



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA  
SISTEM Pengereman *REGENERATIVE ANTI-LOCK*  
*BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN  
KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR**

KARTINI  
0231164000041

Dosen Pembimbing:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC

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





TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA  
SISTEM Pengereman *REGENERATIVE ANTI-LOCK  
BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN  
KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR**

KARTINI  
NRP. 0231164000041

Dosen Pembimbing:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC

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

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

**DESIGN FAULT TOLERANT CONTROL ON  
REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM OF  
ELECTRIC CAR WITH SENSOR AND ACTUATOR  
FAULT**

KARTINI  
NRP. 0231164000041

Supervisors:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC

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

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Kartini  
NRP : 0231164000041  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM Pengereman *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR**" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 20 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Kartini

NRP. 0231164000041

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM  
PENEREMAN *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*  
MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR**

Oleh:

Kartini

NRP. 0231164000041

Surabaya, 20 Juli 2020

Menyetujui,  
Pembimbing I



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

Menyetujui,  
Pembimbing II



Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Listrik FTIRS-ITS



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

NIP. 19711113 199512 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM  
PENEREMAN *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*  
MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR**

### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika

Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)

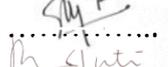
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**KARTINI**

**NRP. 02311640000041**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- |  |  |                 |
|--|--|-----------------|
| 1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. |  | (Pembimbing I)  |
| 2. Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC    |  | (Pembimbing II) |
| 3. Dr. Suyanto, S.T., M.T              |  | (Ketua Penguji) |
| 4. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes       |  | (Penguji I)     |

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA  
SISTEM Pengereman *REGENERATIVE ANTI-LOCK  
BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN  
SENSOR DAN AKTUATOR**

**Nama** : Kartini  
**NRP** : 0231164000041  
**Departemen** : Teknik Fisika FT-IRS ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  
Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC

**ABSTRAK**

Suatu sistem keamanan dalam berkendara merupakan hal penting termasuk sistem pengereman. Pengereman pada mobil listrik mulai berkembang dengan adanya *regenerative anti-lock braking system* untuk menjaga kontrol *slip ratio* dan memanfaatkan energi buang yang dihasilkan agar dipakai kembali. Komponen pada sistem *regenerative ABS* dapat mengalami kegagalan yaitu pada sensor maupun aktuator nya. Untuk mengatasi kegagalan pada sistem tersebut digunakan metode *fault tolerant control*. Kegagalan yang diatasi dengan *fault tolerant control* dapat berupa kesalahan pembacaan sensor (bias) maupun kepekaan (sensitifitas) sensor dan kesalahan aktuator pada motor berupa kesalahan *switch*. Motor BLDC digunakan sebagai aktuator untuk menggerakkan kendaraan. Pada sistem diterapkan kontrol *sliding mode* sebagai pengendali sistem dan kontrol PI untuk menjaga torsi yang dihasilkan oleh motor. *Fault tolerant control* pada sistem ABS mampu mengatasi kesalahan bias sensor sebesar 1% 30% 50% dan 100%, kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 10%, kesalahan aktuator berupa *open switch* pada *gate switch* 1, 2, 1 dan 2, serta kesalahan kedua komponen (sensor dan aktuator) dengan waktu berhenti kendaraan adalah 3.41s. Parameter performansi respon yaitu *overshoot* 6.4% serta *settling time* 0.14s.

**Kata Kunci:** *ABS, Fault Tolerant Control, Inverter, Motor BLDC, Sliding Mode Control, Slip Ratio*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***DESIGN FAULT TOLERANT CONTROL ON REGENERATIVE  
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM OF ELECTRIC CAR WITH  
SENSOR AND ACTUATOR FAULT***

***Name*** : **Kartini**  
***NRP*** : **02311640000041**  
***Department*** : **Engineering Physics FT-IRS ITS**  
***Supervisors*** : **Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**  
**Moh. Kamalul Wafi, S.T., Msc.DIC**

***ABSTRACT***

*A safety system in driving is important, including the braking system. Braking in electric cars began to develop with the regenerative anti-lock braking system to maintain slip ratio control and utilize the waste energy produced to be reused. Components in the ABS regenerative system can fail, namely the sensor or actuator. To overcome the failure of the system the fault tolerant control method is used. Failure that is overcome by fault tolerant control can be in the form of sensor reading errors (bias) or sensor sensitivity (sensitivity) and actuator errors on the motor in the form of a switch error. BLDC motors are used as actuators to drive vehicles. The sliding mode control system is applied as a system controller and PI control to maintain the torque generated by the motor. Fault tolerant control in the ABS system is able to overcome sensor bias errors by 1% 30% 50% and 100%, vehicle sensor sensitivity errors 10%, actuator errors in the form of open switches on gate switches 1, 2, 1 and 2, as well as errors of both components ( sensors and actuators) with vehicle stopping time is 3.41s. Response performance parameters are 6.4% overshoot and 0.14s settling time.*

***Keywords: ABS, Fault Tolerant Control, Inverter, Motor BLDC, Sliding Mode Control, Slip Ratio***

*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* PADA SISTEM Pengereman *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR”**.

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 I yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama mengerjakan tugas akhir.
3. Bapak Moh. Khamalul Wafi, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing II yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, bimbingan, serta bantuan selama mengerjakan tugas akhir.
4. Bapak Hendra Cordova, S.T., M.T. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Sudar dan Ibu Hartini), adik (Mia), dan keluarga atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Yoanne sebagai teman seperjuangan dalam mengerjakan tugas akhir, serta TA-wan Laboratorium Sistem Tertanam dan Siber-Fisik.
7. Ikma, Ira, Rendra, Gita, Finda, Hanif, Agam, Nanang, Sergi yang selalu menemani, membantu, serta memberi dukungan.
8. Seluruh teman-teman asisten Laboratorium Pengukuran, Keandalan, Resiko dan Keselamatan.

9. Seluruh teman – teman angkatan F51 (*Thalassinus Fortis*).
10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Penulis sadar bahwa laporan tugas akhir ini masih kurang sempurna, namun semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya, serta bermanfaat untuk referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lainnya.

Surabaya, 20 Juli 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK .....	xi
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 <i>Quarter Car Electric Vehicle</i> .....	7
2.2 <i>Anti-Lock Braking System</i> .....	8
2.3 <i>Regenerative Braking System</i> .....	10
2.4 Motor BLDC.....	11
2.5 <i>Sliding Mode Control</i> .....	14
2.6 <i>PID Control</i> .....	16
2.7 <i>Hysterisis Control</i> .....	17
2.8 <i>Observer</i> .....	18
2.9 <i>Fault Tolerant Control System</i> .....	21

BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1 Studi Literatur.....	24
3.2 Pemodelan <i>Quarter Car Model</i> .....	24
3.3 Pemodelan Motor .....	26
3.4 Perancangan Sensor.....	28
3.5 Perancangan Kontroler .....	28
3.6 Perancangan <i>Observer</i> .....	32
3.7 Perancangan Sistem <i>Fault Tolerant Control</i> dengan Kesalahan Sensor dan Aktuator.....	38
3.8 Pengujian Sistem <i>Fault Tolerant Control</i> .....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Pengujian Pemodelan <i>Regenerative Braking</i> .....	41
4.2 Pengujian <i>Closed Loop System</i> .....	43
4.3 Hasil Uji E,stimasi <i>Observer</i> .....	44
4.4 Pengujian Kesalahan Bias Sensor .....	46
4.5 Pengujian Kesalahan Aktuator pada <i>Switch Motor</i> .....	51
4.6 Pengujian Kesalahan Bias Sensor Kendaraan dan Aktuator .....	54
4.7 Pengujian Kesalahan Sensitifitas pada Sensor Kendaraan .....	61
4.8 Pengujian Pembebanan Massa .....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	67
5.1 Kesimpulan.....	67
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA.....	69
LAMPIRAN .....	72
BIODATA PENULIS.....	91

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Dinamika gaya yang bekerja pada <i>Quarter Car Model</i> (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007).....	7
<b>Gambar 2. 2</b>	<i>Anti-lock Braking System</i> (Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011) ..	8
<b>Gambar 2. 3</b>	Koefisien gesekan terhadap nilai <i>slip ratio</i> pada macam-macam kondisi permukaan jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014) .....	9
<b>Gambar 2. 4</b>	<i>Four Quadrant operating mode</i> (Sreesha & Vandana, 2015) .....	10
<b>Gambar 2. 5</b>	Konstruksi motor BLDC (Electronics, 2020).....	12
<b>Gambar 2. 6</b>	<i>Six step inverter</i> (Singh, Kulkarni, & Rana, 2013).....	12
<b>Gambar 2. 7</b>	Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013).....	15
<b>Gambar 2. 8</b>	Blok diagram PID (Ogata, 2001).....	17
<b>Gambar 2. 9</b>	<i>Hysteresis controll</i> tiga fasa (Patin, 2015).....	17
<b>Gambar 2. 10</b>	<i>Hysteresis current control</i> (Nguyen-Van, Abe, & Tanaka, 2017) ..	18
<b>Gambar 2. 11</b>	Diagram blok observer (Ogata, 2001) .....	20
<b>Gambar 3. 1</b>	<i>Flowchart</i> tugas akhir .....	23
<b>Gambar 3. 2</b>	Skema motor.....	27
<b>Gambar 3. 3</b>	Diagram blok <i>hysteresis control</i> (Febrianty, 2020).....	28
<b>Gambar 3. 4</b>	Diagram blok pengendalian sistem.....	29
<b>Gambar 3. 5</b>	Struktur <i>Observer</i> .....	38
<b>Gambar 3. 6</b>	Skema <i>fault tolerant control quarter car model</i> .....	39
<b>Gambar 4. 1</b>	Kecepatan kendaraan dan kecepatan roda saat <i>open loop</i> .....	41
<b>Gambar 4. 2</b>	Respon <i>slip ratio</i> dengan <i>set point</i> saat <i>open loop</i> .....	42
<b>Gambar 4. 3</b>	SOC pada baterai .....	42
<b>Gambar 4. 4</b>	Kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan sistem <i>closed loop</i> .....	43
<b>Gambar 4. 5</b>	Respon <i>slip ratio</i> dengan sistem <i>closed loop</i> .....	44
<b>Gambar 4. 6</b>	Respon kesalahan sensor kendaraan pada uji <i>observer</i> .....	45
<b>Gambar 4. 7</b>	Respon estimasi <i>disturbance</i> pada uji <i>observer</i> .....	45
<b>Gambar 4. 8</b>	Respon estimasi torsi beban pada uji observer .....	45
<b>Gambar 4. 9</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 1 % ..	47

<b>Gambar 4. 10</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 1%	47
<b>Gambar 4. 11</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100%	48
<b>Gambar 4. 12</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 100%	48
<b>Gambar 4. 13</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan bias sensor kecepatan roda 10%	50
<b>Gambar 4. 14</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kecepatan roda 10%	50
<b>Gambar 4. 15</b>	Kecepatan dengan kesalahan <i>switch</i> 1	51
<b>Gambar 4. 16</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan <i>switch</i> 1	52
<b>Gambar 4. 17</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan <i>switch</i> 1 dan 2	53
<b>Gambar 4. 18</b>	Kecepatan dengan kesalahan <i>switch</i> 1 dan 2	53
<b>Gambar 4. 19</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan <i>open switch</i> 1 pada detik ke-0.5	55
<b>Gambar 4. 20</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan <i>open switch</i> 1 pada detik ke-0.5	55
<b>Gambar 4. 21</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan <i>open switch</i> 1 dan 2 pada detik ke-0.5	56
<b>Gambar 4. 22</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan <i>open switch</i> 1 dan 2 pada detik ke-0.5	57
<b>Gambar 4. 23</b>	<i>Slip Ratio</i> dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.5 dan kesalahan <i>open switch</i> 1 detik ke 0.3	58
<b>Gambar 4. 24</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.5 dan kesalahan <i>open switch</i> 1 detik ke 0.3	58
<b>Gambar 4. 25</b>	Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.3 dan kesalahan <i>open switch</i> 1 detik ke 0.5	59
<b>Gambar 4. 26</b>	<i>Slip Ratio</i> dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.3 dan kesalahan <i>open switch</i> 1 detik ke 0.5	60
<b>Gambar 4. 27</b>	Kecepatan dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 30% pada detik ke-0.5	62
<b>Gambar 4. 28</b>	<i>Slip ratio</i> dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 30% pada detik ke-0.5	62

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b>	Parameter Gesekan Roda-Jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014) .....	9
<b>Tabel 2. 2</b>	Kondisi <i>Switching</i> Pada <i>Six Step Inverter</i> (Singh, Kulkarni, & Rana, 2013).....	13
<b>Tabel 3. 1</b>	Parameter Variabel Persamaan Gaya (Guo, Jian, & Lin, 2014).....	25
<b>Tabel 3. 2</b>	Parameter Koefisien Gesekan Pada Aspal Kering (Guo, Jian, & Lin, 2014).....	25
<b>Tabel 4. 1</b>	Parameter Performansi Respon dengan Kesalahan Bias Pada Sensor Kecepatan Kendaraan.....	49
<b>Tabel 4. 2</b>	Performansi Respon Dengan Kesalahan <i>Open Switch</i> Pada Detik ke-0.5 .....	54
<b>Tabel 4. 3</b>	Performansi Respon Dengan Kesalahan Bias Sensor dan <i>Kesalahan Open Switch</i> .....	61
<b>Tabel 4. 4</b>	Performansi Respon Dengan Kesalahan Sensitifitas Pada Sensor Kecepatan Kendaraan.....	63
<b>Tabel 4. 5</b>	Performansi Respon Dengan Penambahan Jumlah Penumpang .....	66

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada era perkembangan saat ini, mobilitas masyarakat tentunya sangat padat sehingga transportasi yang digunakan juga terjadi perkembangan yang cukup pesat. Salah satu transportasi pribadi yang banyak digunakan adalah mobil. Seiring dengan perkembangan teknologi, mobil konvensional yang menggunakan bahan bakar minyak atau berasal dari fosil kini telah banyak mengalami inovasi guna menaikkan efisiensi dan alternatif untuk bahan bakarnya. Mobil listrik dapat dinilai mampu menghemat energi hingga 80 persen dibandingkan dengan mobil konvensional dengan bahan bakar minyak. Hal tersebut merupakan salah satu studi dan riset yang sangat didukung oleh kementerian perindustrian bersama dengan kementerian riset, teknologi, dan pendidikan tinggi. Selain itu juga didukung oleh perguruan tinggi yang merupakan tempat untuk studi dan riset mobil listrik tersebut serta industri otomotif. Kementerian Perindustrian mengatakan bahwa penggunaan mobil listrik *hybrid* atau *plug-in hybrid* bisa menghemat bahan bakar minyak hingga dua kali lipat dibandingkan dengan pemakaian bahan bakar B20 (Indonesia, 2018). Dampak dari perkembangan mobil konvensional yaitu adanya gas emisi yang menyebabkan efek rumah kaca dan menaikkan jenis sumber penyakit yang serius. Oleh karena itulah diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai mobil listrik guna mengurangi dampak tersebut dan perkembangan teknologi kedepannya (Ding, Prasad, & Lie, 2017).

Mobil listrik merupakan kendaraan yang menggunakan baterai sebagai penggeraknya dan untuk itu membutuhkan paket baterai yang besar (Singh, Bansal, & Singh, 2019). Secara umum mobil listrik dapat dikategorikan dalam *Pure Electric Vehicle* (PEV) yang sering disebut juga *Battery Electric Vehicle* (BEV), *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), dan *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV). Mobil listrik dapat memenuhi mobilitas yang diinginkan karena sangat ramah lingkungan dan dapat mengurangi emisi gas buang. Keuntungan dari mobil listrik ini yaitu efisiensi energi yang lebih baik, mengurangi emisi gas rumah kaca, secara potensial dapat

menaikkan kesehatan umum, serta menaikkan pertumbuhan ekonomi (Iyiola & Isreal, 2018).

Mobil listrik memiliki beberapa sistem yang penting dan berhubungan satu sama lain. Salah satu sistem yang penting pada mobil listrik yaitu sistem pengereman. Sistem pengereman pada mobil listrik merupakan hal penting yang perlu diperhatikan karena berfungsi sebagai pengamanan dalam berkendara saat terjadi bahaya ataupun kondisi mendesak. Pada saat pengereman tersebut memungkinkan terjadinya *lock* atau *slip* ketika secara mendadak direm. Adanya *slip* tersebut dapat membuat mobil tergelincir atau meluncur bebas karena terjadi penguncian pada roda mobil. Terjadinya *slip* dapat membahayakan bagi penumpangnya, sehingga perlu diminimalkan agar dapat berjalan dengan baik. Dalam sistem pengereman untuk mencegah *lock* tersebut maka perlu adanya sistem yang baik didalamnya. *Anti-lock braking system* (ABS) merupakan sistem pengereman yang mengurangi terjadinya penguncian pada roda mobil sehingga tidak terjadi *slip* saat pengereman. Tujuan adanya *anti-lock braking system* ini untuk mengoptimalkan efektifitas pengereman dan menjaga kendaraan tetap stabil pada semua kondisi jalur yang dilalui dengan mengontrol *slip ratio* pada gaya pengereman maksimal yang diterapkan pada roda (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007).

Pada pengereman roda mobil terdapat energi yang terbuang karena adanya gesekan dari roda dengan kapas rem. Permasalahannya untuk mobil listrik ini adalah pada energi yang dibutuhkan untuk menjalankan mobil tersebut, terutama untuk jarak tempuh yang jauh. Dengan adanya energi panas yang terbuang saat pengereman maka energi tersebut dapat dialokasikan kembali sebagai energi yang dibutuhkan. Energi tersebut dapat disimpan kembali dan kemudian digunakan sebagai energi penggerak. Oleh karena itulah pada sistem pengereman perlu dilakukan regenerasi energi pengereman yang disebut dengan *regenerative braking*. Pada penelitian sebelumnya mengenai pengereman regeneratif dari mobil listrik menunjukkan bahwa ABS regeneratif memiliki respon yang lebih baik untuk situasi berhenti secara mendadak atau dalam keadaan panik. Dengan analisa keandalan, biaya dan ukuran penggerak listrik, serta perangkat penyimpanan energi yang diperlukan untuk regeneratif ABS (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007).

Pada sistem *anti-lock braking system* terdapat beberapa komponen yang penting yaitu sensor dan aktuator. Sensor digunakan untuk mengukur kecepatan roda dan kendaraan sehingga dapat memberikan informasi kepada kontroler agar dapat memerintahkan aktuator sehingga dapat terjadi pengereman. Apabila sensor dan aktuator terjadi kesalahan, maka pengereman tidak dapat terjadi dengan baik atau memungkinkan terjadinya penguncian pada roda. Aktuator pada mobil listrik juga dapat mengalami kesalahan yang disebabkan oleh arus yang terputus karena menggunakan listrik dari baterai. Kesalahan yang terjadi pada aktuator dapat menyebabkan torsi yang dihasilkan juga tidak sesuai dengan kebutuhan untuk gerak kendaraan.

Untuk mencegah adanya kesalahan sensor dan aktuator yang fatal, maka perlu dilakukan perancangan sistem kendali yang baik agar dapat mentoleransi ketika terjadi gangguan menggunakan *fault tolerant control* pada *regenerative ABS* (Pinandhito, Indriawati, & Harly, 2019). Dengan adanya kesalahan pada sensor dan aktuator maka diperlukan estimasi dalam perhitungannya.

Penelitian sebelumnya mengenai perancangan *fault tolerant control* pada *regenerative ABS* dengan *plant* yang digunakan yaitu mobil listrik bermodel *half car* diberikan kesalahan hanya pada sensor (Febrianty, 2020) dan perancangan *fault tolerant control* pada *anti-lock braking system* mobil konvensional dengan kesalahan pada sensor dan aktuator (Ikhfani, 2019). Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan perancangan *fault tolerant control* untuk *regenerative ABS* pada *plant* mobil listrik dengan kesalahan sensor dan aktuator.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dijelaskan, dapat dirumuskan masalah sebagai berikut :

- a) Bagaimana pengaruh kesalahan sensor dan aktuator terhadap pengereman *Regenerative Anti-Lock Braking System* pada mobil listrik ?
- b) Bagaimana merancang FTC untuk mengatasi kesalahan sensor dan aktuator terhadap pengereman *Regeneratif Anti-Lock Braking System* pada mobil listrik ?

### 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disebutkan, tujuan dari tugas akhir ini yaitu :

- a) Mengetahui pengaruh kesalahan sensor dan aktuator terhadap pengereman *Regenerative Anti-Lock Braking System* pada mobil listrik
- b) Merancang FTC untuk mengatasi kesalahan sensor dan aktuator terhadap pengereman *Regeneratif Anti-Lock Braking System* pada mobil listrik

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah :

- a) *Plant* yang digunakan yaitu kendaraan listrik dalam *Quarter Car Model* (QCM)
- b) Sistem kontrol yang digunakan adalah *sliding mode control* dan *Proportional Integral*
- c) Jenis jalan yang diterapkan saat pengereman adalah jenis aspal kering dengan *slip ratio* diatur pada 0,2 sesuai dengan grafik *slip ration-friction coefficient*.
- d) Simulasi pengereman mobil pada jalan lurus dan datar
- e) Jenis motor yang digunakan adalah motor BLDC

### 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a) BAB I PENDAHULUAN  
Pada bab I ini dijelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, serta sistematika laporan.
- b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI  
Pada bab II ini berisi mengenai tinjauan pustaka dan dasar teori yang digunakan yaitu *Quarter car model*, *anti-lock braking system*, *regenerative braking*, motor BLDC, kontrol PID, kontrol *Hysterisis*, *sliding mode control*, *observer*, dan *fault tolerant control*.
- c) BAB III METODOLOGI PENELITIAN  
Pada bab III ini merupakan rancangan dari penelitian yang dilakukan dalam bentuk *flowchart* serta penjabaran pada setiap langkah-langkah.

d) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV berisi analisa mengenai hasil perancangan *fault tolerant control* dan dibandingkan dengan tanpa adanya *fault tolerant control*.

e) BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V ini diberi kesimpulan mengenai hasil perbandingan sistem menggunakan *fault tolerant control* dan tanpa menggunakan *fault tolerant control* serta saran untuk pengembangan penelitian pada tugas akhir selanjutnya.

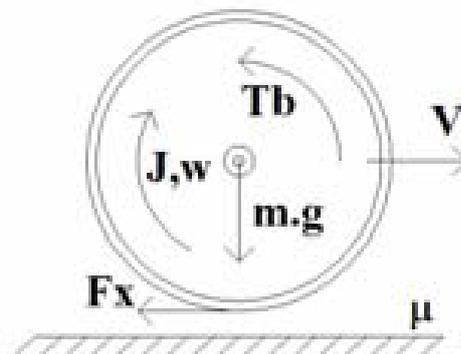
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 *Quarter Car Electric Vehicle*

Mobil listrik merupakan sebuah kendaraan yang menggunakan energi listrik untuk menggerakkan motornya. Motor yang digunakan pada mobil listrik yaitu motor DC (*Direct Current*). Daya pada mobil listrik didapatkan dari energi yang tersimpan pada baterai. Mobil listrik memiliki komponen utama yaitu *electric engine*, *motor controller*, dan *battery*. Baterai dapat diisi melalui sumber energi listrik atau melalui *regenerative braking* (Department of Energy, 2017). Mobil listrik yang digunakan merupakan *quarter car model* yaitu terdiri dari satu roda saja yang diberikan kontrol. Dinamika gaya pada roda saat terjadi pengereman diilustrasikan seperti pada Gambar 2.1 berikut.



**Gambar 2. 1** Dinamika gaya yang bekerja pada *Quarter Car Model* (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007)

$F_x$  merupakan gaya gesek roda (N),  $m$  adalah massa roda (kg),  $g$  adalah gaya gravitasi ( $m/s^2$ ),  $J$  adalah inersia roda ( $kg \cdot m^2$ ),  $\mu$  adalah gaya gesek,  $T_b$  adalah torsi pengereman (N.m) dan  $v$  merupakan kecepatan kendaraan (m/s). Peristiwa pengereman pada *quarter 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”, ditunjukkan dengan persamaan (2.1) dan persamaan (2.2) (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007).

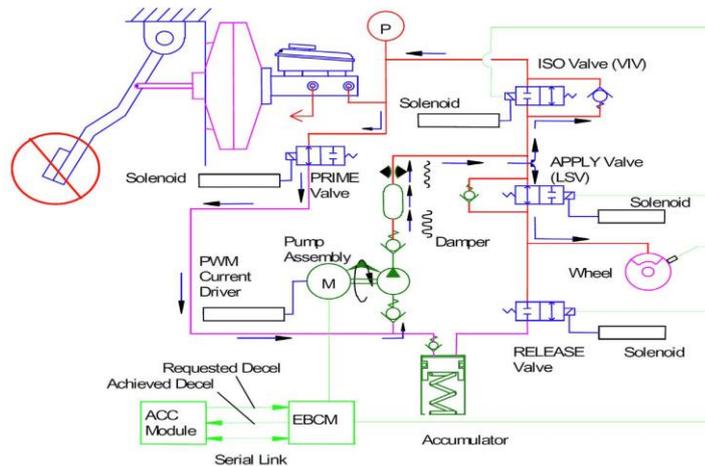
$$\Sigma F = m \cdot a \quad (2.1)$$

$$F_x = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.2)$$

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (2.3)$$

## 2.2 Anti-Lock Braking System

*Anti-lock Braking System* (ABS) merupakan suatu sistem keselamatan aktif yang dirancang untuk mencegah *wheels lock* atau roda terkunci setelah terjadi pengereman secara mendadak atau pengereman pada kondisi jalan yang licin yang darurat. Sehingga ABS ini dapat mengurangi risiko terjadinya *slip* dan memungkinkan pengemudi untuk dapat mempertahankan kontrol kemudi agar terjadinya kecelakaan dapat dihindari.



**Gambar 2.2** *Anti-lock Braking System* (Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011)

Pada mobil listrik dipasang sensor kecepatan (*hall effect*) untuk membaca putaran dari roda dan kendaraan setiap saat, kemudian hasil pembacaan ini akan dikirimkan kepada kontroler untuk melakukan perhitungan *slip ratio*. Perhitungan *slip ratio* berdasarkan persamaan (2.4) berikut (Guo, Jian, & Lin, 2014).

$$\lambda = \frac{v - \omega R}{v} \quad (2.4)$$

Dimana  $\lambda$  adalah *slip ratio*,  $v$  adalah kecepatan kendaraan (m/s), dan  $\omega$  adalah kecepatan angular roda (rad/s). Berdasarkan model Burckhardt (Guo, Jian, & Lin, 2014), kecepatan bergantung pada koefisien gesekan yang diekspresikan sebagai fungsi dari *slip ratio* ( $\lambda$ ) dan kecepatan ( $v$ ) seperti persamaan (2.5) berikut :

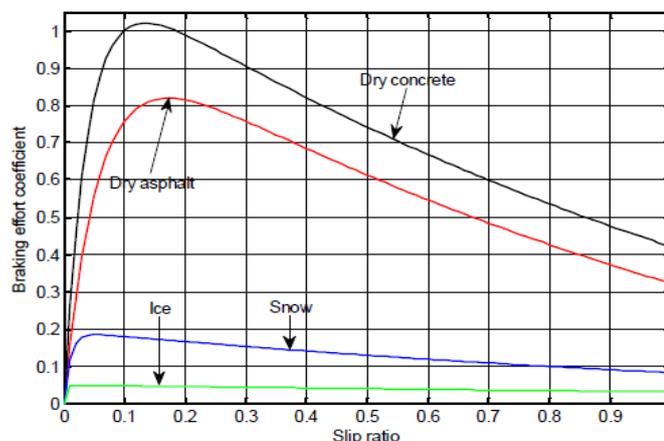
$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.5)$$

Dimana,  $C_1$  adalah nilai maksimum kurva gesekan,  $C_2$  adalah bentuk kurva gesekan,  $C_3$  adalah perbedaan kurva gesekan antara nilai maksimum dan nilai saat  $\lambda = 1$ , dan  $C_4$  adalah nilai karakteristik kebasahan jalan. Dengan mengubah nilai parameter  $C_1 - C_4$ , banyak kondisi gesek antara ban dan jalan yang dapat dimodelkan. Parameter dari beberapa permukaan jalan ditampilkan pada Tabel 2.1 berikut ini.

**Tabel 2.1** Parameter Gesekan Roda-Jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Kondisi permukaan	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
Aspal kering	1.029	17.16	0.523	0.03
Beton kering	1.1973	25.168	0.5373	0.03
Salju	1.946	94.129	0.0646	0.03
Es	0.05	306.39	0	0.03

*Slip ratio* yang didatkan dari hasil kalkulasi sensor kecepatan roda dan kendaraan akan diterima oleh kontroler sehingga dapat memastikan bahwa roda tidak sampai terkunci. Ketika kontroler mendapat informasi hampir terjadi penguncian pada roda, maka kontroler akan memerintahkan aktuator untuk mengurangi gaya pengereman. Selain itu, untuk mendapat performa pengereman yang maksimum, maka kontroler memastikan bahwa nilai *slip ratio* dari roda berada pada nilai yang paling optimal. Nilai optimal *slip ratio* pada masing–masing kondisi jalan ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut :

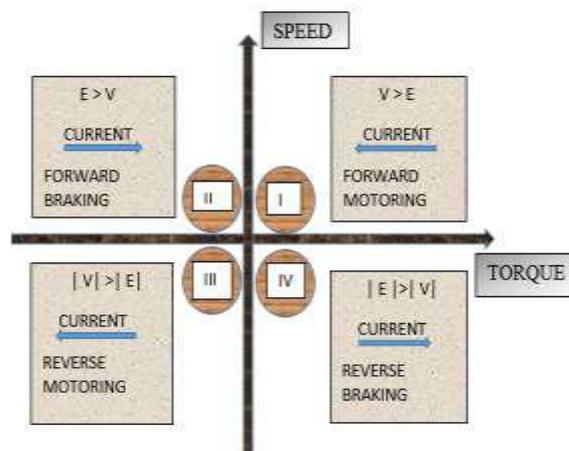


**Gambar 2.3** Koefisien gesekan terhadap nilai *slip ratio* pada macam-macam kondisi permukaan jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014)

### 2.3 Regenerative Braking System

*Regenerative braking system* merupakan sistem pengereman yang dapat mengubah energi mekanik hasil pengereman menjadi energi listrik untuk digunakan kembali sebagai sumber energi dalam menjalankan kendaraan listrik. Kendaraan listrik menggunakan motor sebagai generator ketika terjadi pengereman, yang digunakan untuk memompa energi kendaraan dari pengereman ke penyimpanan energi atau baterai. *Regenerative braking* merupakan pendekatan yang efektif untuk memperpanjang jarak kemudi dari kendaraan listrik dan dapat menyimpan dari 8% hingga 25% dari total energi yang digunakan kendaraan, tergantung dari siklus dan bagaimana cara mengendarainya.

