



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
PADA SISTEM Pengereman Hybrid
DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR
MOBIL LISTRIK**

YOANNE AYUNINGTIAS SANIA
NRP. 0231164000016

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

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



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL*
(FTC) PADA SISTEM PENEREMAN *HYBRID*
DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR
MOBIL LISTRIK**

**YOANNE AYUNINGTIAS SANIA
NRP. 02311640000016**

Dosen Pembimbing:
Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T.
Moh Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.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 OF FAULT TOLERANT CONTROL OF
HYBRID BRAKING SYSTEM WITH FAULT AT
SENSOR AND ACTUATOR OF ELECTRIC VEHICLE***

YOANNE AYUNINGTIAS SANIA
NRP. 0231164000016

Supervisors:

Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T.
Moh Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.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 : Yoanne Ayuningtias Sania
NRP : 02311640000016
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 (FTC) PADA SISTEM Pengereman Hybrid dengan Kesalahan Sensor dan Aktuator pada Mobil Listrik**" 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, 30 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Yoanne Ayuningtias Sania

NRP. 02311640000016

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR
PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
PADA SISTEM PENEREMAN HYBRID DENGAN KESALAHAN
SENSOR DAN AKTUATOR PADA MOBIL LISTRIK

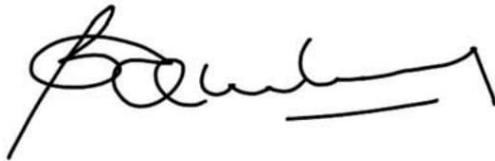
Oleh:

Yoanne Ayuningtias Sania

NRP. 02311640000016

Surabaya, 26 Juli 2020

Menyetujui,
Pembimbing I



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

NIP. 19690507 199512 1 001

Menyetujui,
Pembimbing II



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

Mengetahui,

Kepala Departemen
Teknik Fisika FTIRS-ITS



Dr. Suvanto, S.T., M.T.

NIP. 197111131995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC) PADA SISTEM Pengereman *HYBRID* DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR PADA MOBIL LISTRIK

TUGAS AKHIR

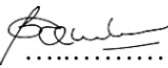

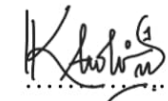
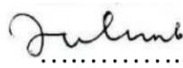
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Yoanne Ayuningtias Sania

NRP. 02311640000016

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIG  (Pembimbing II)
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  (Ketua Penguji)
4. Ir. Zulkifli, M.Sc.  (Penguji I)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
PADA SISTEM Pengereman *HYBRID*
DENGAN KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR PADA
MOBIL LISTRIK**

Nama : Yoanne Ayuningtias Sania
NRP : 02311640000016
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

ABSTRAK

Gangguan pada kendaraan ketika berada di jalan cukup beragam, salah satunya yaitu ban mengalami selip, ini terjadi karena pengereman yang terlalu kuat dan mendadak, sehingga roda terkunci dan berhenti. Salah satu cara untuk mengatasi selip pada mobil listrik menggunakan *Regenerative Anti-lock Braking System* (ABS). Pengereman torsi gesekan dan torsi motor atau pengereman elektrohidrolik (*hybrid*) dapat digunakan pada kendaraan listrik. *Sliding Mode Control* (SMC) digunakan pada ABS dapat mengatasi adanya slip pada saat pengereman. Kesalahan sensor dan aktuator dapat mempengaruhi kinerja SMC. Pada penelitian ini akan dilakukan desain *Fault Tolerant Control* (FTC) pada sistem pengereman mobil listrik yang menggunakan pendekatan model *quarter car* untuk mengatasi adanya kesalahan sensor dan aktuator. Desain FTC dilakukan dengan desain *observer*, lalu validasi model kemudian membandingkan performa SMC dan SMC-FTC dengan kesalahan sensor dan aktuator. Pada penelitian ini didapatkan hasil SMC-FTC dapat mengatasi adanya kesalahan sensor kendaraan sebesar 100%, kesalahan sensor roda sebesar 20% dan kesalahan aktuator sebesar 50%. SMC-FTC mampu mencapai *set point* slip rasio 0,2 dan berhenti lebih cepat dibandingkan sebelum dilengkapi FTC.

Kata Kunci: ABS, *Fault Tolerant Control*, *hybrid*, *observer*, *regenerative*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN OF FAULT TOLERANT CONTROL
OF HYBRID BRAKING SYSTEM
WITH FAULT AT SENSOR AND ACTUATOR
OF ELECTRIC VEHICLE**

Name : Yoanne Ayuningtias Sania
NRP : 0231164000016
Department : Engineering Physics FT-IRS - ITS
Supervisors : Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC.

ABSTRACT

Disturbances in vehicles while on the road are quite diverse, one of them is tire slip, this occurs due to emergency braking, so the wheels lock. Regenerative Anti-lock Braking System operates by preventing the wheels from locking up during braking. Traditional torque braking and motor torque braking (hybrid braking) can be used in braking system in electric vehicles. A Sliding Mode Controller (SMC) for ABS is developed to maintain the optimal slip value. Sensor and actuator fault can affect the performance of the SMC. The FTC design is carried out with the observer design, then validates the model then compares the performance of the SMC and FTSMC with sensor and actuator fault. In this research, the result of FTSMC can overcome vehicle sensor fault by 100%, wheel sensor fault by 20% and actuator fault by 50%. The FTSMC able to achieve a set point slip ratio of 0.2 and stop faster than SMC. FTSMC show the braking system can work well even with sensor and actuator fault.

Keywords: *ABS, Fault Tolerant Control, hybrid, observer, Sliding Mode Control.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)* PADA SISTEM Pengereman Hybrid Dengan Kesalahan Sensor dan Aktuator pada Mobil Listrik”**. Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang turut membantu baik moril maupun materiil dan berperan penting dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Bambang Lelono W, S.T., M.T dan Bapak Moch Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T selaku kepala Laboratorium Fisika Rekayasa yang telah memberikan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS
4. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
5. Bapak Dr. Ir Ali Musyafa' M.Sc. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
6. Kedua orang tua (Bapak Ahmad Latif dan Ibu Arminelly). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
7. Seluruh teman Tugas Akhir Kartini, Ira dan Indayu, terima kasih untuk semuanya.
8. Teman-teman seperjuangan Anin, Dinda dan Yunita yang telah menemani dan membantu penulis selama menempuh pendidikan di ITS.
9. Annisa Nafilata, Gading Diah, Anasthasia Putri, dan Nina Oktavidya yang telah mendukung dan memberi motivasi kepada penulis.

10. Diri sendiri karena tak pernah memutuskan untuk menyerah sesulit apa pun proses penyusunan Tugas Akhir ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 6 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Regenerative Antilock Braking System</i>	5
2.1.1 Sensor Kecepatan Roda.....	9
2.1.2 <i>Electronic Control Unit (ECU)</i>	9
2.1.3 <i>Unit Modulator</i>	10
2.1.4 <i>Unit Generator</i> untuk <i>Regenerative Braking</i>	11
2.2 <i>Sliding Mode Control</i>	13
2.3 <i>Fault Tolerant Control</i>	14
2.4 <i>Observer</i>	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Pemodelan Dinamik <i>Quarter Car Model</i>	20
3.1.1 Pemodelan Rem dari Aktuator Hidraulik pada <i>Quarter Car</i>	21

3.1.2	Pemodelan dari Aktuator Motor Pada <i>Quarter Car</i>	22
3.2	Perancangan <i>Sliding Mode Controller</i>	24
3.3	Perancangan <i>Observer</i>	26
3.4	Pemodelan <i>Fault Tolerant Control</i> (FTC).....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	Uji Pemodelan Anti-Lock Braking System	33
4.2	Uji Sistem <i>Closed Loop</i>	34
4.3	Hasil Uji Estimasi <i>Observer</i>	35
4.4	Uji Kesalahan Bias Sensor.....	37
4.5	Uji Kesalahan Bias Aktuator	41
4.6	Uji Kesalahan Bias Simultan Sensor dan Aktuator	43
4.7	Uji Kesalahan Sensitivitas	46
4.7.1	Uji Kesalahan Sensitivitas pada Sensor	46
4.7.2	Uji Kesalahan Sensitivitas Aktuator.....	49
4.7.3	Uji Kesalahan Sensitivitas pada Sensor dan Aktuator	50
4.8	Uji Ketidakpastian	51
4.9	Respon <i>State of Charge</i> pada Baterai	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....		59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan slip rasio roda (Lubbers, 2014).....	6
Gambar 2. 2	Dinamika gaya yang berkerja (Tur, Ustun & Tuncay, 2007)	7
Gambar 2. 3	Komponen khusus ABS (Aly et al., 2011).....	9
Gambar 2. 4	<i>Electronic Control Unit</i> (Jitesh, 2014).....	10
Gambar 2. 5	<i>Solenoid Valve</i> (WABCO, 2011).....	11
Gambar 2. 6	Kurva torsi-kecepatan dan pemetaan efisiensi dari motor (Guo et al., 2014).....	11
Gambar 2. 7	Diagram alir pada sistem pengereman <i>regenerative</i> di mobil listrik (Guo et al., 2014)	12
Gambar 2. 8	Interpretasi grafik SMC(S.Holkar & M. Waghmare, 2013)	13
Gambar 2. 9	Klasifikasi FTC (Patton, 1997)	14
Gambar 2. 10	Gambar struktur <i>observer</i> (Ogata, 2010)	16
Gambar 3. 1	<i>Flowchart</i> tugas akhir	19
Gambar 3. 2	Diagram blok <i>regenerative anti-lock braking system</i>	21
Gambar 3. 3	Skema diagram blok perancangan <i>sliding mode controller</i>	26
Gambar 3. 4	Diagram blok perancangan FTC	31
Gambar 4. 1	Grafik respon open loop sistem	33
Gambar 4. 2	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda tanpa dilengkapi ABS	34
Gambar 4. 3	Respon sistem close loop dengan SMC	34
Gambar 4. 4	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan setelah dilengkapi ABS	35
Gambar 4. 5	Estimasi kesalahan bias sensor kendaraan	35
Gambar 4. 6	Estimasi kesalahan bias pada aktuator	36
Gambar 4. 7	Estimasi Disturbance saat diberi kesalahan bias pada sensor roda	36
Gambar 4. 8	Slip rasio dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30%	37

Gambar 4. 9	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan bias sensor 30%	37
Gambar 4. 10	Slip rasio dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50%	38
Gambar 4. 11	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50%	38
Gambar 4. 12	Slip rasio dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100%	39
Gambar 4. 13	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100%	39
Gambar 4. 14	Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 7%	40
Gambar 4. 15	Grafik kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 7%	41
Gambar 4. 16	Slip rasio dengan kesalahan bias aktuator 10%	42
Gambar 4. 17	Respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator 10%	42
Gambar 4. 18	Slip rasio kesalahan bias aktuator 50%	42
Gambar 4. 19	Respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator 50%	43
Gambar 4. 20	Respon slip rasio kesalahan bias sensor 50% dan aktuator 5% ...	44
Gambar 4. 21	Respon kecepatan roda dan kendaraan kesalahan 50% sensor dan 5% aktuator.....	44
Gambar 4. 22	Respon slip rasio dengan kesalahan sensor 100% dan kesalahan bias aktuator 10%	45
Gambar 4. 23	Respon kecepatan kendaraan 100% sensor dan kesalahan bias aktuator 10%	45
Gambar 4. 24	Respon slip rasio dengan kesalahan sensitivitas sensor 1%	47
Gambar 4. 25	Respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan sensitivitas sensor kendaraan 1%	47
Gambar 4. 26	Respon rasio slip dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%	47
Gambar 4. 27	Respon kecepatan roda dengan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%	48

Gambar 4. 28	Respon slip dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%.....	49
Gambar 4. 29	Kecepatan kendaraan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%	49
Gambar 4. 30	Respon slip rasio dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 50% dan aktuator sebesar 10%	50
Gambar 4. 31	Kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 50% dan aktuator sebesar 10%	50
Gambar 4. 32	Respon slip rasio jika diberikan 4 penumpang	52
Gambar 4. 33	Kecepatan kendaraan dan roda jika diberikan 4 penumpang.....	52
Gambar 4. 34	Respon slip rasio jika diberikan 6 penumpang	53
Gambar 4. 35	Kecepatan kendaraan dan roda jika diberikan 6 penumpang.....	53
Gambar 4. 36	Grafik respon SOC <i>battery</i> dengan kesalahan aktuator dan sensor	54
Gambar 4. 37	Grafik respon SOC <i>battery</i>	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Parameter gaya yang bekerja saat pengereman (Guo et al., 2014)..	7
Tabel 2. 2	Parameter koefisien gesekan pada jenis permukaan aspal kering (Guo et al., 2014).....	8
Tabel 3. 1	Parameter simulasi pada motor (Guo et al., 2014).....	23
Tabel 4. 1	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan.....	40
Tabel 4. 2	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias aktuator.	43
Tabel 4. 3	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias aktuator dan sensor.....	46
Tabel 4. 4	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan.	48
Tabel 4. 5	Performansi uji ketidakpastian	53

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gangguan pada kendaraan ketika berada di jalan cukup beragam, salah satunya yaitu ban mengalami selip, ini terjadi karena pengereman yang terlalu kuat dan mendadak, sehingga roda terkunci dan berhenti yang dapat hilangnya kendali total kendaraan oleh pengendara sehingga mengakibatkan kecelakaan.

Pada kendaraan, fenomena selip yang tidak diinginkan dapat dicegah dengan menggunakan sistem kendali pengereman, salah satunya yaitu dengan dilengkapi *Anti-lock Braking System* (ABS) dimana fungsi ABS dapat meningkatkan keselamatan kendaraan dalam kondisi ekstrem, karena dapat memaksimalkan gesekan ban-jalan longitudinal dengan tetap menjaga gaya lateral yang besar yang memastikan kemampuan berkendara kendaraan (Co-investigator, 2013).

Desain dari sistem kendali pengereman sangat bergantung pada karakteristik sistem pengereman dan kinerja aktuator. Sistem ABS standar untuk kendaraan beroda dilengkapi dengan aktuator hidrolis tradisional pada dasarnya menggunakan aturan dasar *control logics* (Wellstead, 1997). Dengan adanya perkembangan teknologi sistem pengereman pada aktuator, salah satunya yaitu sistem pengereman elektro-hidrolis.

Pada kendaraan listrik, sistem ABS selain terdiri atas torsi pengereman gesekan tradisional, juga dilengkapi dengan torsi pengereman motor. Sebagai inovasi teknologi, *regenerative ABS* merupakan pendekatan efektif untuk memperbaiki performansi kendaraan. Namun karena *regenerative ABS* dibatasi oleh banyak faktor seperti kecepatan motor, *state of charge* dan temperatur dari baterai, maka sistem pengereman konvensional gesekan masih tetap digunakan bersama *regenerative ABS* (Peng et al., 2008). Algoritma pengereman *regenerative* yaitu dimana torsi motor dimanfaatkan sepenuhnya dan diadopsi untuk mendistribusikan gaya pengereman antara pengereman motor dan pengereman hidrolis (Guo et al., 2014). Sistem pengereman menggunakan *regenerative ABS* berfungsi merubah fungsi motor menjadi generator pada saat dilakukan

pengereman, sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dapat disimpan di dalam baterai atau digunakan saat menjalankan kendaraan. Sistem pengereman *regenerative* dapat mengubah energi kinetik menjadi energi listrik ketika terjadi perlambatan pada kendaraan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyimpanan energi yang berhasil dicapai oleh sistem pengereman *regenerative* berkisar 8% - 25% dari total energi yang digunakan, bergantung pada siklus pengaturan dan strategi kontrolnya (Jie et al., 2006).

Sensor dan aktuator merupakan komponen yang memegang peranan penting pada sistem pengereman *regenerative*. Kesalahan didefinisikan sebagai penyimpangan yang tidak diijinkan pada paling tidak satu karakteristik atau parameter sistem terhadap perilaku normalnya (R.Isermann, 1997). Kesalahan adalah sebuah keadaan yang dapat menyebabkan kerusakan sistem. Strategi kontrol yang mampu menoleransi dampak kesalahan yang muncul dikenal sebagai strategi *fault tolerant control* (FTC) (Patton, 1997). Sistem FTC dirancang untuk mengakomodasi kesalahan sehingga kesalahan minor (seperti kesalahan pada komponen aktuator atau sensor) pada komponen tidak menyebabkan kegagalan sistem.

