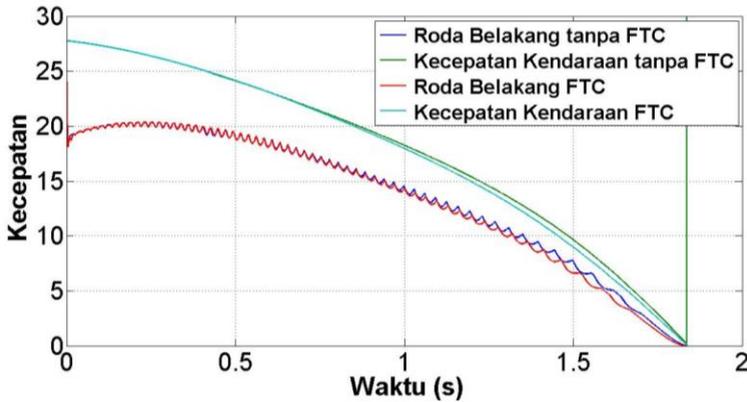


Gambar 4.31 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%

Pada Gambar 4.34 dan 4.35, sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat menjaga slip ratio tetap pada nilai 0,2. Sedangkan sistem tanpa FTC, pada roda depan menunjukkan penurunan slip ratio sebesar 0,238 pada detik ke 0,4 akan tetapi kembali sesuai dengan set point pada detik ke 0,456. Kemudian ketika slip rasio telah mencapai nilai 1 atau roda mulai berhenti, slip rasio menurun secara drastis menuju 0. Pada roda belakang, terjadi penurunan slip rasio akan tetapi tidak terjadi slip.



Gambar 4.32 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%

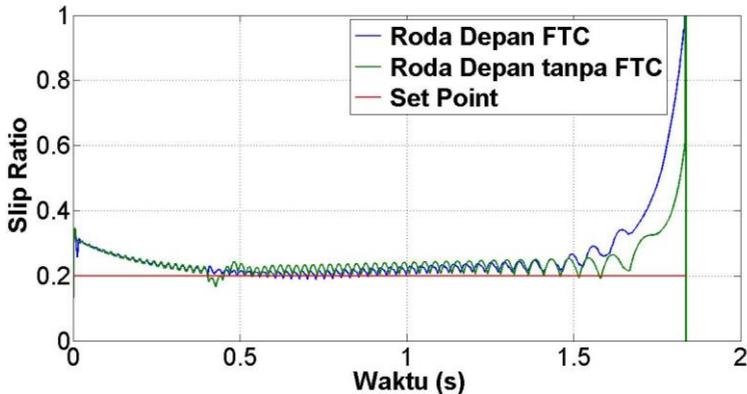


Gambar 4.33 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 5%

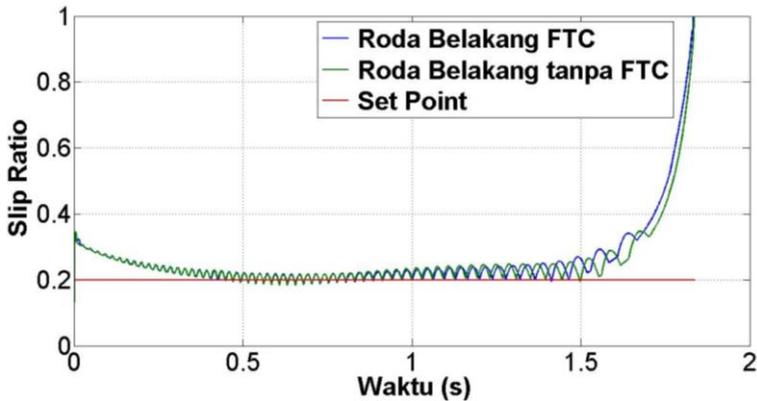
Pada Gambar 4.36 dan 4.37, sistem dengan FTC mampu menjaga sistem tetap stabil. Akan tetapi pada sisten tanpa FTC, pada roda depan mengalami kenaikan kecepatan secara drastis.