Prinsip kerja sistem *regenerative braking* tergantung pada prinsip kerja motor listrik, yang merupakan komponen penting dari sistem. Motor listrik ini selama beroperasi normal akan menerima listrik dari baterai. Tetapi ketika beberapa gaya eksternal diterapkan untuk mengaktifkan motor (selama pengereman), maka berlaku sebagai generator dan menghasilkan listrik. Sehingga setiap kali motor berjalan dalam satu arah, energi listrik akan dikonversi menjadi energi mekanik yang kemudian digunakan untuk mempercepat kendaraan agar kendaraan bergerak dan saat motor berjalan di arah yang berlawanan maka akan melakukan fungsi sebagai generator, yang kemudian mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Memanfaatkan gaya rotasi dari roda untuk mengubah motor listrik (Bhandari, Dubey, Kandu, & Deshbhratar, 2017). Perubahan mode untuk motor listrik ini digambarkan pada Gambar 2.4 Operasi *Four Quadrant* seperti berikut :



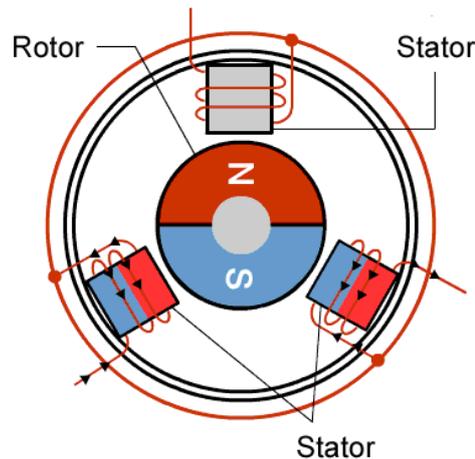
**Gambar 2.4** *Four Quadrant operating mode* (Sreesha & Vandana, 2015)

Operasi empat mode diatas yaitu *forward motoring*, *forward braking*, *reverse motoring* dan *reverse braking* yang terdapat pada motor BLDC. Pada kuadran pertama, kecepatan dan torsi keduanya positif sehingga motor berputar kearah depan. Kuadran kedua, kecepatan tetap diarah positif tetapi torsi pada arah berkebalikan. Torsi balik ini digunakan untuk pengereman. Kuadran tiga hanya berlawanan dengan quadran pertama, kecepatan dan torsi keduanya negatif sehingga perputaran pada arah berkebalikan. Dan untuk kebalikan dari kuadran dua yaitu kuadran empat yang mana daya dihasilkan oleh itu (Sreesha & Vandana, 2015).

Energi yang dihasilkan dari pengereman ini disebut energi balik atau dikenal dengan *back EMF (electromagnetic force)*. Tegangan masukan lebih besar daripada *back EMF* ketika mode *motoring* dan kurang dari *back EMF* ketika mode *generating*. Untuk menghindari kerusakan pada baterai akibat arus yang besar dari *back EMF* maka diperlukan pengendalian pada proses pengereman regeneratif (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007). Besarnya arus balik/arus pengereman ini dapat dikendalikan dengan menggunakan mode pensaklaran dengan *pulse width modulation (PWM)*. PWM berfungsi sebagai pengatur *level* dari pengereman regeneratif dengan variasi *duty cycle* dari sinyal PWM tersebut. Energi listrik ini kemudian digunakan untuk mengisi ulang baterai (Bhandari, Dubey, Kandu, & Deshbhratar, 2017).

## 2.4 Motor BLDC

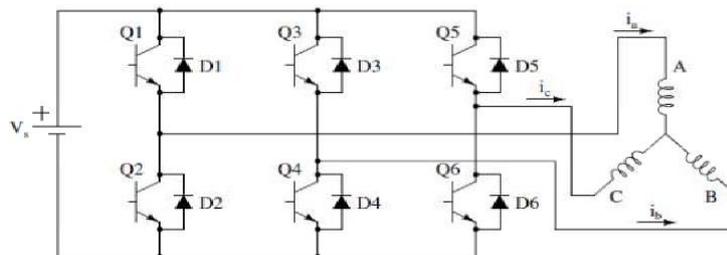
Motor *Brushless Direct Current (BLDC)* adalah sistem penggerak dengan sumber arus listrik DC. Motor BLDC banyak digunakan pada otomotif, *aerospace*, dan sistem otomasi pada industri. Seperti namanya, BLDC motor tidak memiliki sikat sebagai *commutator*. Motor BLDC cocok digunakan untuk kendaraan listrik karena kekuatannya yang tinggi, karakteristik torsi-kecepatan yang lebih baik, efisiensi tinggi, range kecepatan yang lebih tinggi, serta lebih sedikit *noise*, dibandingkan dengan *brushed DC motor* atau motor induksi. Motor BLDC adalah tipe motor *synchronous*, yang berarti medan magnet yang dihasilkan dari stator dan rotasi rotor berada pada frekuensi yang sama (Nian, Peng, & Zhang, 2014).



**Gambar 2.5** Konstruksi motor BLDC (Electronics, 2020)

Motor BLDC terdiri dari dua bagian yaitu *rotor*, bagian yang bergerak terbuat dari permanen magnet dan *stator*, bagian yang tidak bergerak terbuat dari kumparan 3 fasa. BLDC merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa tetapi motor ini disebut dengan BLDC karena pada implementasinya menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter* 3 fasa.

Tegangan AC diberikan pada *stator* untuk menghasilkan medan magnet agar dapat menarik *rotor*. Karena tidak terdapat *brush* pada BLDC, maka untuk mengendalikan motor BLDC perlu diketahui posisi rotor yang menentukan *timing* komutasi. Sensor *hall effect* adalah sensor yang paling umum untuk memprediksi posisi rotor.



**Gambar 2.6** *Six step inverter* (Singh, Kulkarni, & Rana, 2013)

Motor BLDC menggunakan *six step inverter* untuk mengatur aliran arus yang masuk ke motor. Operasi *six step inverter* ini hanya dua kumparan yang diberi arus dalam satu waktu sehingga terdapat dua kumparan aktif dengan arus yang

berkebalikan. Dalam satu putaran motor terdiri dari 6 step yang setiap step nya aktif setiap  $60^0$ . Perubahan komutasi ditunjukkan oleh Tabel 2.2 berikut.

**Tabel 2. 2** Kondisi *Switching* Pada *Six Step Inverter* (Singh, Kulkarni, & Rana, 2013)

Posisi Rotor ( $^0$ )	Kondisi sensor Hall			Switch on	Phase		
	H1	H2	H3		A	B	C
0-60	1	0	0	Q1Q4	+	-	OFF
60-120	1	1	0	Q1Q6	+	OFF	-
120-180	0	1	0	Q3Q6	OFF	+	-
180-240	0	1	1	Q3Q2	-	+	OFF
240-300	0	0	1	Q5Q2	-	OFF	+
300-360	1	0	1	Q5Q4	OFF	-	+

Beberapa asumsi dibuat untuk mengurangi kompleksitas matematis dari motor BLDC, lilitas tiga fasa simetris (jumlah lilitan sama), tidak ada saturasi magnetik, tidak ada losses dari *hysteresis* dan *eddy current*, jarak antar magnet sama, induktansi mutual diabaikan, dan reaksi armatur juga diabaikan (Cham & Samad, 2014).

Persamaan matematis untuk motor BLDC sebagai berikut :

$$\begin{cases} V_a = i_a r + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = i_b r + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = i_c r + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (2.6)$$

Dengan :

- $V_a, V_b, V_c$  = Voltase tiap fasa (V)
- $i_a, i_b, i_c$  = Arus stator tiap fasa (i)
- $e_a, e_b, e_c$  = *back* EMF tiap fasa (V)
- $L$  = induktansi tiap fasa (H)
- $r$  = resistansi tiap fasa ( $\Omega$ )

*Back* EMF dari BLDC berbeda fasa sebesar 120 pada masing – masing fasa nya, dan dapat dinyatakan dalam persamaan (2.7) :

$$\begin{cases} e_a = K_e f(\theta_e) \omega_m \\ e_b = K_e f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_m \\ e_c = K_e f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_m \end{cases} \quad (2.7)$$

Dengan:

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

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

$f(\theta_e)$  = fungsi trapezoidal

$\theta_e$  = posisi sudut rotor (rad)

Pada motor BLDC ini, terdapat parameter penting yaitu besarnya torsi elektromagnetik dari motor. Torsi elektromagnetik yang dihasilkan dari BLDC motor dituliskan pada persamaan (2.8) berikut :

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2.8)$$

atau

$$T_e = K_t \left[ f(\theta_e) i_a + f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.9)$$

Dengan :

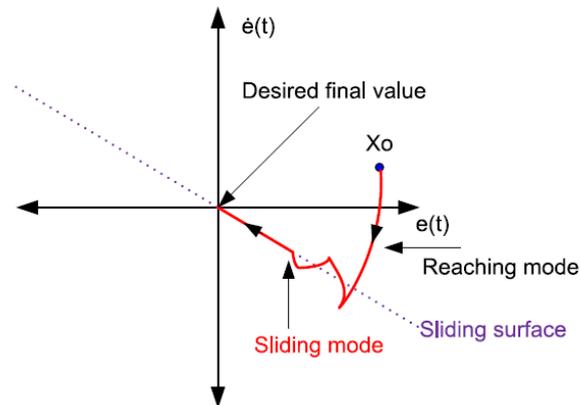
$T_e$  = torsi elektromagnetik (Nm)

$K_t$  = konstanta torsi (Nm/A)

## 2.5 Sliding Mode Control

*Sliding mode control* merupakan metode pada teori kontrol *modern* yang menggunakan pendekatan *state space* untuk menganalisa sebuah sistem. Dengan menggunakan sistem *state space* akan memudahkan jika digunakan pada sistem yang *multi input multi output*. Keuntungan dari SMC adalah sistem kontrol menjadi lebih tidak sensitif pada *disturbance* (Nasir, Ismail, & Ahmad, 2010). SMC banyak diketahui karena kekuatannya dengan trayektori *tracking* yang tinggi dan mensuplai solusi *robust* untuk estimasi parameter, diagnosis kesalahan, dan kontrol. SMC dibuat untuk mendesain sistem kontrol yang kompleks, sistem dinamik *nonlinier* orde tinggi, sensitifitas rendah, dan eror pemodelan (Rahmani, Ghanbari, & Etefagh, 2016).

Representasi grafik SMC seperti pada Gambar 2.7 menggunakan fase bidang yang terdiri dari *error* dan turunan pertama dari *error* tersebut. Dapat dilihat bahwa dimulai dari berbagai *initial condition*, *state trajectory* dijangkau oleh permukaan pada waktu *finite* (*reaching mode*), kemudian meluncur sepanjang permukaan ke arah target (*sliding mode*).



**Gambar 2.7** Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013)

SMC memiliki beberapa kekurangan salah satunya adalah fenomena *chattering*. *Chattering* disebabkan akibat sistem memiliki parameter yang berubah terhadap waktu atau karakteristik nonlinier, sehingga mungkin tidak mengikuti permukaan luncur sepenuhnya.

Langkah pertama untuk desain SMC adalah mendesain persamaan permukaan (*sliding surface*). Langkah kedua yaitu mendesain *feedback control* untuk memberikan sistem trayektori yang konvergen pada *sliding surface*. Perpindahan sistem pada *sliding surface* disebut dengan *sliding mode*. *Sliding surface*  $S(t)$  bergantung pada *tracking error*  $e(t)$  dan turunannya.

$$S(t) = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (2.10)$$

Teori kestabilan Lyapunov digunakan untuk menstabilkan suatu sistem nonlinier yang berubah terhadap waktu. Fungsi Lyapunov yang digunakan sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{2} S^2, V_0 = 0, V > 0 \quad (2.11)$$

Pada penelitian (Rahmani, Ghanbari, & Etefagh, 2016), apabila fungsi *scalar* yang terdapat pada  $V(x,t)$  bersifat kontinu maka turunan parsial pertama fungsi tersebut memenuhi kondisi definit negatif. Berdasarkan Teorema Lyapunov yang diterapkan pada persamaan (2.11) didapatkan turunan pertama memenuhi syarat kestabilan sistem yang bersifat definit negatif dengan nilai  $\varepsilon$  (epsilon) merupakan suatu konstanta positif.

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq -\varepsilon|s| < 0 \quad (2.12)$$

Dengan fungsi *signum* ( $sgn$ ) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$sgn(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

Adanya definisi dari fungsi singnum, persamaan (2.11) dapat dituliskan ke bentuk lain seperti pada persamaan (2.12).

$$\dot{S} = -\varepsilon sgn(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (2.14)$$

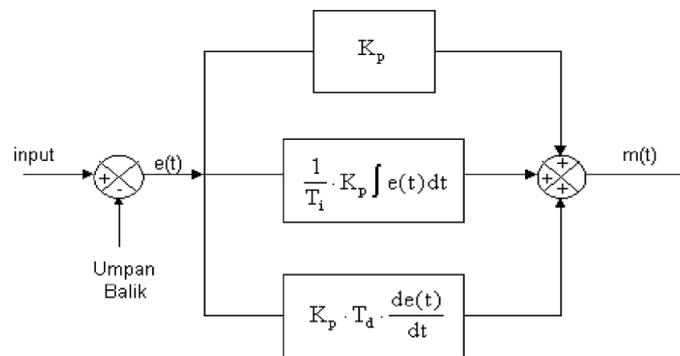
Dengan  $\varepsilon$  (epsilon) dan  $k$  adalah positif konstan.

## 2.6 PID Control

Kontrol PID merupakan sistem kontrol berumpan balik yang sering digunakan pada sistem kontrol industri karena memiliki performa kontrol yang baik. Kontroler PID menghitung nilai *error* sebagai selisih antara variabel proses pengukuran dan *setpoint* yang diinginkan. Algoritma kontrol PID melibatkan tiga parameter konstanta berbeda yang sering disebut *3-terms control* yaitu, *proportional* (P), *integral* (I), dan *derivative* (D). Nilai pada masing-masing aksi kontrol tersebut diinterpretasikan dalam fungsi waktu dan memiliki keunggulan tertentu, dimana aksi kontrol *proportional* mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, aksi kontrol *integral* mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error*, dan aksi kontrol *derivative* mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error* atau meredam *overshot/undershot*. Ketiga aksi kontrol tersebut dijumlahkan untuk menghitung nilai keluaran dari kontrol PID. Algoritma pengendalian PID dirumuskan sebagai berikut:

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

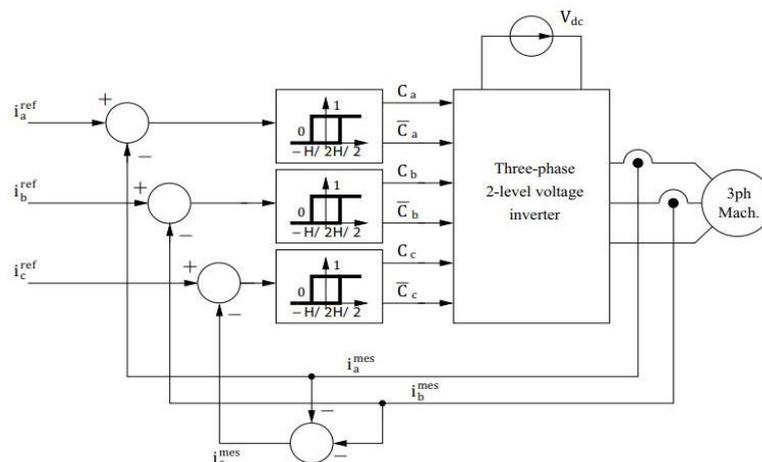
Dimana  $y$  adalah variabel proses yang diukur,  $r$  adalah variabel referensi,  $u$  adalah sinyal kontrol, dan  $e$  adalah kesalahan kontrol ( $e = y_{sp} - y$ ). Variabel referensi disebut dengan *set point*. Sinyal kontrol PID merupakan penjumlahan dari 3-*terms control*, yaitu : P-term (sebanding dengan kesalahan), I-term (sebanding dengan integral dari kesalahan), dan D-term (sebanding dengan turunan dari kesalahan). Parameter kontroler yaitu gain *proportional*  $K$ , waktu integral  $T_i$ , dan waktu turunan  $T_d$  (Astrom, 2002).



**Gambar 2.8** Blok diagram PID (Ogata, 2001)

## 2.7 Hysterisis Control

*Hysteresis* merupakan perbedaan nilai *output* ketika nilai yang diberikan pada *input* naik dengan nilai *output* saat diberikan *input* turun. *Hysteresis control* merupakan jenis dari kontrol *non-optimal* yang berupa kontrol *switch* secara langsung, tetapi melibatkan pengendalian arus secara independen. Contoh penggunaan kontrol ini yaitu pada pengendalian arus motor BLDC yang strukturnya seperti pada Gambar 2.9.

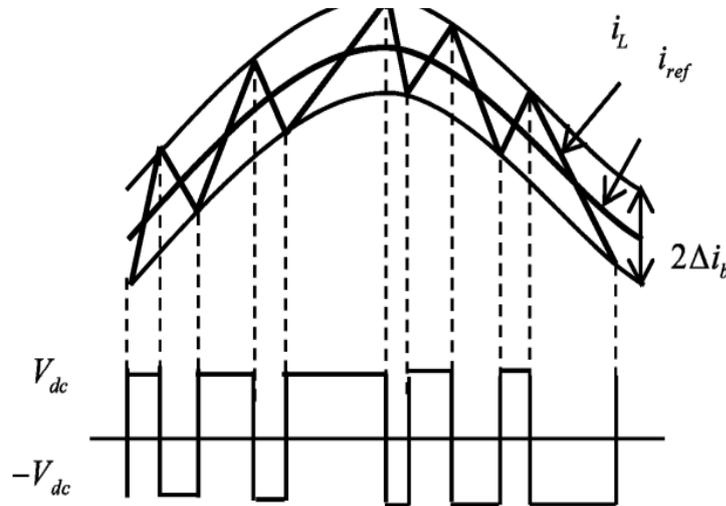


**Gambar 2.9** Hysteresis controll tiga fasa (Patin, 2015)

Kontrol *hysteresis* bekerja secara intuitif, menerapkan fungsi *switching* sama dengan 1 untuk meningkatkan arus dan nilai 0 untuk mengurangi arus. Metode kontrol ini sangat dinamis, tetapi arus *ripple* berhubungan dengan lebar hysteresis dan frekuensi *switching* meningkat ketika *bandwith hysteresis* diperkecil (Patin, 2015). Persamaan untuk batas hysteresis diberikan pada persamaan (2.16) berikut :

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

Pada pengendalian arus menggunakan *hysteresis*, toleransi *bandwidth* arus adalah nilai tetap dari  $\Delta i_b$ . Tidak akan terjadi *switching* ketika arus terukur  $i_L$  berada di antara batas atas dan batas bawah. Switch S1 akan *off*, dan S2 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 S1 *on* dan S2 *off* kemudian arus keluaran akan mulai meningkat (Nguyen-Van, Abe, & Tanaka, 2017). Pergerakan arus dapat dilihat pada Gambar 2.10.



**Gambar 2. 10** *Hysteresis current control* (Nguyen-Van, Abe, & Tanaka, 2017)

## 2.8 Observer

Observer digunakan untuk estimasi suatu *state* serta kesalahan pada suatu sistem. Observer digunakan pada skema *fault tolerant control* untuk mendeteksi kesalahan sistem berdasarkan model dari sistem. Ketika terjadi kesalahan pada sensor dan aktuator, observer akan mengestimasi perbedaan antara keluaran yang

diukur dengan estimasi keluaran atau yang disebut dengan *error*. Dampak kesalahan aktuator dan sensor dapat direpresentasikan sebagai vektor *input* tak-diketahui yang beraksi pada dinamika sistem atau pada pengukuran. Sebuah kesalahan aktuator berhubungan dengan perubahan sebuah *input* kontrol yang diterapkan pada sistem, sedangkan sebuah kesalahan sensor berhubungan dengan perubahan sebuah *output* pengukuran sistem.

Sistem dinamik suatu sistem dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) yang dapat didefinisikan secara umum untuk sistem kontinyu seperti di bawah ini (Ogata, 2001)

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

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

Dengan :

$A$  = matriks keadaan

$B$  = matriks kendali

$C$  = matriks keluaran

$D$  = matriks gangguan

$u(t)$  = masukan kendali

$y(t)$  = vektor keluaran

$\dot{x}(t)$  = vektor keadaan

Model matematis observer menyerupai model matematis pada plant, namun terdapat penambahan gain observer ( $K_e$ ).

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_e(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.19)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (2.20)$$

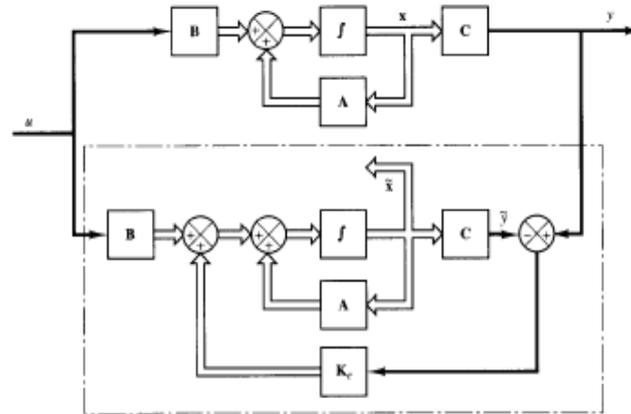
Dengan :

$\dot{\hat{x}}(t)$  = turunan estimasi *state*  $x(t)$

$K_e$  = *gain observer*

$\hat{x}(t)$  = estimasi *state*  $x(t)$

$\hat{y}(t)$  = estimasi  $y(t)$



**Gambar 2. 11** Diagram blok observer (Ogata, 2001)

*Gain observer* adalah matriks untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran  $y$  aktual dan  $y$  estimasi sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata, 2001). *Observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Diagram blok sistem observer dapat dilihat pada Gambar 2.11.

Adanya kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut sehingga bentuk state space sistem yang terdapat kesalahan menjadi sebagai berikut :

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

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

Kesalahan sensor dan aktuator dimodelkan pada persamaan (2.23) dan (2.24) berikut:

$$x_f(t) = \alpha x(t) + \beta \quad (2.23)$$

$$f(t) = x_f(t) - x(t) \quad (2.24)$$

Dengan:

$\alpha$  = Kesalahan sensitifitas

$\beta$  = Kesalahan bias

$x_f$  = State dengan penambahan kesalahan

$f$  = Kesalahan yang terjadi

$x$  = State tanpa kesalahan

Untuk memperoleh gain observer dilakukan ekspansi sehingga diperoleh persamaan baru dan dapat diketahui pengaruh kesalahan pada sensor terhadap *state* sistem.

$$\dot{z}(t) = A_z[y(t) - z(t)] \quad (2.25)$$

$$\dot{z}(t) = A_z[Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.26)$$

$A_z$  merupakan matriks identitas ( $I$ ), Matriks dari kesalahan sensor dan aktuator dapat didefinisikan sebagai  $f = \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix}$ .

Persamaan (2.26) dapat mendefinisikan persamaan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan persamaan matriks yang sudah di ekspansi. Persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.27) .

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \quad (2.27)$$

Untuk mendapatkan nilai dari *gain observer* maka dipakai ekspansi melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan persamaan (2.28)

$$\dot{\hat{x}}_a(t) = A_a \hat{x}_a + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x (y - \hat{y}) \quad (2.28)$$

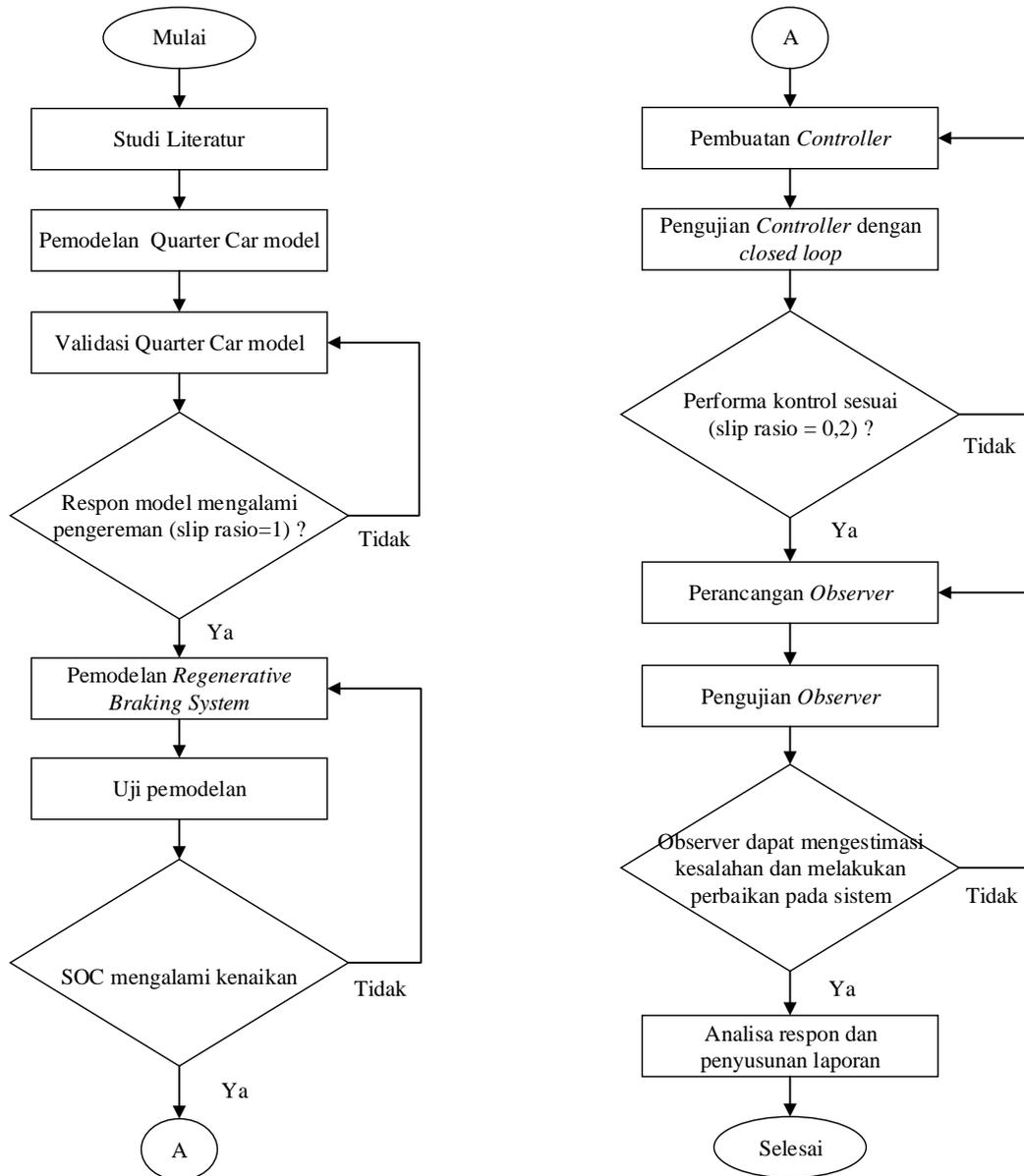
## 2.9 Fault Tolerant Control System

Pada suatu sistem yang terdiri dari beberapa komponen memungkinkan terjadinya kerusakan atau kegagalan pada masing-masing komponennya. Untuk mengatasi kemungkinan terjadinya kegagalan yang disebabkan oleh kesalahan tersebut diperlukan adanya sistem kontrol yang baik untuk mengatasi. Salah satu kontrol yang mampu mengatasi hal tersebut yaitu *fault tolerant control system* (FTCS). FTCS dibutuhkan untuk menaikkan keandalan dan level automasi pada sistem *engineering* yang *modern* (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2013). Tujuan utama FTCS adalah untuk merancang sebuah sistem kontrol dengan struktur yang mampu mencapai kestabilan sistem, baik ketika komponen sistem bekerja normal ataupun terjadi kesalahan. Tahapan dalam sistem *Fault Tolerant Control* adalah yang pertama yaitu mendeteksi kesalahan yang diberikan yang ada pada sistem. Kemudian kesalahan tersebut diestimasi dan dikompensasi. Rekonfigurasi kontrol berfungsi untuk memperbaiki kesalahan agar sistem tetap berjalan secara optimal.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada pengerjaan tugas akhir ini dilakukan sesuai prosedur yang telah dibuat pada *flowchart* berikut :



**Gambar 3.1** *Flowchart* tugas akhir

### 3.1 Studi Literatur

Pada studi literatur ini diperlukan sebagai referensi untuk mengetahui materi-materi yang berhubungan dalam pengerjaan tugas akhir yaitu pemahaman mengenai *fault tolerant control*, *anti-lock braking system*, *regenerative braking*, *sliding mode control* dan *observer*. Studi literatur ini dilakukan di awal hingga akhir penelitian dengan mencari sumber referensi dari buku dan jurnal penelitian serta beberapa laporan tugas akhir sebelumnya yang telah dilakukan.

### 3.2 Pemodelan *Quarter Car Model*

Pemodelan dinamik gerak longitudinal untuk *quarter car model* ini menggunakan persamaan Hukum Newton II seperti pada persamaan (2.1). Pada saat pengereman terjadi gaya gesek roda dengan jalan sesuai dengan persamaan (2.2) yaitu  $F_x = m \frac{dv}{dt}$

Dengan nilai gaya gesek yang bekerja pada *quarter car model* adalah :

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.1)$$

Pemodelan gerak rotasi roda seperti pada Gambar 2.1, dituliskan dalam persamaan gerak rotasi sebagai berikut :

$$F_x R - T_b = J \dot{\omega} \quad (3.2)$$

dimana torsi pengereman didapat dari torsi elektromagnetik pada motor yang dikali dengan rasio *gearbox* untuk roda.

$$T_b = T_e \cdot n \quad (3.3)$$

Dengan:

$T_b$	= torsi pengereman	(N.m)
$J$	= momen inersia roda	(kg.m <sup>2</sup> )
$\omega$	= kecepatan angular roda	(rad/s)
$m$	= Massa kendaraan <i>quarter car model</i>	(kg)
$g$	= Gaya gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$v$	= Kecepatan kendaraan	(m/s)
$\mu$	= Koefisien gesek permukaan jalan	
$n$	= rasio <i>gearbox</i>	

Beberapa parameter yang digunakan pada persamaan gaya adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 1** Parameter Variabel Persamaan Gaya (Guo, Jian, & Lin, 2014)

No.	Simbol	Variabel (satuan)	Nilai
1	$m$	Massa <i>half car model</i> (kg)	324.5
2	$g$	Percepatan gravitasi (m/s <sup>2</sup> )	9.8
3	$\alpha$	Sudut jalan <i>half car model</i> (rad)	0
4	$R$	Jari- jari roda (m)	0.33
5	$v$	Kecepatan awal kendaraan (m/s)	27.78
6	$\omega$	Kecepatan roda (rad/s)	84.18
7	$n$	Rasio <i>gearbox</i>	10
8	$\tau_b$	Torsi pengereman <i>time constant</i>	0.01

Koefisien gesek ( $\mu$ ) didapatkan dari persamaan (2.5). Pada persamaan tersebut membutuhkan parameter untuk setiap variabelnya. Gambar 2.3 menunjukkan grafik koefisien gesekan dan *slip ratio* yaitu pada kondisi *snow* dan *ice* memiliki koefisien yang rendah mengakibatkan terjadinya *slip* sangat rentan. Kondisi jalan *dry asphalt* dapat dikatakan sebagai kondisi jalan normal dengan nilai koefisien gesekan maksimal mencapai 0.8 dan nilai *slip* cukup rendah seperti pada Gambar 2.3. Sehingga kondisi jalan yang digunakan dalam simulasi ini adalah *dry asphalt* (Guo, Jian, & Lin, 2014) dengan parameter koefisien gesekannya ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ) ditunjukkan oleh Tabel 3.2 berikut :

**Tabel 3. 2** Parameter Koefisien Gesekan Pada Aspal Kering (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
$C_1$	Nilai maksimum kurva gesekan	1.029
$C_2$	Bentuk kurva gesekan	17.16
$C_3$	Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$	0.523
$C_4$	Nilai karakteristik kebasahan jalan	0.03

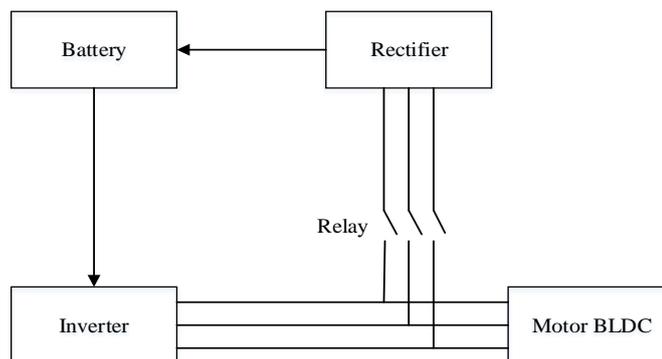
Parameter lain untuk menentukan koefisien gesekan yaitu kecepatan ( $v$ ) dan juga *slip ratio* ( $\lambda$ ). Nilai *slip ratio* yang akan digunakan sebagai *set point* pada *anti-lock braking system* ini yaitu 0,2. Nilai tersebut didapatkan dari persamaan (2.4). Kecepatan roda yang digunakan untuk mengkalkulasi nilai *slip ratio* didapatkan dari persamaan gerak rotasi.