Hasil penelitian dengan menggunakan desain FTC untuk sistem pengereman diantaranya yaitu (Swaroop et al., n.d.) yang menjelaskan bahwa kesalahan sensor dan aktuator pada sistem pengereman pada kendaraan yang dikontrol secara elektrik dapat menghambat kemampuan kendaraan untuk melambat dan penelitian selanjutnya yaitu (Tur et al., 2007) dimana penelitian ini membahas tentang pengereman *regenerative* pada mobil listrik sebagai ABS dengan aktuator elektro-hidrolik. Namun untuk penelitian-penelitian tersebut belum dilengkapi FTC dimana dapat mengakomodasi kesalahan sensor dan aktuator.

Berdasarkan uraian di atas, maka permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah merancang sebuah sistem pengereman hybrid pada mobil listrik sebagai *regenerative* ABS yang dilengkapi dengan sistem FTC sehingga setelah diberikan kesalahan sensor dan aktuator dapat terkompensasi.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dijelaskan diatas maka dapat dirumusan permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang *observer* untuk mendapatkan estimasi kesalahan sensor dan aktuator pada *regenerative ABS*?
2. Bagaimana merancang FTC yang dapat digunakan untuk mengakomodasi kesalahan sensor dan aktuator pada sistem *regenerative anti-lock braking system*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan dari perumusan masalah tersebut, maka tujuan tugas akhir ini adalah:

1. Merancang *observer* untuk estimasi kesalahan sensor dan aktuator pada *regenerative anti-lock braking system*.
2. Merancang sistem *Fault Tolerant Control (FTC)* pada *regenerative anti-lock braking system* untuk mengakomodasi kesalahan sensor dan aktuator.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini diantaranya:

1. Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah berupa *Quarter Car Model (QCM)* untuk jenis kendaraan berpenumpang.
2. *Slip ratio* mobil dijaga pada nilai 0,2 pada kondisi jalan aspal kering.
3. Kendaraan diasumsikan dengan kondisi pengereman sampai berhenti dan berada pada lintasan lurus di kondisi jalan datar, dan tidak bergelombang.
4. Motor dan aktuator hanya dimodelkan dalam sistem orde satu.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut

- BAB I PENDAHULUAN

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

- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab II dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS), metode *observer*, *Fault Tolerant Control* (FTC) dan perancangannya serta *Sliding Mode Control* (SMC).

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

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

- **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan FTC yang dibandingkan dengan hasil perancangan sistem pengendalian.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

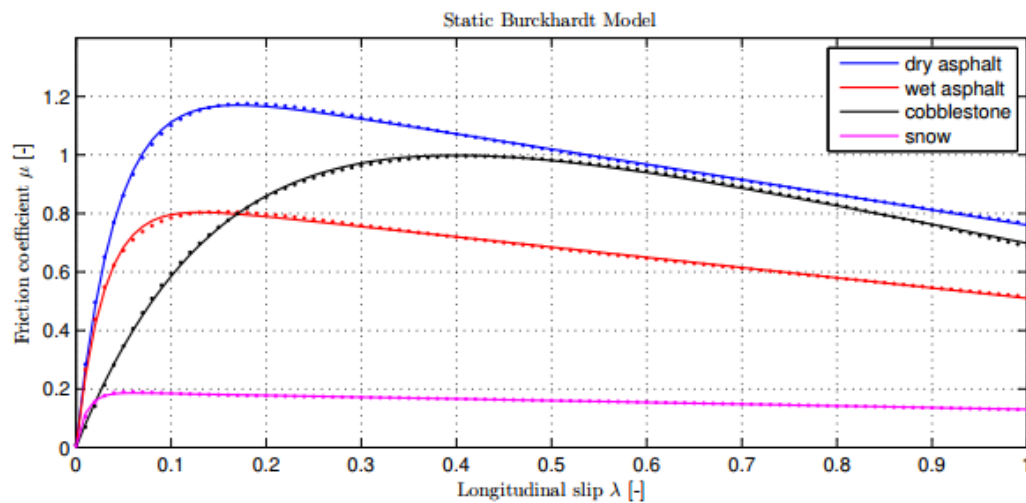
Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Regenerative Antilock Braking System*

Regenerative Antilock Braking System (ABS) digunakan pada mobil listrik untuk mencegah terjadinya slip dan penguncian pada ban saat pengereman. ABS berfungsi ketika terjadi proses pengereman, kendaraan dapat mencapai akselerasi minimum dengan optimal tanpa mempengaruhi stabilitas dan kemampuan kendali kemudi pada kendaraan dengan mengutamakan keselamatan yang maksimal (Aly et al., 2011), sehingga komponen ini adalah salah satu sistem keamanan (*safety*) pada mobil. ABS pertama kali diterapkan untuk kereta api ditahun 1943, kemudian diterapkan untuk kendaraan otomotif mobil pada tahun 1971 dengan tujuan utama mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas kendaraan, dan meningkatkan *steerability* ketahanan selama pengereman. Pada proses pengereman, terjadi *tractive force* yang dihasilkan oleh ban sebanding dengan gaya normal jalan yang bekerja pada ban. Perbandingan yang digunakan tergantung variasi atau koefisien jalan seperti kering, basah, bersalju, dan lain sebagainya, serta karakteristik lekukan jalan seperti jalanan yang berlubang, rata, dan lain sebagainya. ABS mengalami kemajuan teknologi dalam kemampuannya mengkonversi energi kalor yang dihasilkan pada saat proses pengereman menjadi energi listrik dan dapat disimpan di dalam baterai. Sistem pengereman inilah yang dinamakan *Regenerative Anti-lock Braking System* teknologi pengereman kendaraan untuk mencapai tingkat akselerasi minimum dengan optimal dan efisien tanpa mempengaruhi stabilitas dan kemampuan kendali kemudi kendaraan dengan tingkat keselamatan maksimum dan mampu menyimpan energi terbuang pada saat pengereman menjadi energi listrik (Guo et al., 2014) Pada penelitian yang dilakukan terdapat grafik fungsi non-linear antara *breaking effort coefficient* (μ) yaitu gesekan antara ban dan permukaan jalan dengan slip rasio roda (λ) pada kondisi jalanan tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan slip rasio roda (Lubbers, 2014)

Pada jurnal penelitian (Guo et al., 2014) nilai slip rasio roda (λ) memiliki persamaan yang didefinisikan sebagai berikut:

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

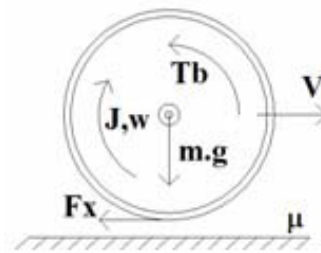
dimana:

ω = Kecepatan sudut pada roda (rad/s)

r = Jari-jari putaran roda (m)

v = Kecepatan kendaraan (m/s)

Saat kondisi normal berkendara, $v = \omega r$, slip rasio (λ) akan bernilai 0. Ketika saat terjadi pengereman yang parah, dapat didefinisikan $\omega = 0$ ketika $\lambda = 1$ dan hal tersebut mengakibatkan roda terkunci (*wheel lockup*). Roda terkunci dapat menyebabkan hilangnya kontrol terhadap kemudi kendaraan dan memperpanjang jarak pemberhentian kendaraan yang mana hal tersebut merupakan keadaan yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, ABS akan memanipulasi slip pada roda, sehingga dapat melakukan pergesekan maksimum dengan jalan dan menstabilkan kemudi kendaraan.



Gambar 2. 2 Dinamika gaya yang berkerja (Tur, Ustun & Tuncay, 2007)

Pemodelan gerak rotasi roda *quarter car model* yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 memiliki persamaan sebagai berikut:

$$F_x r - T_b = J \dot{\omega} \quad (2.2)$$

dengan:

T_b = torsi pengereman

J = momen inersia roda

ω = kecepatan angular roda (rad/s)

r = radius roda (m)

Parameter yang digunakan saat pengereman pada kendaraan *quarter car model* bekerja ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Parameter gaya yang bekerja saat pengereman (Guo et al., 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
m	Massa <i>quarter car model</i> (kg)	342.5
J	Momen inersia roda (kg.m ²)	3.5
R	Jari-jari putaran roda (m)	0.33
ct	rolling resistance (kg/s)	201.39
τh	Torsi hidrolik <i>time constant</i> (s)	0.01
v	Kecepatan Kendaraan (m/s)	27.78
ω	Kecepatan Roda (rad/s)	84.18

Mendapatkan nilai F_x dari persamaan (2.2). Sedangkan perhitungan λ didapatkan dari persamaan non-linear sebagai berikut.

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.3)$$

dimana:

- C_1 = nilai maksimum kurva gesek
 C_2 = bentuk kurva gesek
 C_3 = perbedaan nilai kurva gesek antara nilai maksimumnya dan nilai kurva gesek pada saat λ sama dengan 1
 C_4 = nilai karakteristik kelembaman.
 λ = *slip ratio*

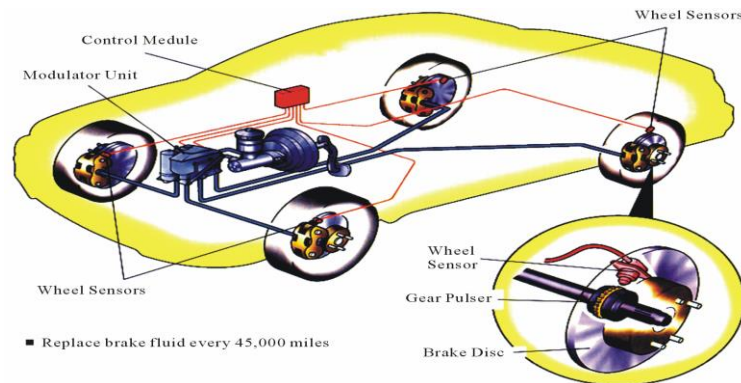
Parameter untuk mendapatkan perhitungan slip rasio yaitu dengan menggunakan koefisien gesekan pada jenis permukaan aspal kering yang ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Parameter koefisien gesekan pada jenis permukaan aspal kering (Guo et al., 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
C1	Nilai maksimul kurva gesekan	1.029
C2	Bentuk kurva gesekan	17.16
C3	Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$	0.523
C4	Nilai karakteristik kebasahan jalan	0.03

Berdasarkan tujuan utama adanya ABS didapatkan 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan dari kendaraan. Jarak henti dari kendaraan pada proses pengereman menjadi salah satu faktor penting. Parameter yang mempengaruhi jarak henti dari kendaraan adalah massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan, dan gaya pengereman. Jarak henti dari kendaraan dapat diperkecil dengan peningkatan gaya pengereman dikarenakan setiap jenis permukaan jalan memiliki koefisien puncak dari gaya pengereman tersebut, sehingga adanya ABS dapat mengontrol kendaraan untuk mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum. Adanya kebutuhan akan stabilitas dan ketahanan dari kendaraan yang dapat mempengaruhi ABS ini menjadikan kestabilan dari kendaraan adalah faktor yang penting untuk posisi kendaraan ketika

proses pengereman terjadi. Gambaran umum dari komponen *Anti-Lock Braking System* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Komponen khusus ABS (Aly et al., 2011)

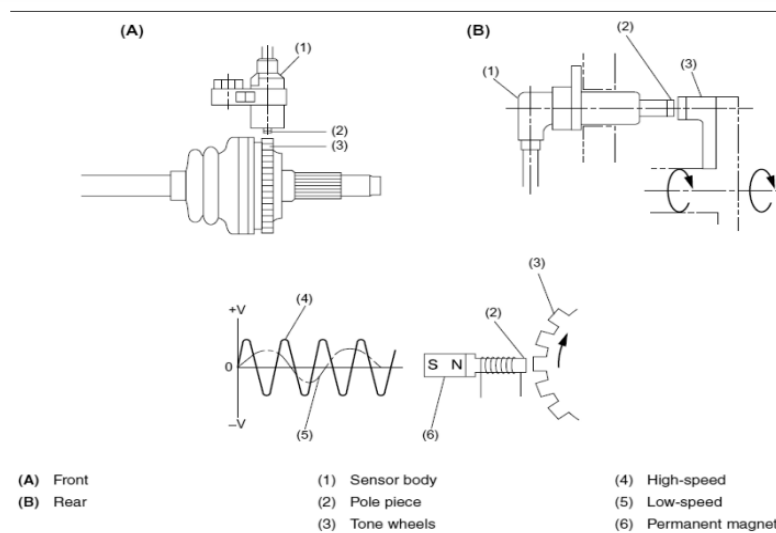
2.1.1 Sensor Kecepatan Roda

Sensor dengan tipe *magnetic pickup* diletakkan dekat dengan roda yang menghasilkan sinyal untuk mengindikasikan kecepatan roda kepada ECU. Pada umumnya, sebuah sensor menghasilkan sinyal elektrik dengan proporsional frekuensi untuk kecepatan roda. Sebuah permanen magnet dan melewati gigi besi dikombinasikan untuk menghasilkan sinyal (Wabco, 1999). Sensor kecepatan pada roda berfungsi mendeteksi kecepatan putaran masing- masing roda melalui sensor dan roda gigi (rotor) yang terpasang pada roda sebagai sumber input sistem. Kendaraan yang menggunakan ABS pada umumnya memiliki empat sensor dan terletak pada pinggiran roda di tiap sisi as. Mengenai peletakan sensor bergantung pada tipe suspensinya. Secara khusus, sensor pada kendaraan bersuspensi spring diletakkan pada as ganda bagian depan, sedangkan pada kendaraan bersuspensi udara (air suspension), sensor diletakkan pada bagian belakang.

2.1.2 *Electronic Control Unit (ECU)*

Sebuah *Elektronik Control Unit (ECU)* menggunakan sinyal sensor roda untuk menghitung kecepatan jalan dan kecepatan roda dan kecepatan roda ketika perlambatan maupun mengalami percepatan (WABCO, 2011). ECU memberikan

sinyal masukan untuk kontrol modul hidrolik yang selanjutnya akan dikirimkan tekanan fluida pada masing- masing jalur sistem pengereman untuk mencegah terjadinya slip. Secara umum ECU bertugas untuk menerima, menguatkan dan menyaring sinyal yang dikirim oleh sensor untuk 15 menghitung kecepatan dan akselerasi roda, lalu secara *logic* memutuskan roda ketika hendak mengunci dan mengaktifkan *valve* ABS pada kondisi dan waktu tertentu. Pada saat *valve* aktif, ECU dapat mengatur tekanan udara yang menuju ruangan rem. ECU dengan menggunakan kabel dapat menghubungkan antara komponen-komponen ABS lainnya seperti, *wheel sensor*, *modulator unit*, *power source*, *ground*, dan lain sebagainya. Gambaran umum untuk ECU ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Electronic Control Unit* (Jitesh, 2014)

2.1.3 *Unit Modulator*

Valve modulator ABS meregulasi tekanan udara dari tiap pengereman ABS yang dikendali. Ketika pengereman normal, *ABS modulator valve* tidak diaktifkan dan aliran udara melewati *valve* ABS kedalam *brake chambers*. Ketika ABS beroperasi, *valve* ABS akan memodulasi tekanan udara di dalam *brake chambers* untuk mengendalikan pengereman dan mencegah roda terkunci (Wabco, 1999). Selama proses pengereman, *valve* terbiasa untuk menyesuaikan tekanan pengereman silinder yang berhubungan dengan sinyal kendali yang diterimadari ECU (WABCO, 2011). Fungsi dari *valve* sendiri yaitu menerima tekanan udara dari

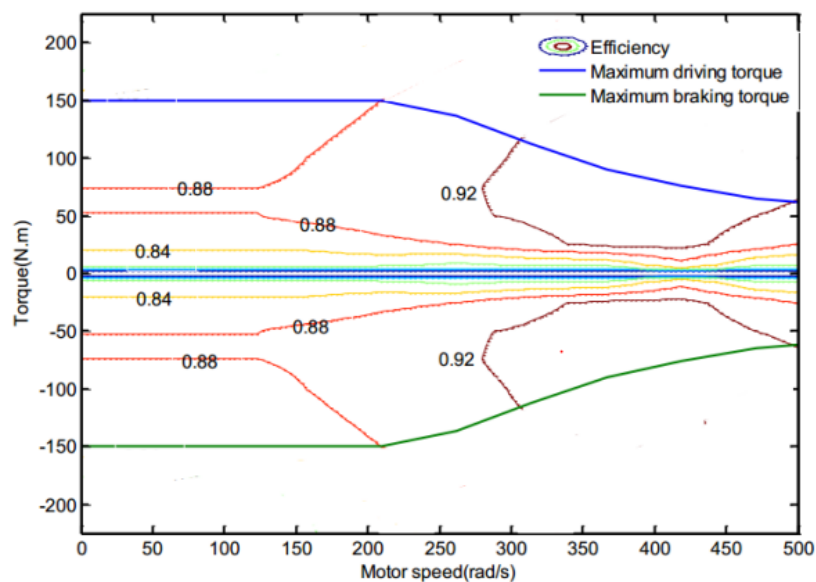
katup relay, mengirim tekanan udara ke bagian ruang rem, dan mengeluarkan tekanan udara. Ditunjukkan pada Gambar 2. 5.