4.5.3. Kesalahan sensitivitas 10%

Gambar 4.34 hingga Gambar 4.37 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas yang diberikan kepada sensor sebesar 10%.

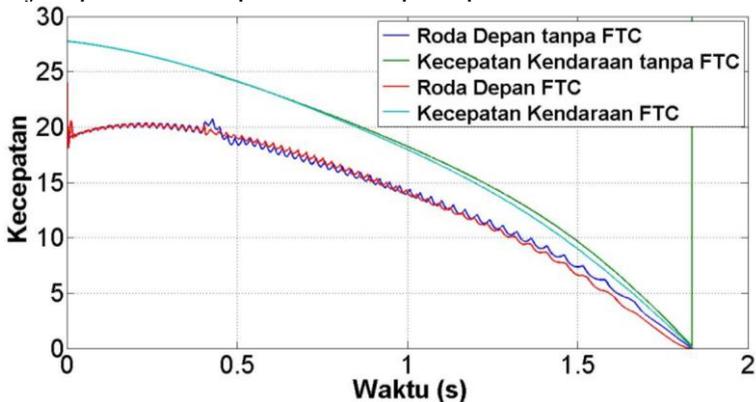


Gambar 4.34 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%

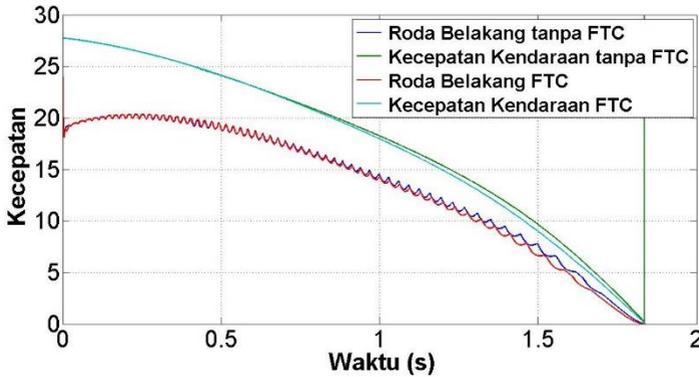


Gambar 4.35 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%

Pada Gambar 4.34 dan 4.35, sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat menjaga slip ratio tetap pada nilai 0,2. Sedangkan sistem tanpa FTC, pada roda depan menunjukkan penurunan slip ratio sebesar 0,109 pada detik ke 0,4 akan tetapi kembali sesuai dengan set point pada detik ke 0,456 kemudian terjadi penurunan slip rasio mencapai 0 pada detik terakhir.