Parameter pada setiap variabel di substitusikan ke persamaan total gaya yang bekerja pada *quarter car model* sehingga didapatkan persamaan matematis untuk *quarter car model*. Permukaan jalan dianggap lurus dengan  $\alpha$  (kemiringan)  $0^\circ$ .

Persamaan-persamaan yang didapat tersebut di simulasikan dalam Matlab Simulink sebagai pemodelan *plant* yaitu blok *vehicle plant*. Pada blok ini nilai gaya-gaya yang telah disebutkan sebelumnya diintegrasikan untuk mendapatkan kecepatan kendaraan. Parameter pada tiap gaya yang bernilai konstanta dibuat dalam blok *gain*. Gaya  $F_x$  didapat dari *slip ratio* dan kecepatan yang masuk ke blok *function* untuk menghitung nilai gaya gesek ( $\mu$ ) dan diberi *gain* berisi parameter  $F_x$ . Kecepatan ini akan menjadi output dari *quarter car model* untuk digunakan pada perancangan FTC. Input yang masuk ke blok *quarter car model* ini yaitu torsi elektromagnetik dari motor yang telah dikalikan dengan *ratio gearbox* untuk menjadi torsi pengereman. Nilai  $F_x$  yang dikalikan dengan jari-jari roda dikurangi dengan torsi pengereman diberi *gain inertia* motor yang diintegrasikan akan menghasilkan kecepatan roda. Blok *slip ratio* mendapat masukan dari kecepatan kendaraan dan kecepatan roda kemudian keluarannya menjadi input pada  $F_x$ . Kecepatan roda dan kecepatan kendaraan serta *slip ratio* menjadi keluaran dari blok *quarter car model*.

### 3.3 Pemodelan Motor

Motor yang digunakan sebagai penggerak mobil listrik dalam simulasi tugas akhir ini adalah motor jenis BLDC yang dibuat dengan *permanent magnet synchronous motor* yang ada di *toolbox* Simulink Matlab. Sebagai *regenerative* mobil listrik, maka pemodelan motor menggunakan *driver* berupa *inverter* dan juga *rectifier* serta *power supply* berupa *battery*. Gambar 3.2 dibawah merepresentasikan skema motor yang disimulasikan.



**Gambar 3. 2** Skema motor

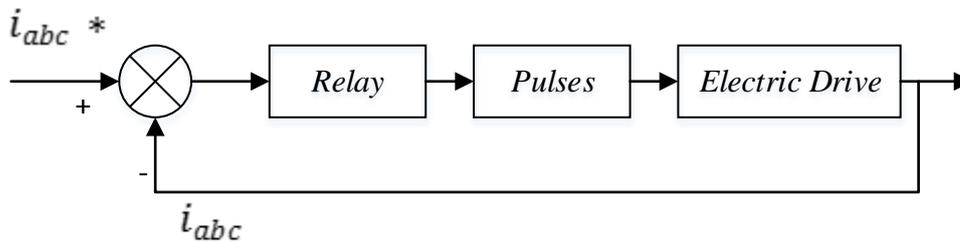
*Battery* sebagai *power supply* untuk menggerakkan motor dengan mengalirkan daya kepada *inverter*. *Inverter* menerima masukan *gate* PWM dari *hysteresis control* dan akan mengalirkan sumber tiga fasa kepada motor yang disebut mode *motoring*. *Inverter* mengeluarkan arus dan masuk ke *current measurement* untuk mengetahui nilai arus tersebut. Arus yang dihasilkan akan masuk ke *input* arus pada motor. Saat terjadi pengereman, motor mengalirkan sumber ke *rectifier* untuk menyimpannya sebagai mode *generator*. *Rectifier* akan jalan ketika *input* torsi mekanik/beban bernilai positif dengan diberi blok *compare to zero* kemudian masuk ke *switch* untuk mengalirkan arus ke *rectifier*. *Output* tegangan *rectifier* akan masuk ke baterai dan nilai *state of charge* dapat dilihat melalui *scope*.

Selain mendapat arus dari *baterai* melalui *inverter*, motor juga mendapat input berupa torsi mekanik yang didapat dari torsi elektromagnetik (dianggap sebagai torsi pengereman). Keluaran torsi elektromagnetik dari motor ini dijadikan sebagai input pada *vehicle plant* dengan mengubahnya menjadi torsi pengereman, yaitu dikalikan rasio *gearbox* bernilai 10 (torsi pengereman adalah 10 kali dari torsi yang dihasilkan motor).

Pada perancangan motor ini diberikan kontrol arus menggunakan *hysteresis control*. Arus stator dari motor di *feedback* sebagai arus terukur dan *hall* untuk *input* pada *decoder* yang digunakan bersama torsi sebagai arus referensi. Arus referensi didapatkan dari keluaran kontrol kecemasan motor berupa torsi yang di ubah menjadi arus sesuai dengan persamaan (3.4) berikut (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007):

$$T_e = K_t \cdot I_a \quad (3.4)$$

Keluaran dari *hysteresis control* ini berupa 6 pulsa sebagai masukan *gate* pada *inverter*. Pengendalian arus motor dari *hysteresis control* ini seperti diagram blok pada Gambar 3.3



**Gambar 3.3** Diagram blok *hysteresis control* (Febrianty, 2020)

Pemodelan *half car model* dan motor dikatakan valid apabila dalam simulasi kendaraan dapat melakukan pengereman dan benar berhenti hingga kecepatan sama dengan nol. Pada sistem pengereman *regenerative* dapat ditunjukkan dengan penurunan *state of charge* (SOC) tidak besar saat terjadi pengereman.

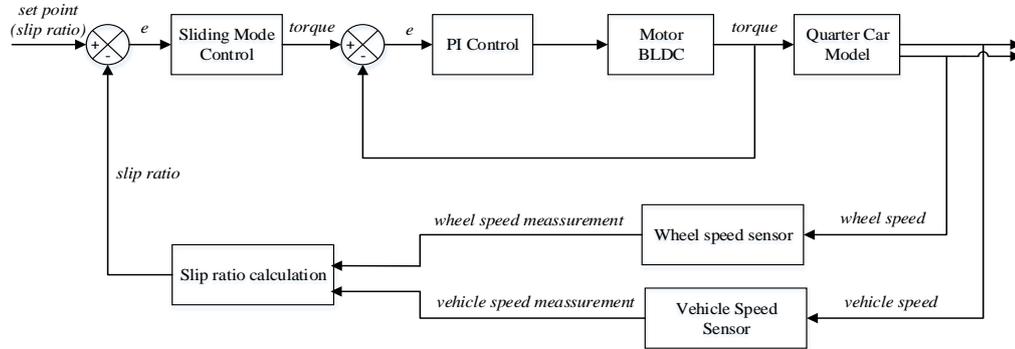
### 3.4 Perancangan Sensor

Sensor kecepatan yang digunakan untuk mengukur kecepatan angular roda dan kendaraan dirancang pada blok sensor  $\omega$  dan sensor  $v$  dengan input berasal dari kecepatan roda dan kecepatan kendaraan keluaran *vehicle plant*. Sensor diasumsikan memiliki respon orde nol yang berarti tidak ada *delay* saat pengukuran. Hasil pengukuran langsung diproses dan didapatkan hasilnya. Asumsi orde nol ini dapat dituliskan dalam persamaan fungsi transfer yaitu pembilang dan penyebutnya bernilai 1 dan dibuat pada Simulink menggunakan blok *transfer function* serta diisi nilainya 1. Keluaran dari *transfer function* ini disambungkan dengan blok *switch* untuk mengatur kesalahan. Pengurangan dari keluaran *transfer function* dan kesalahan dengan blok *subtract* akan menghasilkan kesalahan sensor.

### 3.5 Perancangan Kontroler

Perancangan kontrol pada tugas akhir ini yaitu menggunakan *sliding mode control*, *PI control*, dan *hysteresis control*. Pengendalian yang diperlukan yaitu pada *slip ratio* dengan sinyal kontrol  $e$  menjadi input pada *sliding mode control* untuk menghasilkan torsi referensi (*set point*), torsi keluaran motor yang di kontrol dengan *PI control* agar sesuai dengan torsi referensi, dan arus motor yang diatur

dengan *hysterisis control*. Diagram blok pengendalian sistem dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut :



**Gambar 3.4** Diagram blok pengendalian sistem

### 3.5.1 Perancangan *Sliding Mode Control*

Perancangan *sliding mode control* seperti yang telah dijelaskan pada subbab 2.5 yaitu menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*) agar spesifikasi dari desain *plant* dapat terpenuhi. Kemudian merekonstruksi *gain switched feedback* agar dapat mengendalikan *trajectory state plant* menuju *sliding surface*. Persamaan matematis untuk pemodelan *quarter car* yaitu pada persamaan (2.1), (2.2), dan (3.2) dituliskan kembali :

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$F_x = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.5)$$

$$F_x R - T_b = J \dot{\omega}$$

*Slip ratio* pada persamaan (2.4) diturunkan menjadi :

$$\lambda_i = \frac{v - \omega R}{v} = 1 - \frac{\omega R}{v} \quad (3.6)$$

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{R \dot{\omega}}{v} + \frac{R \omega \cdot \dot{v}}{v^2} \quad (3.7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.5) ke persamaan (3.6) maka didapatkan persamaan baru yaitu :

$$\dot{\lambda}_i = -F_x \frac{R^2}{J} \frac{1}{v} + \frac{R}{J} \frac{1}{v} T_b - \frac{R \omega}{m v^2} F_x \quad (3.8)$$

Nilai *slip ratio* digunakan sebagai *sliding surface*, karena akan dikendalikan agar tetap berada pada kondisi idealnya. Persamaan untuk *sliding surface* adalah sebagai berikut:

$$S(t) = \lambda_{setpoint}(t) - \lambda(t) \quad (3.9)$$

Digunakan pendekatan *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012), yang dituliskan dengan persamaan (3.10) sebagai berikut :

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.10)$$

Dengan  $\varepsilon$  adalah konstanta *robustness* sistem dan  $k$  adalah gain maksimum *output controller*.

Fungsi *signum* ( $\operatorname{sgn}$ ) dapat didefinisikan dengan persamaan (3.11) berikut:

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Persamaan (3.8) dan persamaan (3.9) disubstitusikan ke persamaan (3.10) sehingga didapatkan persamaan baru :

$$\dot{\lambda}_{setpoint} - \left( -F_x \frac{R^2}{J} \frac{1}{v} + \frac{R}{J} \frac{1}{v} T_b - \frac{R\omega}{mv^2} F_x \right) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad (3.12)$$

Sehingga didapatkan persamaan  $T_b$  sebagai berikut:

$$T_{breq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mv} \hat{F}_x + \frac{Jv}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.13a)$$

Selanjutnya persamaan sinyal kontrol berupa torsi pengereman yang dibutuhkan untuk sistem kontrol didefinisikan:

$$T_{breq} = T_{beq} + T_{bhit} \quad (3.13b)$$

Dengan  $T_{beq}$  merupakan estimasi input kontrol ekivalen berdasarkan persamaan (3.13a) dapat diperoleh sebagai :

$$T_{beq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mv} \hat{F}_x \quad (3.14)$$

Nilai gaya gesek  $F_x$  diperoleh dari nilai estimasi sehingga mengandung ketidakpastian yang bergantung dari massa dan koefisien gesek.

Rentang variasi massa dan koefisien gesek didefinisikan sebagai :

$$\begin{aligned} m_{min} &\leq m \leq m_{max} \\ \mu_{min} &\leq \mu \leq \mu_{max} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$T_{bhit}$  adalah *input* kontrol *hitting* untuk memenuhi *sliding condition* karena terjadi ketidakpastian dinamik pada  $T_{beq}$ . Persamaan untuk  $T_{bhit}$  berdasarkan persamaan (3.12) di definisikan sebagai berikut :

$$T_{bhit} = \frac{Jv}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.16)$$

Dengan :

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

$\varepsilon$  merupakan gain *sliding* dan  $k$  merupakan gain *error*.

Perancangan *sliding mode control* ini dibuat pada blok sistem *controller* yang didalamnya terdapat subsistem untuk menghasilkan *slip ratio*. *Set point* berupa *slip ratio* sebesar 0.2 di kurangkan dengan hasil subsistem *slip ratio* akan menghasilkan sinyal kontrol pada *sliding mode control*. Dalam subsistem *sliding mode control* terdapat perhitungan nilai  $T_{beq}$  dan  $T_{bhit}$  sesuai dengan persamaan (3.14) dan persamaan (3.16) yang kemudian akan dijumlahkan sehingga menghasilkan nilai  $T_{breq}$ . Keluaran dari kontroler *sliding mode* ini merupakan sinyal kontrol berupa torsi pengereman ( $T_{breq}$ ) yaitu terdiri dari  $T_{beq}$  yang merupakan estimasi input kontrol ekuivalen dan  $T_{bhit}$  merupakan input kontrol *hitting* untuk memenuhi *sliding condition* terjadi ketidakpastian dinamik pada  $T_{beq}$ . Sinyal kontrol torsi pengereman ini akan menjadi *set point* pada pengendali PI yang di *feedback* dengan torsi pengereman yang dihasilkan oleh motor.

### 3.5.2 Perancangan PI Control

Pada pengendali PI ini digunakan untuk mengatur torsi pengereman pada keluaran motor agar sesuai dengan *set point* yang diberikan oleh sinyal kontrol dari *sliding mode*. Tuning PI dengan metode *trial and error* untuk mendapatkan respon yang baik dengan memberikan *set point* berupa torsi sebesar 1000 Nm . Nilai

parameter tuning PI pada *controller* diperoleh *gain proporsional* sebesar 0.8 dan *gain integral* sebesar 1.

### 3.5.3 Perancangan *Hysteresis Control*

*Current control* pada motor BLDC dilakukan oleh *hysteresis control* dengan mengubah keluaran torsi sebagai *pulses* yang masuk ke inverter pada motor. *Current controller* bekerja berdasarkan prinsip pada *hysteresis control* dengan menggunakan *bandwith* sebesar 0,1 A. Skema current control telah dijelaskan di subbab 3.3 pada pemodelan motor.

### 3.6 Perancangan *Observer*

Pada *anti-lock braking system* terdapat beberapa komponen diantaranya sensor kecepatan kendaraan dan roda. Kedua sensor ini akan menghasilkan kecepatan masing-masing yang digunakan untuk menghitung *slip ratio*. Perhitungan *slip ratio* memerlukan hasil yang akurat dari keluaran sensor. Apabila dalam pembacaan sensornya terdapat kesalahan maka akan menghasilkan *slip ratio* yang berbeda pula. Dengan adanya kesalahan pada pembacaan sensor ini maka diperlukan suatu pengamat untuk mengestimasi nilai kecepatan yang dihasilkan sehingga sesuai dengan nilai sebenarnya. Selain kesalahan pada sensor, komponen lain dari *anti-lock braking system* yaitu aktuator yang juga memungkinkan terjadi kesalahan. *Observer* dirancang untuk mengestimasi kesalahan aktuator dan sensor pada sistem pengereman mobil listrik dengan *anti-lock braking system* ini. Pada penelitian ini variabel yang diukur adalah kecepatan kendaraan, kecepatan roda, dan torsi pengereman. Sedangkan variabel yang diestimasi yaitu nilai pengukuran, kesalahan sensor, kesalahan aktuator, dan  $F_x$  (gaya gesek).

*Observer* dirancang dengan memodelkan persamaan gaya pada pengereman dan persamaan gerak rotasi roda seperti pada persamaan (2.2) dan persamaan (3.2) menjadi *state space* seperti berikut:

*State* kecepatan kendaraan :

$$-F_x = m\dot{v} \quad (3.18a)$$

$$\dot{v} = -\frac{F_x}{m} \quad (3.18b)$$

*State* kecepatan roda :

$$F_x R - T_b = J \dot{\omega} \quad (3.19a)$$

$$\dot{\omega} = \frac{(F_x R - T_b)}{J} \quad (3.19b)$$

Pada pemodelan untuk torsi pengereman diasumsikan respon dengan persamaan orde pertama sebagai berikut :

$$\frac{T_b(s)}{T_{bf}(s)} = \frac{1}{\tau_b s + 1}$$

$$\frac{T_b(s)}{T_{bf}(s)} = \frac{1}{0,01s + 1}$$

$$T_b(s) \cdot 0,01s + T_b(s) = T_{bf}(s)$$

$$T_b(s) \cdot 0,01s = T_{bf}(s) - T_b(s)$$

$$\dot{T}_b(s) = 100 T_{bf}(s) - 100 T_b(s) \quad (3.20)$$

Dari ketiga persamaan (3.18b), (3.19b) dan (3.20) dibuat *state space plant* dengan *state* yang didefinisikan yaitu kecepatan kendaraan ( $v$ ), kecepatan roda ( $\omega$ ), dan torsi pengereman ( $T_b$ ) sebagai berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.21a)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{T}_b \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100 & 0 \\ 0 & -1/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/m & 0 \\ 0 & 100 \\ R/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_{bf} \end{bmatrix} \quad (3.21b)$$

Dengan:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100 & 0 \\ 0 & -1/J & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/m & 0 \\ 0 & 100 \\ R/J & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk *state output* dapat dituliskan :

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.22a)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.22b)$$

Dengan:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Torsi pengereman ( $T_b$ ) dapat diketahui nilainya dari sinyal kontrol sedangkan untuk nilai gaya gesek ( $F_x$ ) tidak bisa diketahui. Oleh karena itu, gaya gesek dianggap sebagai gangguan dan perlu diestimasi untuk bisa mendapatkan nilainya. Kesalahan sensor kecepatan dan aktuator akan diestimasi dengan adanya tambahan *state* gangguan berupa gaya gesek ( $F_x$ ). Adanya kesalahan-kesalahan tersebut mengakibatkan struktur untuk *observer* perlu diperbaiki lagi. Sehingga persamaan untuk *state space* yang telah diberikan gangguan adalah sebagai berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (3.23)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (3.24)$$

Dengan adanya gangguan tersebut, maka kondisi *observability* pada sistem tidak terpenuhi jika akan diestimasi. *State* gangguan  $F_x$  diestimasi karena diperlukan untuk mengestimasi kecepatan kendaraan dan adanya kesalahan sensor pada roda dapat dianggap sebagai gangguan inersia roda ( $J$ ) di mana  $J$  lebih kecil dari massa kendaraan  $m$ , sehingga dampak dari perubahan ini tidak besar.

Untuk mengestimasi  $F_x$  dilakukan dengan membangun struktur kompensator PI pada *observer loop* tertutup. Kompensator ini dapat mengestimasi nilai *state* sistem dengan adanya gain *proportional* ( $P_\omega$ ) dan juga mengestimasi gangguan menggunakan gain *integral* ( $K_{i\omega}$ ). Sehingga struktur *observer* untuk gerak rotasi pada roda dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{J} (-\hat{T}_b + P_\omega (\omega_{meas} - \hat{\omega}) + \hat{F}_x R) \quad (3.25)$$

$$\hat{F}_x = K_{i\omega} (\omega_{meas} - \hat{\omega}) \quad (3.26)$$

Agar kesalahan sensor *vehicle speed* ( $f_{sv}$ ) muncul pada persamaan *state*, maka perlu didefinisikan *state* baru untuk mengestimasi *state* kecepatan kendaraan dengan struktur *augmented state* seperti persamaan (3.27) dimana  $A_z$  merupakan gain  $z$ .

$$\dot{z} = A_z[v_{meas} - z] \quad (3.27)$$

Struktur *observer* untuk kecepatan kendaraan berdasarkan *augmented state* tersebut dapat dibangun dengan memberikan gain *proportional* ( $P_v$ ) pada *state* kecepatan kendaraan dan gain *integral* ( $K_{iv}$ ) pada kesalahan sensor kecepatan kendaraan. Nilai gain didapatkan dari metode lqr dengan *tuning trial and error*. Sehingga struktur *observer* untuk gerak kendaraan adalah sebagai berikut :

$$\dot{\hat{v}} = \frac{1}{m}(-\hat{F}_x + P_v(z - \hat{z})) \quad (3.28)$$

$$\dot{\hat{f}}_{sv} = K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.29)$$

$$\dot{\hat{z}} = A_z(\hat{v} + \hat{f}_{sv} - z) + K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.30)$$

Kemudian pada aktuator terdapat kesalahan yang didefinisikan sebagai gangguan yang muncul pada persamaan *state*. Sehingga untuk mengestimasi kesalahan aktuator ini dapat dilakukan dengan memberikan gain *proportional* ( $P_{Tb}$ ) pada *state* persamaan dinamik dari aktuator sesuai persamaan (3.20) yaitu torsi pengereman dan gain *integral* ( $K_{Tb}$ ) pada kesalahan aktuator. Sehingga struktur *observer* untuk kesalahan aktuator ini menjadi sebagai berikut :

$$\dot{\hat{T}}_b = -100\hat{T}_b + 100(T_{bdem} + P_{Tb}(T_b - \hat{T}_b) + \hat{f}_a) \quad (3.31)$$

$$\dot{\hat{f}}_a = K_{Tb}(T_b - \hat{T}_b) \quad (3.32)$$

Sehingga dari struktur *observer* yang telah dibuat dengan beberapa gangguan tersebut, maka dapat dituliskan kembali persamaan (3.25), persamaan (3.28), persamaan (3.30), dan persamaan (3.31) sebagai berikut :

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{J}(-\hat{T}_b + P_\omega(\omega_{meas} - \hat{\omega}) + \hat{F}_x \cdot r) \quad (3.33)$$

$$\dot{\hat{v}} = \frac{1}{m}(-\hat{F}_x + P_v(z - \hat{z})) \quad (3.34)$$

$$\dot{\hat{z}} = A_z(\hat{v} + \hat{f}_{sv} - z) + K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.35)$$

$$\dot{\hat{T}}_b = -100\hat{T}_b + 100(T_{bdem} + P_{Tb}(T_b - \hat{T}_b)) + \hat{f}_a \quad (3.36)$$

Dari keempat persamaan *state* tersebut, dituliskan dalam bentuk *state space* untuk *observer* seperti pada persamaan (3.37) berikut :

$$\dot{\hat{x}} = A_a \hat{x}_a + B_a u + E_a \hat{F}_a + K_p \cdot e \quad (3.37a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{v}} \\ \dot{\hat{z}} \\ \dot{\hat{T}}_b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_z & -P_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{v} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \end{bmatrix} T_{bdem} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{R}{J} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & P_z & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{F}_x \\ \hat{f}_{sv} \\ \hat{f}_a \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} P_\omega/J & 0 & 0 \\ 0 & P_v/m & 0 \\ 0 & K_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 100P_{Tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\omega \\ e_z \\ e_{Tb} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.37b)$$

Dengan:

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_z & -P_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

$$\hat{X}_a = \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{v} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_b \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \end{bmatrix}$$

$$E_a = \begin{bmatrix} R/J & 0 & 0 \\ -1/m & 0 & 0 \\ 0 & P_z & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F}_a = \begin{bmatrix} \hat{F}_x \\ \hat{f}_{sv} \\ \hat{f}_a \end{bmatrix}$$

$$K_P = \begin{bmatrix} P_\omega/J & 0 & 0 \\ 0 & P_v/m & 0 \\ 0 & K_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 100P_{Tb} \end{bmatrix}$$

Persamaan keluaran nya adalah sebagai berikut :

$$\hat{y} = C_a x_a \quad (3.38a)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{v} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_b \end{bmatrix} \quad (3.38b)$$

Dengan :

$$C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Persamaan *gain* untuk *state* gangguan dapat dituliskan kembali :

$$\begin{aligned} \hat{F}_x &= K_{i\omega}(\omega_{meas} - \hat{\omega}) \\ \hat{f}_{sv} &= K_{iv}(z - \hat{z}) \\ \hat{f}_a &= K_{Tb}(T_b - \hat{T}_b) \end{aligned} \quad (3.39)$$

Sehingga ditulis dalam bentuk *state space* menjadi

$$\hat{F}_a = K_i \cdot e \quad (3.40a)$$

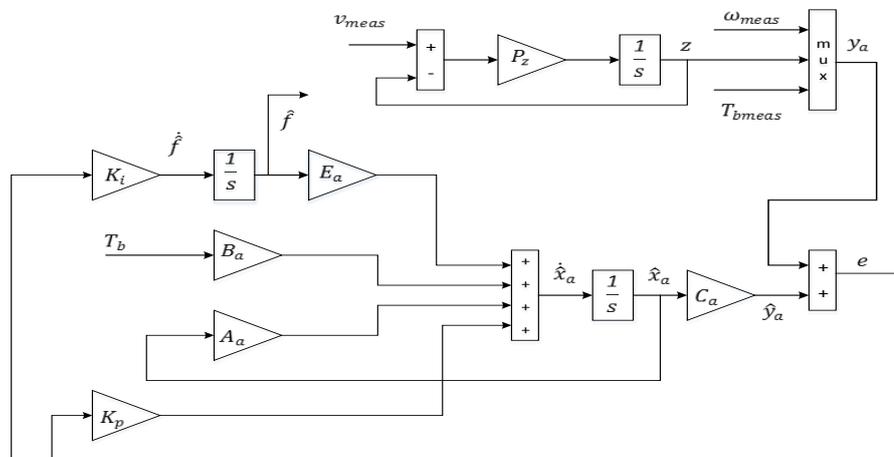
$$\hat{F}_a = \begin{bmatrix} \hat{F}_x \\ \hat{f}_{sv} \\ \hat{f}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i\omega} & 0 & 0 \\ 0 & K_{iv} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\omega \\ e_z \\ e_{Tb} \end{bmatrix} \quad (3.40b)$$

Dengan :

$$K_i = \begin{bmatrix} K_{i\omega} & 0 & 0 \\ 0 & K_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Tb} \end{bmatrix}$$

Berdasarkan model *state space* untuk *observer* yang telah dibuat maka didapatkan struktur observer seperti pada Gambar 3.5.

Struktur observer tersebut dibuat pada *simulink* dengan memberikan input dari  $v_{meas}$ ,  $\omega_{meas}$ ,  $T_b$ , dan  $T_{bmeas}$ . Sedangkan keluaran dari *observer* yaitu *state* sistem terestimasi dan *state* gangguan.

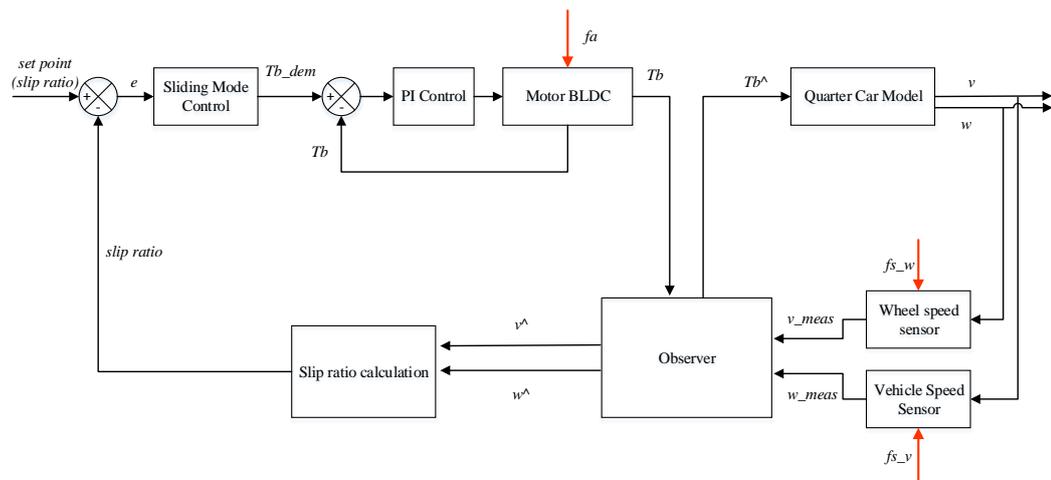


**Gambar 3.5** Struktur *Observer*

### 3.7 Perancangan Sistem *Fault Tolerant Control* dengan Kesalahan Sensor dan Aktuator

Perancangan FTC pada sistem pengereman mobil listrik ini direkonfigurasi dengan memberikan kompensasi pada sistem. Hasil estimasi *state* pengukuran yang didapatkan akan di kompensasi dengan FTC sebagai masukan pada kontroler sehingga sistem dapat berjalan sesuai dengan *set point* yang diinginkan yaitu berupa *slip ratio* bernilai 0.2.

Dari skema FTC pada Gambar 3.6 dapat diketahui bahwa sinyal pembacaan sensor yang diberi kesalahan akan masuk ke *observer* dan didapatkan sinyal pembacaan sensor ter estimasi. Kesalahan aktuator masuk kedalam motor sebagai kesalahan *switch* pada *gate inverter* yang dikompensasi dengan torsi estimasi hasil *observer*. Hasil dari estimasi torsi digunakan sebagai *input* torsi pada *vehicle plant* sehingga torsi yang masuk sudah ter kompensasi.



**Gambar 3.6** Skema *fault tolerant control quarter car model*

### 3.8 Pengujian Sistem *Fault Tolerant Control*

Pengujian sistem dilakukan pada *plant* pengereman *quarter car model* yang di simulasikan sesuai dengan beberapa parameter *plant*. Kesalahan yang diberikan berupa kesalahan bias pada sensor, kesalahan sensitifitas sensor, dan kesalahan *open switch* pada *gate inverter* motor. Kesalahan bias sensor diberikan pada sensor kecepatan kendaraan dan kecepatan roda. Kesalahan sensitifitas diberikan pada sensor kecepatan kendaraan. Sedangkan kesalahan aktuator diberikan pada *switch* pertama dan kedua pada input *gate inverter*.

Kompensasi yang diberikan pada sistem sebagai FTC ini dapat diterima untuk mengakomodasi kesalahan aktuator dan sensor namun bergantung pada karakteristik kesalahannya. Pada kesalahan bias yang diberikan cocok jika menggunakan metode kompensasi ini.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

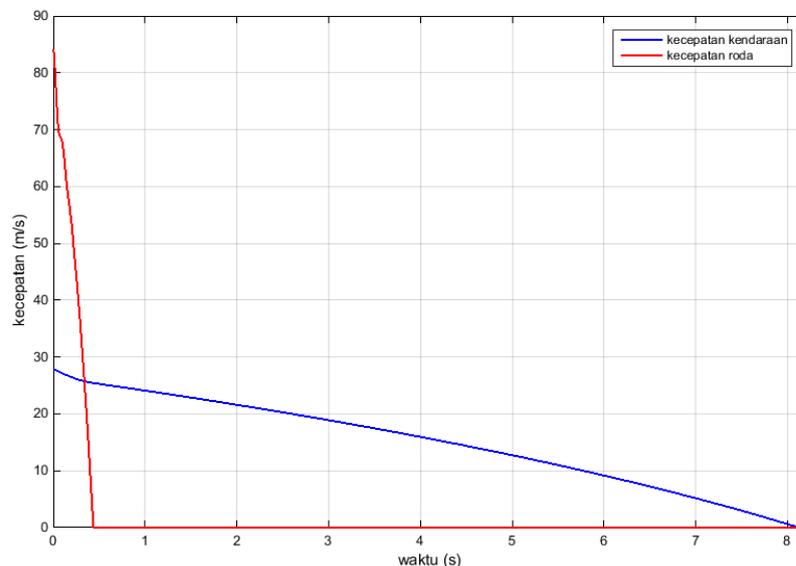
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini disajikan hasil analisis perancangan dan pengujian estimasi untuk sistem *fault tolerant control* pada pengereman *quarter car model*. Dari hasil analisis ini dapat diketahui performa sistem dengan karakteristiknya. Pengujian sistem dilakukan menggunakan *software* simulink pada MATLAB R2014b.