Gambar 2. 5 Solenoid Valve (WABCO, 2011)

2.1.4 Unit Generator untuk Regenerative Braking

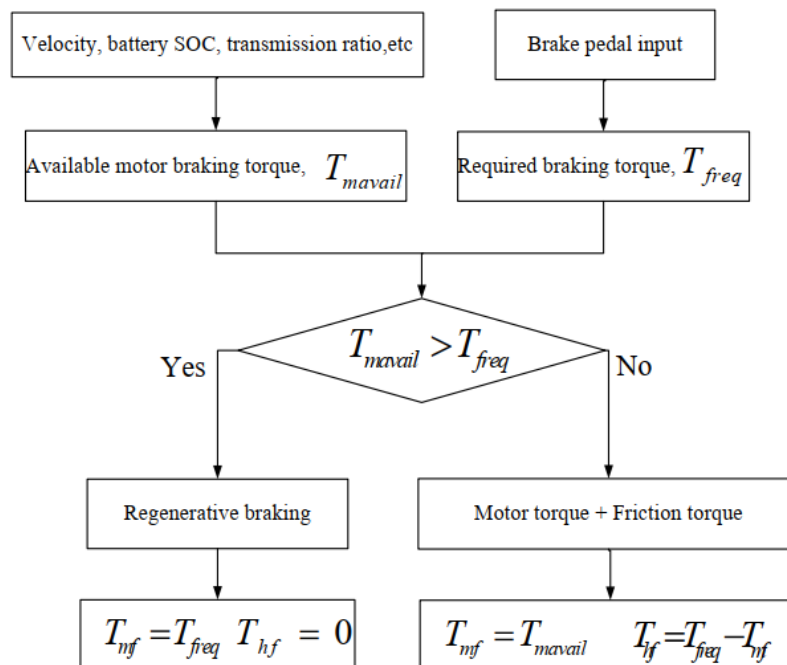
Regenerative braking adalah metode pengereman yang menggunakan energi mekanik dari motor dan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang akan dikembalikan ke baterai.



Gambar 2. 6 Kurva torsi-kecepatan dan pemetaan efisiensi dari motor (Guo et al., 2014)

Karakteristik respon dari torsi yang cepat dari motor dapat meningkatkan performansi antilock dari kendaraan. Pada Gambar 2.6 menunjukkan kurva maksimum torsi-speed dan pemetaan efisiensi dari motor di berbagai titik operasi.

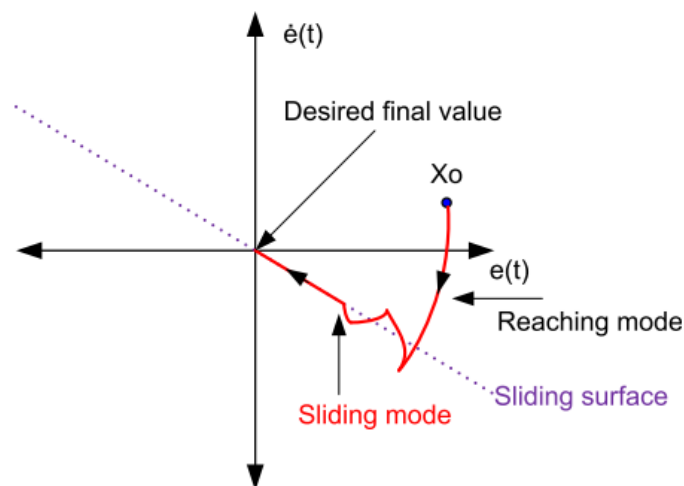
Berdasarkan jurnal pada penelitian (Guo et al., 2014) saat mode berkendara, motor bekerja sebagai penggerak roda dan saat mode *regenerative braking* bekerja sebagai generator yang akan menghasilkan listrik. Sehingga, pada saat torsi motor bernilai positif, maka motor akan mengambil daya dari baterai dan ketika torsi motor bernilai negatif, maka motor akan bekerja layaknya generator yaitu mengisi daya dari baterai. Pengisian baterai tersebut disebabkan oleh adanya tegangan balik pada motor atau dikenal dengan back EMF (electromagnetic force). Sistem *regenerative braking* pada mobil listrik diperlukan suatu algoritma untuk menentukan bagaimana mendistribusikan sistem pengereman antara pengereman dari motor yang menjadi generator untuk regenerative braking dan pengereman hidraulik pada situasi pengereman normal atau pengereman darurat. Gambar 2.7 menunjukkan diagram alir dari pengereman *regenerative* untuk menentukan bagaimana mendistribusikan sistem pengereman pada mobil listrik.



Gambar 2. 7 Diagram alir pada sistem pengereman *regenerative* di mobil listrik (Guo et al., 2014)

2.2 Sliding Mode Control

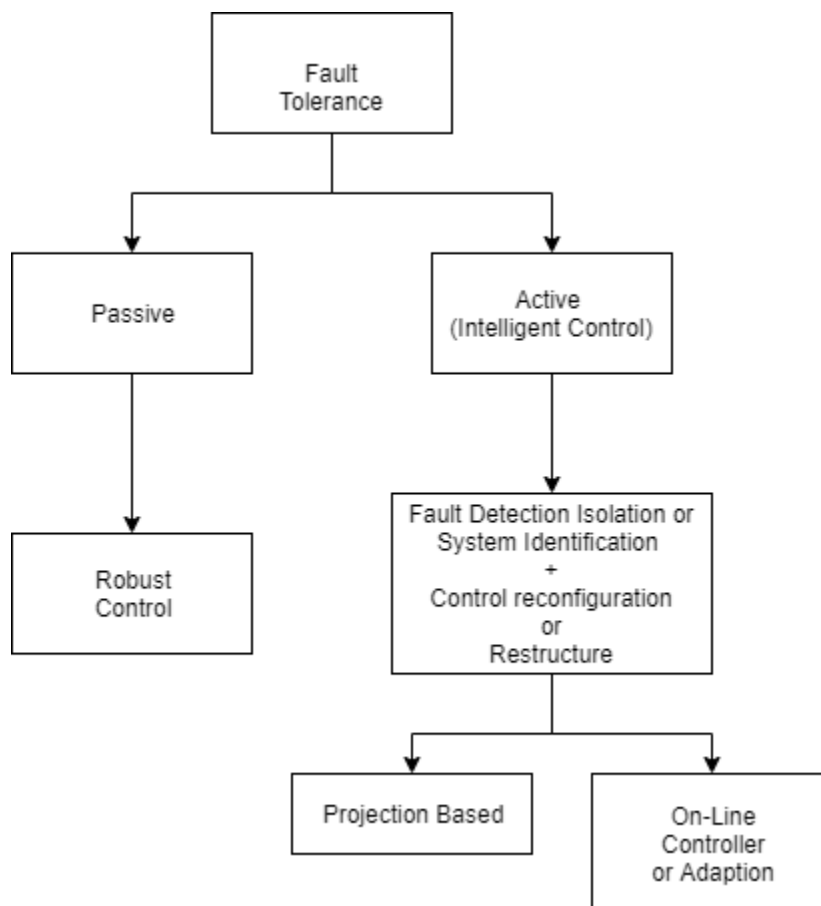
Pengendali jenis *sliding mode* adalah suatu jenis kendali modern dengan menggunakan pendekatan *state space* dalam menganalisa sebuah sistem yang kompleks (Nasir et al., 2010). SMC terkenal dengan kekuatan dan ketahanan pada *high tracking trajectory* dan *robust* untuk mengestimasi parameter, diagnosis kesalahan, dan kontrol. Metode SMC dikembangkan agar dapat membuat sistem kontrol pada model kompleks dengan dinamik non-linear derajat tinggi yang bekerja pada keadaan tidak tentu SMC digunakan pada ABS untuk mendapatkan *feedback on-off* berskala tinggi dalam penentuan aliran tekanan fluida yang terdapat pada distribusi tiap-tiap rem. SMC bekerja dengan mengendalikan *trajectory state* suatu sistem tertentu untuk menuju suatu permukaan licur (*reaching mode*) dan mempertahankan nilai tertentu. Penentuan nilai permukaan licur ini mempertimbangkan *state* dari suatu sistem dengan menggunakan fase bidang yang terdiri dari *error* dan turunan pertama dari *error* tersebut. Oleh karena itu 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 licur sepenuhnya. Gambaran dari interpretasi grafik SMC ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Interpretasi grafik SMC(S.Holkar & M. Waghmare, 2013)

2.3 *Fault Tolerant Control*

Kesalahan yang terjadi pada sistem dapat mempengaruhi kinerja dan penurunan kestabilan dalam sistem. Kesalahan yang terjadi biasanya terletak pada sensor, aktuator ataupun komponen lainnya. Untuk menghindari hal tersebut dilakukan perancangan baru untuk pendekatan model lebih efisiensi sehingga dapat mengendalikan sistem. Pendekatan ini adalah *Fault Tolerant Control* (FTC). FTC secara idealnya didampingi secara sistematis dan pendekatan yang terintegrasi untuk merancang nya yang dimana digunakan desain FTC ini untuk mengkompensasi kesalahan minor (kesalahan sensor dan kesalahan aktuator) yang diterima oleh sistem, sehingga kestabilan sistem dapat terjaga dan kegagalan sistem dapat dicegah. Klasifikasi pada strategi *Fault Tolerant Control* ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Klasifikasi FTC (Patton, 1997)

Kesalahan biasa terjadi pada aktuator, sensor atau bahkan komponen lainnya yang menyebabkan menurunnya performa kinerja sistem. Untuk mengatasi hal

tersebut, telah dikembangkan pendekatan baru untuk mengendalikan sistem. Pendekatan baru ini dilakukan dengan cara menolerir kerusakan komponen sambil mempertahankan stabilitas dan kinerja yang diinginkan. Metode ini sangat bermanfaat jika diaplikasikan dalam sistem keamanan yang kritis, seperti sistem pada pesawat terbang, sistem pengolahan pada pabrik-pabrik industri, dan lain-lain. Pendekatan baru dalam sistem kontrol adalah dengan menerapkan *Fault Tolerant Control* (FTC). Sistem *Fault Tolerant Control* adalah suatu sistem pengendali yang mampu mentoleransi kesalahan dalam suatu sistem untuk meningkatkan kinerja yang diinginkan. FTC adalah sebuah kombinasi kompleks dari 3 bidang yaitu *Fault Detection Isolation* (FDI), kontrol rekonfigurasi dan kontrol *robust* (Patton, 1997). Dalam skema FTC, FDI akan mendeteksi dan mencari sumber kesalahan. Informasi yang diperoleh akan diteruskan ke mekanisme untuk memulai rekonfigurasi. Kontroler yang sudah direkonfigurasi akan mencoba untuk beradaptasi dengan kesalahan yang terjadi sehingga stabilitas dan tingkat kinerja dari sistem akan tetap baik.

2.4 *Observer*

Observer mengestimasi state variabel berdasarkan pada pengukuran output dan variabel kendali. *Observer state* dapat didesain apabila kondisi keteramatan atau *observability* dipenuhi (Ogata, 2010). Ditinjau dari sistem, ruang keadaan didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.2)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.3)$$

dengan:

A = matriks keadaan yang mempresentasikan fungsi alih plant

B = matriks nilai masukan

C = matriks output

D = matriks *disturbance*

u = masukan kendali

x = vektor keadaan

y = vektor nilai keluaran/nilai masukan

Susunan *observer* didapatkan dari pemodelan matematika yang pada dasarnya didapatkan dari sistem *plant*, kecuali ketika ditambahkan istilah tambahan berupa estimasi kesalahan untuk dikompensasi yang terdapat ketidakpastian pada matriks A dan B dan kurangnya inisial *error*. Estimasi kesalahan merupakan perbedaan antara output pengukuran dan output estimasi. Inisial *error* adalah perbedaan antara *state* inisial dan *state* estimasi inisial. Sehingga pemodelan matematis dari observer dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_e(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.4)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (2.5)$$

dengan:

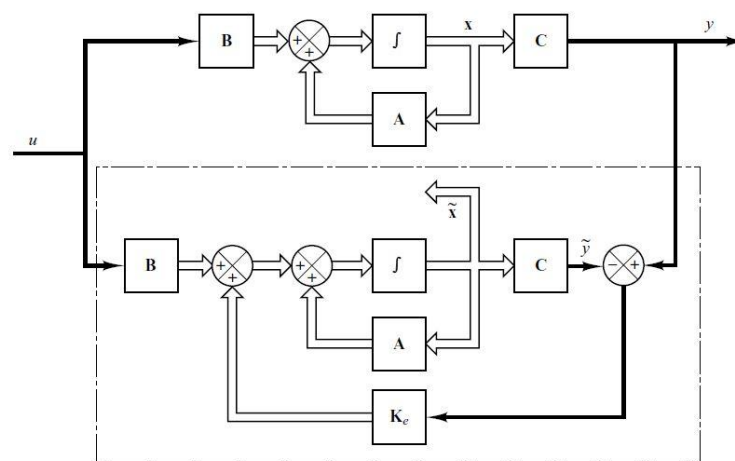
$\hat{x}(t)$ = estimasi *state* $\dot{x}(t)$

K_e = *gain observer*

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

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

Diagram blok sistem dan *observer* state digambarkan seperti pada Gambar 2.10 di bawah. Dalam gambar ini, *observer* mengandung nilai *gain observer*, yang dimana fungsi dari *gain observer* untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran y aktual dan y estimasi sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata, 2010).



Gambar 2. 10 Gambar struktur *observer*(Ogata, 2010)

Kesalahan sensor dan aktuator dapat didefinisikan sebagai penambahan masukan vektor. Ruang keadaan bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (2.6) dan (2.7).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a \quad (2.6)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s \quad (2.7)$$

Dimana F_a dan F_s merupakan matriks kesalahan aktuator dan kesalahan sensor. Jenis kesalahan sensor dan aktuator dimodelkan pada persamaan berikut:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta \quad (2.8)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.9)$$

Dimana $s_f(t)$ merupakan sinyal aktual, α dan β merupakan konstantan penambahan kesalahan $f(t)$ termasuk $f_a(t)$ dan $f_s(t)$.

Melalui persamaan (2.9) dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = A_z [y(t) - z(t)] \quad (2.10)$$

$$\dot{z}(t) = A_z [Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.11)$$

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 (2.11) dapat mendefinisikan persamaan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan persamaan matriks yang sudah di ekspansi. Persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.12).

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \quad (2.12)$$

Dari persamaan (2.6) hingga (2.11) disubstitusikan pada persamaan (2.12) menjadi berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

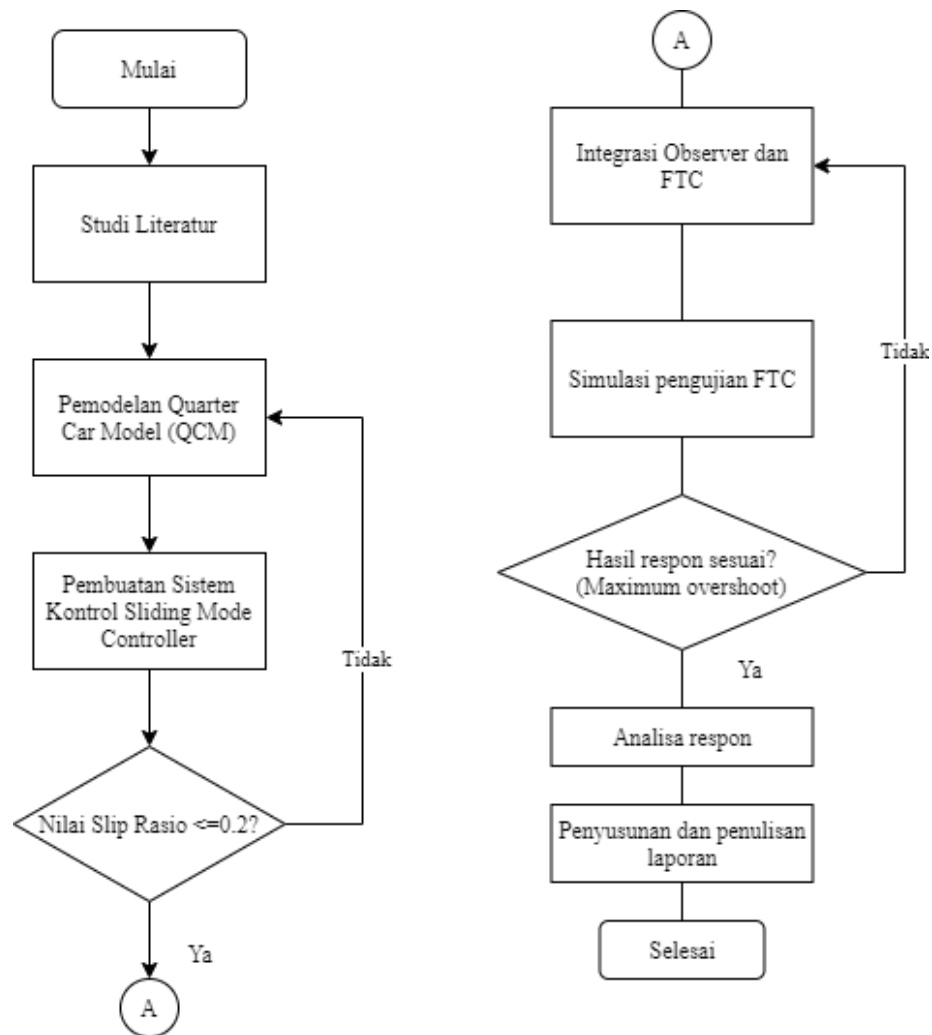
Untuk mendapatkan nilai dari *gain observer* maka dipakai ekspansi melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan persamaan (2.14).