Gambar 4.36 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%

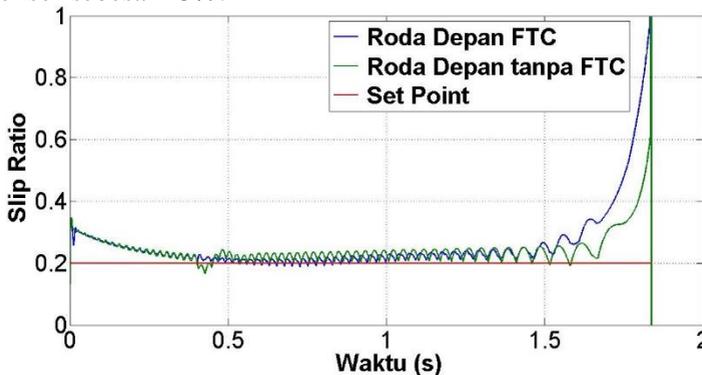


Gambar 4.37 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 10%

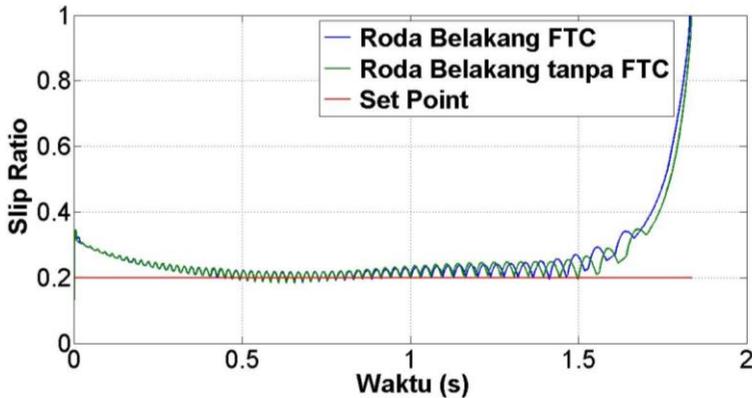
Pada roda belakang, terjadi penurunan slip ratio akan tetapi tidak terjadi terkuncinya roda. Pada Gambar 4.36 dan 4.37, sistem dengan FTC mampu menjaga kestabilan sistem. Akan tetapi pada sistem tanpa FTC, pada roda depan, terjadi kenaikan kecepatan secara drastis.

4.5.4. Kesalahan sensitivitas 25%

Gambar 4.38 hingga Gambar 4.39 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas yang diberikan kepada sensor sebesar 25%.

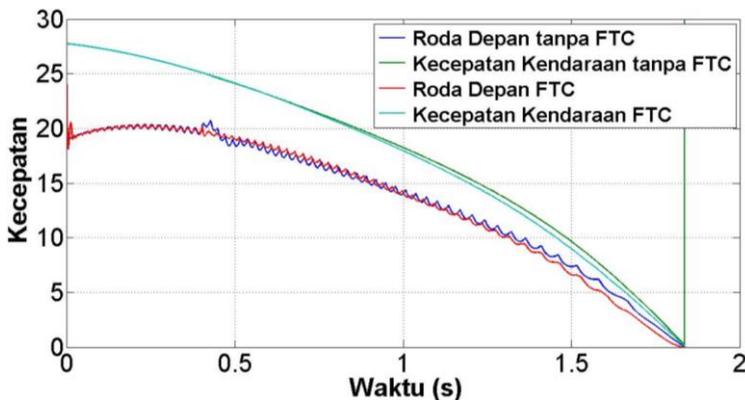


Gambar 4.38 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%

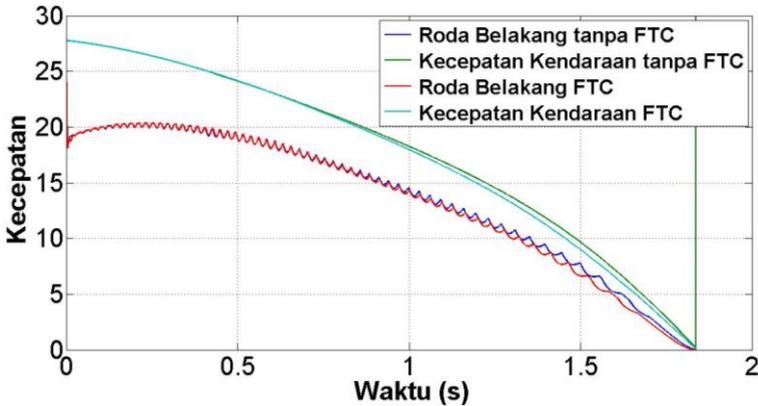


Gambar 4.39 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%

Pada Gambar 4.38 dan 4.39, sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan dari sensor yang telah diberikan. Kontroler dapat menjaga slip ratio tetap pada nilai 0,2. Sedangkan sistem tanpa FTC, pada roda depan menunjukkan penurunan slip ratio sebesar 0,109 pada detik ke 0,4 akan tetapi kembali sesuai dengan set point pada detik ke 0,456 kemudian terjadi penurunan slip ratio hingga 0 pada detik terakhir .