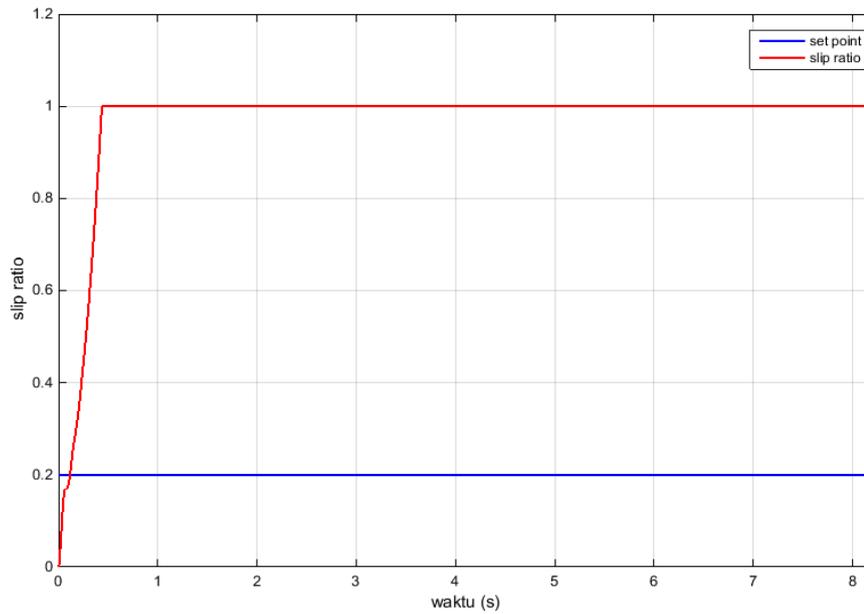
#### 4.1 Pengujian Pemodelan *Regenerative Braking*

Pada pemodelan *quarter car* yang telah dilakukan perlu dipastikan apakah model tersebut sudah merepresentasikan sistem dengan baik. Hasil simulasi dari pemodelan tersebut dapat dilihat dari respon kecepatan kendaraan dan *slip ratio* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Untuk mengetahui hasil pemodelan *regenerative braking* sistem yang diberikan pada motor dapat dilihat pada Gambar 4.3.

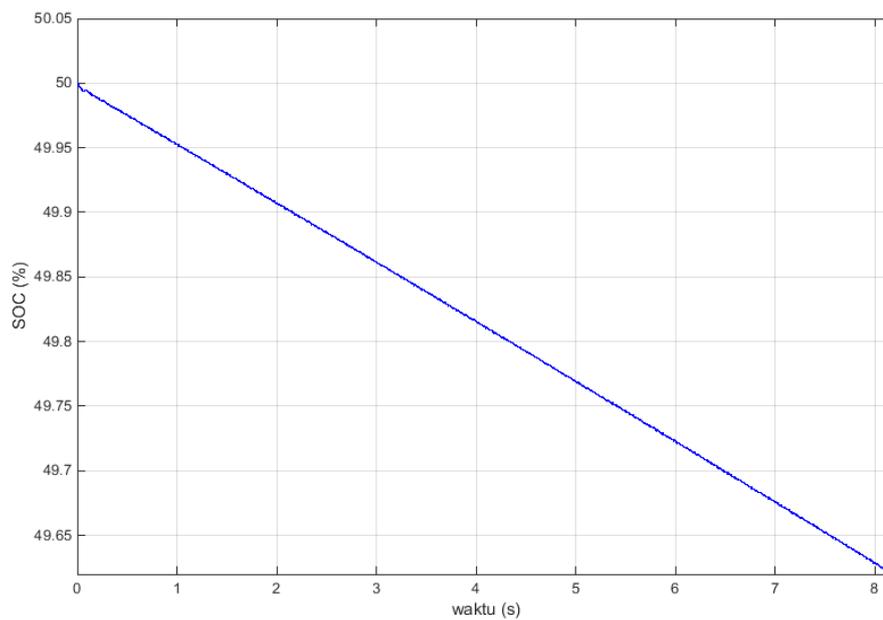


**Gambar 4. 1** Kecepatan kendaraan dan kecepatan roda saat *open loop*

Pada Gambar 4.1 menunjukkan respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda. Kecepatan roda dapat berhenti pada detik ke-0.46, sedangkan kecepatan kendaraan berhenti pada detik ke-8.216. Hal tersebut dapat menunjukkan bahwa telah terjadi slip antara kecepatan kendaraan dan kecepatan roda saat pengereman.



**Gambar 4.2** Respon *slip ratio* dengan *set point* saat *open loop*



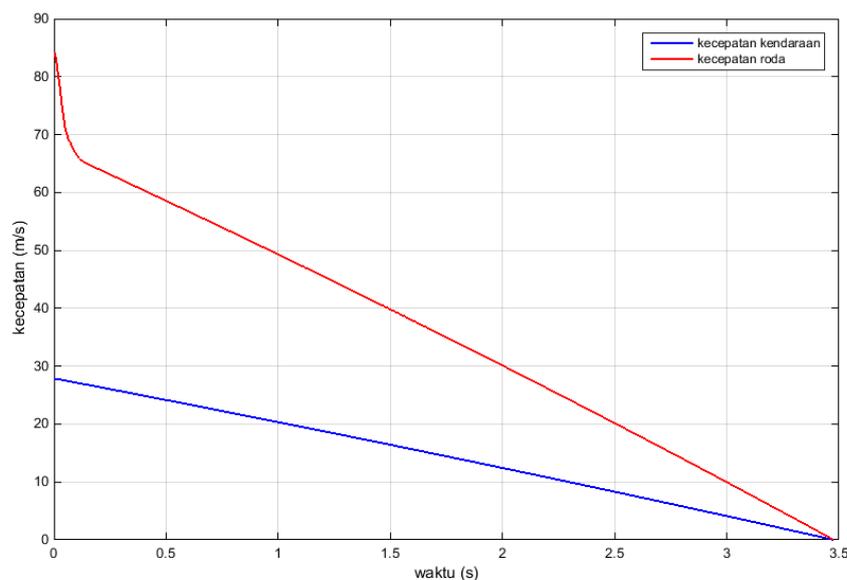
**Gambar 4.3** SOC pada baterai

Gambar 4.2 merupakan respon *slip ratio* dengan *set point* yang menunjukkan bahwa *slip ratio* telah mengalami kenaikan hingga bernilai 1 saat detik ke-0.46. Sehingga pada sistem *open loop* ini perlu diberikan *feedback* untuk menjadi sistem *closed loop* agar menghasilkan respon sesuai dengan *set point*. Sistem *closed loop* ini yang digunakan sebagai *anti-lock braking system* pada pengereman mobil listrik.

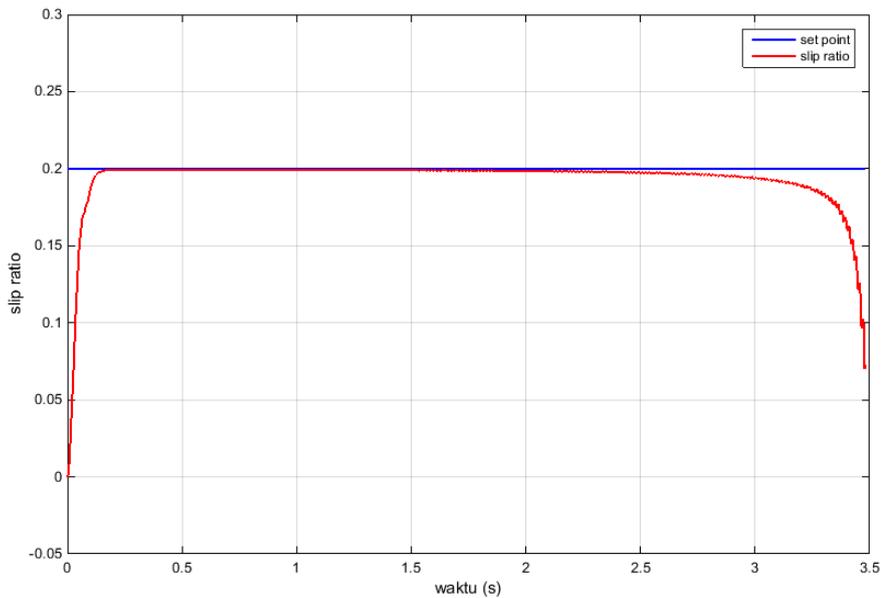
Gambar 4.3 untuk mengetahui hasil pemodelan *regenerative braking* sistem yang diberikan pada motor. Saat terjadi pengereman mendadak motor akan menghasilkan listrik yang kemudian akan masuk sebagai pengisi pada baterai. Hasil uji tersebut dapat diketahui dari nilai *state of charge* pada baterai yang digunakan pada motor seperti pada Gambar 4.3. Sebelum terjadi pengereman nilai *state of charge* baterai sebesar 50% dan pada saat terjadi pengereman nilai *state of charge* menjadi 49.63%. Hal tersebut membuktikan bahwa pengereman regeneratif pada *anti-lock braking system* dapat menghasilkan listrik dari motor dengan menjadi generator.

#### 4.2 Pengujian *Closed Loop System*

Kontroler digunakan untuk mengatur sistem agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Pada perancangan kontroler ini menggunakan *sliding mode control* untuk menghasilkan sinyal kontrol berupa torsi, dan kontrol PI untuk mengatur torsi motor yang dihasilkan agar sesuai dengan torsi keluaran *sliding mode*. Kontrol *sliding mode* mendapat sinyal kontrol dari nilai eror yang dihasilkan *set point* berupa *slip ratio* yang dikendalikan sebesar 0.2 dengan *slip ratio* hasil perhitungan kecepatan kendaraan dan roda. Selain itu juga terdapat kontrol arus pada motor berupa *hysteresis control*. Hasil dari sistem *closed loop* ini ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5



**Gambar 4.4** Kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan sistem *closed loop*



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

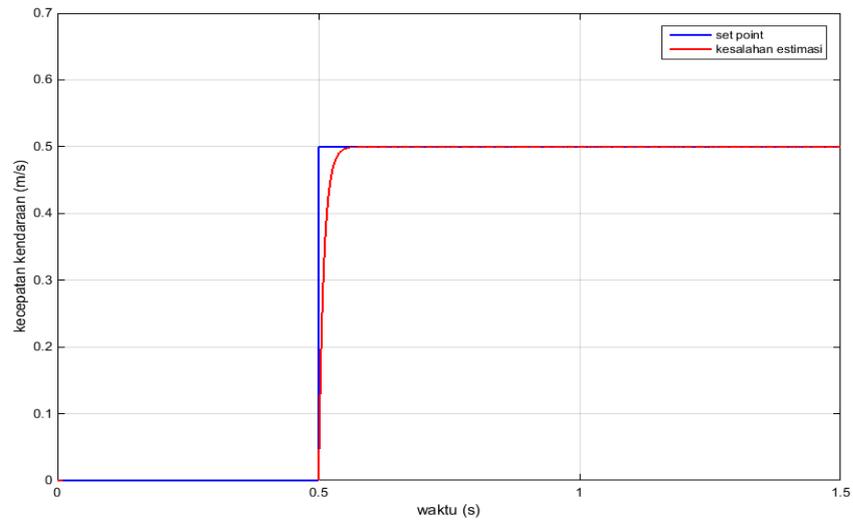
Dari hasil grafik pada Gambar 4.4 tersebut, sistem dengan *closed loop* menghasilkan respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dapat berhenti pada waktu yang sama yaitu pada detik ke-3.48. Ketika diberikan FTC waktu berhenti dari kendaraan dan roda menjadi lebih pendek yaitu terjadi pada detik ke-3.471.

Sedangkan untuk respon *slip ratio* sistem *closed loop* ini sudah mencapai nilai yang sesuai dengan *set point* yaitu sebesar 0.2 yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.

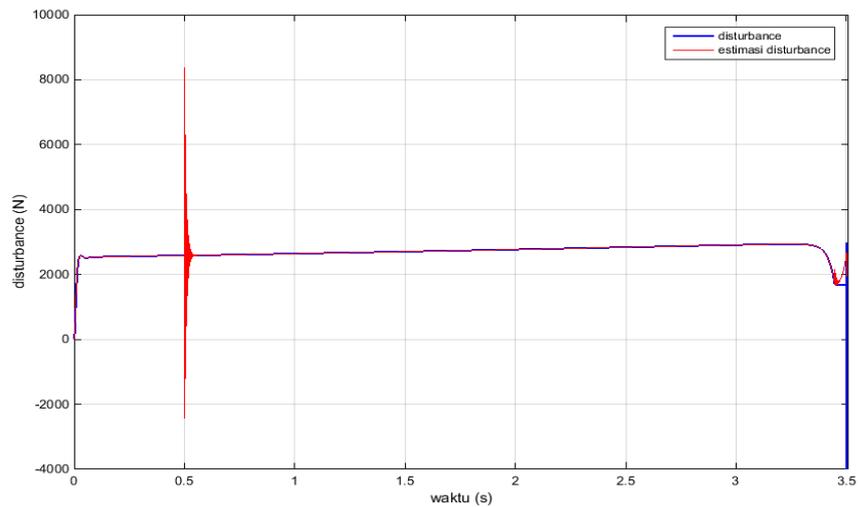
Respon kecepatan kendaraan dan *slip ratio* untuk kecepatan awal kendaraan yang berbeda dapat dilihat pada Lampiran J.

### 4.3 Hasil Uji Estimasi *Observer*

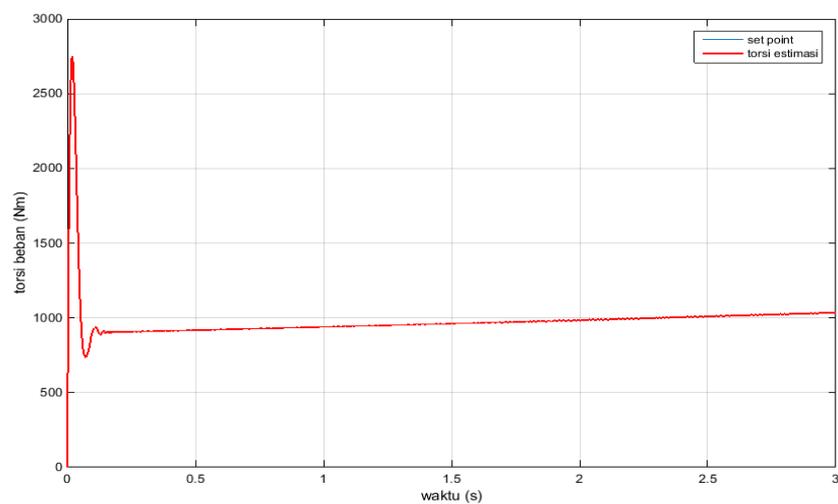
Pengujian *observer* dilakukan untuk mengetahui apakah *observer* yang dibuat dapat mengestimasi nilai *state* pengukuran dan *state* kesalahan yang diberikan pada sistem. Hasil uji *observer* yang pertama didapatkan dari respon estimasi kesalahan sensor kecepatan kendaraan dengan pemberian kesalahan sebesar 50% pada detik ke-0.5 s ditunjukkan pada Gambar 4.6. Kemudian hasil uji kesalahan sensor kecepatan roda diberikan kesalahan sebesar 20% pada detik ke-0.5 s ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Hasil uji *observer* selanjutnya yaitu diberikan kesalahan aktuator berupa *open switch* pada *switch 1 gate inverter* di detik ke-0.5 s dengan hasil respon pada Gambar 4.8 sebagai berikut :



**Gambar 4.6** Respon kesalahan sensor kendaraan pada uji *observer*



**Gambar 4.7** Respon estimasi *disturbance* pada uji *observer*



**Gambar 4.8** Respon estimasi torsi beban pada uji *observer*

Dari Gambar 4.6 menunjukkan bahwa saat pemberian kesalahan sensor kecepatan kendaraan sebesar 50%, respon *observer* dapat mengikuti respon kesalahan yang diberikan dengan *settling time* 0.08 s.

Kesalahan bias sensor kecepatan roda sebesar 20% pada Gambar 4.7 memberikan dampak pada hasil estimasi gaya gesek ( $F_x$ ) sebagai *disturbance* sistem. Nilai *true value* gaya gesek didapatkan dari *vehicle plant* dan dibandingkan dengan hasil estimasi. Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa dengan adanya kesalahan sensor kecepatan roda pada detik ke-0.5 mengakibatkan kesalahan gaya gesek dengan kenaikan nilai yang tinggi di detik tersebut. Namun dengan adanya *observer* mampu mengatasi kesalahan tersebut sehingga respon  $F_x$  dapat mengikuti *set point* kembali.

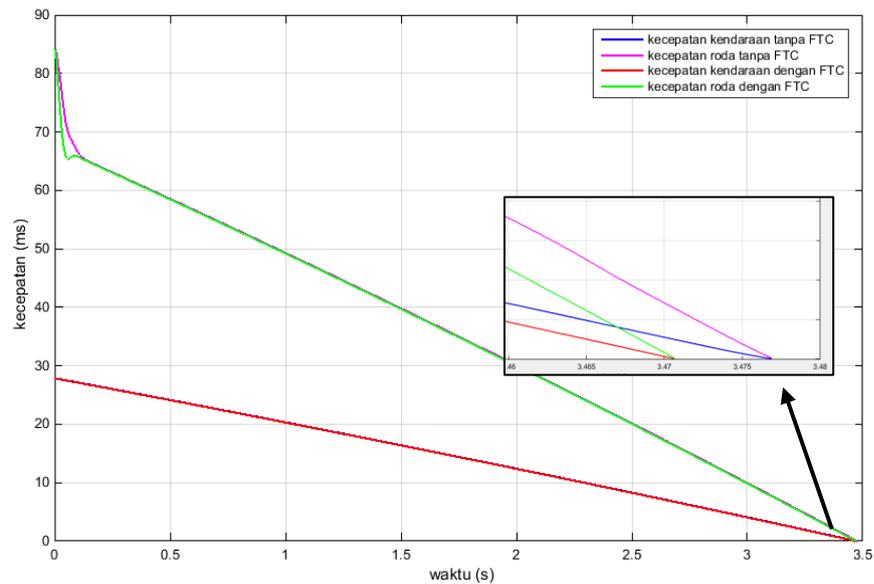
Pada Gambar 4.8 menunjukkan respon torsi hasil estimasi dengan torsi *true value* nya. Adanya kesalahan aktuator pada *swith gate inverter* berpengaruh pada torsi yang dihasilkan. Dengan adanya *observer*, torsi beban yang dihasilkan dapat diestimasi sehingga ketika terjadi kesalahan nilainya masih dapat mengikuti *true value*.

#### **4.4 Pengujian Kesalahan Bias Sensor**

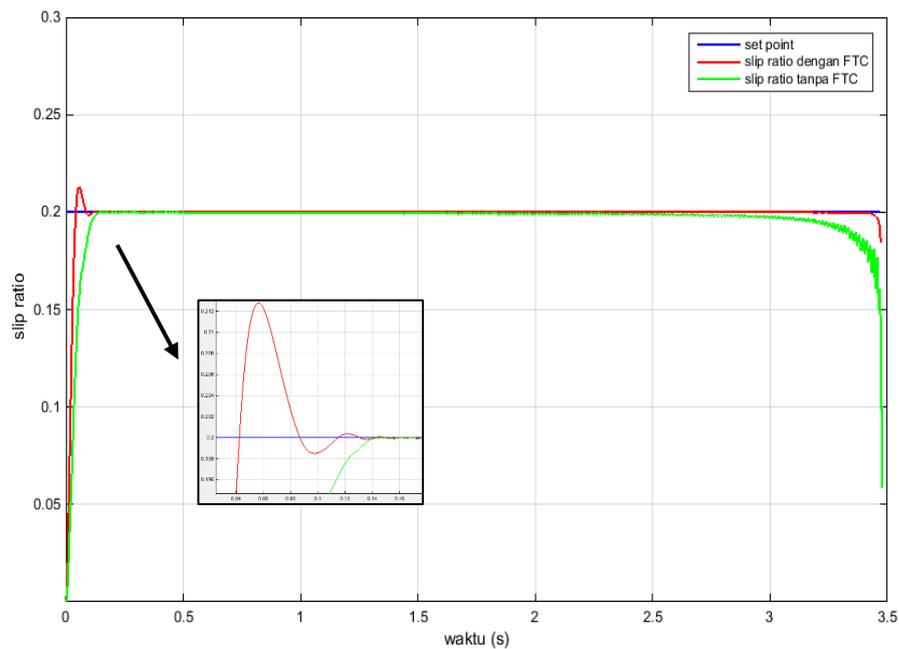
Pada sistem *anti-lock braking system* ini terdapat dua sensor yaitu sensor kecepatan kendaraan dan sensor kecepatan roda. Pengujian kesalahan sensor yang diberikan yaitu kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan sebesar 1%, 30%, 50%, dan 100% pada detik ke-0.5 s. Sedangkan untuk kesalahan sensor kecepatan roda diberikan kesalahan bias sebesar 10% pada detik ke-0.5 s.

##### **4.4.1 Kesalahan Bias Sensor Kecepatan Kendaraan**

Kesalahan pertama yang diberikan yaitu kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan sebesar 1% pada detik ke-0.5 s. Respon kecepatan kendaraan dan *slip ratio* yang dihasilkan dengan adanya kesalahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 sebagai berikut :

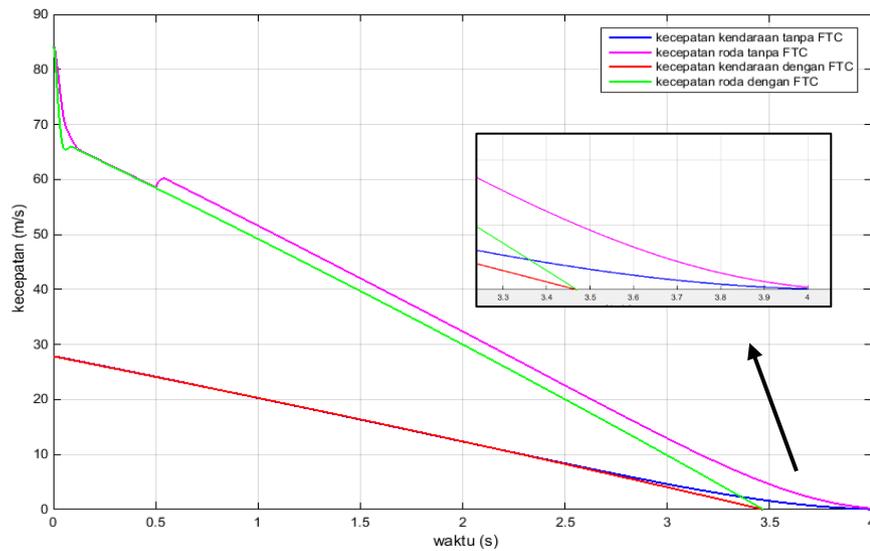


**Gambar 4.9** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 1 %

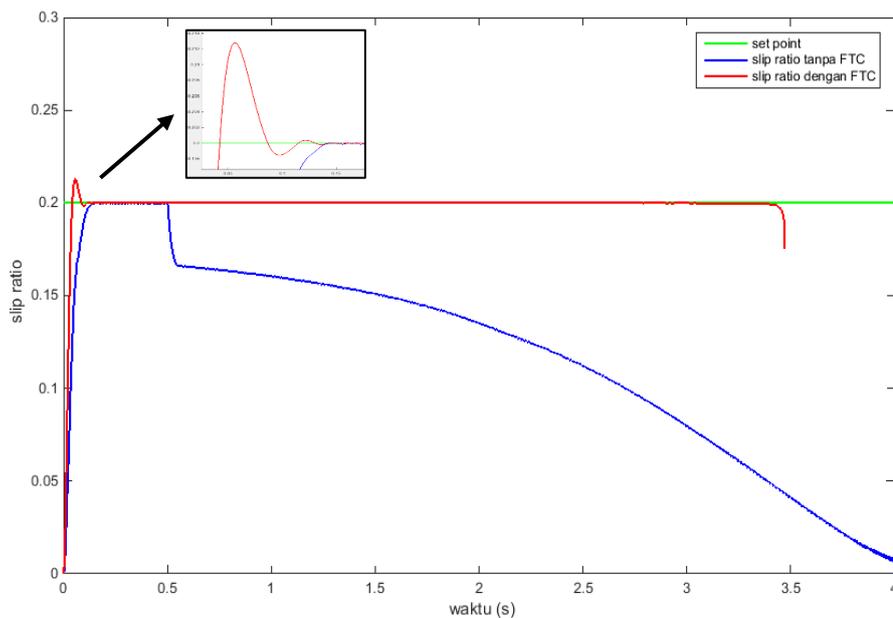


**Gambar 4.10** Slip ratio dengan kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 1%

Hasil respon untuk kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 30% dan 50% disajikan pada Lampiran K. Sedangkan untuk kesalahan 100% ditampilkan pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 sebagai berikut :



**Gambar 4. 11** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100%



**Gambar 4. 12** Slip ratio dengan kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 100%

Dari hasil respon kecepatan dan slip ratio pada Gambar 4.9 sampai Gambar 4.12 tersebut menunjukkan bahwa untuk kecepatan kendaraan dan kecepatan roda yang telah diberi kesalahan bias sebesar 1% dan tanpa adanya FTC (*fault-tolerant control*) akan berhenti pada detik ke-3.477 seperti pada Gambar 4.9 yang berwarna biru dan ungu. Sedangkan dengan penggunaan FTC, kecepatan kendaraan dan kecepatan roda yang telah diberi kesalahan bias 1% dapat berhenti di detik ke-3.471 seperti pada grafik berwarna merah dan hijau. Slip ratio dengan kesalahan sebesar

1% dapat dilihat pada Gambar 4.10 yang menunjukkan grafik warna hijau adalah *slip ratio* tanpa FTC sedangkan grafik warna merah menggunakan FTC. Respon untuk *slip ratio* tersebut memiliki *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14 s.

Kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 100% yang diberikan pada sistem menghasilkan respon kecepatan kendaraan pada Gambar 4.11. Grafik berwarna biru dan ungu merupakan respon kecepatan ketika diberi kesalahan tanpa menggunakan FTC yang memiliki waktu berhenti pada detik ke-4. Sedangkan untuk sistem yang telah diberi FTC akan menghasilkan waktu berhenti pada detik ke-3.471 seperti pada grafik berwarna merah dan hijau. *Slip ratio* yang dihasilkan dengan kesalahan ini dapat dilihat pada Gambar 4.12. Respon *slip ratio* tanpa FTC yaitu pada grafik berwarna biru yang tidak mengikuti *set point* ketika diberi kesalahan di detik ke-0.5. Ketika diberi FTC, respon *slip ratio* yang ditunjukkan pada warna merah telah mengikuti *set point* dengan *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14s.

Parameter performansi respon dengan beberapa kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan tanpa *fault tolerant control* dan dengan *fault tolerant control* dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini :

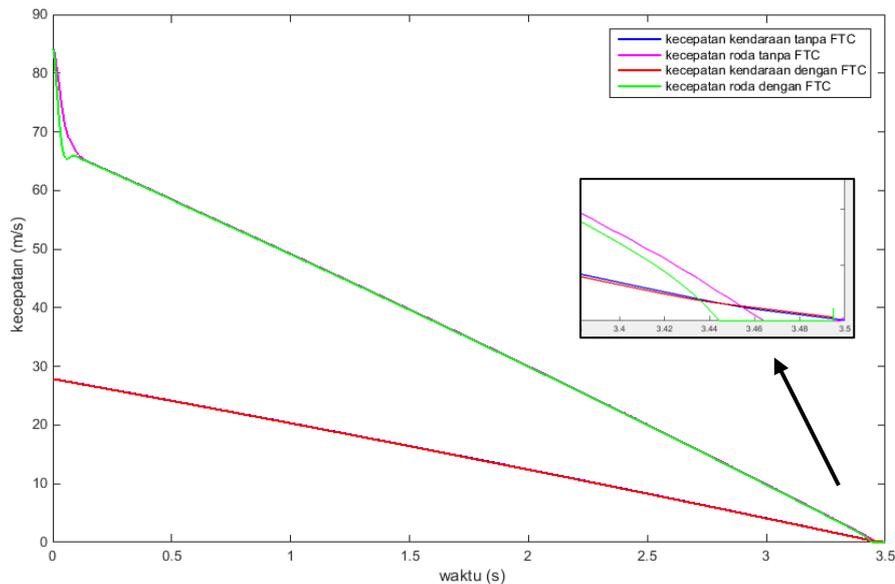
**Tabel 4. 1** Parameter Performansi Respon dengan Kesalahan Bias Pada Sensor Kecepatan Kendaraan

Kesalahan Bias Sensor Kecepatan Kendaraan	Waktu Berhenti	
	Tanpa FTC	FTC
1 %	3.477 s	3.471 s
30 %	3.532 s	3.471 s
50 %	3.609 s	3.471 s
100 %	4 s	3.471 s

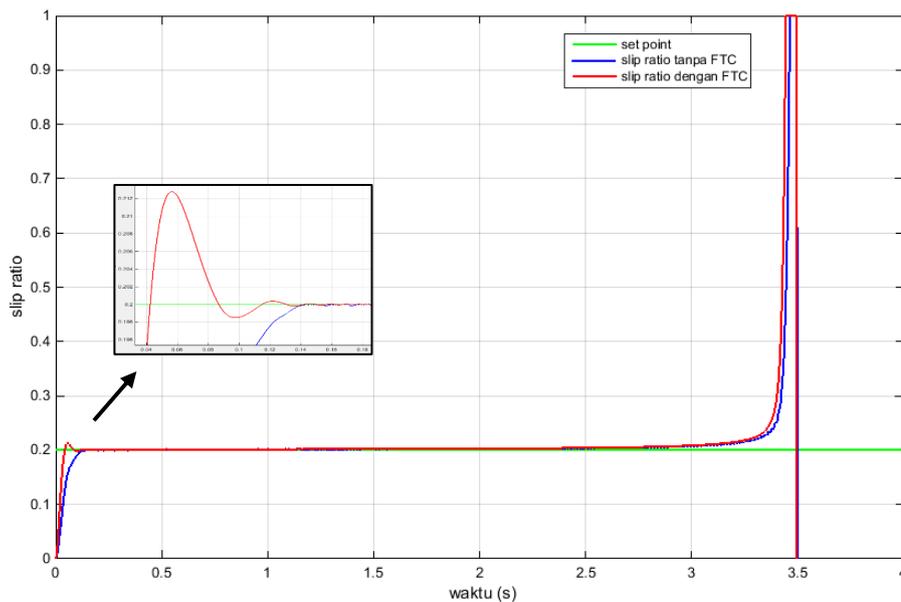
Dari performansi respon yang telah ditampilkan pada Tabel 4.1, untuk kesalahan bias pada sensor kecepatan kendaraan, FTC dapat mengatasi kesalahan yang diberikan dari 1% hingga 100 % dan dapat mempertahankan performansi sistem agar tetap stabil dengan waktu berhenti yang lebih cepat dari waktu berhenti dengan adanya kesalahan tanpa FTC.