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_a \hat{x} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x (Y - \hat{Y}) \quad (2.14)$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui *flowchart* yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 *Flowchart* tugas akhir

a. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari referensi untuk melakukan pengerjaan dan penyusunan tugas akhir. Oleh karena itu diperlukan pemahaman mendalam mengenai *regenerative antilock braking system*, *Fault Tolerant Control System (FTCS)*, *sliding mode controller*. Studi literatur dilakukan dengan mencari sumber referensi melalui buku dan

jurnal penelitian yang sudah pernah dilakukan terkait poin-poin pada topik tugas akhir.

b. *Pemodelan Quarter Car Model*

Pemodelan dari *Quarter Car Model* didapatkan dari studi literatur yang telah dilakukan sebagai plant yang akan dikontrol dibuat simulasi dengan *software* MATLAB.

c. *Perancangan Kontroler*

Setelah dilakukan pemodelan plant QCM maka dilakukan perancangan *Sliding Mode Controller* yang bertujuan untuk menentukan nilai parameter yang mampu menghasilkan respon yang baik pada sistem.

d. *Perancangan Observer & Pengujian Observer*

Perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan yang ada. Perancangan berdasarkan berdasarkan pada pemodelan matematis yang digunakan. Uji *observer* dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan bahwa *observer* yang dirancang sudah merepresentasikan plant yang telah dimodelkan dalam mengestimasi kesalahan. Hasil uji *observer* dinyatakan dengan membandingkan kesalahan aktual dengan hasil *observer*

e. *Perancangan & Uji Performansi FTC*

Setelah dilakukan perancangan *observer* selanjutnya dilakukan uji performansi sistem dengan memberikan bias pada sensor dan aktuator.

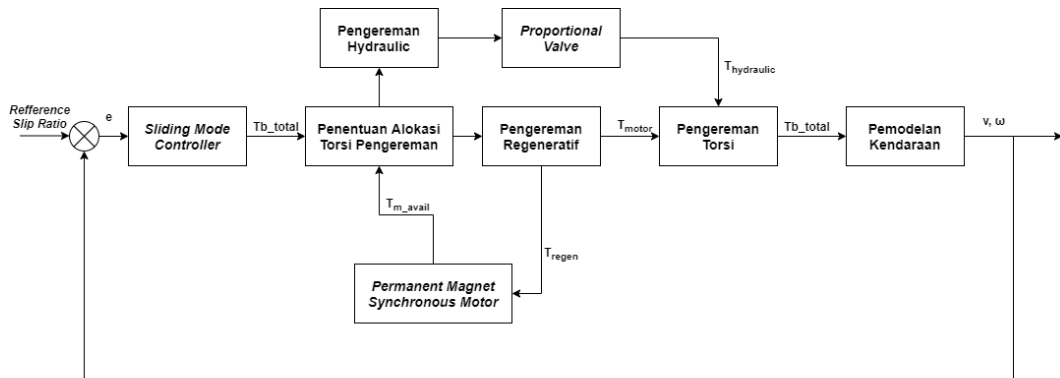
f. *Pembuatan Laporan*

Pembuatan laporan dilakukan setelah melakukan uji performansi dimana laporan tugas akhir berisi analisa dan hasil performansi. Selain itu laporan juga berisi mengenai teori penunjang dan dokumentasi selama proses pengerjaan tugas akhir berupa tulisan ilmiah.

3.1 *Pemodelan Dinamik Quarter Car Model*

Pada penelitian yang sudah dilakukan (Guo et al., 2014) dan (Tur et al., 2007), *Anti-lock Braking System (ABS)* memiliki tiga model matematis yaitu *quarter car*, *half car*, dan *full car model*, sedangkan untuk tugas akhir ini menggunakan *quarter car model (QCM)*, dimana *quarter car model* adalah representasi dari mobil dengan

satu roda. *Quarter car model* diasumsikan ketiga roda lainnya memiliki karakteristik dan sistem yang sama dengan satu roda.



Gambar 3. 2 Diagram blok *regenerative anti-lock braking system*

3.1.1 Pemodelan Rem dari Aktuator Hidraulik pada *Quarter Car*

Quarter Car Model merupakan salah satu pemodelan pengereman yang umum dan menjelaskan kriteria satu roda yang memiliki seperempat massa dari kendaraan. Pemodelan dinamik gerak longitudinal kendaraan untuk sistem pengereman pada *quarter car model* menggunakan Hukum Newton II. Hukum Newton II yang menyatakan bahwa percepatan benda selalu berbanding lurus dengan gaya yang bekerja pada suatu benda dan berbanding terbalik dengan massa benda. Gaya-gaya yang bekerja pada sistem pengereman untuk *quarter car model* ditunjukkan pada Gambar 3.2 adalah gaya *frictional* (F_x). Persamaan gaya yang terjadi ditunjukkan dengan persamaan berikut ini.

$$ma = \sum F \quad (3.1)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -F_x \quad (3.2)$$

Dengan nilai gaya yang bekerja pada *quarter car model* antara lain sebagai berikut.

$$F_x = \mu mg \quad (3.3)$$

dengan:

m = Massa kendaraan *quarter car model* (kg)

g = Gaya gravitasi (m/s^2)

- v = Kecepatan kendaraan (m/s)
 μ = Koefisien gesek permukaan jalan

Nilai *slip ratio* sebagai acuan bernilai 0.2 berdasarkan (Tur et al., 2007). *Slip ratio* mewakili perbedaan antara kecepatan roda dan kecepatan relatif pada kendaraan terhadap permukaan jalan, yang dapat dinyatakan pada persamaan (2.1).

Setelah dilakukan pemodelan kendaraan, tahap selanjutnya yaitu memodelkan aktuator hidraulik dengan skema dari *ABS hydraulic brake system*. Aktuator yang digunakan pada sistem ini adalah tipe *proportional valve*. Pemodelan aktuator hidraulik menggunakan fungsi orde satu.

$$G = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (3.4)$$

Dimana nilai k merupakan gain dari system hydraulic dan τ merupakan konstanta waktu torsi *hydraulic*.

3.1.2 Pemodelan dari Aktuator Motor Pada *Quarter Car*

Torsi motor memiliki peran penting dalam sistem *regenerative ABS* yang dimana motor akan digunakan sebagai penggerak kendaraan sedangkan saat pengereman *regenerative* motor akan digunakan sebagai generator yang akan menghasilkan listrik.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi performa torsi motor pada sistem pengereman *regenerative* yang dihasilkan oleh motor adalah SOC (*State of Charge*) dari baterai, kecepatan sudut motor, dan temperatur baterai (Jie et al., 2006). Pada penelitian ini faktor temperatur baterai akan diabaikan. Tujuan dari SOC adalah untuk menjaga agar baterai dapat terhindar dari *overcharging* yang dapat mempengaruhi umur baterai. Faktor bobot K_{soc} pada SOC dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K_{soc} = \begin{cases} 1 & SOC \leq 0,8 \\ 10(0,9 - SOC) & 0,8 < SOC \leq 0,9 \\ 0 & 0,9 < SOC < 1 \end{cases} \quad (3.5a)$$

Sedangkan faktor yang dapat mempengaruhi kecepatan sudut motor dari rendahnya gaya elektrik motor (voltase) yang dihasilkan pada saat kecepatan rotasi

rendah. Faktor bobot K_{ω_m} pada kecepatan sudut motor dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$K_{\omega_m} = \begin{cases} 0 & \omega_m \leq 50 \text{ rad/s} \\ (\omega_m - 50)/50 & 50 < \omega_m \leq 100 \text{ rad/s} \\ 1 & 0,9 < 100 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (3.5b)$$

Setelah SOC baterai dan kecepatan sudut motor diketahui, torsi motor yang menjadi generator Ketika adanya pengereman, $T_{generator}$ dapat dihitung sebagai berikut.

$$T_{generator} = \frac{T_{mmax} \cdot I \cdot K_{\omega_m} \cdot K_{soc}}{\eta_t} \quad (3.6)$$

dimana:

T_{mmax} = Torsi motor maksimum

I = Rasio transmisi

η_t = Efisiensi transmisi

Tabel 3. 1 Parameter simulasi pada motor (Guo et al., 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
T_{mmax}	Torsi motor maksimum	150 N.m
I	Rasio transmisi	4,1
η_t	Efisiensi transmisi	0,95

Sehingga dengan adanya pemodelan rem pada actuator hidraulik dipersamaan 3.4 dan persamaan motor pada persamaan 3.6 diperoleh persamaan 2.2 menjadi berikut.

$$F_x r - (T_h + T_g) = J \dot{\omega} \quad (3.7)$$

$$F_x r - T_b = J \dot{\omega} \quad (3.8)$$

dengan:

T_b = torsi hidraulik dan torsi generator

J = momen inersia roda

ω = kecepatan angular roda (rad/s)

3.2 Perancangan *Sliding Mode Controller*

Pemodelan matematis dari sistem sangat diperlukan dalam perancangan *Sliding Mode Control*. Hal pertama yang dilakukan untuk merancang sliding mode controller adalah menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*) agar dapat memenuhi spesifikasi dari desain plan. Selanjutnya adalah dengan merekonstruksi gain *switched feedback* agar dapat mengendalikan *trajectory state plant* menuju *sliding surface*. Persamaan (3.9) sampai dengan (3.11) merupakan persamaan yang mempresentasikan model matematis gerak longitudinal dan gerak rotasi dari roda pada sistem ABS.

$$ma = \Sigma F \quad (3.9)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -F_x \quad (3.10)$$

$$F_x r - T_b = J\dot{\omega} \quad (3.11)$$

Persamaan rasio slip dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda_i = \frac{v - \omega r}{v} = 1 - \frac{\omega r}{v} \quad (3.12)$$

Kemudian persamaan (3.12) dideferensialkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{R\dot{\omega}}{v} + \frac{R\omega \dot{v}}{v^2} \quad (3.13)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.10) dan persamaan (3.11) pada persamaan (3.13) sehingga didapatkan:

$$\dot{\lambda}_i = -F_x \frac{r^2}{Jv} + \frac{rT_b}{Jv} - \frac{r\omega}{mv^2} F_x \quad (3.14)$$

Persamaan untuk *sliding surface* adalah sebagai berikut:

$$S(t) = \lambda_{setpoint}(t) - \lambda(t) \quad (3.15)$$

Dalam tugas akhir ini digunakan pendekatan *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012), yang dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.16)$$

dengan:

ε = konstanta *robustness* sistem

k = gain maksimum output controller

Fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

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

Disubstitusikan persamaan (3.13) dan (3.14) pada persamaan (3.15), sehingga didapatkan:

$$\dot{\lambda}_{setpoint} - \left(-F_x \frac{r^2}{Jv} + \frac{r T_b}{Jv} - \frac{r\omega}{mv^2} F_x \right) = -\varepsilon \text{sgn}(S) - kS \quad (3.18)$$

Sehingga didapatkan persamaan T_{breq} sebagai berikut:

$$T_{breq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mv} \hat{F}_x + \frac{Jv}{r} [\varepsilon \text{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.19)$$

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

$$T_{breq} = T_{beq} + T_{bhit} \quad (3.20)$$

Dengan T_{beq} merupakan estimasi input kontrol ekivalen berdasarkan persamaan (3.18) dapat diperoleh sebagai:

$$T_{beq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mv} \hat{F}_x \quad (3.21)$$

\hat{F}_x merupakan nilai estimasi dari gaya friksi. Dalam persamaan gaya friksi yang ditunjukkan pada persamaan (3.2) dan (3.3) mengandung ketidakpastian dalam massa kendaraan (m) yang sering berubah berdasarkan jumlah penumpang dan berat bagasi, serta koefisien gaya gesek yang tergantung pada kondisi permukaan jalan. Rentang variasi dari m dan μ didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m_{min} &\leq m \leq m_{max} \\ \mu_{min} &\leq \mu \leq \mu_{max} \end{aligned} \quad (3.22)$$

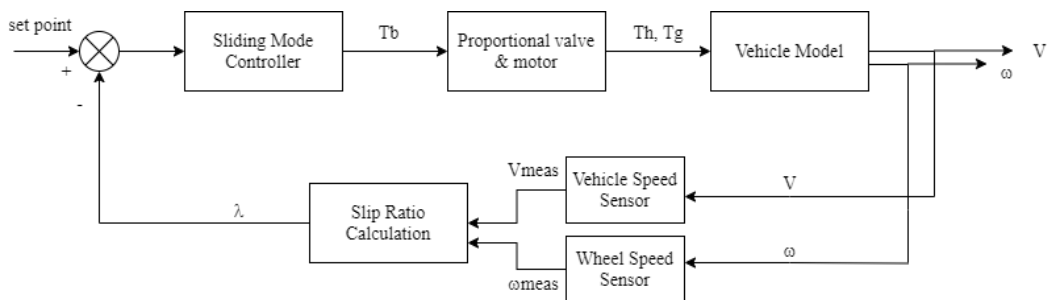
T_{bhit} adalah input kontrol *hitting* untuk memenuhi *sliding condition* terjadi ketidakpastian dinamik pada T_{beq} dengan ε merupakan gain *sliding* dan k merupakan gain *error*, Persamaan dari T_{bhit} berdasarkan persamaan (3.19) di definisikan sebagai berikut:

$$T_{bhit} = \frac{Jv}{r} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.23)$$

dengan:

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

Diagram blok dari SMC untuk *Regenerative ABS* ditunjukkan pada Gambar 3.3 dengan outputan dari kontroller merupakan sinyal kontrol berupa torsi pengereman (T_b) yaitu terdiri dari T_{beq} yang merupakan estimasi input kontrol ekuivalen dan T_{bhit} merupakan input *control hitting* untuk memenuhi *sliding condition* terjadi ketidakpastian dinamik pada T_{beq} . Lalu keluaran *slip ratio calculation* membandingkan nilai yang didapatkan dari hasil FTC dengan *input set point* 0,2, yang dimana perbedaan nilai tersebut atau error akan menjadi input kontroller atau *sliding mode controller*.