Gambar 4.40 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%

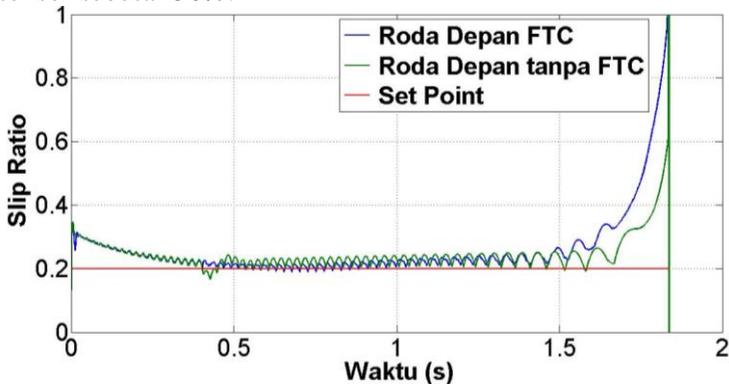


Gambar 4.41 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 25%

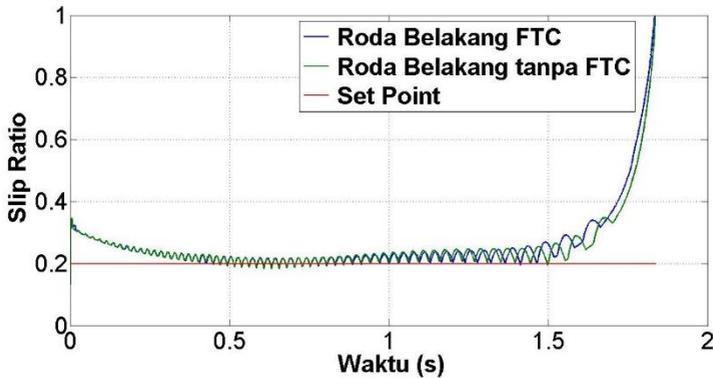
Pada roda belakang, terjadi penurunan akan tetapi roda tetap stabil dan tidak mengalami slip. Pada Gambar 4.40 dan 4.41, sistem dengan FTC mampu menjaga sistem tetap stabil. Pada sistem tanpa FTC mengalami kenaikan secara drastic pada roda depan.

4.5.5. Kesalahan sensitivitas 50%

Gambar 4.42 hingga Gambar 4.43 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas yang diberikan kepada sensor sebesar 50%.

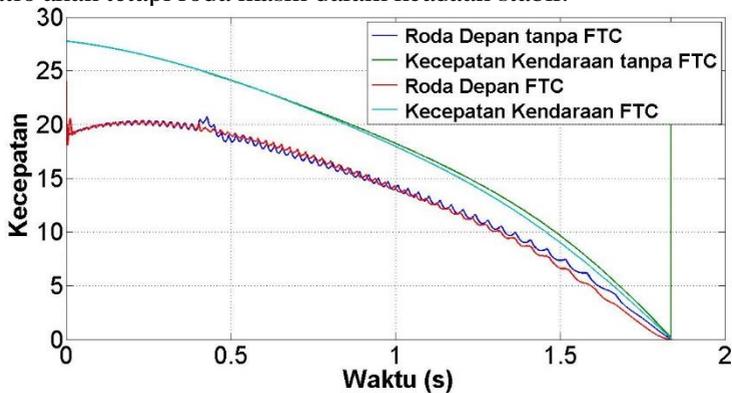


Gambar 4.42 Perbandingan slip rasio roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 50%

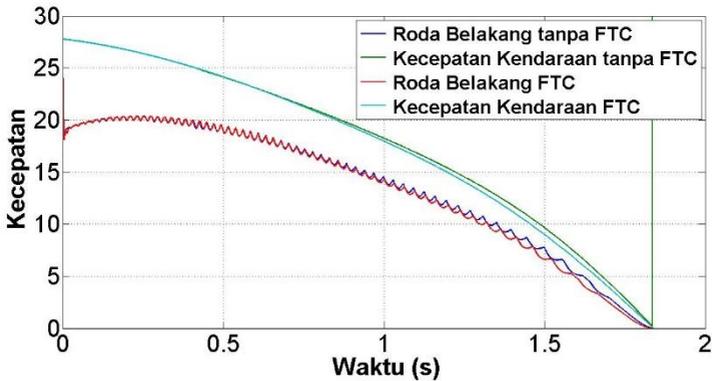


Gambar 4.43 Perbandingan slip rasio roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 50%