#### 4.4.2 Kesalahan Bias Sensor Kecepatan Roda

Selain pengujian kesalahan bias pada sensor kecepatan kendaraan, pengujian kesalahan bias sensor juga dilakukan pada sensor kecepatan roda. Kesalahan bias sensor yang diberikan pada kecepatan roda yaitu sebesar 10% pada detik ke-0.5. Hasil respon kecepatan dan *slip ratio* yang dihasilkan dengan adanya kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan ini ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 berikut :



**Gambar 4. 13** Kecepatan dengan kesaahan bias sensor kecepatan roda 10%



**Gambar 4. 14** Slip ratio dengan kesalahan bias sensor kecepatan roda 10%

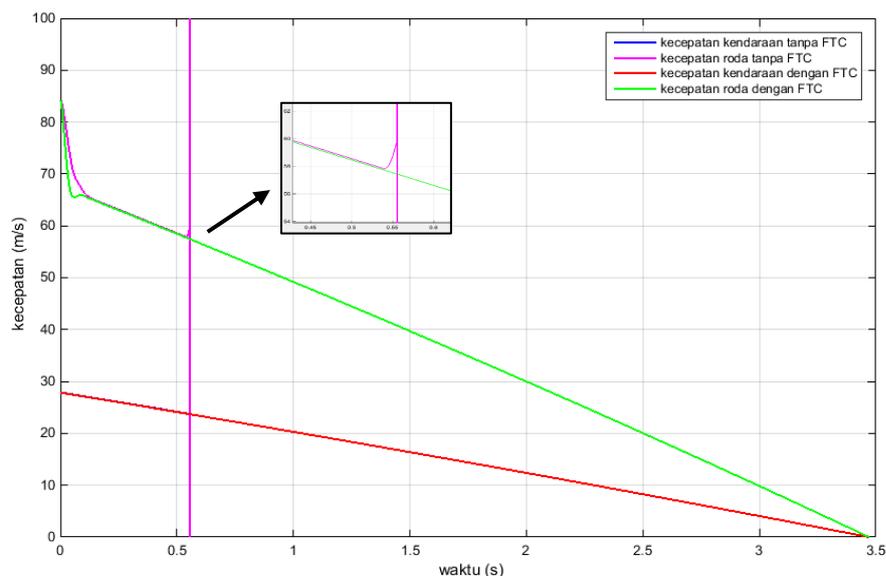
Pada Gambar 4.13 menunjukkan kecepatan kendaraan dan roda ketika diberikan kesalahan bias sensor kecepatan roda sebesar 10% dengan grafik berwarna biru dan ungu merupakan respon kecepatan tanpa menggunakan FTC yang berhenti pada detik ke-3.44. Sedangkan dengan adanya FTC, respon kecepatan dapat berhenti lebih cepat yaitu pada detik ke-3.42. *Slip ratio* yang dihasilkan dengan kesalahan pada sensor kecepatan roda ini seperti pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa respon menggunakan FTC mampu menghasilkan *slip ratio* sesuai *set point*. Performansi untuk *slip ratio* hasil FTC ini yaitu memiliki *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14s yang ditunjukkan pada grafik berwarna merah.

#### 4.5 Pengujian Kesalahan Aktuator pada *Switch Motor*

Pengujian selanjutnya yaitu dengan adanya kesalahan aktuator *plant* yang diberikan pada *switch* masukan *gate inverter* motor. *Inverter* pada motor memiliki 6 *gate* masukan yang dihasilkan dari *hysteresis control*. Kesalahan diberikan pada satu *switch* yaitu *switch 1* dan 2 berupa *open switch* pada detik ke-0.5 dan juga untuk kedua *switch* secara bersamaan.

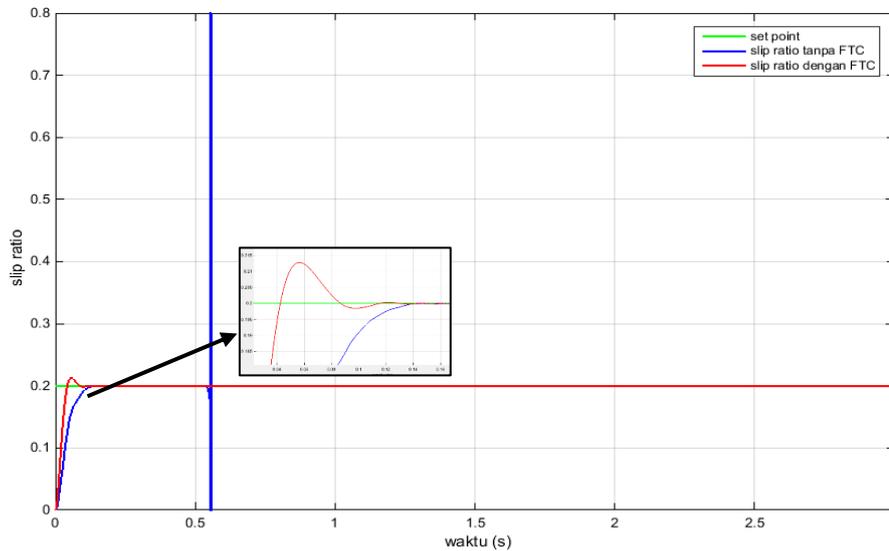
##### 4.5.1 Kesalahan pada *Switch 1*

Kesalahan *open switch* pada *gate inverter* yang pertama diberikan pada *switch 1*. Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan *open switch* ini ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut :



**Gambar 4. 15** Kecepatan dengan kesalahan *switch 1*

Sedangkan untuk respon *slip ratio* yang dihasilkan dengan adanya kesalahan ini ditunjukkan pada Gambar 4.16 sebagai berikut :

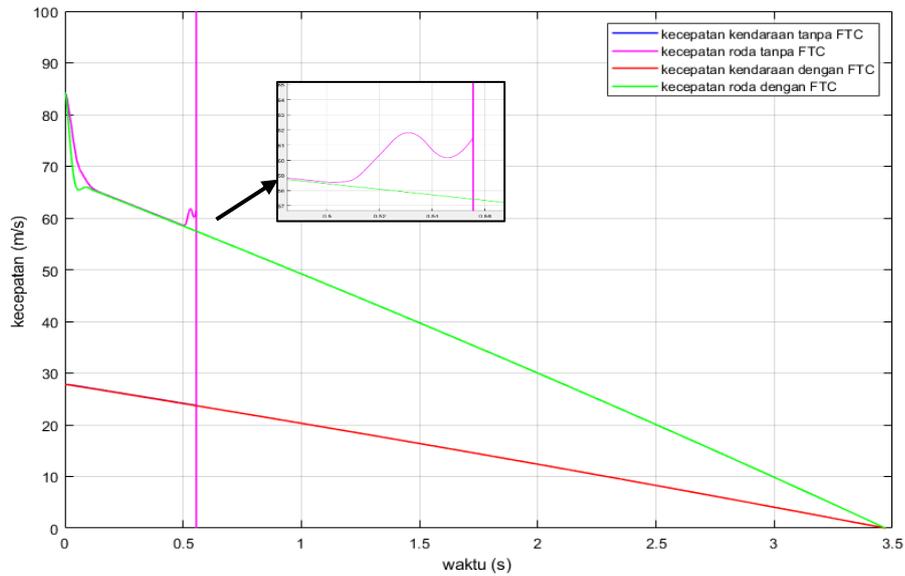


**Gambar 4. 16** *Slip ratio* dengan kesalahan *switch 1*

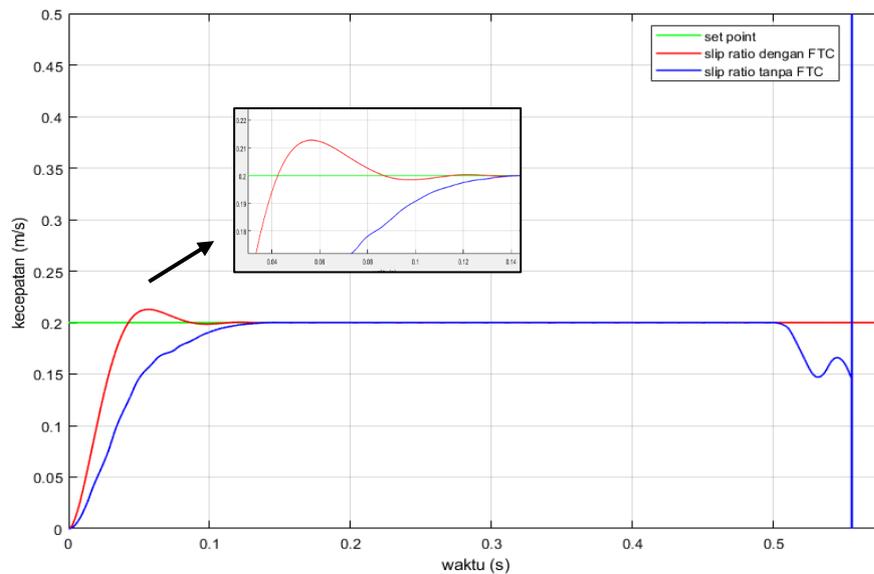
Dari respon kecepatan dengan kesalahan aktuator berupa *open switch* pada *switch 1* seperti pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa pada detik ke-0.56 kecepatan kendaraan dan roda menjadi naik hingga tak terhingga yang menjadikan sistem tidak stabil yaitu pada grafik berwarna ungu dan biru. Hal tersebut juga bisa dilihat pada grafik respon *slip ratio* yang naik pada detik ke-0.556 yang berwarna biru. Sedangkan untuk sistem yang telah diberikan FTC dengan kesalahan yang diberikan tersebut, mampu membuat kecepatan kendaraan dan roda bersama-sama berhenti pada detik ke-3.471 seperti pada Gambar 4.15 grafik berwarna merah dan hijau. *Slip ratio* yang telah diberikan FTC dapat kembali sesuai *set point* ditunjukkan oleh grafik warna merah dengan performansi respon yaitu *settling time* 0.14s pada Gambar 4.16.

#### 4.5.2 Kesalahan pada *Switch 1* dan *2*

Kesalahan *open switch* selanjutnya yaitu diberikan pada kedua *switch gate inverter*. Pada *gate switch 1* dan *2* diberikan kesalahan pada detik ke-0.5. Hasil respon kecepatan dan *slip ratio* untuk kesalahan yang diberikan tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18. sebagai berikut :



**Gambar 4. 18** Kecepatan dengan kesalahan *switch* 1 dan 2



**Gambar 4. 17** Slip ratio dengan kesalahan *switch* 1 dan 2

Pada Gambar 4.16 grafik warna biru dan ungu merupakan kecepatan kendaraan dan roda tanpa adanya FTC yang naik pada detik ke-0.555, sedangkan untuk grafik warna merah dan hijau merupakan grafik kecepatan dengan FTC. Kecepatan kendaraan dan roda dapat berhenti bersama pada detik ke-3.471 dengan FTC. Respon *slip ratio* pada kesalahan *switch* 1 dan 2 ditampilkan pada Gambar 4.18 dengan grafik warna hijau adalah *slip ratio* tanpa FTC sedangkan grafik warna merah dengan FTC. *Slip ratio* kendaraan tanpa adanya FTC akan naik pada detik

ke-0.555 s. FTC yang diberikan dapat menghasilkan *slip ratio* sesuai *set point* dengan performansi respon *overshoot* 0.14s dan *settling time* 6.4%.

Kesalahan *open switch* pada *switch 2 gate inverter* dapat dilihat dilampiran. Performansi respon dengan kesalahan aktuator berupa *open switch* tanpa *fault tolerant control* dan menggunakan *fault tolerant control* dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini :

**Tabel 4. 2** Performansi Respon Dengan Kesalahan *Open Switch* Pada Detik ke-0.5

<b>Kesalahan <i>open switch</i></b>	<b>Tanpa FTC (Waktu terjadi <i>slip</i>)</b>	<b>FTC (Waktu berhenti)</b>
<i>Switch 1</i>	0.555 s	3.471 s
<i>Switch 2</i>	0.602 s	3.471 s
<i>Switch 1 dan 2</i>	0.555 s	3.471 s

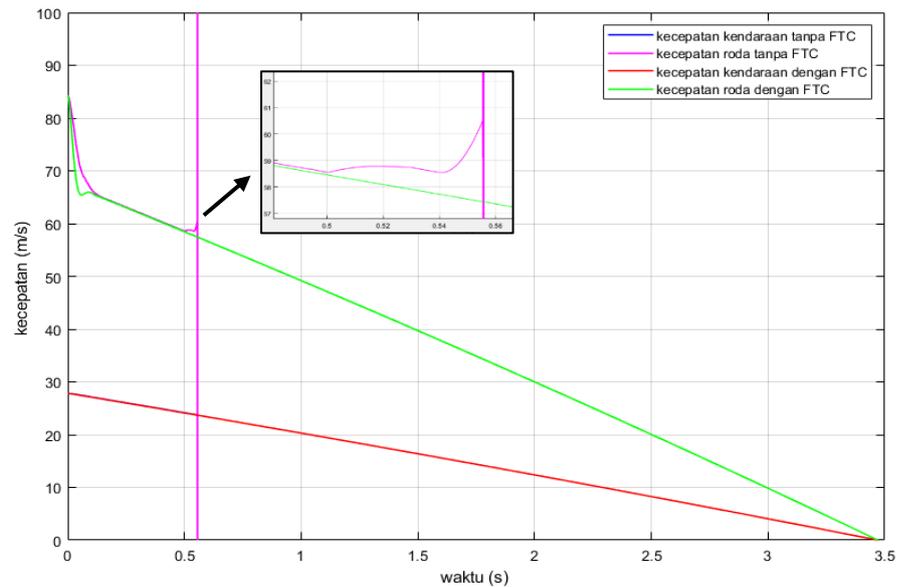
Berdasarkan parameter performansi untuk kesalahan *open switch* pada *gate inverter* motor, kendaraan tanpa dilengkapi FTC akan mengalami *slip* pada waktu setelah terjadinya kesalahan. Sedangkan untuk kendaraan yang telah dilengkapi FTC dapat memberikan respon yang lebih baik dengan waktu berhenti pada detik ke-3.471 s.

#### **4.6 Pengujian Kesalahan Bias Sensor Kendaraan dan Aktuator**

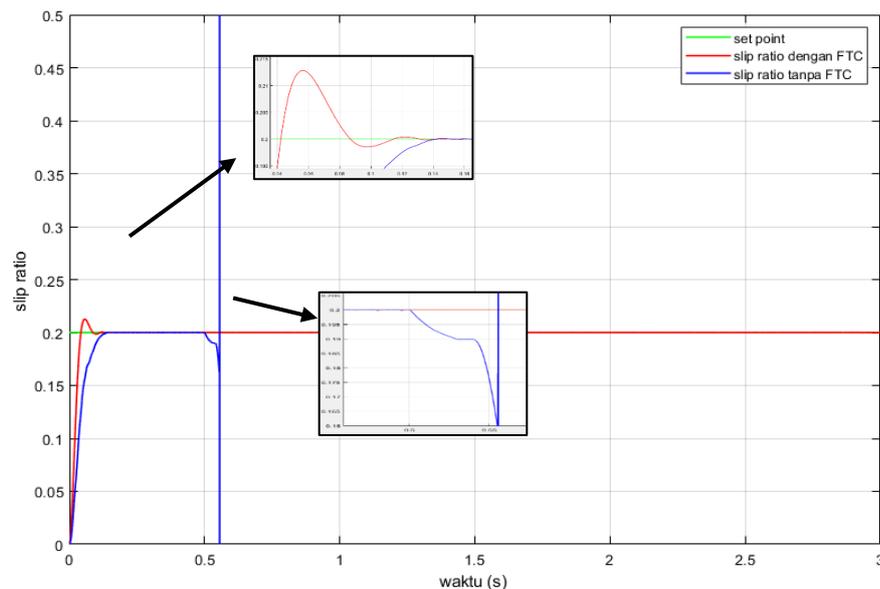
Uji kesalahan berikutnya yaitu sistem diberikan kesalahan bias pada sensor dan kesalahan aktuator *open switch*. Kesalahan yang pertama dilakukan dalam waktu yang sama pada detik ke-0.5. Kemudian uji kesalahan yang kedua yaitu diberikan dalam waktu berbeda. Adanya kesalahan dalam waktu yang berbeda ini yaitu kesalahan bias sensor pada detik ke-0.5 dan kesalahan *open switch* pada detik ke-0.3 serta sebaliknya.

##### **4.6.1 Kesalahan Bias Sensor dan kesalahan *Switch 1* pada detik ke 0.5**

Kesalahan bias sensor diberikan sebesar 30% pada detik ke-0.5 s serta kesalahan *open switch* pada *switch 1 gate inverter* pada detik ke-0.5 s. Hasil respon kecepatan dan *slip ratio* dengan kesalahan yang diberikan tersebut ditampilkan pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 sebagai berikut :



**Gambar 4. 20** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan *open switch* 1 pada detik ke-0.5



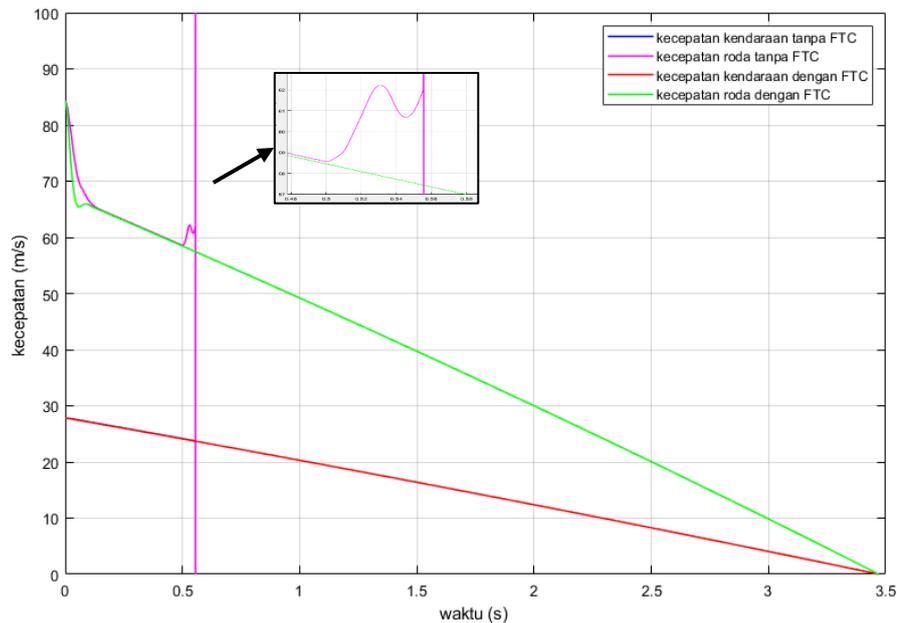
**Gambar 4. 19** Slip ratio dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan *open switch* 1 pada detik ke-0.5

Dari hasil respon kecepatan dengan kesalahan bias sensor dan kesalahan *open switch* menunjukkan pada detik ke-0.555 s kecepatan mengalami kenaikan yang membuat terjadinya *slip*. Kecepatan mulai naik pada detik ke-0.5 s saat diberi kesalahan yang ditunjukkan oleh grafik kecepatan kendaraan dan roda berwarna biru dan ungu. Sedangkan untuk kendaraan yang telah diberi FTC akan

menghasilkan respon lebih baik walaupun terdapat kesalahan. Respon kecepatan dengan FTC ini ditunjukkan dengan grafik berwarna merah serta hijau pada Gambar 4.19 yaitu kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dapat berhenti bersama pada detik ke 3.471 s. Untuk *slip ratio* kendaraan saat diberi kesalahan akan mengalami kenaikan pula yang menunjukkan terjadinya slip seperti pada Gambar 4.20 dengan respon berwarna biru. Sedangkan *slip ratio* yang telah dilengkapi FTC telah mampu mengikuti *set point* yang diberikan yaitu sebesar 0.2 seperti pada grafik berwarna merah. Performansi respon FTC dengan kesalahan yang diberikan yaitu memiliki *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14s.

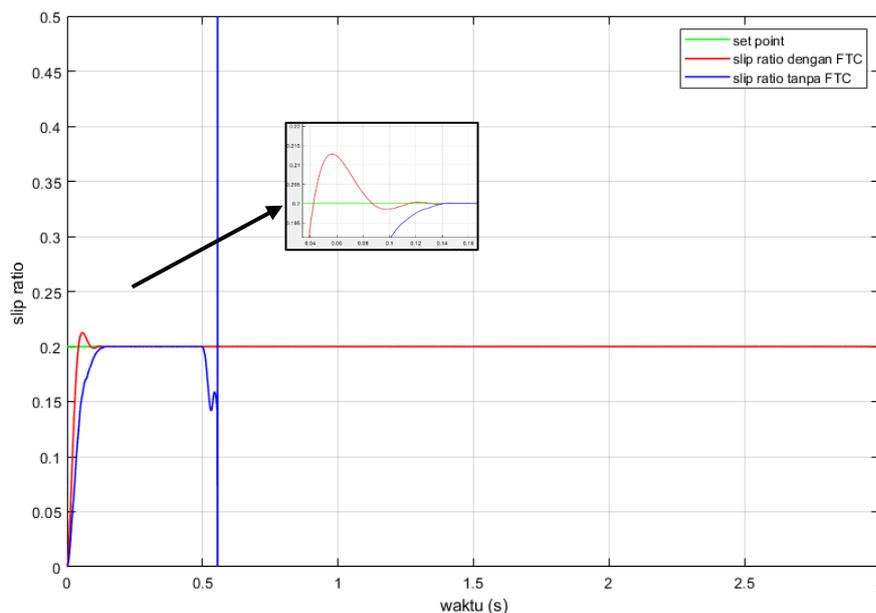
#### 4.6.2 Kesalahan Bias Sensor dan Kesalahan Switch 1 dan 2 pada detik ke 0.5

Pengujian kesalahan selanjutnya diberikan pada sensor berupa kesalahan bias kecepatan kendaraan 30% pada detik ke-0.5 s dan kesalahan *open switch* pada *gate switch* 1 dan 2 pada detik ke-0.5 s. Hasil respon kecepatan untuk kesalahan yang diberikan ini ditampilkan pada Gambar 4.21 sebagai berikut :



**Gambar 4. 21** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan *open switch* 1 dan 2 pada detik ke-0.5

Sedangkan untuk hasil respon *slip ratio* dengan kesalahan yang diberikan ditampilkan pada Gambar 4.22 sebagai berikut :

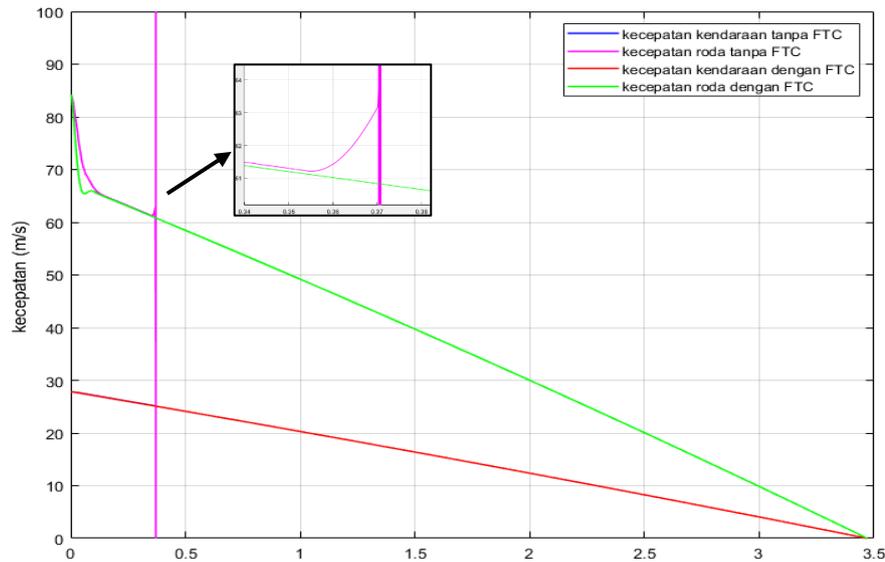


**Gambar 4. 22** Slip ratio dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan *open switch* 1 dan 2 pada detik ke-0.5

Respon kecepatan pada Gambar 4.21 dengan kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan *open switch* pada *gate switch* 1 dan 2 *inverter* menunjukkan kecepatan mulai mengalami kenaikan pada detik ke-0.5 saat pemberian kesalahan dan pada detik ke-0.555 kecepatan kendaraan dan kecepatan roda mengalami *slip* yang ditunjukkan dengan grafik respon berwarna biru dan ungu. Sedangkan kendaraan dengan adanya FTC memberikan respon kecepatan yang berhenti pada detik ke-3.471 dalam waktu yang sama, ditunjukkan dengan grafik warna merah dan hijau. Respon *slip ratio* pada Gambar 4.22 dengan grafik berwarna biru yaitu *slip ratio* tanpa ada FTC yang mengalami kenaikan pada detik ke-0.555. *Slip ratio* dengan menggunakan FTC menghasilkan respon yang sesuai dengan *set point* ditunjukkan oleh grafik berwarna merah dan *set point* berwarna hijau. Performansi respon dengan FTC memiliki *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14 s.

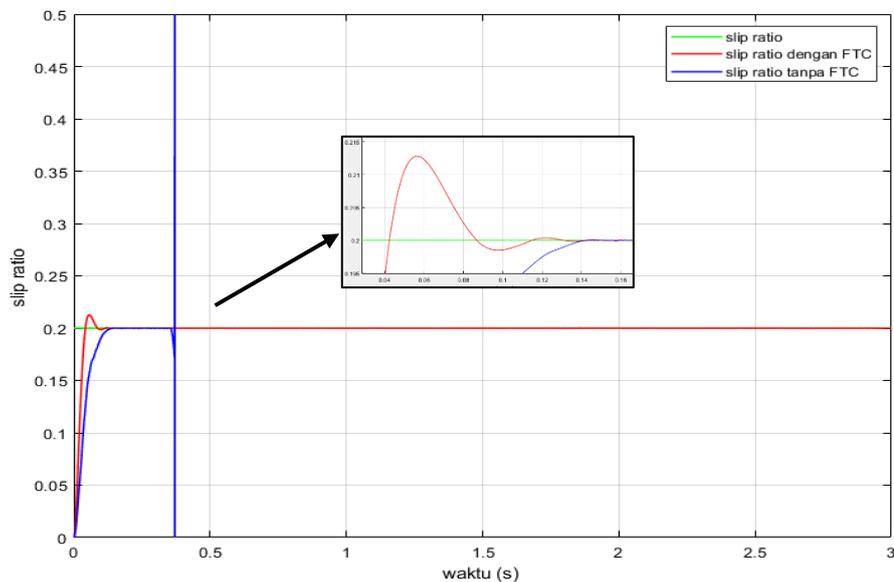
#### 4.6.3 Kesalahan Bias Sensor Detik ke 0.5 dan Kesalahan *Switch* detik ke 0.3

Kesalahan sensor dan aktuator diberikan dalam waktu yang berbeda dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 30% pada detik ke-0.5 s dan kesalahan aktuator berupa *open switch* pada *gate switch* 1 di detik ke-0.3 s. Respon kecepatan yang dihasilkan dengan kesalahan yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 4.23 sebagai berikut :



**Gambar 4. 24** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.5 dan kesalahan *open switch* 1 detik ke 0.3

Respon *slip ratio* yang dihasilkan dengan kesalahan yang diberikan ditampilkan pada Gambar 4.24 berikut ini :



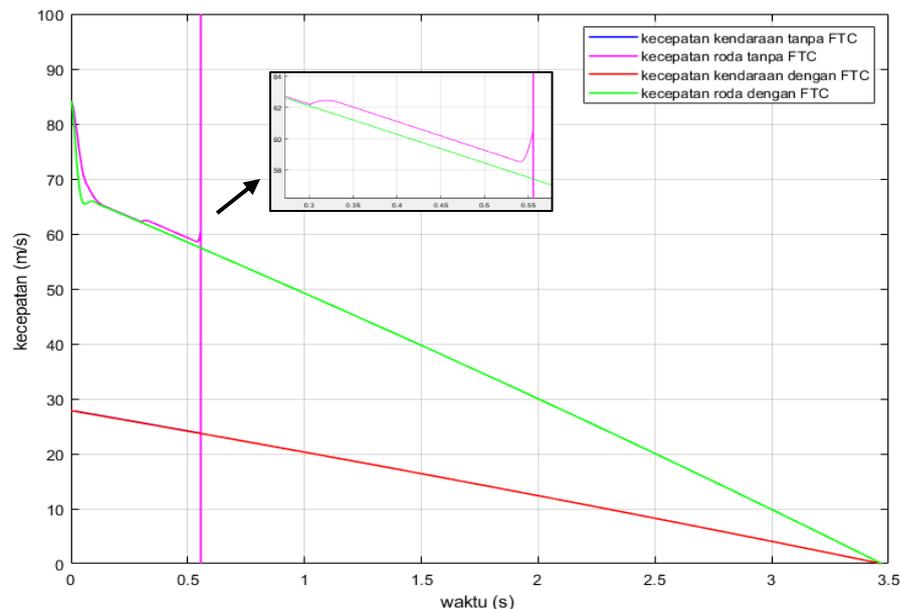
**Gambar 4. 23** *Slip Ratio* dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.5 dan kesalahan *open switch* 1 detik ke 0.3

Berdasarkan Gambar 4.24 kecepatan kendaraan dan kecepatan roda yang diberikan kesalahan akan mengalami kenaikan pada detik ke-0.355 dan terjadi slip pada detik ke-0.37 yang ditunjukkan oleh grafik berwarna biru dan ungu. Sedangkan untuk kendaraan yang menggunakan FTC tidak terjadi slip pada detik

tersebut dan berhenti bersama pada detik ke-3.471 ditunjukkan oleh grafik berwarna merah dan hijau. *Slip ratio* akibat adanya kesalahan yang diberikan mengalami kenaikan pada detik ke-0.37 sehingga terjadi *slip*. Respon *slip ratio* dengan FTC mampu mengikuti *set point* yang telah diatur yaitu 0.2 seperti pada Gambar 4.24 dengan grafik berwarna biru merupakan *slip ratio* tanpa FTC sedangkan grafik berwarna merah menggunakan FTC mengikuti *set point* dengan performansi *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14 s.