Gambar 3.3 Skema diagram blok perancangan *sliding mode controller*

3.3 Perancangan *Observer*

Langkah pertama sebelum merancang FTC adalah merancang model *state space* yang dapat mempresentasikan model system *plant* ABS. Pemodelan dimulai

dengan mengubah fungsi alih dari kecepatan gerak rotasi dan persamaan torsi kedalam bentuk *state space* sebagai berikut:

Kecepatan kendaraan didefinisikan sebagai berikut:

$$-F_x = m\dot{v} \quad (3.25a)$$

$$\dot{v} = -F_x/m \quad (3.25b)$$

Kecepatan gerak rotasi didefinisikan sebagai berikut:

$$F_x r - T_b = J\dot{\omega} \quad (3.26a)$$

$$\dot{\omega} = (F_x r - T_b)/j \quad (3.26b)$$

Persamaan dinamik torsi hidrolik sebagai berikut:

$$\frac{T_h(s)}{T_{href}(s)} = \frac{1}{\tau_h s + 1}$$

$$\frac{T_h(s)}{T_{href}(s)} = \frac{1}{0,01s + 1}$$

$$T_h(s) \cdot 0,01s + T_h(s) = T_{href}(s)$$

$$T_h(s) \cdot 0,01s = T_{href}(s) - T_h(s)$$

$$\dot{T}_h(s) = 100 T_{href}(s) - 100 T_h(s) \quad (3.27)$$

Dengan persamaan $T_b = T_h + T_g$ diubah ke bentuk *state space* maka persamaannya sebagai berikut:

$$\dot{T}_b = \dot{T}_h + \dot{T}_g \quad (3.38)$$

Kemudian persamaan (3.27) disubstitusikan ke bentuk persamaan (3.28), sehingga menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\dot{T}_b = 100T_{href} - 100T_b + 100T_g \quad (3.29)$$

Berdasarkan persamaan model sistem *observer* yang telah disusun, persamaan (2.2) dapat dituliskan kembali persamaan ruang keadaan plant dalam bentuk berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{T}_b \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100 & 0 \\ 0 & -1/j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/m & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 100 \\ r/j & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_{href} \\ T_m \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

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

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

State output pada persamaan (2.3) dapat dituliskan:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

dengan:

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

Gaya friksi F_x yang tidak diketahui nilainya dan tidak dapat diukur, dapat dianggap sebagai gangguan pada model ini sehingga diperlakukan seperti kesalahan yang mempengaruhi persamaan state agar persamaan ruang keadaan ABS menjadi linier. Algoritma *observer* untuk mengestimasi F_x dibangun dengan menggunakan struktur PI yaitu kompensator PI digunakan pada tahap *observer* loop tertutup. Oleh karena itu, *observer* PI dapat digunakan untuk memperkirakan nilai *actual* dari state sistem. Oleh karena itu, *observer* PI dapat digunakan untuk mengestimasi nilai sebenarnya dari state sistem melalui gain proporsional (P_ω) dan *disturbance* melalui gain integral ($K_{i\omega}$). Sehingga model *observer* untuk gerak rotasi roda didefinisikan sebagai:

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{j} (-\hat{T}_b + P_\omega (\omega_{meas} - \hat{\omega}) + \hat{F}_x r) \quad (3.32)$$

$$\dot{\hat{F}}_x = K_{i\omega} (\omega_{meas} - \hat{\omega}) \quad (3.33)$$

Kesalahan sensor vehicle speed f_{sv} dapat muncul di persamaan state, maka pada persamaan kendaraan digunakan *augmented state* seperti persamaan (3.34) dimana A_z merupakan gain z :

$$\dot{z} = A_z [V_{meas} - z] \quad (3.34)$$

Gain K_i dan gain K_p didapatkan menggunakan metode *tuning lqr, trial and error*, persamaan *observer* untuk gerak kendaraan yang berlaku adalah :

$$\dot{\hat{v}} = \frac{1}{m}(-\hat{F}_x + P_v(z - \hat{z})) \quad (3.35)$$

$$\dot{\hat{f}}_{ah} = K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.36)$$

$$\dot{\hat{z}} = A_z(\hat{v} + \hat{f}_{sv} - z) + K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.37)$$

Kesalahan aktuator hidrolik f_{ah} muncul didalam persamaan state dan substitusi dari persamaan model dinamik sistem torsi pengereman pada persamaan (3.30) sebagai berikut :

$$\dot{\hat{T}}_h = -100\hat{T}_b + 100(T_{hdem} + P_{Tb}(T_h - \hat{T}_h) + \hat{f}_{ah}) + 100T_m \quad (3.38)$$

$$\dot{\hat{f}}_{ah} = K_{ih}(T_h - \hat{T}_h) \quad (3.39)$$

Pada persamaan diatas disubstitusikan pada persamaan (2.14) sehingga menjadi persamaan ruang keadaan baru sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{v}} \\ \dot{\hat{z}} \\ \dot{\hat{T}}_h \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_z & -P_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{v} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 100 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{hdem} \\ T_m \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} r/j & 0 & 0 \\ -1/m & 0 & 0 \\ 0 & P_z & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{F}_x \\ \hat{f}_{sv} \\ \hat{f}_{ah} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} P_\omega/j & 0 & 0 \\ 0 & P_v/m & 0 \\ 0 & K_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 100 \cdot P_{Tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\omega \\ e_z \\ e_{T_b} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.40)$$

dengan:

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

$$\hat{X}_a = \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{V} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_h \end{bmatrix}$$

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

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

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

$$K_p = \begin{bmatrix} P_\omega/j & 0 & 0 \\ 0 & P_V/m & 0 \\ 0 & K_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 100 \cdot P_{Tb} \end{bmatrix}$$

Persamaan (2.5) yaitu persamaan state output menjadi sebagai berikut.

$$y = \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{V} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_h \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

dengan:

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

Persamaan (3.33), (3.36), dan (3.39) disubstitusikan pada persamaan (3.42) sehingga menjadi persamaan (3.43)

$$\dot{\hat{F}}_a = K_i \cdot e \quad (3.42)$$

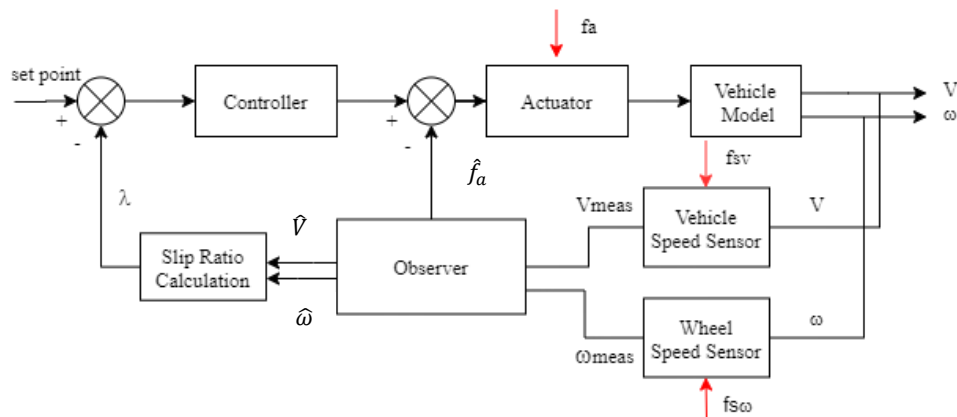
$$\dot{\hat{F}}_a = \begin{bmatrix} \dot{\hat{F}}_x \\ \dot{\hat{f}}_{sv} \\ \dot{\hat{f}}_{ah} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i\omega} & 0 & 0 \\ 0 & K_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\omega \\ e_z \\ e_{Tb} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

dengan:

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

3.4 Pemodelan *Fault Tolerant Control* (FTC)

Pemodelan strategi sistem *fault tolerant control* (FTC) dilakukan dengan mendesain *observer* menggunakan parameter variabel pengukuran berupa hasil keluaran kecepatan dari angular roda dan kecepatan dari kendaraan yang diukur menggunakan *sensor wheel speed* dan *sensor vehicle speed*. Sehingga perancang dapat membandingkan performansi yang telah diberikan kesalahan dan bagaimana rekonfigurasi yang dapat dilakukan oleh suatu sistem apabila diberikan kesalahan sensor maupun kesalahan pada aktuator. Diagram blok dari sistem *observer* dengan adanya kesalahan pada aktuator dan sensor ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3. 4 Diagram blok perancangan FTC

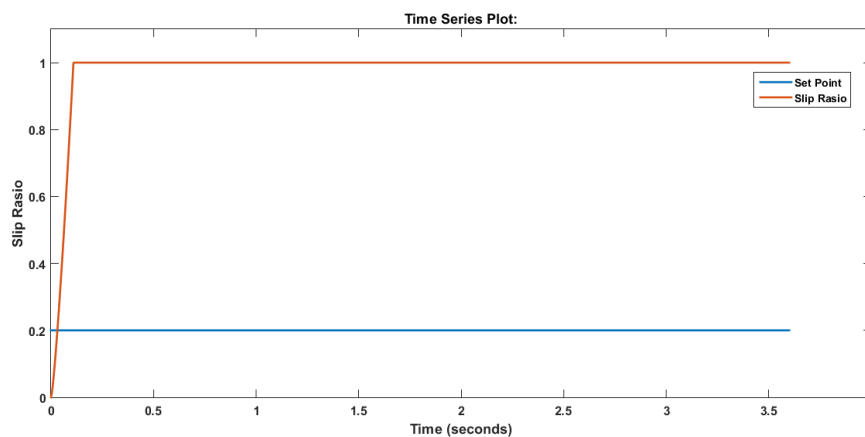
Halaman ini memang dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

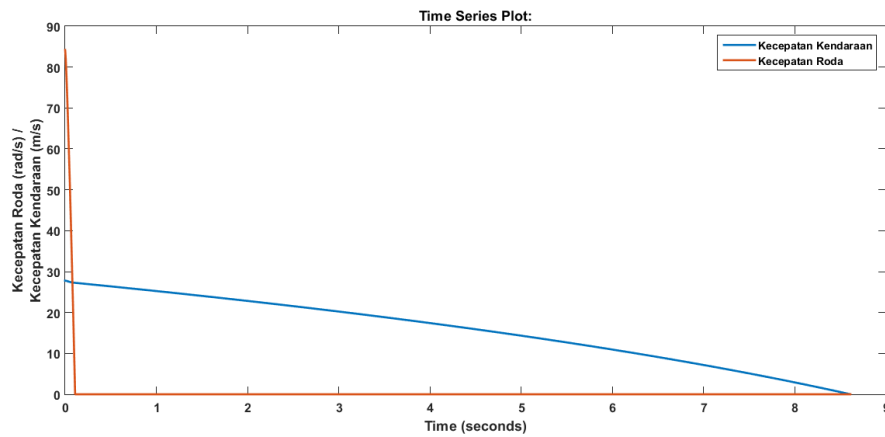
4.1 Uji Pemodelan Anti-Lock Braking System

Pada Pengujian pemodelan pertama yaitu ABS dilakukan uji loop terbuka yang digunakan untuk pengujian *quarter car model*. Rasio slip akan terus naik hingga nilai maksimal yaitu pada nilai 1 yang menunjukkan kendaraan kehilangan kemampuan *steerability*-nya karena roda terkunci sempurna.



Gambar 4. 1 Grafik respon *open loop* sistem

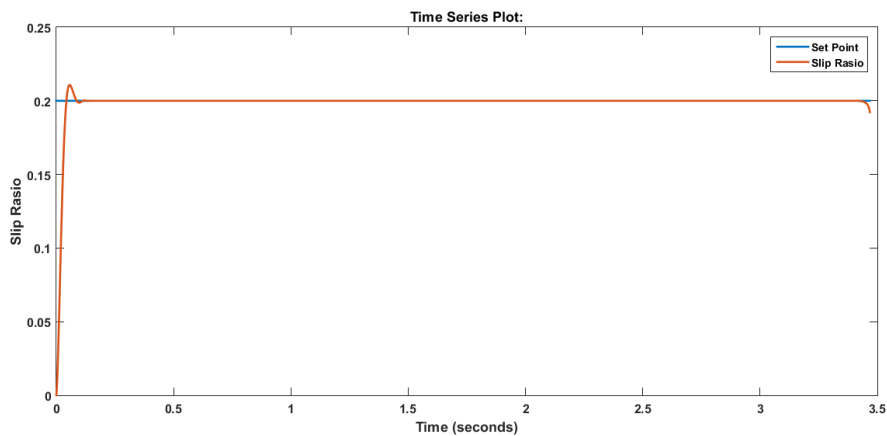
Pada Gambar 4.1 dapat dilihat pemodelan telah sesuai karena nilai *slip ratio* naik sebesar 1 saat detik 0,1 yang menunjukkan bahwa kendaraan mengalami *lock*. Pada uji kecepatan roda dan kendaraan tanpa dilengkapi *Anti-Lock Braking System* (ABS) menunjukkan hasil pengereman yang kurang baik karena pada saat kecepatan kendaraan masih berada pada kecepatan 27,33 m/s roda sudah mengalami *locking* . Pada detik ke 0,1s kecepatan roda sudah berhenti sedangkan kecepatan kendaraan berhenti pada detik ke 8,61 sehingga selisih waktunya 8.5s yang berarti jarak henti kendaraan semakin panjang. Grafik respon kecepatan tanpa dilengkapi ABS dapat dilihat pada Gambar 4.2.



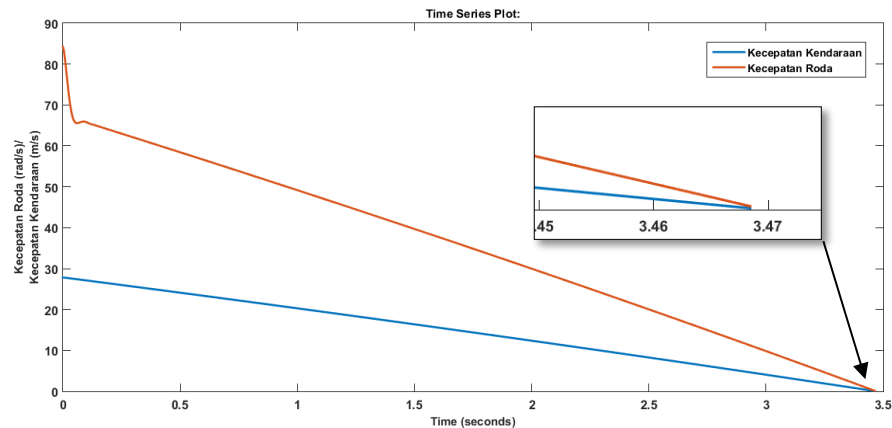
Gambar 4. 2 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda tanpa dilengkapi ABS

4.2 Uji Sistem *Closed Loop*

Untuk mengetahui pengendalian rasio slip sudah mampu stabil sesuai set point atau belum dilakukan uji *closed loop*. Gambar 4.3 Merupakan grafik hasil uji close loop dengan menggunakan pengendalian *sliding mode controller* (SMC). Respon sistem pada Grafik 4.3 *maximum overshoot* 6%, *settling time* 0.11 s, dan *error steady state* sebesar 0.



Gambar 4. 3 Respon sistem *close loop* dengan SMC

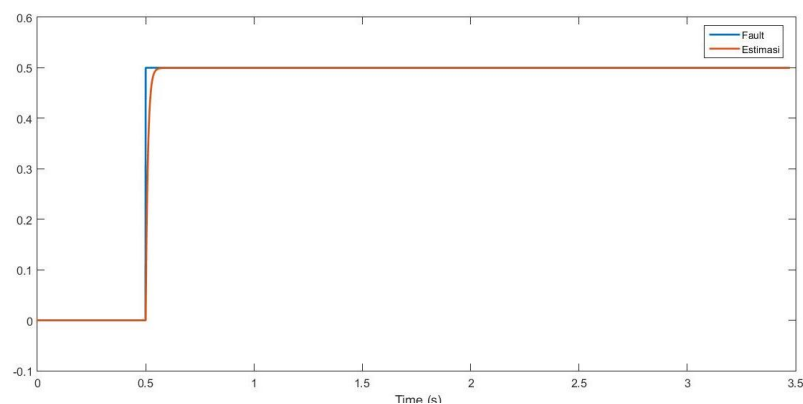


Gambar 4. 4 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan setelah dilengkapi ABS

Grafik hasil uji kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan dilengkapi ABS dapat dilihat pada Gambar 4.4 Dengan kecepatan yang diberikan sebesar 27,78 m/s Dapat diketahui bahwa saat dilengkapi ABS kecepatan kendaraan maupun kecepatan roda mendapatkan respon kecepatan angular roda yang lebih baik dengan mencapai titik henti secara bersamaan pada detik ke 3,469 sehingga roda tidak mengalami *locking*. Jarak pemberhentian kendaraan juga dapat kita lihat lebih singkat dikarenakan tidak adanya *lock* yang terjadi pada roda.

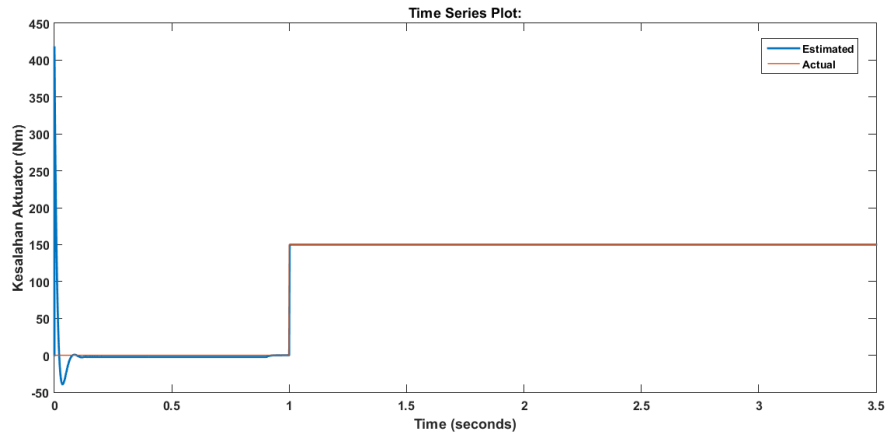
4.3 Hasil Uji Estimasi *Observer*

Uji estimasi *observer* bertujuan untuk mengetahui hasil *observer* yang telah didesain dalam mengestimasi state dan kesalahan yang diberikan pada sensor maupun aktuator.