Pada Gambar 4.42 dan 4.45, sistem dengan FTC mampu mengestimasi dan merekonfigurasi kesalahan sensor yang telah diberikan. Kemudian kontroler dapat menjaga slip ratio tetap pada nilai 0,2. Sedangkan sistem tanpa FTC, pada roda depan menunjukkan penurunan *slip ratio* sebesar 0,109 pada detik ke 0,4 akan tetapi *slip ratio* kembali sesuai dengan set point pada detik ke 0,456 dan mengalami penurunan *slip ratio* secara drastis mencapai 0 pada detik terakhir. Pada roda belakang, terjadi kenaikan slip ratio akan tetapi roda masih dalam keadaan stabil.



Gambar 4.44 Perbandingan kecepatan roda depan dengan dan tanpa FTC pada kesalahan sensitivitas 50%

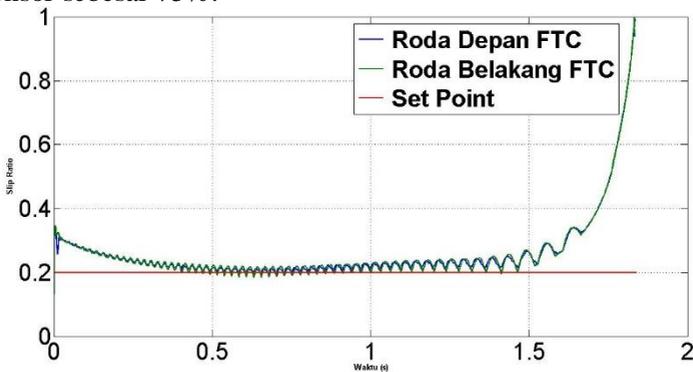


Gambar 4.45 Perbandingan kecepatan roda belakang dengan dan tanpa FTC pada kesalahan 50%

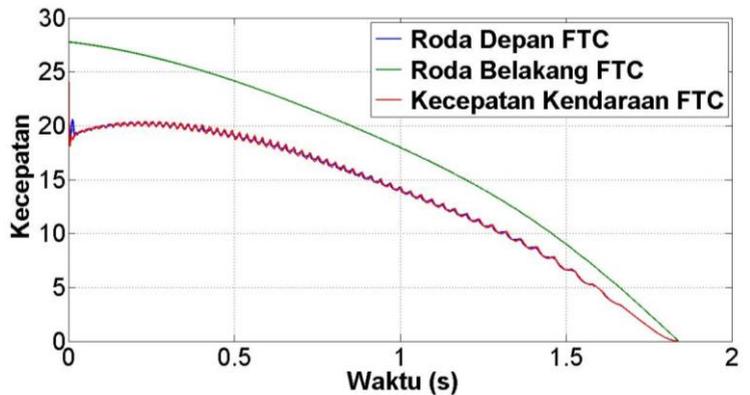
Pada Gambar 4.44 dan 4.45, sistem dengan FTC mampu menjaga sistem tetap stabil dan bekerja dengan optimal. Akan tetapi pada sistem tanpa FTC, terjadi kenaikan kecepatan secara drastis pada roda depan.

4.5.6. Kesalahan sensitivitas 75%

Gambar 4.46 hingga Gambar 4.47 menunjukkan respon sistem terhadap kesalahan sensitivitas yang diberikan kepada sensor sebesar 75%.