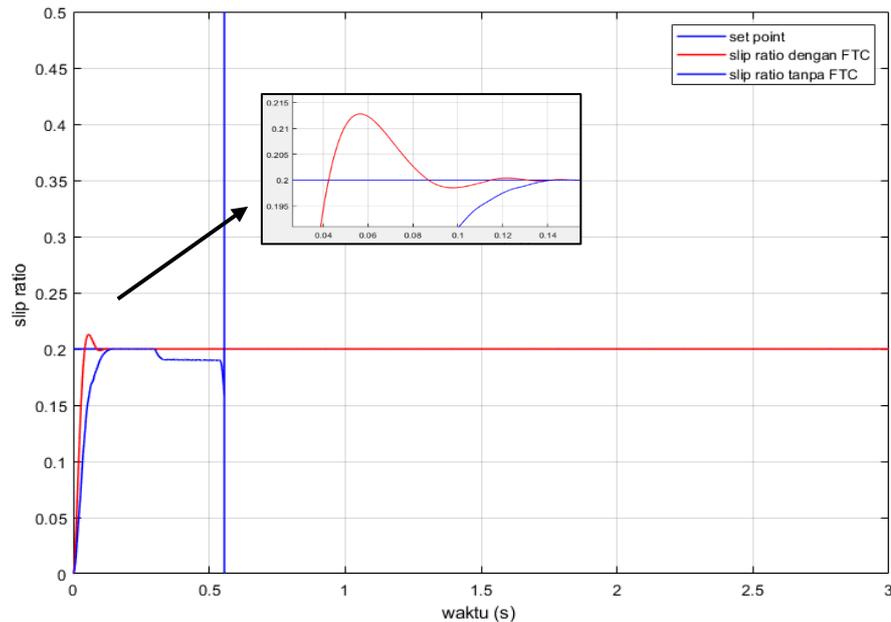
#### 4.6.4 Kesalahan Bias Sensor Detik ke 0.3 dan Kesalahan *Switch* detik ke 0.5

Kesalahan bias sensor diberikan pada detik ke-0.3 sebesar 30% kemudian kesalahan aktuator berupa *open switch* pada *gate switch* 1 diberikan pada detik ke-0.5 menghasilkan respon kecepatan kendaraan dan roda seperti pada Gambar 4.25 sebagai berikut :



**Gambar 4. 25** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.3 dan kesalahan *open switch* 1 detik ke 0.5

Respon untuk *slip ratio* dengan adanya kesalahan bias sensor kendaraan pada detik ke-0.3 dan kesalahan *open switch* 1 pada detik ke-0.5 ditunjukkan oleh Gambar 4.26 berikut ini :



**Gambar 4. 26** *Slip Ratio* dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.3 dan kesalahan *open switch* 1 detik ke 0.5

Berdasarkan Gambar 4.25 hasil respon kecepatan dengan kesalahan bias sensor terjadi pada detik ke-0.3 dan kesalahan aktuator pada detik ke-0.5 s kecepatan roda mengalami kenaikan di detik ke-0.3 hingga pada detik ke-0.555 telah terjadi *slip* yang ditunjukkan oleh grafik berwarna biru dan ungu. Sedangkan grafik respon dengan FTC kecepatan kendaraan dan kecepatan roda berhenti bersama pada detik ke-3.471 yang ditunjukkan oleh grafik berwarna merah dan hijau. Respon *slip ratio* dengan kesalahan yang diberikan tanpa FTC seperti pada Gambar 4.26 grafik berwarna biru mengalami penurunan di detik ke-0.3 dan naik pada detik ke-0.555. *Slip ratio* yang telah diberi FTC akan mengikuti *set point* ditunjukkan oleh grafik berwarna merah dan *set point* berwarna hijau.

Kesalahan bias sensor kendaraan dan kesalahan *open fault* yang diberikan dalam waktu bersamaan yaitu detik ke-0.5 dengan nilai kesalahan bias sensor kendaraan 50% dan kesalahan *switch* 1 serta kesalahan *switch* 1&2 ditampilkan pada Lampiran I. Performansi respon untuk beberapa kesalahan sensor dan aktuator yang diberikan pada sistem dalam waktu yang sama dan berbeda disajikan dalam Tabel 4.3 sebagai berikut :

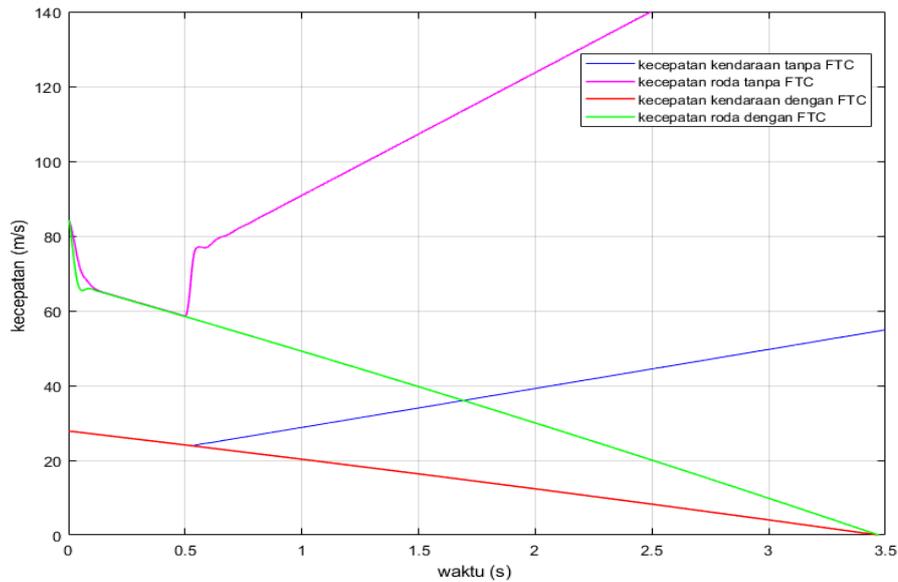
**Tabel 4. 3** Performansi Respon Dengan Kesalahan Bias Sensor dan *Kesalahan Open Switch*

<b>Kesalahan</b>	<b>Tanpa FTC (waktu terjadi <i>slip</i>)</b>	<b>FTC (waktu berhenti)</b>
Sensor 30% dan <i>Switch</i> 1 detik ke-0.5	0.555 s	3.471 s
Sensor 50% dan <i>Switch</i> 1 detik ke-0.5	0.555 s	3.471 s
Sensor 30% dan <i>Switch</i> 1,2 detik ke-0.5	0.555 s	3.471 s
Sensor 50% dan <i>Switch</i> 1,2 detik ke-0.5	0.555 s	3.471 s
Sensor 30% detik ke 0.5 dan <i>Switch</i> 1 detik ke-0.3	0.37 s	3.471 s
Sensor 30% detik ke 0.3 dan <i>Switch</i> 1 detik ke-0.5	0.555 s	3.471 s

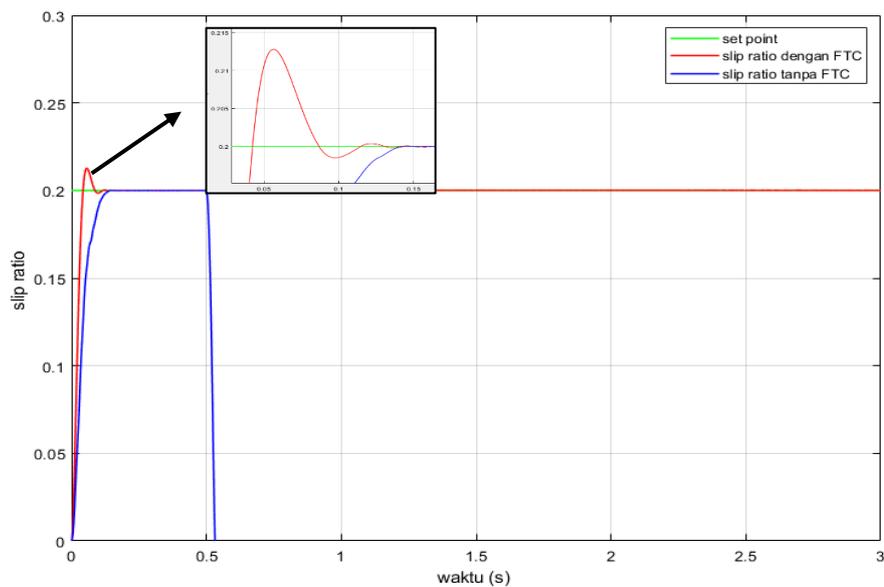
Dari hasil performansi respon pada Tabel 4.3 dengan kesalahan bias sensor kendaraan dan kesalahan aktuator berupa *open switch* dapat dilihat bahwa tanpa adanya FTC kendaraan akan mengalami *slip* pada waktu setelah terjadinya kesalahan *open switch*. Kesalahan *open switch* yang terjadi di detik ke-0.5 akan menghasilkan respon kecepatan naik dan terjadi *slip* di detik ke-0.555. Sedangkan untuk kesalahan *open switch* yang terjadi pada detik ke 0.3 membuat respon naik dan *slip* di detik ke-0.37. *Overshoot* dan *settling time* dengan beberapa kesalahan menghasilkan nilai yang sama. Dengan FTC kendaraan mampu mengatasi *slip* yang terjadi dan kecepatan kendaraan serta roda berhenti di detik yang sama yaitu 3.471 dengan *overshoot* 6.4% serta *settling time* 0.14s.

#### **4.7 Pengujian Kesalahan Sensitifitas pada Sensor Kendaraan**

Uji sensitifitas dilakukan pada sensor kendaraan yang diberikan dengan beberapa kesalahan yaitu sebesar 1%, 30%, 50%, dan 100% pada detik ke 0.5. Hasil respon kecepatan dan *slip ratio* dengan kesalahan sensitifitas kecepatan kendaraan sebesar 30% dapat dilihat pada Gambar 4. 27 dan Gambar 4.28 sebagai berikut :



**Gambar 4. 27** Kecepatan dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 30% pada detik ke-0.5



**Gambar 4. 28** Slip ratio dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 30% pada detik ke-0.5

Dari Gambar 4.27 dapat diketahui pada detik ke-0.5 kecepatan roda mengalami kenaikan dan tidak dapat dikendalikan yang ditunjukkan oleh grafik berwarna ungu. Sedangkan kecepatan kendaraan mulai naik pada detik ke-0.53 hingga tidak dapat dikendalikan yaitu grafik berwarna biru. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan sensitifitas sensor kecepatan kendaraan dengan nilai kesalahan

30% tidak membuat kendaraan berhenti tetapi semakin bergerak. Respon kecepatan menggunakan FTC dapat berhenti bersama di detik ke-3.471 yaitu grafik warna merah dan hijau.

Respon *slip ratio* untuk kesalahan sensitifitas sensor kecepatan kendaraan ini ditampilkan pada Gambar 4.28. Dari grafik respon *slip ratio* pada Gambar 4.28 dapat diketahui bahwa *slip ratio* turun pada detik ke-0.53 dan membuat sistem tidak stabil yang ditunjukkan oleh grafik berwarna biru. Dengan adanya FTC, respon *slip ratio* dapat kembali sesuai dengan *set point* yaitu 0.2 seperti pada grafik berwarna merah dan untuk *set point* berwarna hijau. Performansi respon dengan FTC yaitu memiliki *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14 s.

Kesalahan sensitifitas sensor kecepatan kendaraan sebesar 1%, 50%, dan 100% ditampilkan pada Lampiran I. Performansi respon dengan kesalahan sensitifitas pada sensor kecepatan kendaraan disajikan dalam Tabel 4.4 berikut ini:

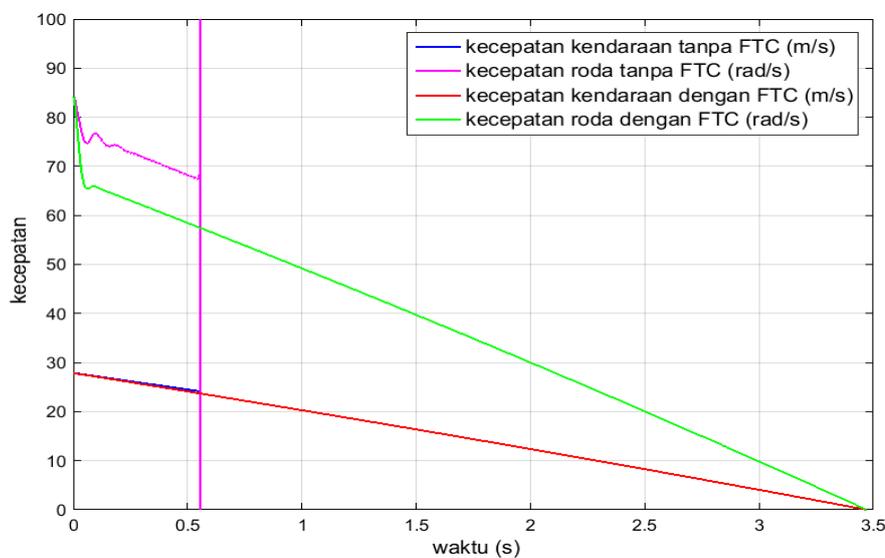
**Tabel 4. 4** Performansi Respon Dengan Kesalahan Sensitifitas Pada Sensor Kecepatan Kendaraan

Kesalahan sensitifitas	Tanpa FTC		FTC (waktu berhenti)
	Waktu slip v dan w	Waktu berhenti	
1 %	-	3.485 s	3.471 s
30 %	0.5 s dan 0.5 s	-	3.471 s
50 %	0.5 s dan 0.53 s	-	3.471 s
100 %	0.5 s	-	3.471 s

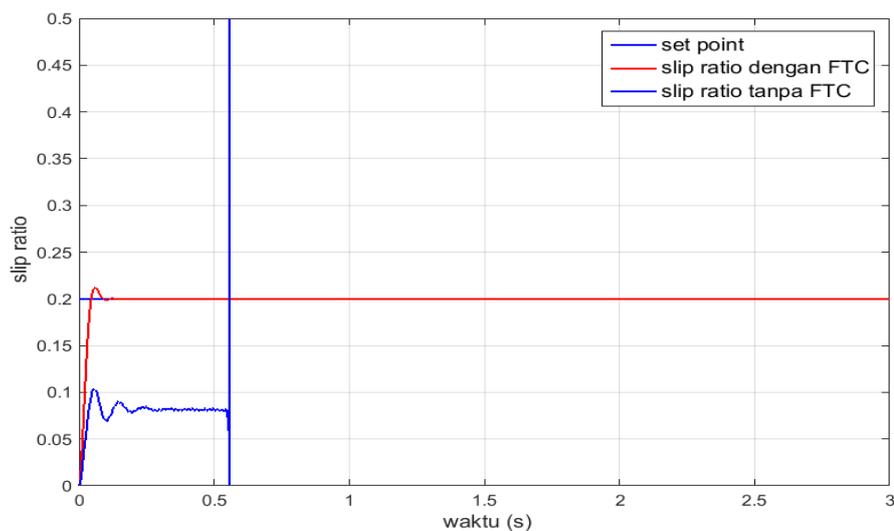
Dari tabel performansi untuk kesalahan sensitifitas kendaraan dengan kesalahan sensitifitas 1% kecepatan kendaraan dan kecepatan roda masih dapat berhenti pada waktu yang sama. Kesalahan 30% dan 50% membuat kendaraan menjadi tidak stabil dan kecepatan kendaraan serta kecepatan roda naik hingga tidak dapat berhenti. Sedangkan untuk kesalahan sensitifitas 100% , kecepatan kendaraan dan kecepatan roda terhenti di detik ke-0.5 sehingga kendaraan tidak stabil. Dengan FTC, kesalahan yang diberikan dapat ditoleransi sehingga menghasilkan kecepatan kendaraan dan kecepatan roda berhenti pada waktu yang sama yaitu di detik ke-3.471. *Slip ratio* yang dihasilkan dapat mengikuti *set point* dengan performansi *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14s.

#### 4.8 Pengujian Pembebanan Massa

Dengan adanya penambahan massa pada kendaraan karena terdapat penumpang, memungkinkan terjadinya perbedaan waktu berhenti kendaraan atau respon yang berbeda ketika terjadi pengereman. Pembebanan massa disimulasikan dengan memberikan penumpang dengan asumsi berat satu orang penumpang adalah 50 kg. Uji pertama menggunakan 4 orang penumpang dengan pemberian kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 30% dan kesalahan *open switch* pada *gate switch* 1 di detik ke-0.5 yang ditampilkan pada Gambar 4.29 dan Gambar 4.30 berikut :



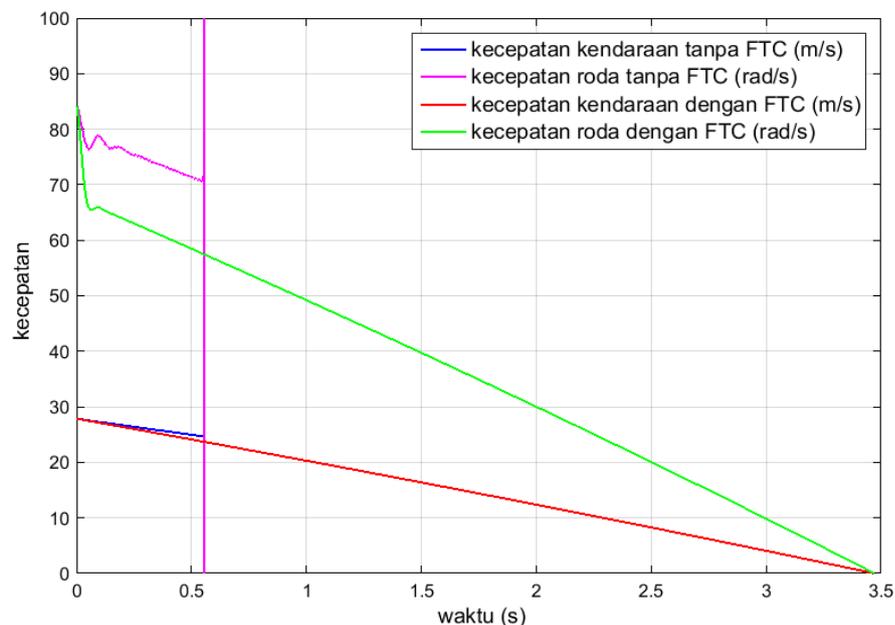
**Gambar 4. 29** Kecepatan untuk 4 penumpang dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1 detik ke-0.5



**Gambar 4. 30** Respon slip ratio untuk 4 penumpang dengan kesalahan bias sensor kendaraan dan kesalahan *switch* 1 detik ke-0.5

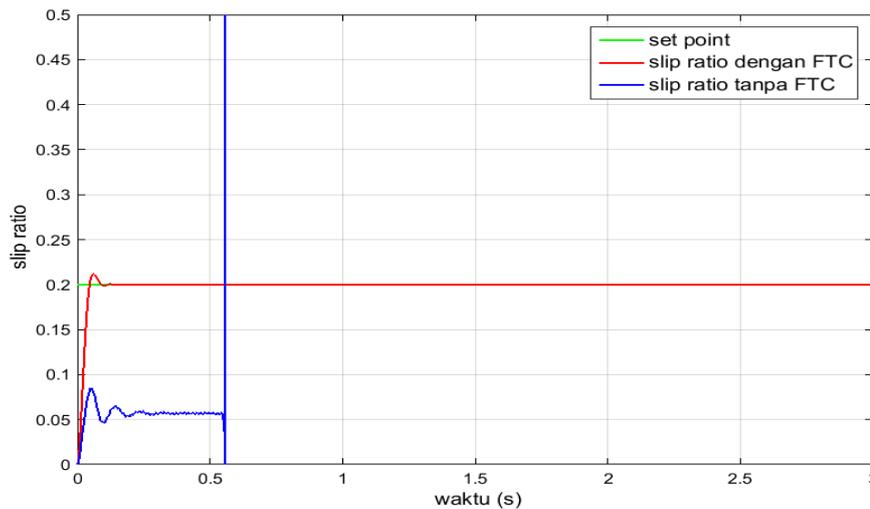
Dari Gambar 4.29 penambahan penumpang sebanyak 4 orang dengan kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1 di detik ke-0.5 menghasilkan respon kecepatan roda yang berwarna ungu serta kecepatan kendaraan berwarna biru. Kecepatan naik di detik ke-0.555 dan membuat sistem tidak stabil. Respon dengan FTC mampu membuat kendaraan dan roda berhenti pada waktu yang sama yaitu detik ke-3.471. *Slip ratio* tanpa menggunakan FTC ditunjukkan oleh grafik berwarna biru pada Gambar 4.30 yang memiliki respon belum mencapai *set point* dengan *error* 59%. Kemudian terjadi ketidakstabilan pada detik 0.555. Sedangkan respon menggunakan FTC dapat membuat kendaraan stabil dengan *slip ratio* sesuai *set point* yaitu 0.2. Karakteristik respon untuk FTC adalah *overshoot* 6% dan *settling time* 0.13 s.

Uji kedua yaitu dengan memberi penambahan jumlah penumpang menjadi 6 orang. Kesalahan yang diberikan adalah kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *open switch* 1. Respon kecepatan dengan kesalahan yang diberikan disajikan pada Gambar 4.31 sebagai berikut :



**Gambar 4. 31** Kecepatan untuk 6 penumpang dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1 detik ke-0.5

Sedangkan untuk respon *slip ratio* ditunjukkan oleh Gambar 4.32 sebagai berikut :



**Gambar 4. 32** Respon slip ratio untuk 6 penumpang dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1 detik ke-0.5

Pada Gambar 4.31 menunjukkan respon kecepatan dengan penambahan 6 orang penumpang yang diberi kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1 pada detik ke-0.5. Kecepatan kendaraan serta kecepatan roda mengalami kenaikan dan terjadi ketidakstabilan pada detik ke-0.555 yang ditunjukkan oleh grafik berwarna ungu dan biru. Dengan adanya FTC, kecepatan kendaraan dan roda dapat berhenti pada detik yang sama yaitu ke-3.471 ditunjukkan oleh grafik berwarna merah dan hijau. Respon *slip ratio* tanpa menggunakan FTC dapat dilihat pada Gambar 4.32 grafik berwarna biru. Respon *slip ratio* tersebut belum mencapai *set point* yaitu 0.2 seperti pada grafik berwarna hijau dengan *error* 71%. Sedangkan menggunakan FTC *slip ratio* mampu sesuai dengan *set point* yang ditunjukkan oleh grafik warna merah. Dengan adanya penambahan beban penumpang pada kendaraan, maka sistem memiliki respon yang berbeda pula. Performansi respon untuk sistem dengan penambahan penumpang yang diberi kesalahan bias sensor 30% dan kesalahan *switch* 1 detik ke-0.5 disajikan pada Tabel 4.5 berikut :

**Tabel 4. 5** Performansi Respon Dengan Penambahan Jumlah Penumpang

Jumlah penumpang	Tanpa FTC			Dengan FTC		
	Waktu slip	Settling time	error	Waktu berhenti	Settling time	overshoot
4	0.555s	0.14 s	59%	3.471 s	0.13 s	6 %
5	0.555s	0.14 s	71%	3.471 s	0.14 s	6.4 %

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa data yang telah dilakukan, didapat kesimpulan mengenai Tugas Akhir ini yang berjudul Perancangan *Fault Tolerant Control* pada Sistem Pengereman *Regenerative Anti-Lock Braking System* Mobil Listrik dengan Kesalahan Sensor dan Aktuator sebagai berikut :

- a) Pengereman *Regenerative Anti-Lock Braking System* pada mobil listrik dapat dipengaruhi oleh adanya kesalahan sensor dan aktuator saat berjalannya sistem. Kesalahan sensor dapat berupa kesalahan bias dan kesalahan sensitifitas.
  - Hasil respon dengan adanya kesalahan bias sensor sebesar 1%, 30%, 50%, dan 100% dapat mengakibatkan sistem berhenti dalam waktu yang lebih lama yaitu berturut-turut 3.477 s, 3.532 s, 3.609 s, dan 4 s.
  - Kesalahan aktuator berupa kesalahan *open switch* pada *gate switch inverter* motor mengakibatkan sistem tidak stabil dan terjadi *slip* pada waktu setelah terjadinya kesalahan. Kesalahan *open switch* 1 dan 2 di detik ke-5 berturut-turut mengakibatkan sistem tidak stabil pada detik ke-0.555 dan ke-0.602.
  - Kesalahan sensor dan aktuator dalam waktu yang sama menghasilkan respon sistem tidak stabil setelah terjadinya kesalahan aktuator. Kesalahan sensor di detik ke-0.5 dan kesalahan aktuator di detik ke-0.3 menyebabkan respon tidak stabil di detik ke-0.37. Kesalahan sensor pada detik ke-0.3 dan kesalahan aktuator pada detik ke-0.5 menyebabkan respon sistem tidak stabil pada detik ke-0.555.
- b) Perancangan FTC menggunakan *observer* mampu mengatasi kesalahan dengan memberikan gain *proportional* yaitu  $P_{\omega}$  sebesar  $9 \times 10^2$ ,  $P_v$  sebesar  $10^5$ ,  $P_{Tb}$  sebesar  $9 \times 10^2$ , dan  $P_{iz}$  sebesar  $10^6$  pada algoritma *observer*. FTC

dapat mempertahankan respon dengan baik untuk kesalahan sensor dan aktuator yang diberikan.

- Kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan FTC mampu berhenti pada waktu 3.471 s. *Slip ratio* dapat dipertahankan sesuai *set point* yang diberikan yaitu 0.2 dengan performansi respon *overshoot* 6.4% dan *settling time* 0.14s.
- Penambahan beban penumpang pada kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan aktuator *switch* 1 dapat dikompensasi dengan FTC yang membuat kendaraan berhenti pada detik ke-3.471. Performansi FTC dengan penambahan beban 4 penumpang memiliki *overshoot* sebesar 6% dan *settling time* 13 s. Penambahan penumpang 6 orang memiliki *overshoot* 6.4% dan *settling time* 14 s.

## 5.2 Saran

Adapun saran dalam proses tugas akhir ini untuk penelitian selanjutnya adalah :

- a) Pada penelitian selanjutnya plant dapat dibuat lebih kompleks dengan penambahan roda sehingga menjadi *halfcar* atau *fullcar electric vehicle*.

## DAFTAR PUSTAKA

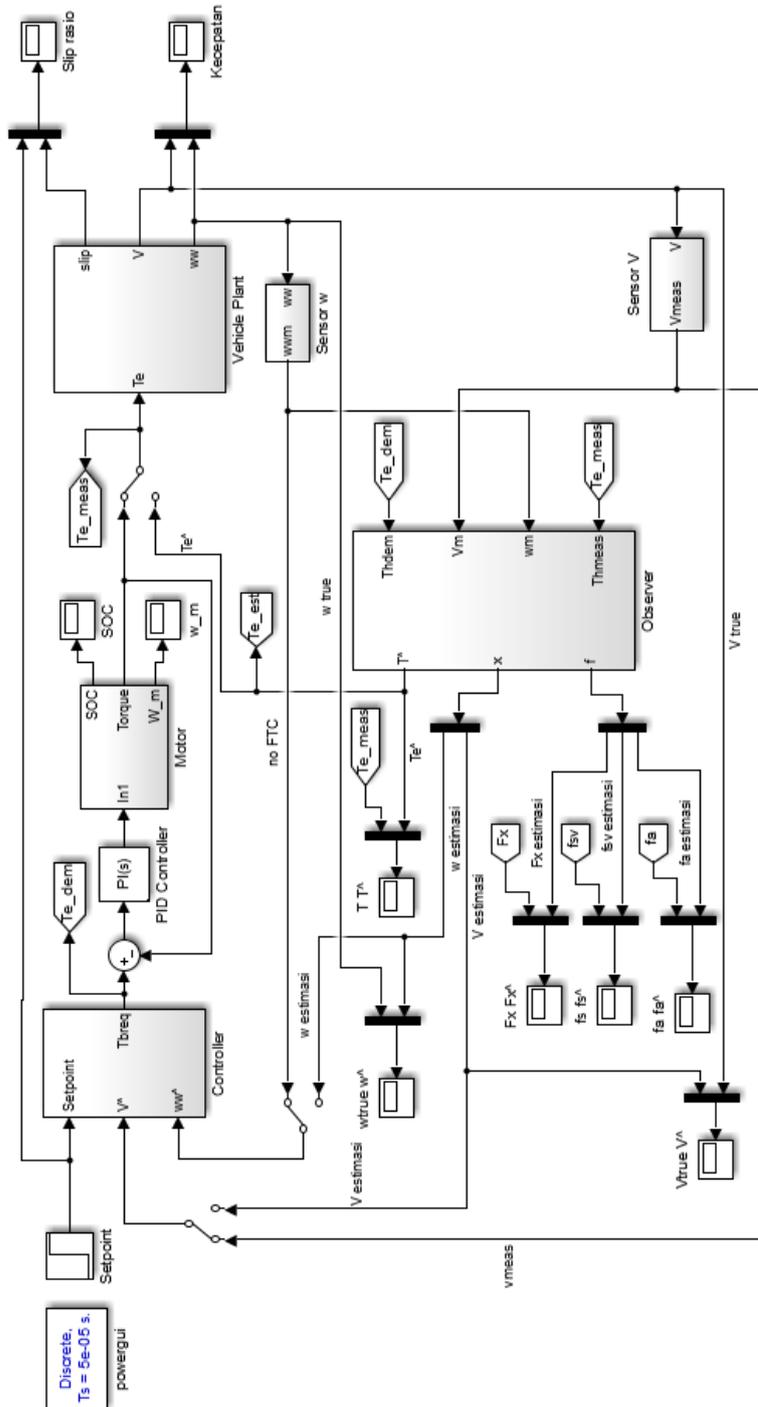
- Aisyah, P. Y., & Indriawati, K. (2019). The Faults Estimation Method of Wind Turbine Components by Optimization with  $\ell_0$  norm Constraint. *12th International Conference on Information & Communication Technology and System (ITCS) 2019*, 65-69.
- Aly, A., Zeidan, E.-S., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*(2), 186-195.
- Astrom, K. J. (2002). PID Control. In *Control System Design* (pp. 216-217). Santa Barbara.
- Bhandari, P., Dubey, S., Kandhu, S., & Deshbhratar, R. (2017). Regenerative Braking Systems (RBS). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 71-74.
- Buyoan, L., Haiping, D., & Weihua, L. (2014). Comparative Study of Vehicle Tire-Road Friction Coefficient Estimation with a Novel Cost Effective Method. *University of Wollongong Australia*, 1-36.
- Cham, C.-L., & Samad, Z. B. (2014). Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 866-872.
- Department of Energy, U. S. (2017, September). Electric Drive Vehicle.
- Ding, N., Prasad, K., & Lie, T. (2017). The electric vehicle: a review *International Journal Electric and Hybrid Vehicles*. 9(1).
- Electronics, R. (2020). *What are Brushless DC Motors*. (Renesas Electronics Corporation) Retrieved March 27, 2020, from What are Brushless DC Motors: <https://www.renesas.com/us/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html>
- Febrianty, D. F. (2020). *Perancangan Fault Tolerant Control (FTC) pada Aplikasi Pengereman Regenerative Mobil Listrik dengan Model Half Car sebagai Anti-Lock Braking System dengan Kesalahan Sensor*. Surabaya: Teknik Fisika, ITS.

- Gaojian, C., Jinglei, D., Shaosong, L., Xilu, Z., Xiaohui, L., & Zhixin, Y. (2017). Slip Control of Electric Vehicle Based in Tire-Road Friction Coefficient Estimation. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-9.
- Guo, J., Jian, X., & Lin, G. (2014). Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*(7), 6459-6476.
- Holkar, K. S., & Waghmare, L. M. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Applications*, 1-5.
- Ichikawa, M., Sebe, N., Suyama, K., & Indriawati, K. (2017). A Bias Fault Estimation of Actuators and Sensors by Optimization with  $\ell_0$  norm Constraint. *11th Asian Control Conference (ASCC)*, 1443-1448.
- Ikhfani, E. P. (2019). *Perancangan Sistem Fault Tolerant Control (FTC) Berdasarkan Estimasi Kesalahan Sensor dan Aktuator pada Anti-Lock Braking System Mobil Konvensional*. Surabaya: Teknik Fisika, ITS.
- Indonesia, K. P. (2018, November 6). *Studi Mobil Listrik: Hemat Energi Hingga 80 Persen*. (Kementrian Perindustrian)
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2013). Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linier System with Actuator and Sensor Faults. *IEEE International Conference on Control System*, 22-2.
- Iyiola, & Isreal, M. (2018). Recent Development of Electric Cars.
- Liu, J., & Wang, X. (2012). *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Nasir, A. N., Ismail, R. M., & Ahmad, M. A. (2010). Performance Comparison between Sliding Mode Control (SMC) and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 122-127.
- Nguyen-Van, T., Abe, R., & Tanaka, K. (2017). A Digital Hysteresis Current Control for Half-Bridge Inverters with Constrained Switching Frequency. *Energies*, 10(1610), 1-13.