Gambar 4. 5 Estimasi kesalahan bias sensor kendaraan

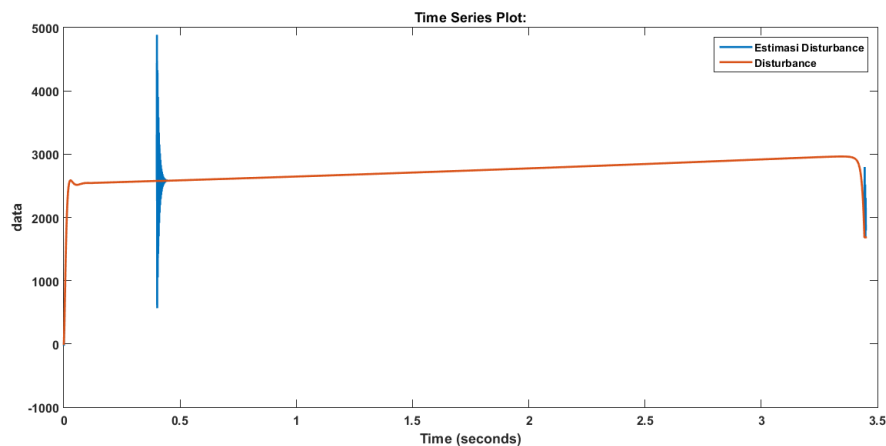
Gambar 4.5 merupakan grafik hasil estimasi *observer* dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 0.5 pada detik ke-0.5 s. Dari gambar dapat dilihat bahwa *observer* yang dirancang sudah dapat mengestimasi kesalahan bias kendaraan yang diberikan dengan waktu menuju stabil sebesar (*settling time*) sebesar 0.05 detik.



Gambar 4. 6 Estimasi kesalahan bias pada aktuator

Gambar 4.6 menunjukkan grafik respon dengan adanya kesalahan berupa kesalahan bias sebesar 150 pada detik ke-1. Garis merah merupakan kesalahan *actual* dari *real plant* dan garis biru merupakan hasil estimasi dari *observer* ketika ada kesalahan. Dari grafik yang dihasilkan menunjukkan bahwa *observer* yang telah dirancang sudah dapat mengestimasi kesalahan bias aktuator yang diberikan.

Simulasi selanjutnya yaitu *observer* untuk mengestimasi disturbance ditunjukkan pada Gambar 4.7.

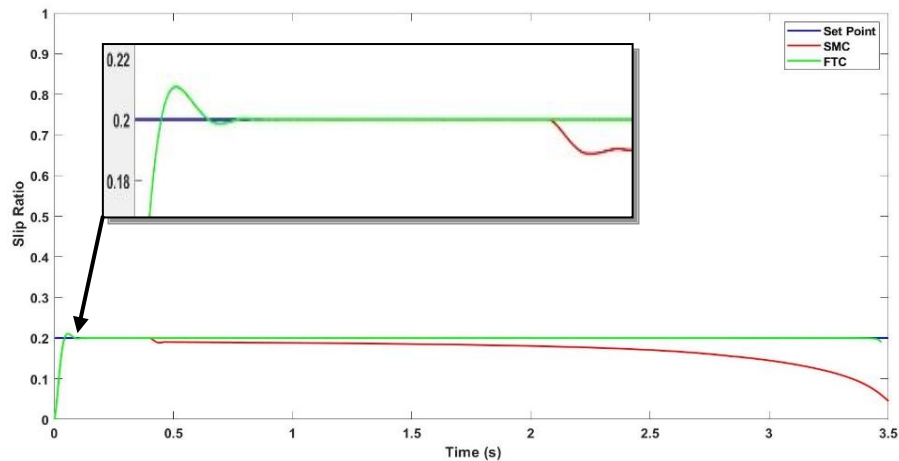


Gambar 4. 7 Estimasi Disturbance saat diberi kesalahan bias pada sensor roda

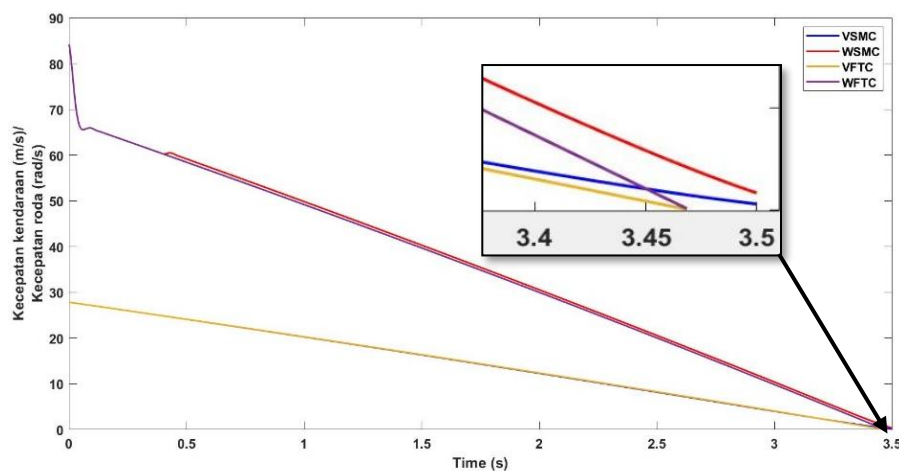
Gambar 4.7 adalah hasil estimasi kesalahan bias pada sensor roda sebesar 7% pada detik ke-0,3. *Disturbance* yang berupa gaya gesek yang terdapat pada roda ditunjukkan dengan grafik yang berwarna merah. Dari grafik yang dihasilkan menunjukkan bahwa *observer* sudah dapat mengestimasi *disturbance* pada plant.

4.4 Uji Kesalahan Bias Sensor

Pada sistem ini memiliki dua sensor, yaitu sensor kendaraan dan sensor roda. Kesalahan bias sensor kendaraan yang diberikan sebanyak 30%, 50%, dan 100% sedangkan kesalahan bias sensor roda yang diberikan sebesar 7%. Pada gambar 4.8 dan 4.9 hasil uji respon sistem saat terjadi kesalahan pada detik 0.4 dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 30%.

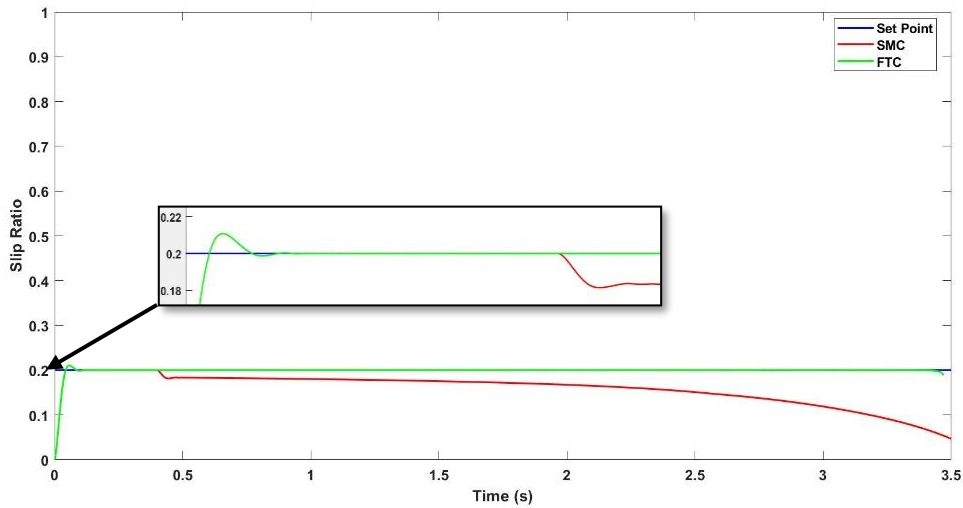


Gambar 4. 8 Slip rasio dengan kesalahan bias sensor kendaraan 30%

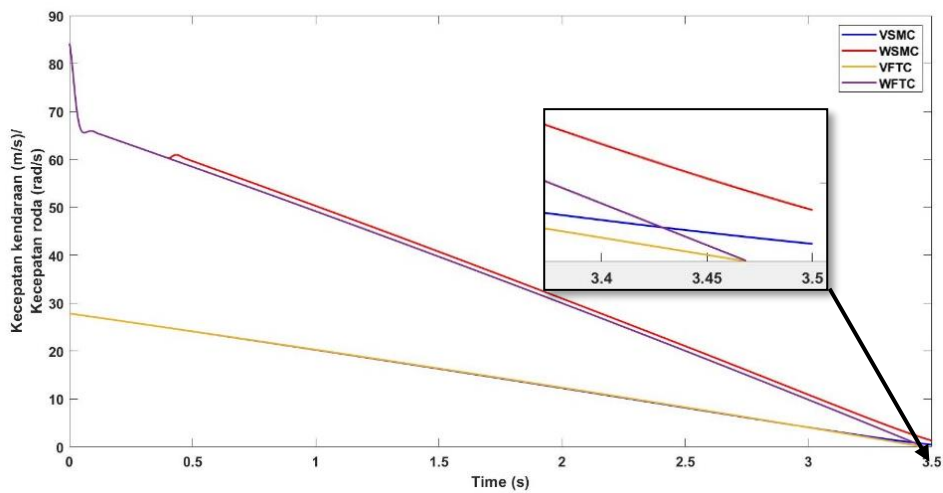


Gambar 4. 9 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan bias sensor 30%

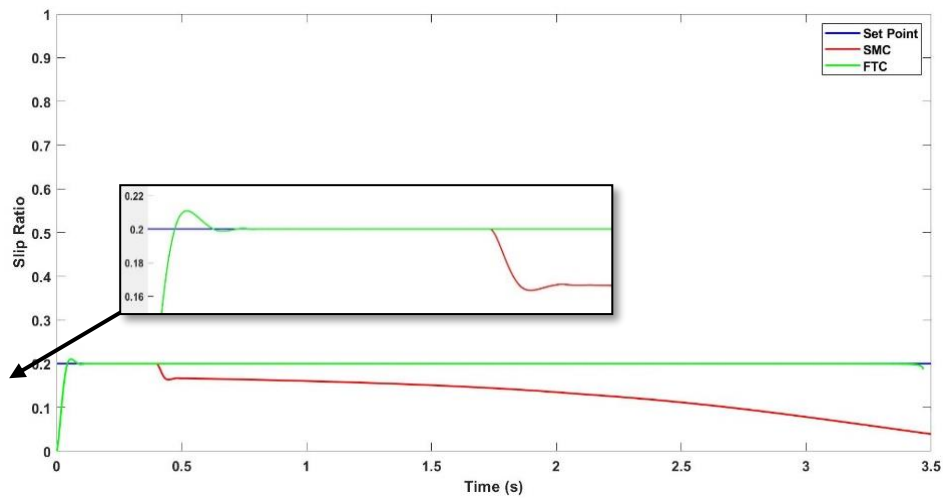
Simulasi selanjutnya yaitu ketika diberikan kesalahan bias kendaraan sebesar 50% pada detik ke-0.4 s yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dan 4.11.



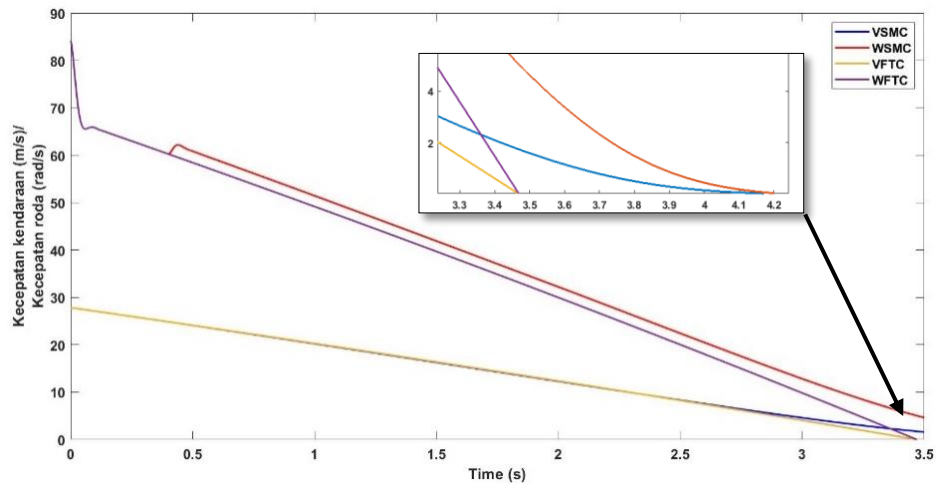
Gambar 4. 10 Slip rasio dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50%



Gambar 4. 11 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan bias sensor kendaraan 50%



Gambar 4. 12 Slip rasio dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100%



Gambar 4. 13 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100%

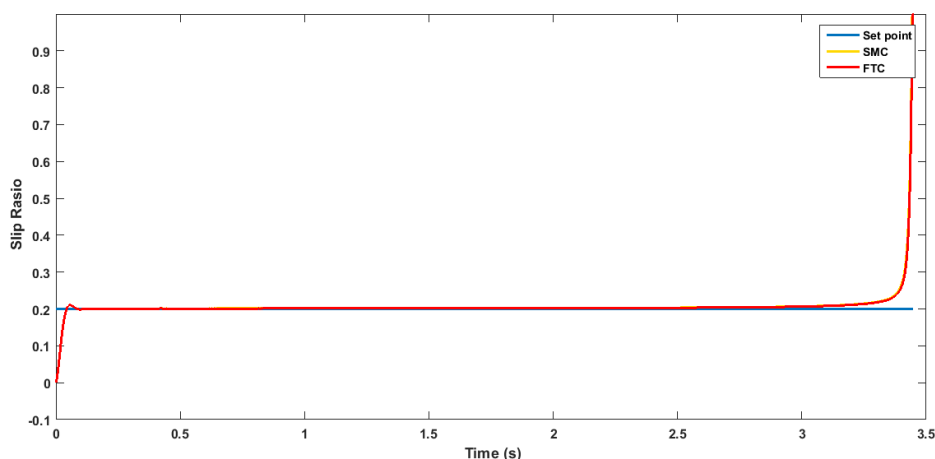
Gambar 4.8 hingga 4.13 merupakan hasil uji respon sistem setelah diberikan kesalahan bias pada sensor kendaraan sebesar 30%, 50%, dan 100% pada detik ke-0,4. Gambar untuk respon rasio slip dengan FTC ditunjukkan dengan garis warna hijau dan sedangkan garis warna merah merupakan respon rasio slip tanpa FTC. Sedangkan untuk respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan FTC ditunjukkan dengan garis warna kuning dan ungu, sedangkan tanpa FTC ditunjukkan dengan garis warna biru dan merah. Pada grafik tanpa FTC atau hanya menggunakan SMC saja, saat detik ke-3,5 dimana nilai slip rasio turun sampai dengan 0,035. Berdasarkan penelitian (Guo, Jian, & Lin, 2014), *slip ratio* memiliki batas minimal dan maksimal yaitu minimalnya *slip ratio* adalah 0,15 dan

maksimalnya 0,25. Dengan adanya FTC saat diberi kesalahan bias pada sensor kendaraan sistem masih stabil berada pada nilai *set point* 0,2. Hal ini menunjukkan FTC memiliki kelebihan yaitu kendaraan lebih stabil saat adanya pengereman darurat sampai kendaraan berhenti. Parameter performansi sistem ketika diberi kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 30%, 50% dan 100% ditunjukkan pada Tabel 4.1.