Gambar 4.46 Slip rasio dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75%



Gambar 4.47 Kecepatan roda dan mobil dengan FTC pada kesalahan sensitivitas 75%

Pada Gambar 4.46 dan 4.47, menunjukkan hasil dari sistem dengan FTC ketika sensor diberi kesalahan pada detik 0,4 berupa kesalahan sensitivitas 75% dan sistem dapat menjaga kestabilannya. Ketika tanpa FTC, sistem tidak dapat menjaga kestabilannya, dilihat pada detik 1,8 sistem tidak mampu mempertahankan kestabilannya dimana pada simulasi ditandai dengan adanya error pada *Simulink*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan, maka kesimpulan dari tugas adalah sebagai berikut:

- Kesalahan sensor pada sistem ini akan mempengaruhi sinyal pembacaan yang dihasilkan oleh sensor sehingga torsi pengereman pun berbeda, dengan demikian nilai gaya gesek F_x pun juga terpengaruhi. Kesalahan yang diberikan pada roda depan juga mempengaruhi putaran pada roda belakang.
 - Sistem *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* pada mobil listrik yang dirancang ini mampu melakukan pengereman memiliki waktu pengereman 1,83 detik.
 - Sistem *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* pada mobil listrik yang telah diberikan kesalahan sensor memiliki waktu pengereman melebihi 10 detik dan mengalami slip pada roda yang diberikan kesalahan..
- *Observer* yang dirancang mampu merepresentasikan kesalahan actual yang terjadi dan memiliki parameter respon *max overshoot* 9,765%, *rise time* 0,00186 detik, dan *time settling* 0,2954 detik dan *error* 12,75%. Dilanjutkan dengan perancangan *Fault Tolerant Control* yang telah dirancang mampu mengompensasi kesalahan yang ada pada sensor baik kesalahan bias (1 rad/s, 5 rad/s, 10 rad/s, 25 rad/s, dan 50 rad/s) juga kesalahan sensitivitas (5%, 10%, 25%, 50%, dan 75%.) dengan waktu pengereman 1,83 detik.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan dari pelaksanaan pengerjaan tugas akhir ini untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Sistem yang telah dibuat diimplementasikan pada mobil listrik.

- Memodelkan sistem pengereman yang telah dibuat dengan *full car model* agar lebih merepresentasikan kendaraan lebih baik lagi.
- Mendesain sistem dengan menggunakan Algoritma kontrol lain, seperti *fuzzy* atau *Sliding Mode Control*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. A. Syaifulah, "Mobil Listrik 'ZEON' (Zero Pollution) Sebagai Sarana Wisata di Ekowisata Mangrove Wonorejo".
- [2] B. J. Varocky, "Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car," January 2011.
- [3] X. J. G. L. Jingang Guo, "Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller," *Energies*, vol. 7, pp. 6459-6476, 9 October 2014.
- [4] Y.-H. X. d. Y.-N. X. Ying-Lan Yu, "Reserach of Sensor Fault-Tolerant Control Based on Analytical Reconstruction Model for Electronic Brake Pedal Simulator," *International Journal of Modeling and Optimation*, Vols. 5, No.6, December 2015.
- [5] S.H.Z, "Designing a Genetic Neutral Fuzzy Antilock-Brake-System Controller," *Transaction on Evolutionary Computation*, 2002.
- [6] 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.
- [7] 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].
- [8] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Arizona: Microchip Technology, 2003.
- [9] S. R. K. Suganya, "Simulation of Four Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor Using Fuzzy," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 31, February 2014.