- Nian, X., Peng, F., & Zhang, H. (2014). Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5798-5808.
- Ogata, K. (2001). *Modern Control Engineering 5th Edition*. Boston: Prentice Hall.
- Patin, N. (2015). DC/AC Converters. In *Power Electronic Applied to Industrial System and Transport* (pp. 35-100). Elsevier.
- Pinandhito, M. R., Indriawati, K., & Harly, M. (2019). Active Fault Tolerant Control Design in Regenerative Anti-lock Braking System of Electric Vehicle with Sensor Fault. *AIP Conference Proceedings*.
- Rahmani, M., Ghanbari, A., & Etefagh, M. M. (2016). Robust adaptive control of a bio-inspired robot manipulator using bat. *Expert Systems With Applications*.
- Singh, C. P., Kulkarni, S., & Rana, S. C. (2013). State-Space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control using Fuzzy PID. *Computer Science*.
- Singh, K. V., Bansal, H. O., & Singh, D. (2019). A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures.
- Sreesh, A., & Vandana, P. (2015). Four Quadrant Operation of BLDC Motor with Current Controller. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 85-90.
- Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Istanbul, Turkey.

# LAMPIRAN

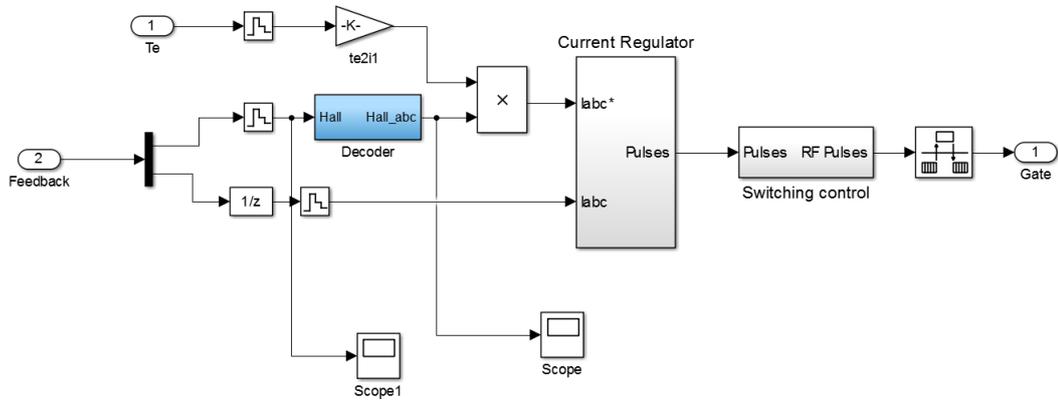
## A. Sistem FTC pada Pengereman Regenerative sebagai ABS menggunakan simulink



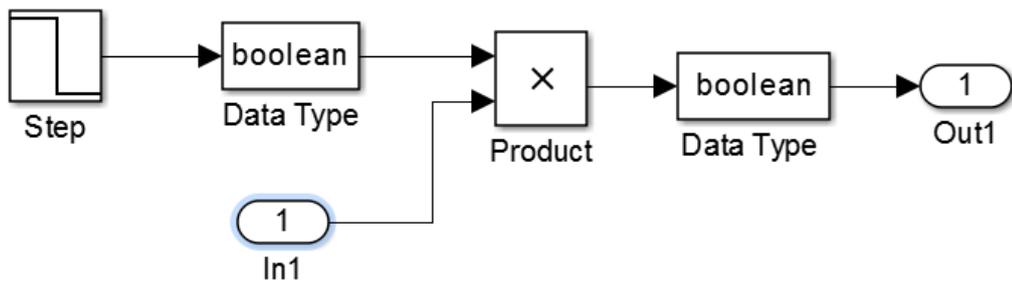
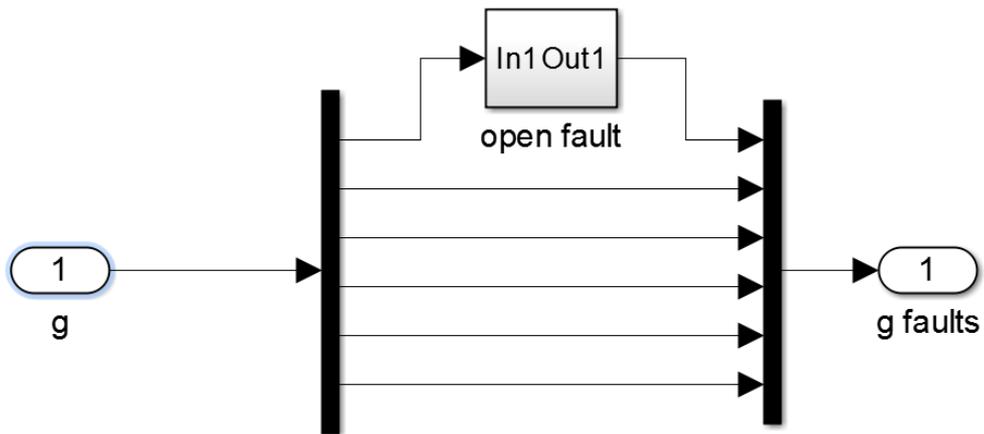




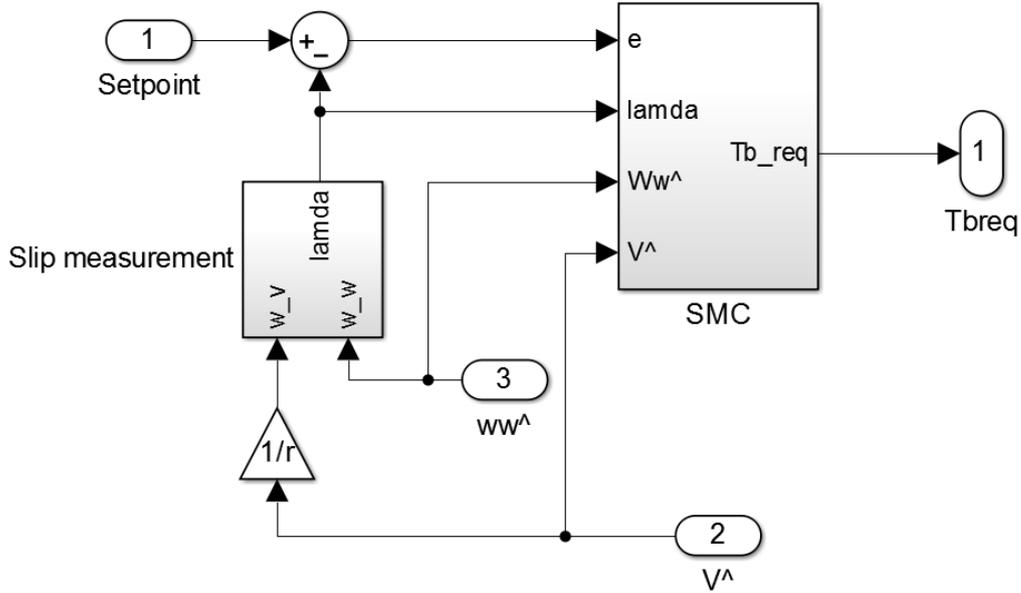
**D. Current Controller**



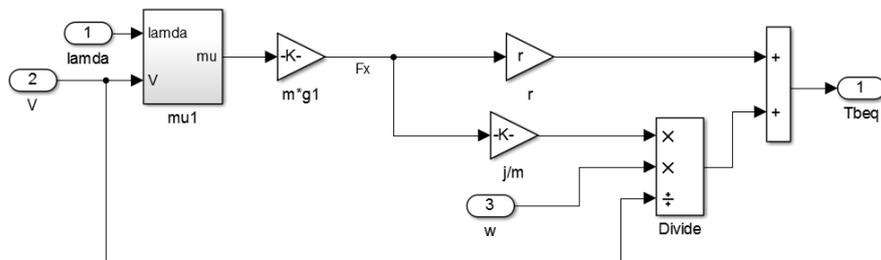
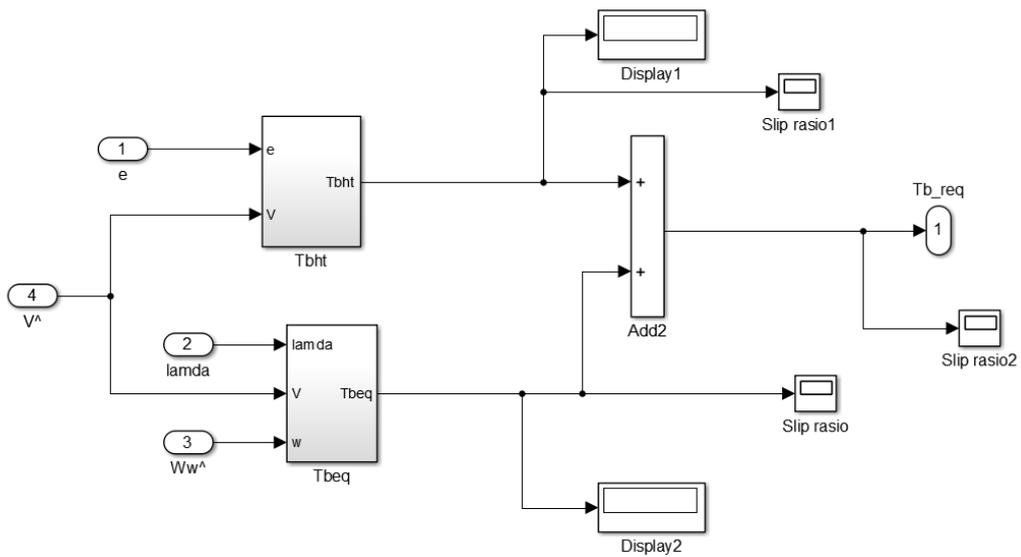
**Switch Fault**

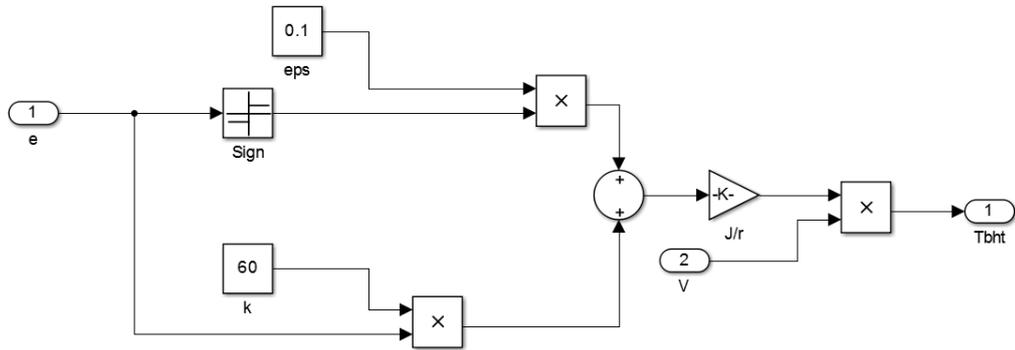


**E. Controller**

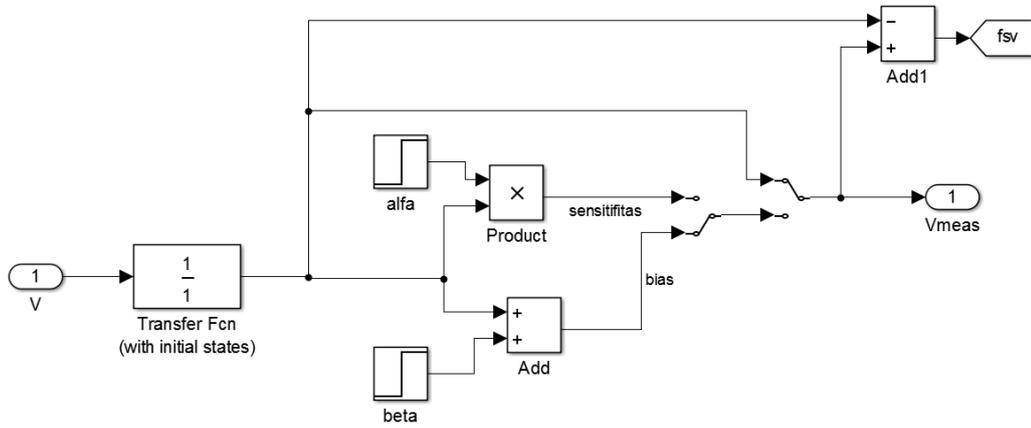


**Sliding Mode Control**

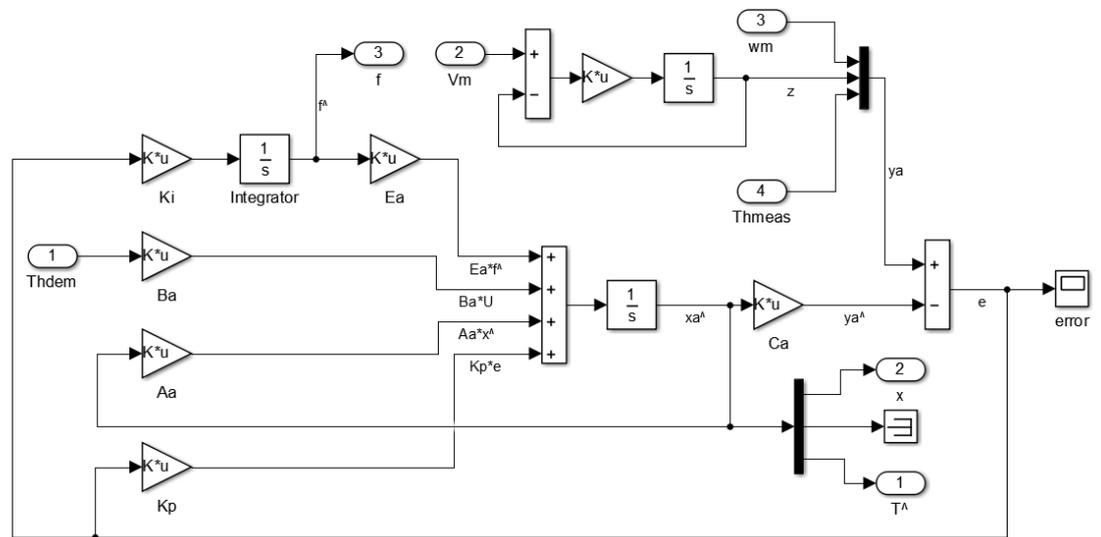




**F. Sensor**



**G. Observer**



## H. Kode Matlab

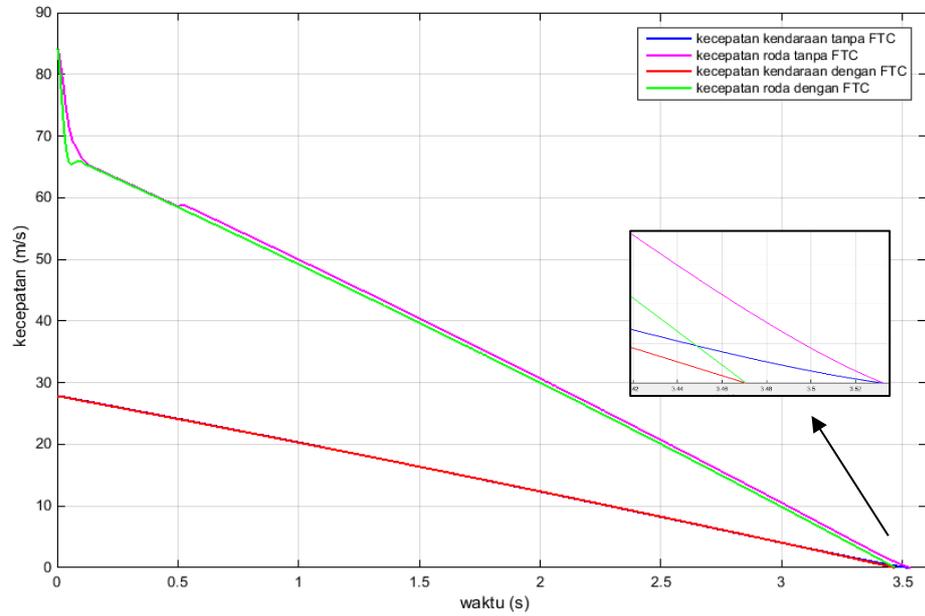
```

clear
clc
% Definisi parameter regenerative A`BS pada EV
mass    = 342.5;           %massa kendaraan
mass1   = 642.5;           %massa dengan 4 penumpang
mass2   = 142.5;           %massa dengan 6 penumpang
r       = 0.33;            %jari jari roda
inert   = 3.5;             %inersia roda
g       = 9.8;             %gravitasi
c1      = 1.029;           %koefisien gesek 1
c2      = 17.16;           %koefisien gesek 2
c3      = 0.523;           %koefisien gesek 3
c4      = 0.03;            %koefisien gesek 4
ctrl    = 1;
pz      = 100;             %gain z
tau     = 0.01;            %
Kt      = 0.57176;         %konstanta torsi
Vin     = 27.7778;         %nilai awal kecepatan
k       = 200;
t       = 0.01;
pi      = 22/7;
freq_max = 20000;
h       = 1e-15;
Ts_vect = 50e-6;
%Parameter Observer
A = [0    0    0
     0  -100  0
     0 -1/inert 0];      %Matriks A
B = [-1/mass1  0
     0    100
     r/inert  0];       %Matriks B
C = [1 0 0
     0 1 0
     0 0 1];           %Matriks C
D = [0 0;0 0;0 0];
% Extended state (w, v, z, Tb)
Aa = [0 0  0 -1/inert
     0 0  0  0
     0 pz -pz  0
     0 0  0 -1/tau];   %Matriks Aextended
Ba = [0; 0; 0; 1/tau]; %Matriks Bextended
Ca = [1 0 0 0
     0 0 1 0
     0 0 0 1];         %Matriks Cextended
Ea = [r/inert 0 0
     -1/mass1 0 0
     0    pz 0
     0    0 1/tau];   %Matriks Kesalahan (Fx fsv fa)
% Gain observer
Kp = [900/inert  0  0
     0  1e5/mass1  0
     0  1e6  0
     0  0  900*1/tau]; %Gain proportional
Ki= [9*1e7  0  0
     0  1*1e6  0
     0  0  900];      %Gain integral

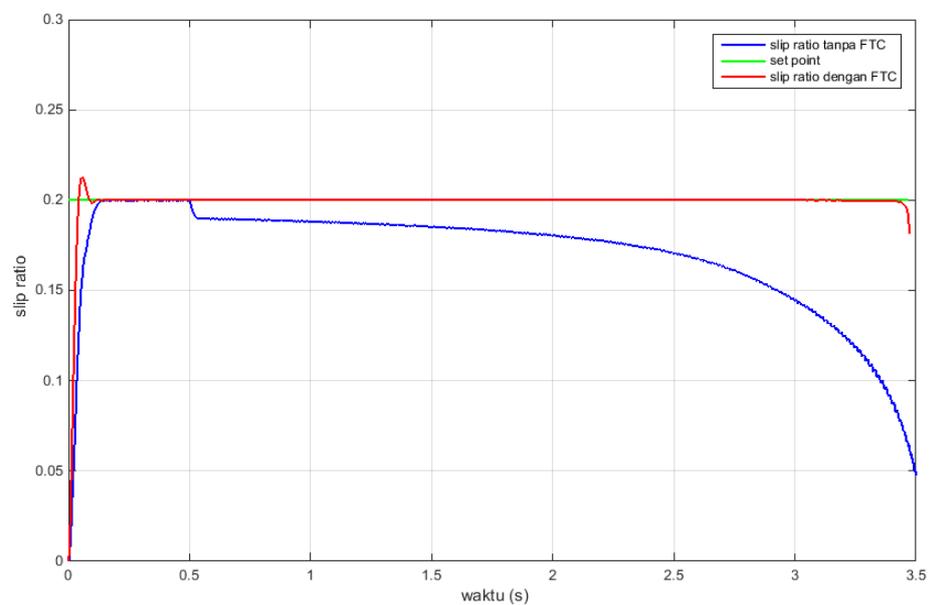
```

## I. HASIL UJI KESALAHAN

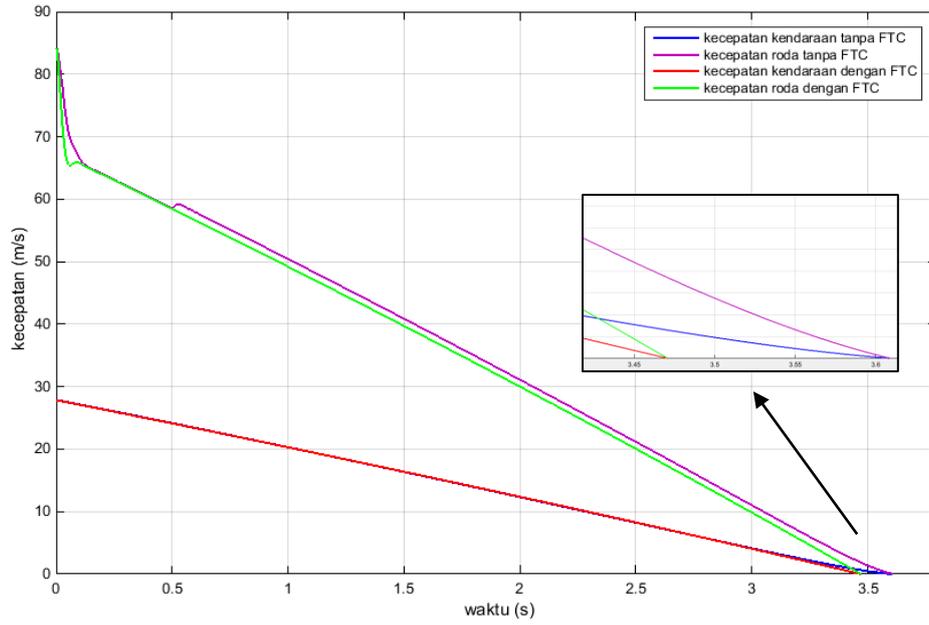
### a. Kesalahan bias sensor



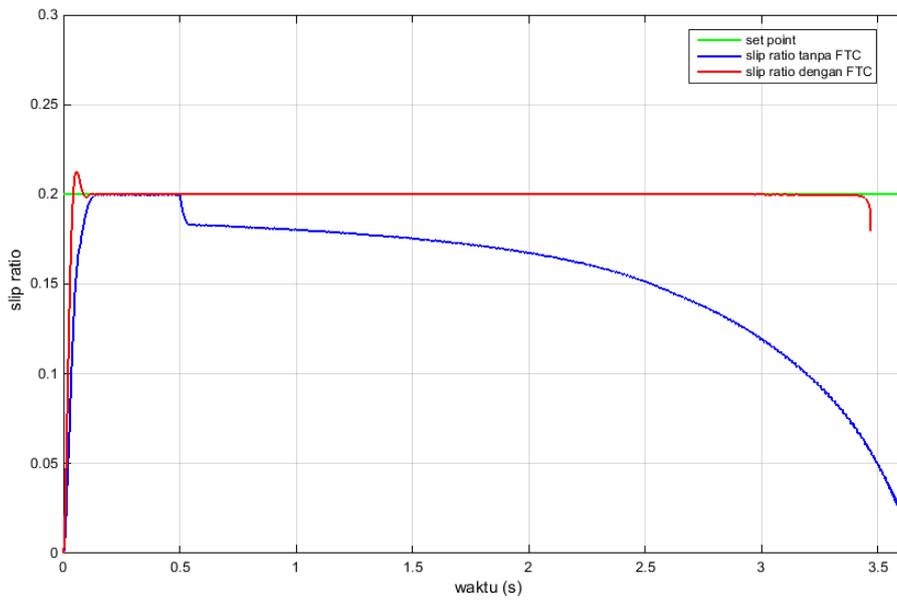
**Gambar a.** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.5 s