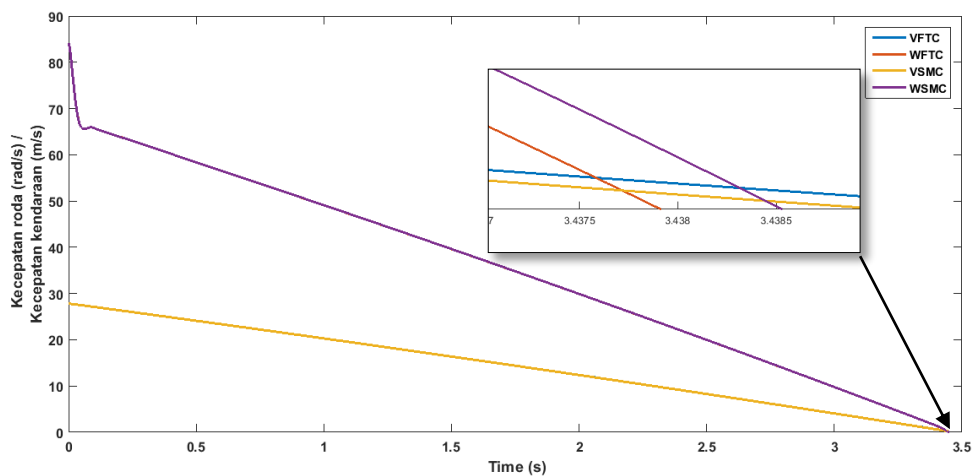
Tabel 4. 1 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan.

Kesalahan Bias Sensor Kendaraan	Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
30%	3,471s	3,50s
50%	3,471s	3,84s
100%	3,471s	4,20s

Dari Tabel 4.1 dapat diketahui sistem setelah diberi kesalahan bias sensor kendaraan yang dilengkapi FTC memiliki waktu berhenti lebih cepat dibandingkan dengan sistem tanpa dilengkapi dengan FTC. Uji respon selanjutnya yaitu dengan memberikan kesalahan bias pada sensor roda. Kesalahan bias yang diberikan sebesar 7% pada detik ke-0,4. Hasil respon sistem ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan 4.15.



Gambar 4. 14 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 7%

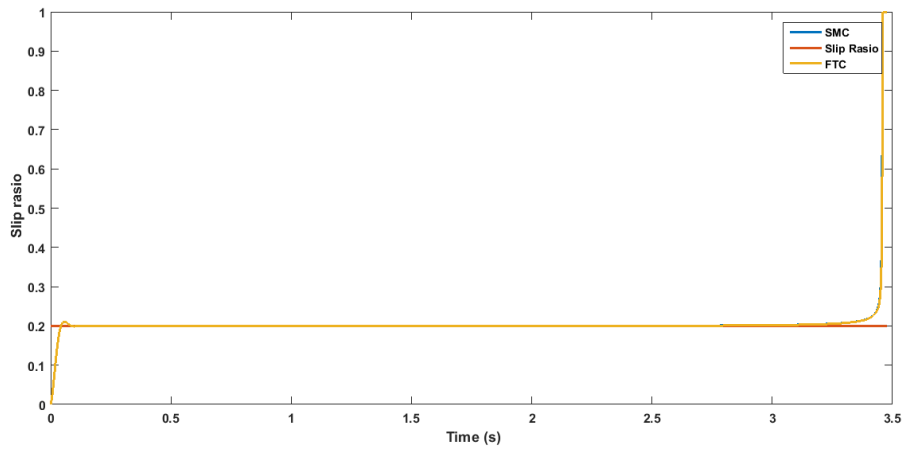


Gambar 4.15 Grafik kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 7%

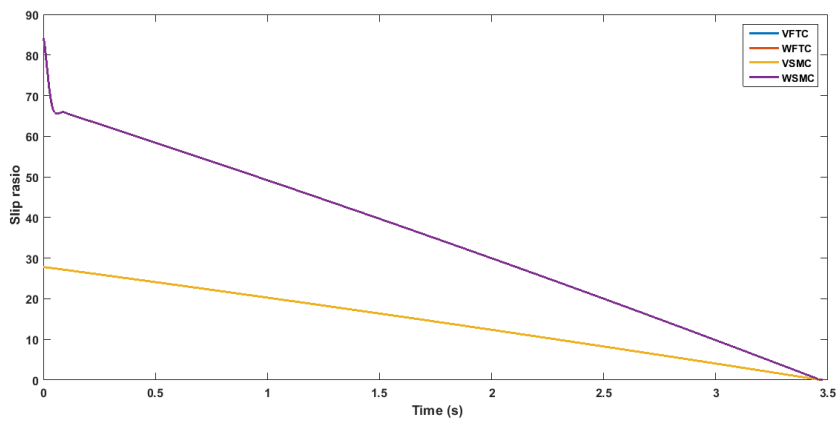
Pada Gambar 4.14 dan 4.15 menunjukkan respon sistem setelah diberi kesalahan bias pada sensor roda sebesar 7% pada detik ke-0.4. Untuk respon slip rasio dengan FTC dan tanpa FTC berturut-turut ditunjukkan dengan garis warna merah dan kuning. Dari respon yang telah dihasilkan ditunjukkan bahwa sistem yang dilengkapi FTC maupun tidak dilengkapi FTC masih bisa stabil dengan nilai slip rasio sistem yang stabil berada pada nilai set pointnya. Namun waktu yang dimiliki kendaraan untuk berhenti ketika sistem yang dilengkapi dengan FTC dan tanpa FTC berturut-turut yaitu 3,437 detik dan 3,438 detik.

4.5 Uji Kesalahan Bias Aktuator

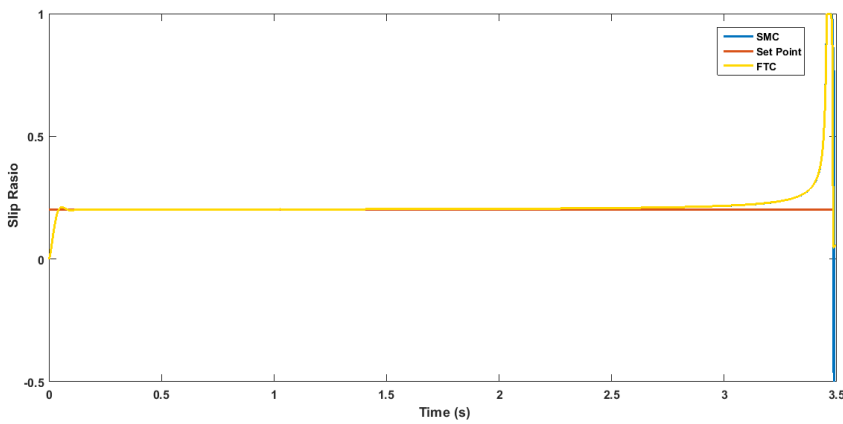
Uji kesalahan bias pada aktuator dilakukan dengan hanya memberikan kesalahan bias pada aktuator, sedangkan sensor kendaraan dan sensor roda dianggap tidak salah. Kesalahan yang diberikan adalah sebesar 10%, dan 50%. Uji respon saat diberi kesalahan aktuator sebesar 10% pada detik ke-0.9 ditunjukkan pada gambar 4.16 dan gambar 4.17.



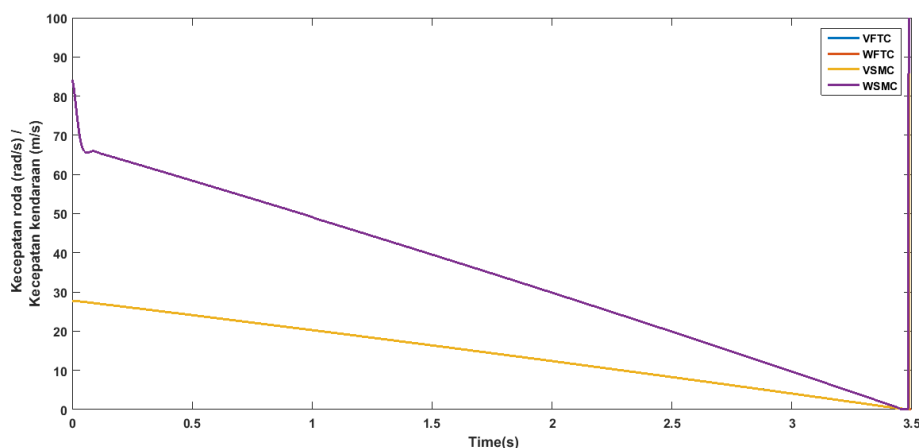
Gambar 4. 16 Slip rasio dengan kesalahan bias aktuator 10%



Gambar 4. 17 Respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator 10%



Gambar 4. 18 Slip rasio kesalahan bias aktuator 50%



Gambar 4. 19 Respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator 50%

Gambar 4.16 sampai dengan Gambar 4.19 merupakan hasil respon sistem ketika diberi kesalahan pada aktuator sebesar 10% dan 50%. Untuk grafik respon slip rasio, hasil respon yang dilengkapi FTC ditunjukkan dengan garis warna kuning sedangkan yang tidak dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Sedangkan untuk respon kecepatan sistem yang dilengkapi dengan FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna biru dan merah dan ketika tanpa FTC ditunjukkan dengan grafik warna ungu dan kuning. Besar kesalahan yang diberikan berpengaruh terhadap nilai slip rasio yaitu saat diberikan kesalahan 10% hasil respon pada detik ke-1,5 slip rasio 0,2002 sedangkan saat diberikan kesalahan 50% hasil respon pada detik ke-1,5 slip rasio 0,203.

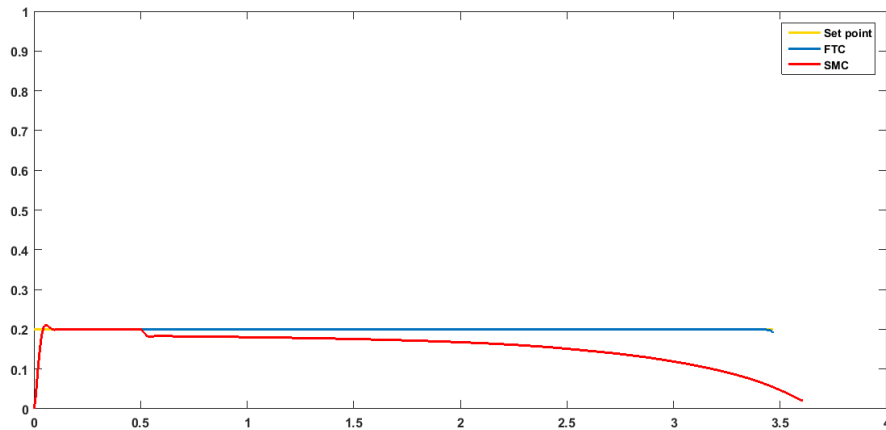
Tabel 4. 2 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias aktuator.

Kesalahan Bias Aktuator	Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
10%	3,45 s	3,45 s
50%	3,48 s	3,48 s

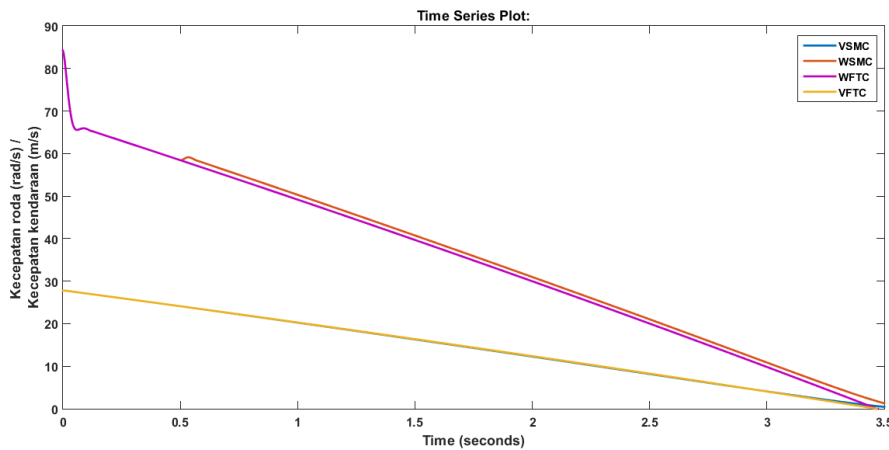
4.6 Uji Kesalahan Bias Simultan Sensor dan Aktuator

Kesalahan secara simultan pada actuator dan sensor kendaraan diberikan waktu yang berbeda yaitu diberikan kesalahan sensor pada detik ke-0,5 dan

kesalahan aktuator pada detik ke-1. Pada Gambar 4.20 dan 4.21 ditunjukkan ketika sistem diberikan kesalahan bias pada sensor sebesar 50% dan kesalahan bias aktuator sebesar 5%.

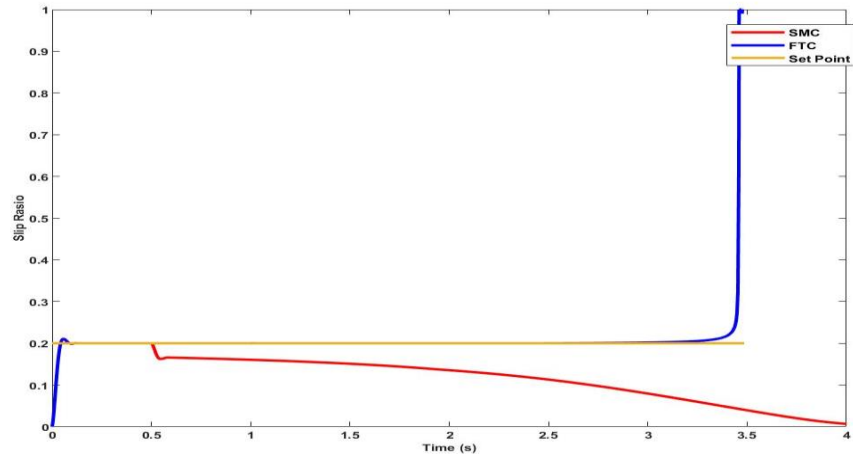


Gambar 4. 20 Respon slip rasio kesalahan bias sensor 50% dan aktuator 5%

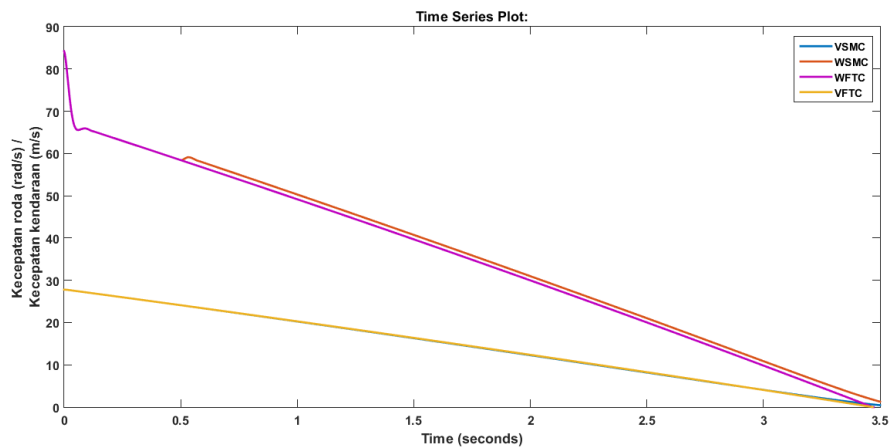


Gambar 4. 21 Respon kecepatan roda dan kendaraan kesalahan 50% sensor dan 5% aktuator

Tahap selanjutnya yaitu uji respon sistem terhadap kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% saat detik ke 0,5 dan kesalahan aktuator sebesar 10% pada detik ke-1 ditunjukkan pada Gambar 4.22 dan Gambar 4.23.



Gambar 4. 22 Respon slip rasio dengan kesalahan sensor 100% dan kesalahan bias aktuator 10%



Gambar 4. 23 Respon kecepatan kendaraan 100% sensor dan kesalahan bias aktuator 10%

Gambar 4.20 hingga gambar 4.23 merupakan hasil respon sistem setelah diberikan kesalahan bias pada sensor kendaraan pada detik ke 0,5 dan kesalahan bias pada aktuator pada detik ke-1. Untuk hasil respon slip rasio untuk garis warna biru menunjukkan hasil FTC sedangkan warna merah tanpa FTC, sedangkan respon kecepatan untuk hasil tanpa FTC ditunjukkan dengan garis warna biru dan merah dan dengan FTC ditunjukkan dengan garis warna ungu dan kuning. Kesalahan bias yang diberikan pada Gambar 4.20 dan 4.21 adalah sebesar 5% untuk kesalahan aktuator dan 50% untuk kesalahan sensor sedangkan Gambar 4.22 dan 4.23 ketika

sistem diberikan kesalahan bias sebesar 10% untuk kesalahan aktuator dan 100% untuk kesalahan sensor. Dari respon yang telah didapatkan dapat diketahui bahwa sistem ketika dilengkapi FTC mampu mengkompensasi kesalahan bias pada sensor kendaraan maupun aktuator dengan baik. Hal tersebut dapat ditunjukkan dengan respon slip rasio sistem yang stabil berada pada nilai set point 0,3. Hal lain saat tanpa dilengkapi FTC, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Disisi lain, sistem yang dilengkapi FTC memiliki waktu berhenti yang sedikit lebih cepat dibandingkan dengan sistem tanpa dilengkapi FTC. Performansi dari sistem saat diberi kesalahan bias sensor pada detik ke-0,5 dan kesalahan bias aktuator pada detik ke-1 dengan kesalahan sensor sebesar 50% dan 100% serta kesalahan aktuator sebesar 5% dan 10% dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias aktuator dan sensor.