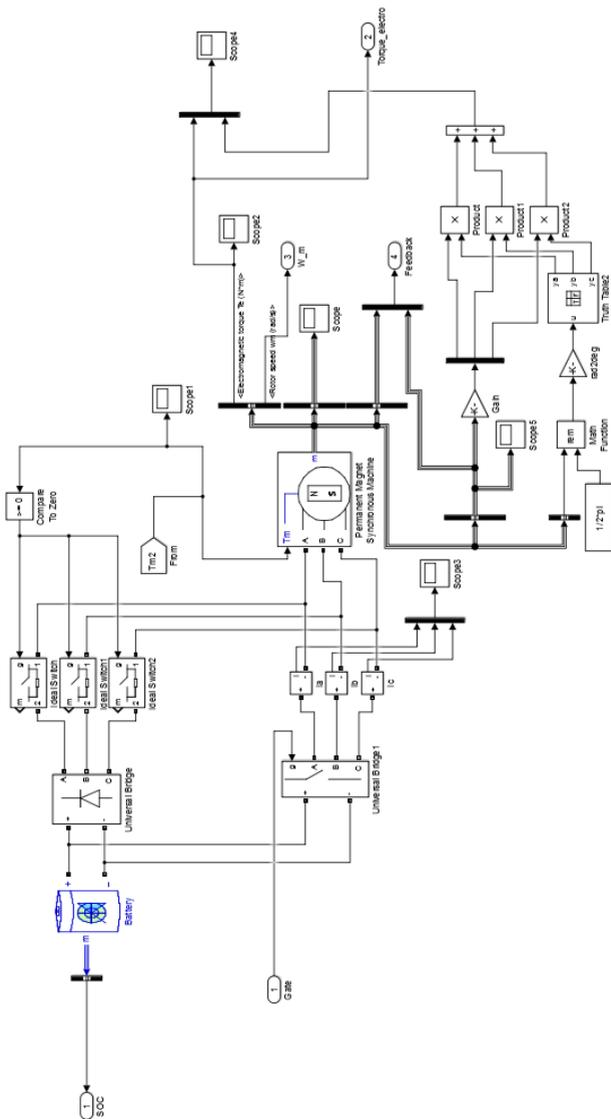
- [10] C. L. C. a. Z. Samad, "Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing," *Electro Engineering Technology*, vol. IX, pp. 742-748, 2014.
- [11] C. P. K. S. Singh, "State-space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control Using Fuzzy PID Controller," *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*, vol. 2, pp. 359-369, 2012.
- [12] 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.
- [13] A. M., "PID Control," *Control System, Robotics, and Automation*, vol. 2.
- [14] K. Ogata, *Modern Control Engineering 5th Edition*, Boston: Prentice Hall, 2001.
- [15] N. Patin, "DC/AC Converter," *Power Electronic Applied to Industrial System and Transport*, vol. II, pp. 35-101, 2015.
- [16] R. A. a. K. T. Triet Nguyen-van, "A Digital Hysteresis Current Control for Half-Bridge Inverters with Constrained Swithing Frequency," *Energies*, 14 October 2017.
- [17] K. Indriawati, "Robust Fuzzy Observer-based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear System with Simultaneous Actuator and Sensor Fault: Aplication to a DC Series Motor Speed Drive," *Praize Worthy Prize*, pp. 375-385, 2016.
- [18] P. J. A. a. A. N. Michel, "State Feedback and State Observer," in *A Linear Systems Primer*, Boston, 2007, pp. 351-410.
- [19] Z. Suryanullah, PERANCANGAN FAULT TOLERANT CONTROL (ftc) PADA APLIKASI Pengereman

REGENERATIVE MOBIL LISTRIK SEBAGAI ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR, Surabaya, 2016.