**Gambar b.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% detik ke-0.5 s

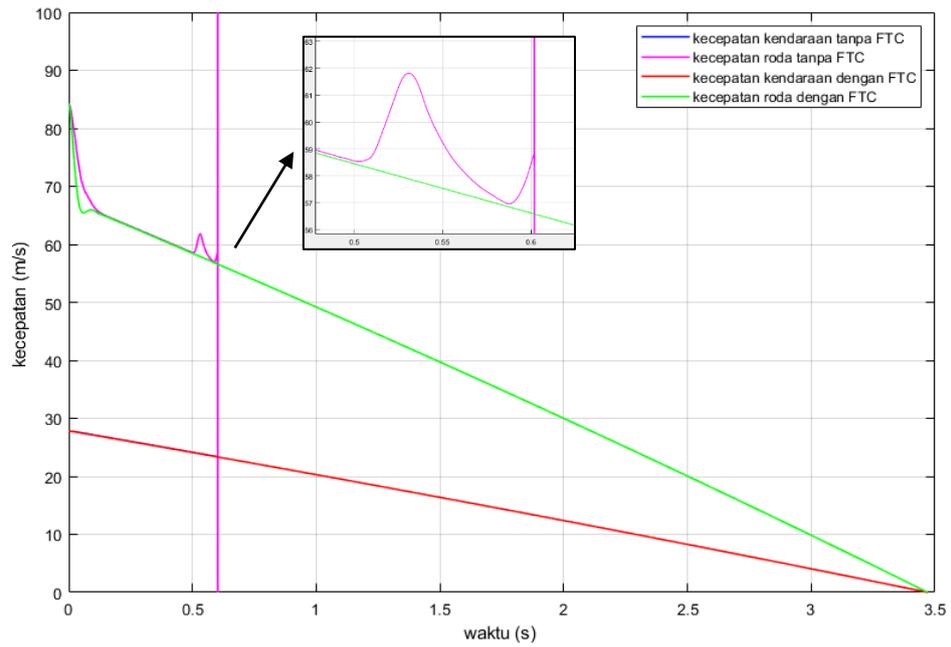


**Gambar c.** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50% detik ke-0.5 s

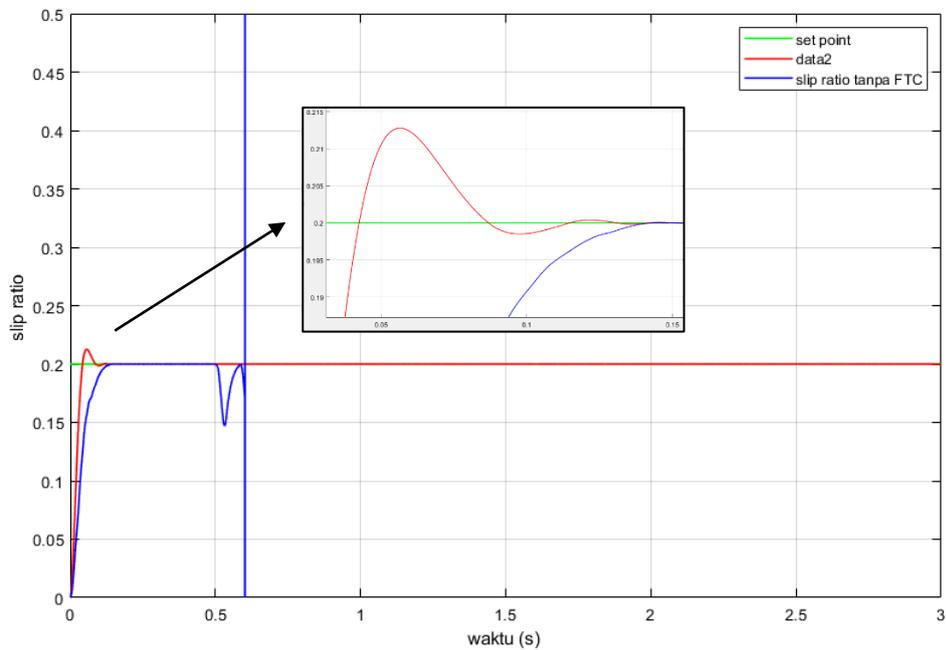


**Gambar d.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50% detik ke-0.5 s

b. Kesalahan aktuator *open switch*

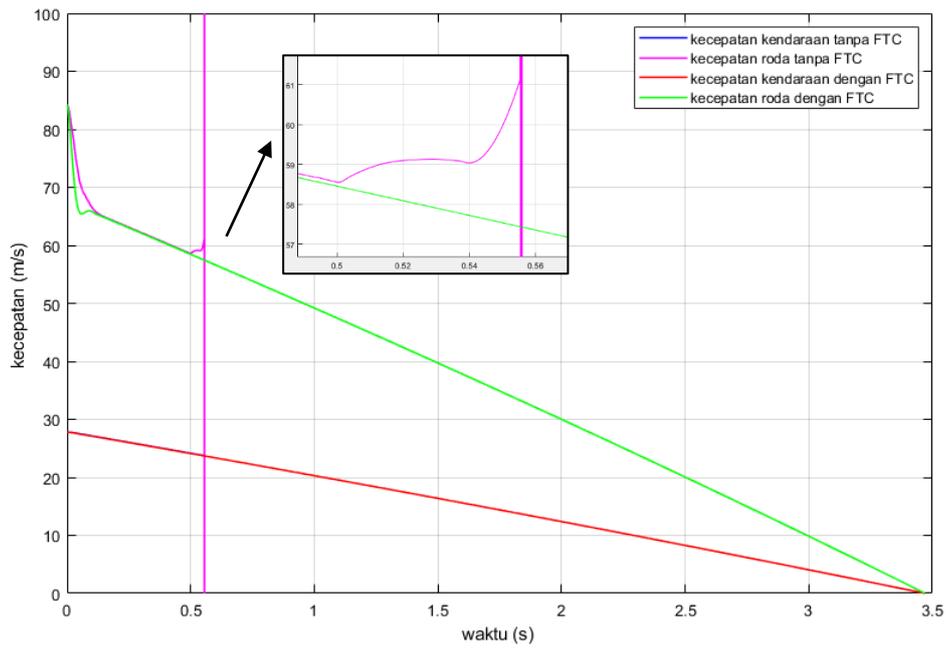


**Gambar e.** Kecepatan dengan kesalahan aktuator pada switch 1 detik ke-0.5

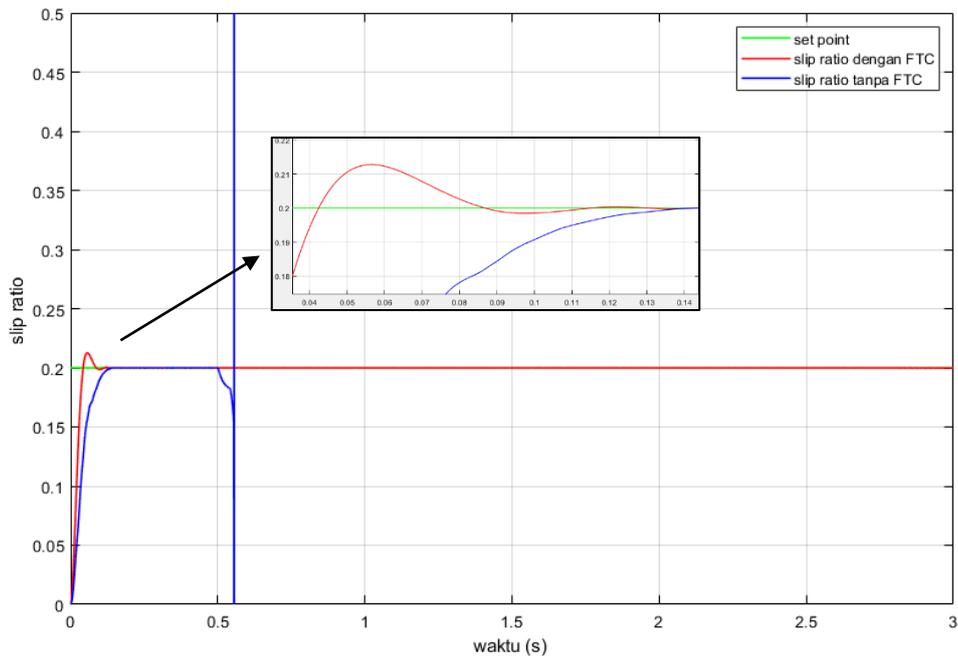


**Gambar f.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan aktuator pada switch 2 detik ke-0.5 s

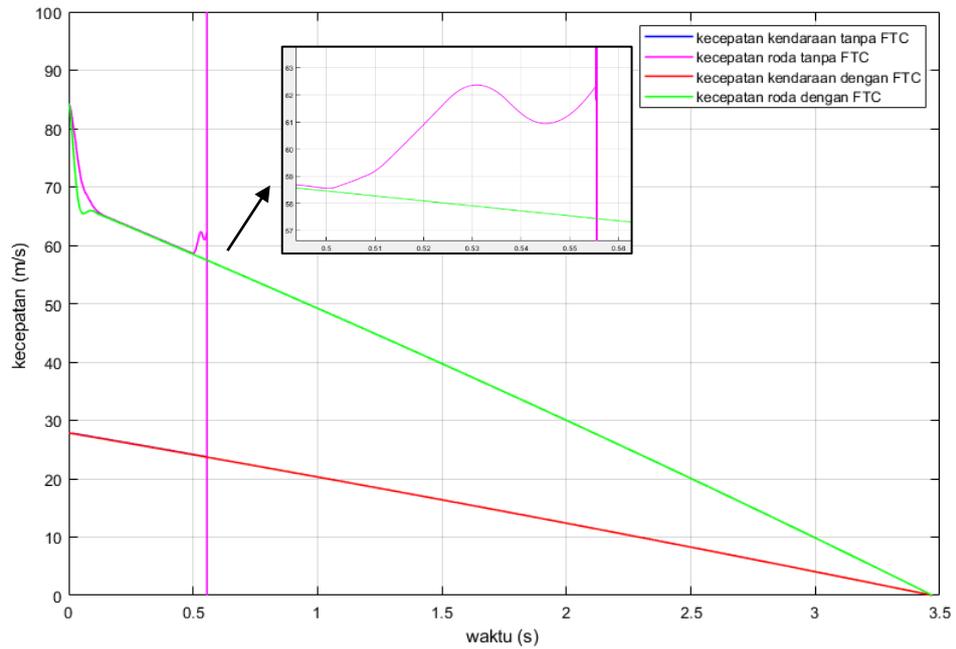
## c. Kesalahan sensor dan aktuator



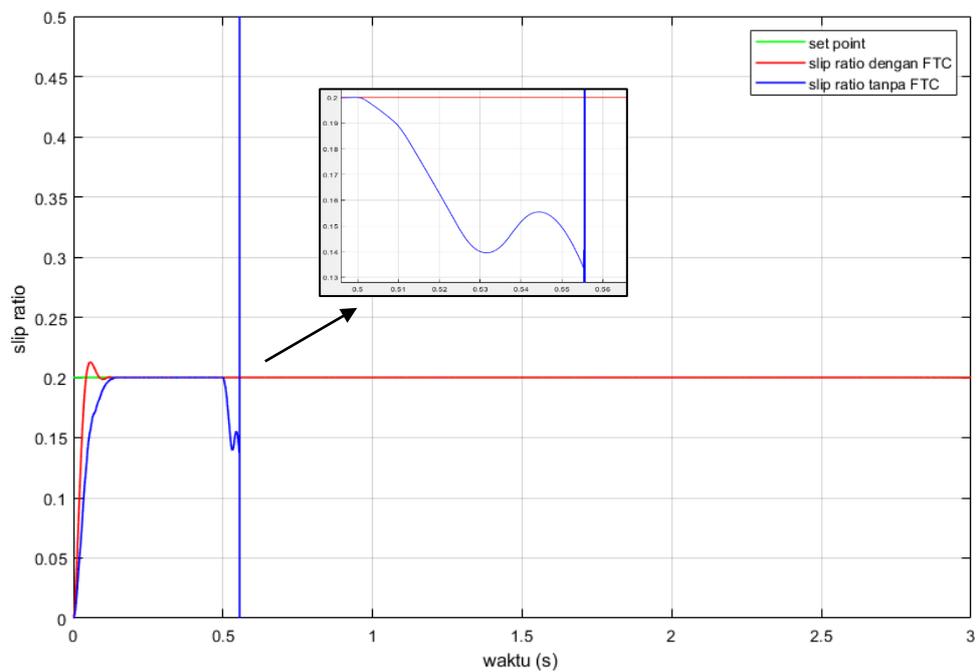
**Gambar g.** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor 30% dan *switch* 1 detik ke-0.5 s



**Gambar h.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50% dan kesalahan *switch* 1 detik ke-0.5 s

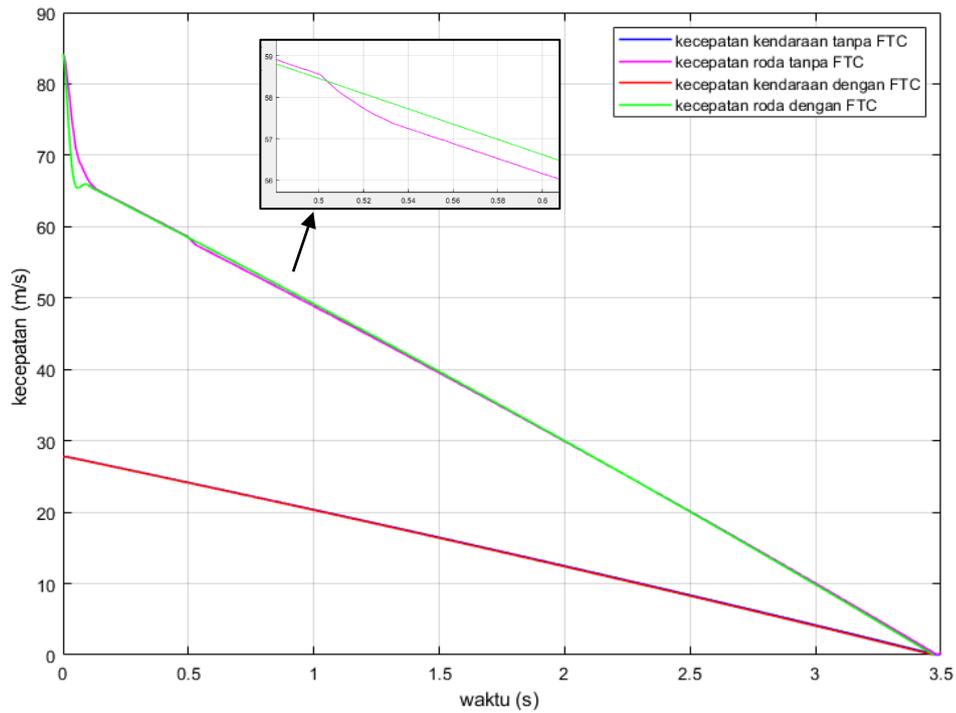


**Gambar i.** Kecepatan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1&2 detik ke-0.5 s

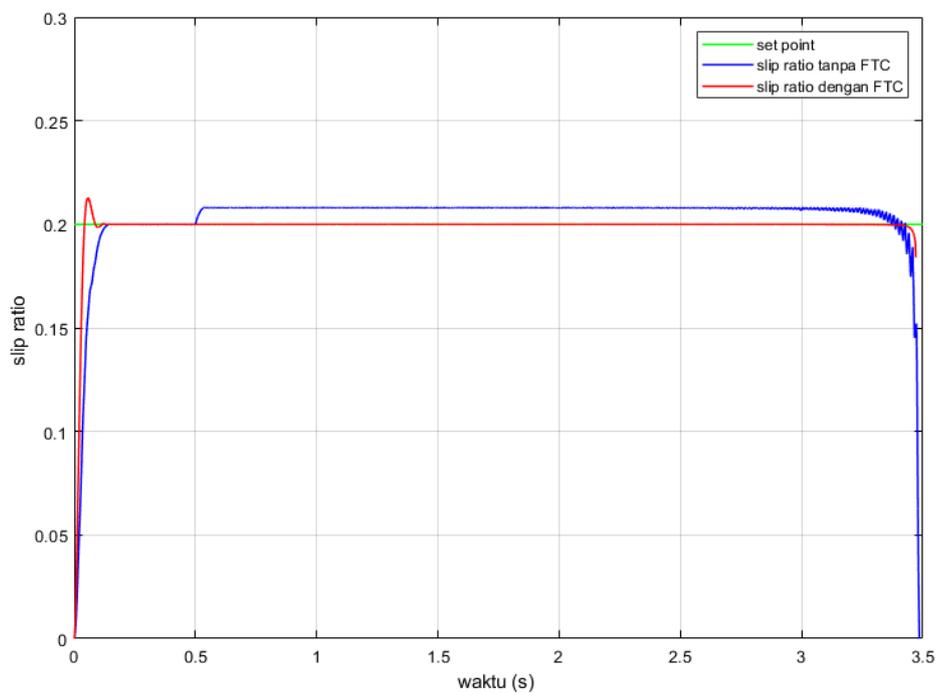


**Gambar j.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30% dan kesalahan *switch* 1&2 detik ke-0.5 s

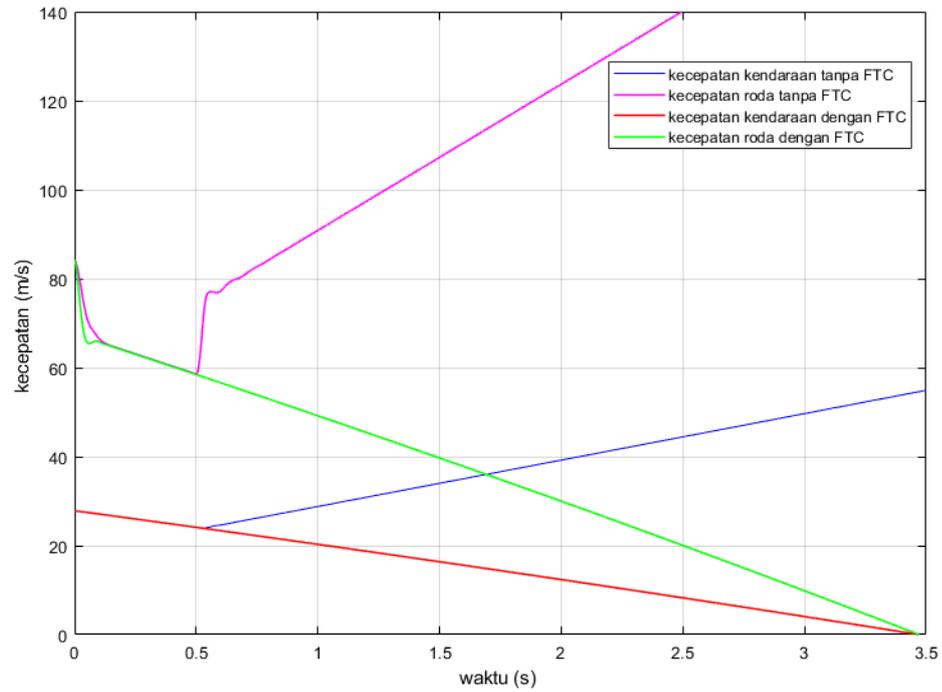
## d. Kesalahan sensitifitas sensor



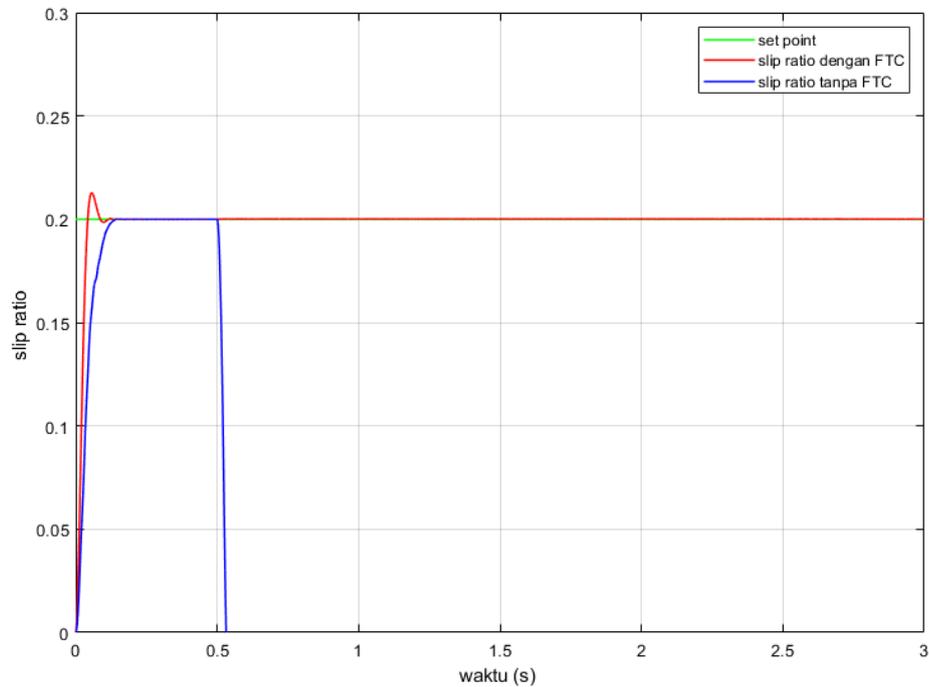
**Gambar k.** Kecepatan dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 1% detik ke-0.5 s



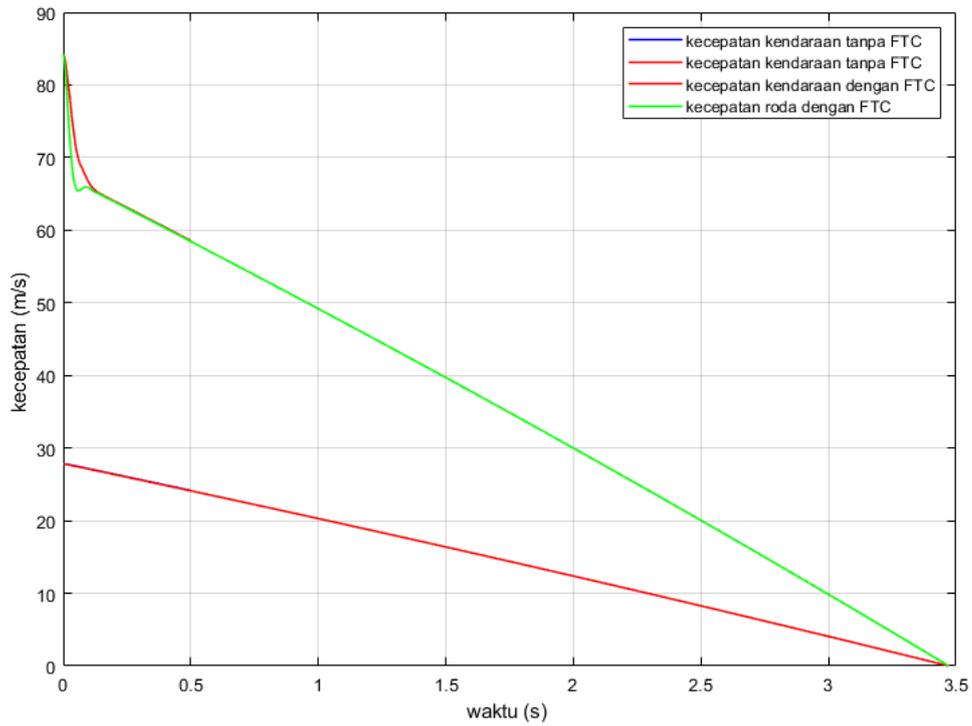
**Gambar l.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 1% detik ke-0.5 s



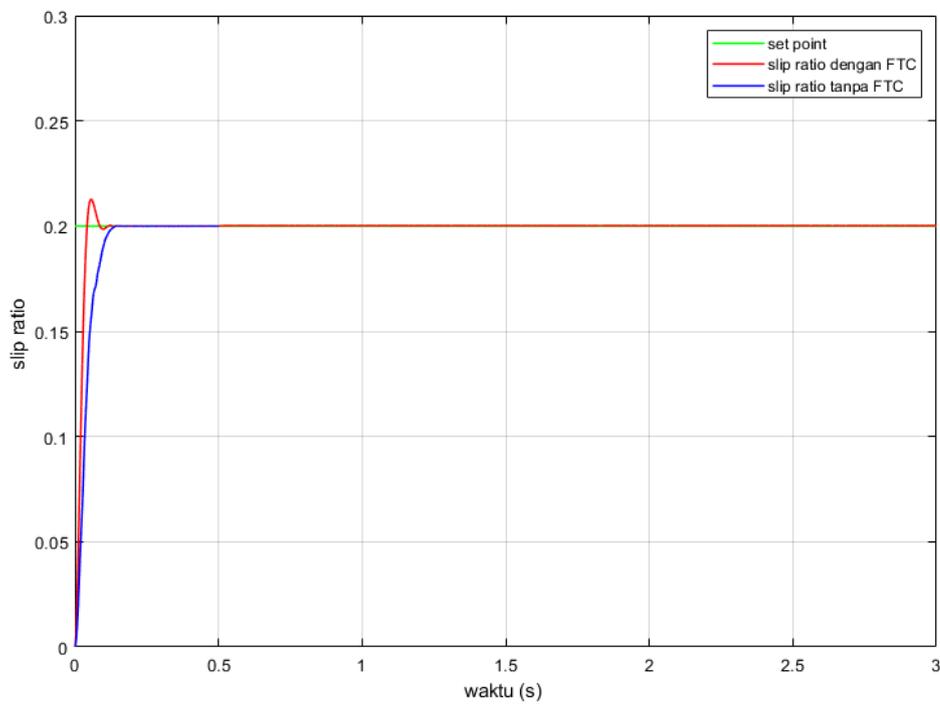
**Gambar m.** Kecepatan dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 50% detik ke-0.5 s



**Gambar n.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 50% detik ke-0.5

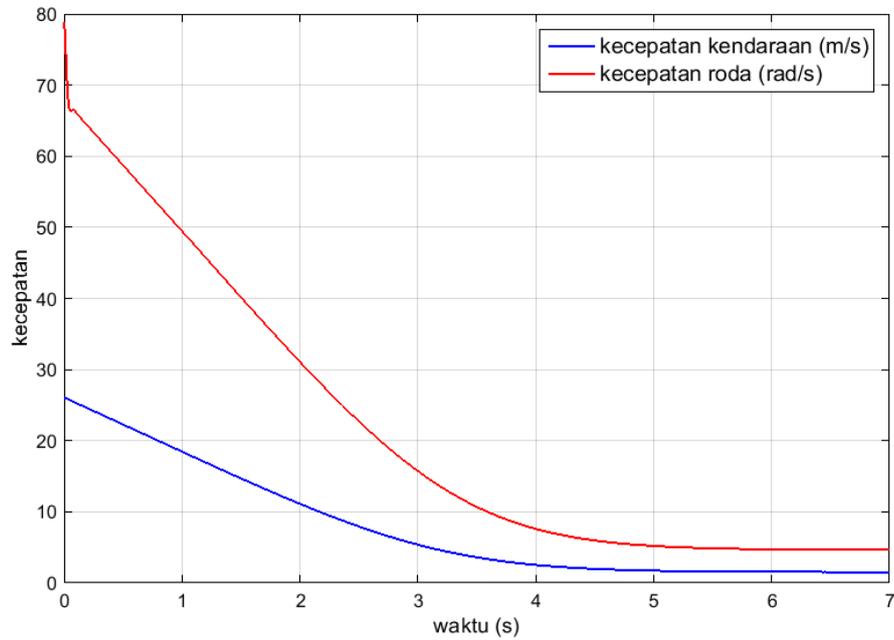


**Gambar o.** Kecepatan dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 100% detik ke-0.5 s

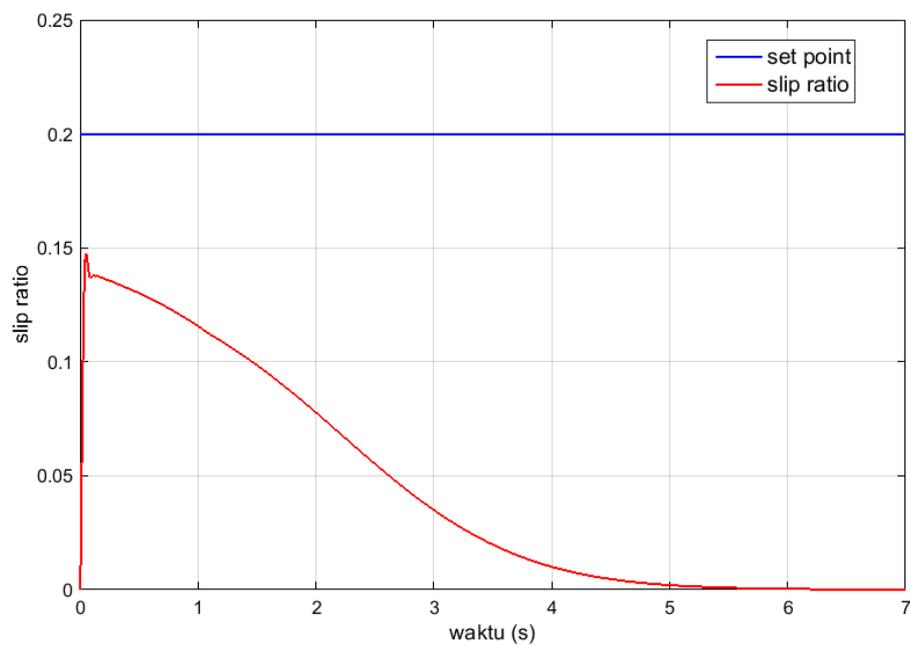


**Gambar p.** Respon *slip ratio* dengan kesalahan sensitifitas sensor kendaraan 100% detik ke-0.5 s

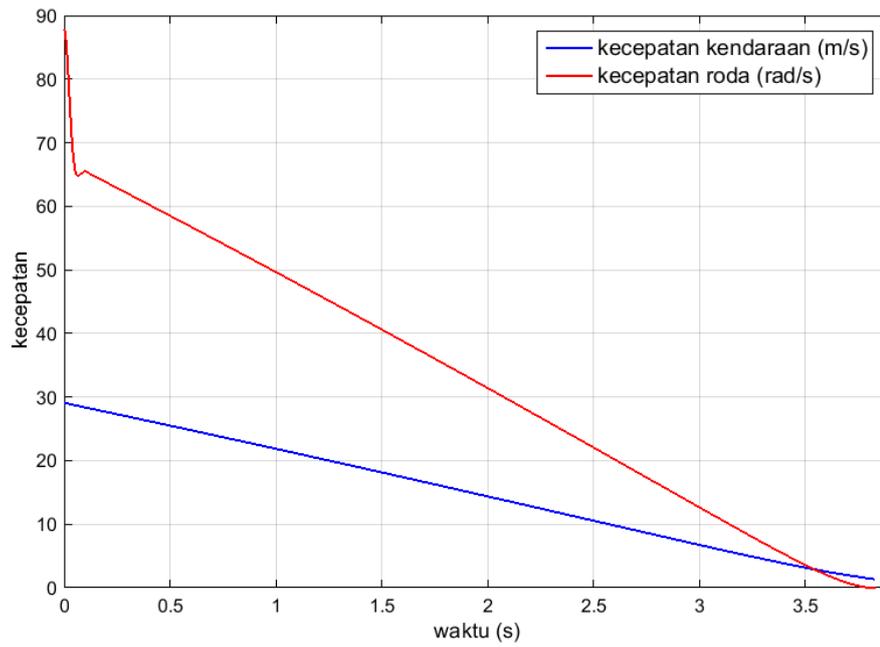
## J. PENGUJIAN *CLOSED LOOP* PADA KECEPATAN AWAL KENDARAAN BERBEDA



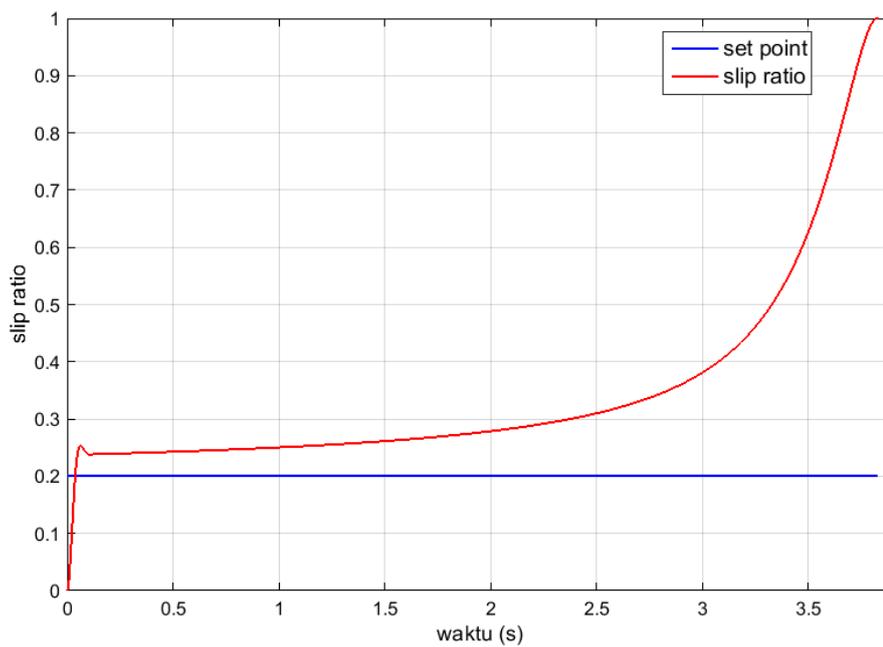
**Gambar q.** Respon kecepatan dengan kecepatan awal 26 m/s



**Gambar r.** Respon *slip ratio* dengan kecepatan awal 26 m/s



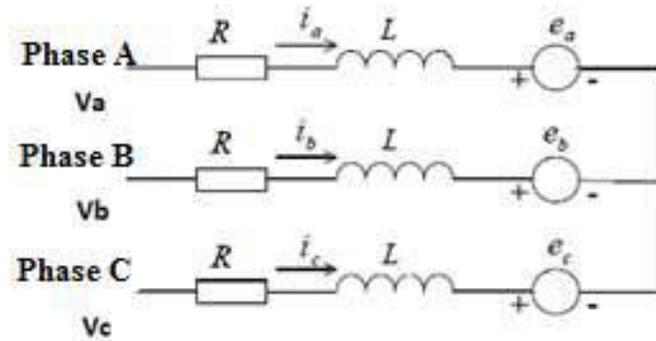
**Gambar s.** Respon kecepatan dengan kecepatan awal 29 m/s



**Gambar t.** Respon *slip ratio* dengan kecepatan awal 29 m/s

## K. PENURUNAN RUMUS PERSAMAAN BLDC

Pada persamaan (2.6) yaitu untuk persamaan matematis pada BLDC dapat dilihat dari Gambar u Berikut :



**Gambar u.** *Equivalent circuit of BLDC motor*

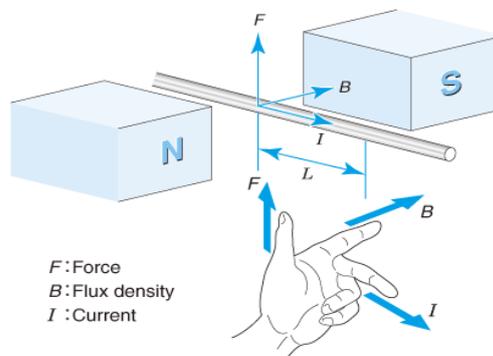
Dari Gambar u tersebut, untuk *phase A* dengan Tegangan  $V_a$  dipengaruhi oleh  $r$ ,  $i_a$ ,  $L$ , dan  $e_a$ . Sehingga dapat dituliskan dalam persamaan menjadi :

$$V_a = i_a r + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

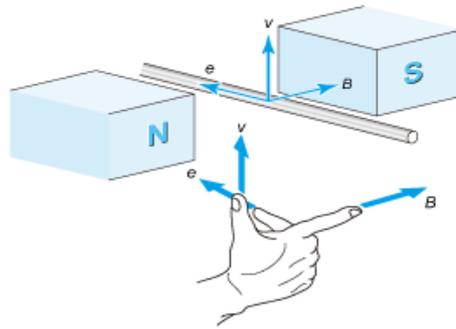
Sehingga dari ketiga *phase*, A B dan C, dapat dituliskan menjadi seperti persamaan (2.6) yang dituliskan kembali sebagai berikut :

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

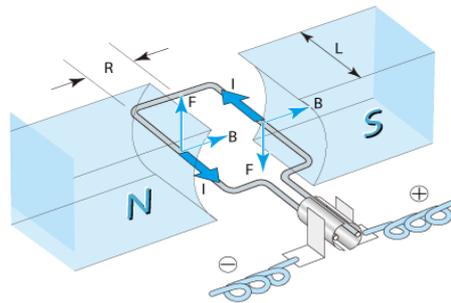
Persamaan (2.7) yaitu *back EMF* dapat diturunkan dari penjelasan berikut ini :



**Gambar v.** *Fleming's left hand rule*



**Gambar w.** *Fleming's right hand rule*



**Gambar x.** *DC motor principle of rotation*

Dengan  $B$  ,  $F$  ,  $L$  ,  $e$  ,  $R$  , dan  $v$  berturut-turut adalah *Magnetic flux density* (T), *Force* (N), *Length of wire in the field* (m), *back EMF* (V), *jari-jari* (m), dan *kecepatan* (m/s).

Berdasarkan Gambar w, arah tegangan ditentukan oleh aturan tangan kanan Fleming. Arah arus adalah kebalikan dari arah arus yang ditunjukkan pada Gambar v. Karena fungsi ini mengurangi arus, maka disebut *back EMF* (*elektromagnetic force*). Kecepatan kawat  $v$  dapat dinyatakan sebagai  $v = \omega R$  dengan mengacu pada Gambar x. Oleh karena itu, *back EMF* yang muncul pada kawat akan diekspresikan sesuai dengan persamaan berikut :

$$e = B L R \omega$$

Sehingga *back EMF* sebanding dengan kecepatan putar  $\omega$ . Dalam kasus motor DC aktual, *back EMF* yang bekerja pada semua kumparan digabungkan dan muncul di antara terminal. Karena *back EMF* juga sebanding dengan kecepatan putar, maka dapat diekspresikan menggunakan *back EMF* konstanta  $K_c$ . Sehingga dapat dituliskan persamaan *back EMF* seperti pada persamaan (2.7).

## BIODATA PENULIS



Kartini dilahirkan di Tuban pada tanggal 12 Maret 1998. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari TK PKK Sidotentrem (2002-2004) dilanjutkan di SDN Sidotentrem 02 (2004-2010), SMPN 1 Bangilan (2010-2013), SMA N 1 Tuban (2013-2016) dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember semenjak 2016 hingga sekarang mengambil bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol. Pada bulan Juli 2020 penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* PADA SISTEM PENEREMAN *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR**. Apabila terdapat pertanyaan mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi nomor telepon penulis yaitu : 081226429282, dan juga melalui email penulis yaitu : [kartini.tf.its@gmail.com](mailto:kartini.tf.its@gmail.com).