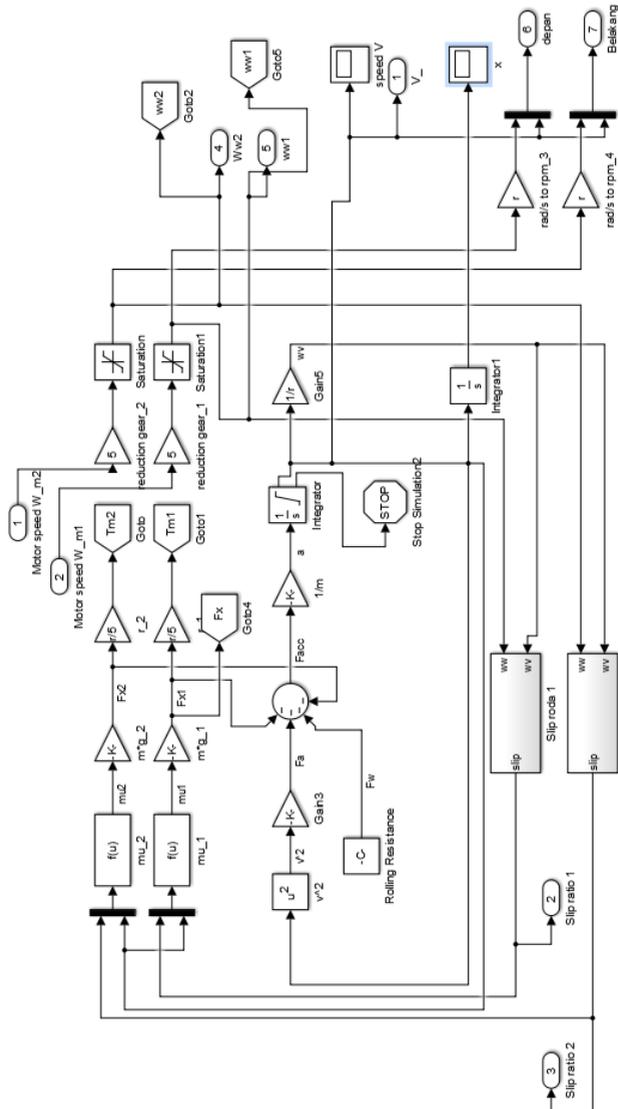
- [20] H. D. W. L. Boyuan Li, "Comparative study of vehicle tyre-road friction coefficient estimation with a novel cost-effective method," *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanism and Mobility*, Vols. 52, (8), pp. 1066-1098, 2014.
- [21] S. Manias, *Power Electronics and Motor Drive Systems*, Athens: Academic Press, 2017.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] S. X. L. d. B. G. C. Z. F. Bai, "Control Applied to Electric Torque Control for Regenerative Braking of an Electric Vehicle," *Asian Network for Scientific Information*, vol. 5, 2005.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

2. Pemodelan aktuator motor pada *Simulink*



3. Pemodelan *Half Car Model* pada Simulink



6. Kode Matlab

```
%% motor model
clear;
m = 1298.9;
r = 0.325;
r2 = 0.32;
Af = 3.1;
Cr = 0.3;
Ct = 0.01;
sig = 1.225;
C1 = 1.28;
C2 = 23.99;
C3 = 0.523;
C4 = 0.3;
g = 9.8;
Vin = 27.778;

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

%% state space speed
Av = [0];
Bv = [-0.00154 -0.00154];
Cv = [1];
Dv = 0;
Fv = [-0.00154];

%% 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=[-0.0202333];
B=[-4.3333 66.645];
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))];
obsv = obsv (Atilt,Ctilt);

%% LQR
Q =eye(3);
Q(1,1) = 1;
Q(2,2) = 1e4;
Q(3,3) =1e11;
R = [1e-1];

Ktilt = lqr (Atilt',Ctilt',Q,R);

```

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama Penulis Dea Faiza Febrianty, dilahirkan di Gresik, 11 Februari 1998. Riwayat Pendidikan Penulis dimulai dari TK PIKPG Gresik (2003-2004) dilanjutkan di SDN Pongangan 1 Gresik (2004-2010) , SMPN 2 Gresik (2010-2013), SMAN 1 Manyar Gresik (2013-2016) dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika ITS bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol.

Pada bulan Januari 2020, penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan *Fault Tolerant Control (FTC)* pada Pengereman *Regenerative* pada Mobil Listrik dengan Model *Half Car* sebagai *Anti-lock Braking System* dengan Kesalahan Sensor**. Apabila terdapat pertanyaan tentang tugas akhir ini maka dapat menghubungi nomor telpon penulis yaitu: 081234717436, dan dapat juga melalui email penulis yaitu deafaizafebrianty@gmail.com.