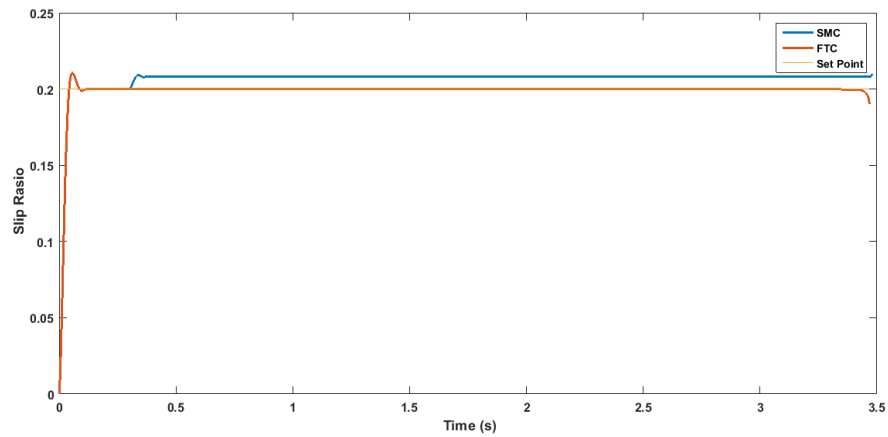
Kesalahan Bias Aktuator	Kesalahan Bias Sensor	Waktu Berhenti	
		SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
5%	50%	3,46 s	3,48 s
10%	100%	3,52 s	3,5 s

4.7 Uji Kesalahan Sensitivitas

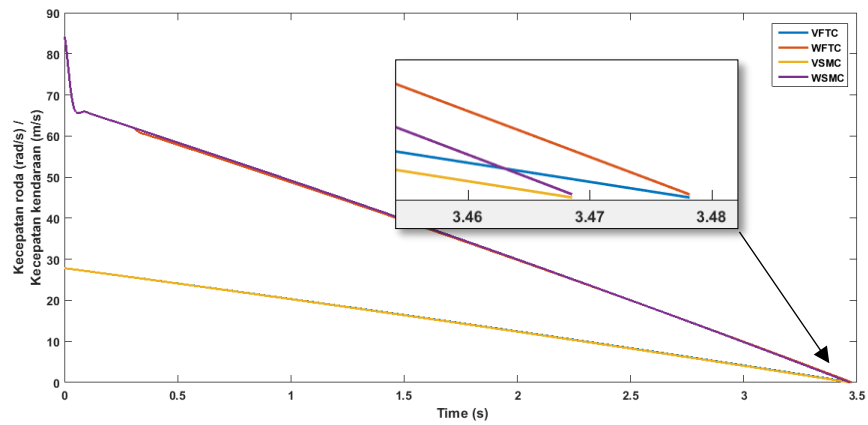
Sistem diberikan kesalahan sensitivitas pada sensor dan aktuator. Dengan kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% pada detik 0.3s, serta kesalahan sensitivitas pada aktuator yang diberikan sebesar 10% dan 35%. Dan kesalahan sensitivitas pada sensor dan aktuator yang diberikan sebesar 10% dan 20%.

4.7.1 Uji Kesalahan Sensitivitas pada Sensor

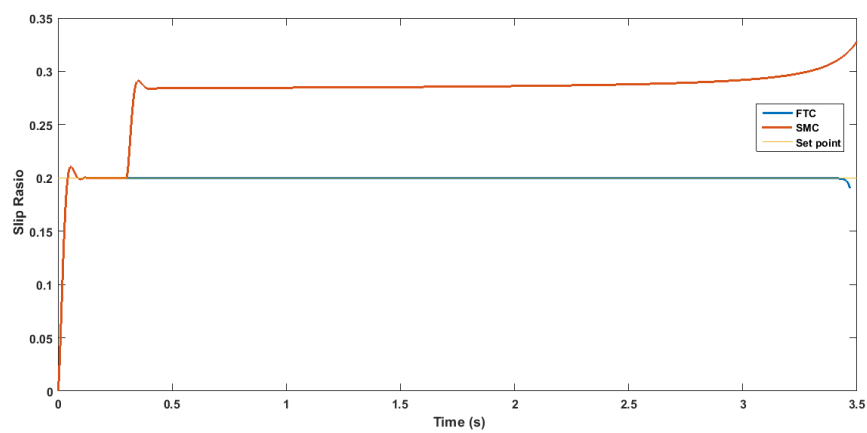
Tahap ini, sistem diberikan kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan pada detik ke 0,3 sebesar 1%, ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan 4.25



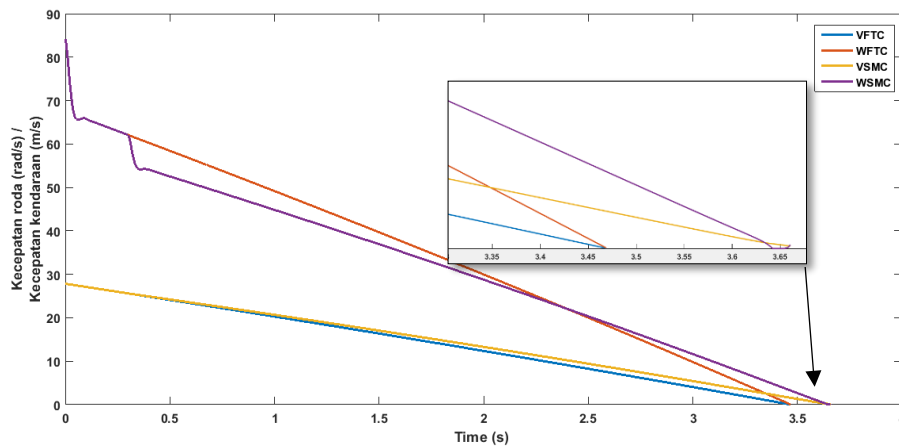
Gambar 4. 24 Respon slip rasio dengan kesalahan sensitivitas sensor 1%



Gambar 4. 25 Respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan sensitivitas sensor kendaraan 1%



Gambar 4. 26 Respon rasio slip dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%



Gambar 4. 27 Respon kecepatan roda dengan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%

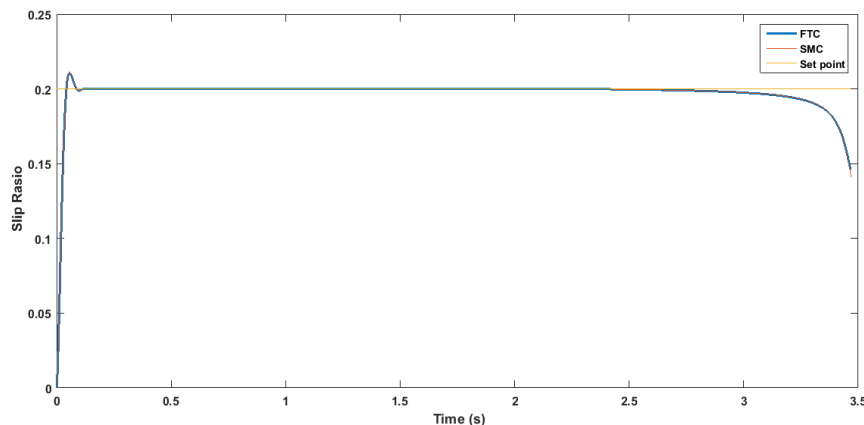
Gambar 4.24 hingga 4.27 menunjukkan hasil uji respon sistem setelah diberi kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% pada detik ke-0,3. Dapat dilihat bahwa hasil respon dengan dilengkapi FTC mampu mengkompensasi kesalahan sensitivitas yang diberikan pada sensor kendaraan sebesar 1% dan 90%, dengan dibuktikan hasil respon slip rasio stabil pada set pointnya yaitu 0,2. Sedangkan untuk hasil respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan, sistem yang dilengkapi dengan FTC berhenti lebih cepat dibandingkan dengan sistem yang tanpa dilengkapi dengan FTC atau menggunakan SMC saja. Parameter performansi sistem saat diberi kesalahan sensitivitas sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan.

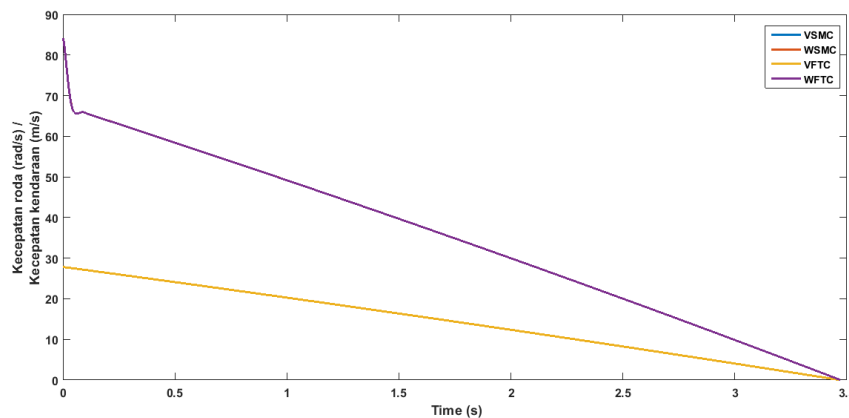
Kesalahan Sensitivitas Sensor	Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
1%	3,465 s	3,475 s
90%	3,45 s	3,65 s

4.7.2 Uji Kesalahan Sensitivitas Aktuator

Hasil uji respon sistem setelah diberikan kesalahan sensitivitas pada aktuator ditunjukkan pada kondisi terjadi pada detik ke-1 dengan kesalahan sensitivitas 1% ditunjukkan pada Gambar 4.28 dan 4.29.



Gambar 4. 28 Respon slip dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%



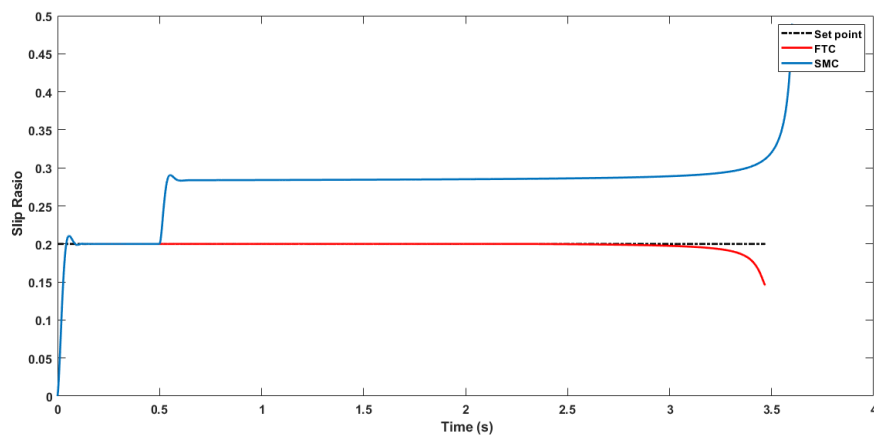
Gambar 4. 29 Kecepatan kendaraan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%

Gambar 4.38 dan 4.39 merupakan hasil respon sistem ketika diberi kesalahan sensitivitas pada aktuator sebesar 1%. Terdapat dua gambar yang menunjukkan grafik slip rasio yang merupakan variabel yang dikendalikan dalam penelitian ini dan gambar yang kedua adalah grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda yang dimana grafik warna ungu dan kuning adalah ketika sistem dilengkapi FTC dan grafik warna biru dan merah tanpa dilengkapi FTC. Dari respon yang didapatkan grafik ketika menggunakan FTC dan ketika tidak

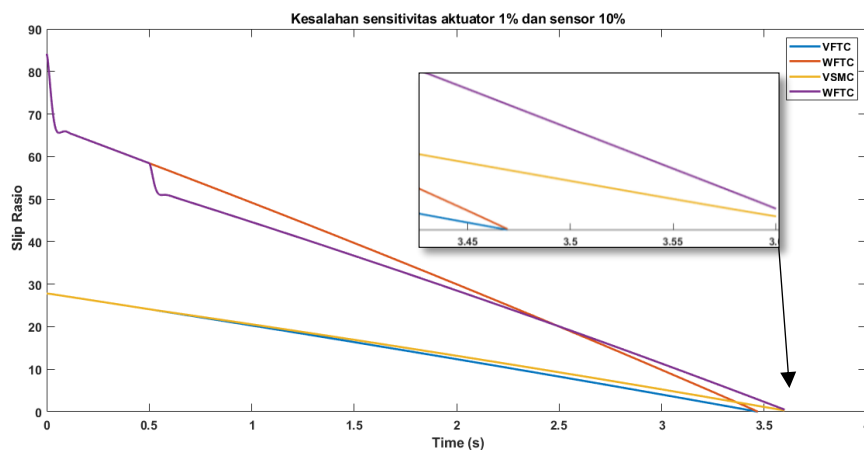
dilengkapi FTC memiliki respon yang sama, baik pada respon slip rasio maupun grafik kecepatan, sistem berhenti pada detik ke-3,46.

4.7.3 Uji Kesalahan Sensitivitas pada Sensor dan Aktuator

Hasil uji selanjutnya adalah sistem diberi kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 50% pada detik ke-0,5 dan kesalahan sensitivitas aktuator sebesar 10% pada detik ke-0,3 yang ditunjukkan pada Gambar 4.30 dan 4.31.



Gambar 4. 30 Respon slip rasio dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 50% dan aktuator sebesar 10%



Gambar 4. 31 Kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 50% dan aktuator sebesar 10%

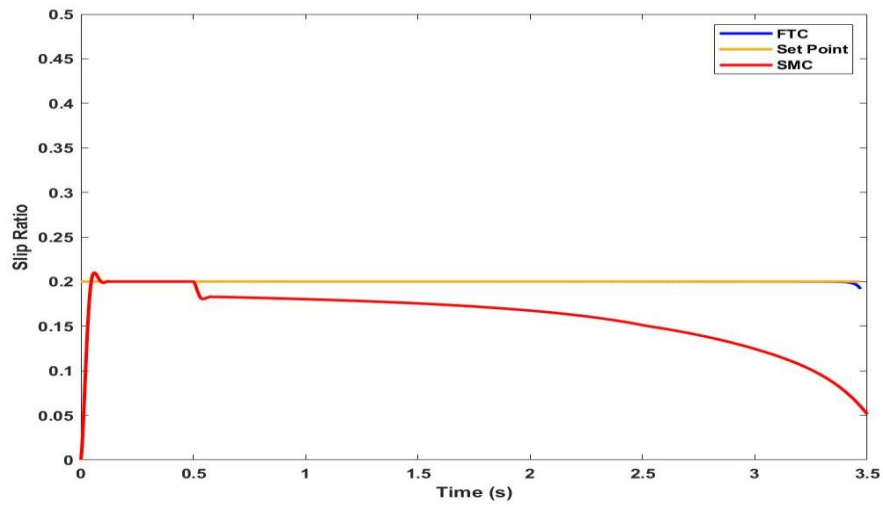
Pada Gambar 4.32 dan 4.31 menunjukkan hasil respon slip rasio dan respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan pada sistem setelah diberikan kesalahan

sensitivitas sensor sebesar 50% detik ke-0,5 dan kesalahan sensitivitas aktuator sebesar 10% detik ke-0,5. Hasil respon slip rasio ditunjukkan dengan grafik berwarna merah merupakan respon sistem dilengkapi dengan FTC sedangkan untuk grafik berwarna biru merupakan respon sistem tanpa dilengkapi FTC, dimana setelah diberikan kesalahan hasil respon sistem dilengkapi dengan FTC menunjukkan sistem stabil dengan nilai slip rasio yang tetap berada pada set point yaitu 0,2 dengan waktu berhenti pada detik ke-3,46. Hal yang berbeda ditunjukkan dengan grafik tanpa dilengkapi FTC, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem.. Hal ini ditunjukkan nilai slip rasio mulai naik setelah diberinya kesalahan pada detik ke-0,5. Begitu juga untuk respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda tanpa dilengkapi FTC membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan sistem yang dilengkapi FTC, kendaraan berhenti pada detik ke-3,62.

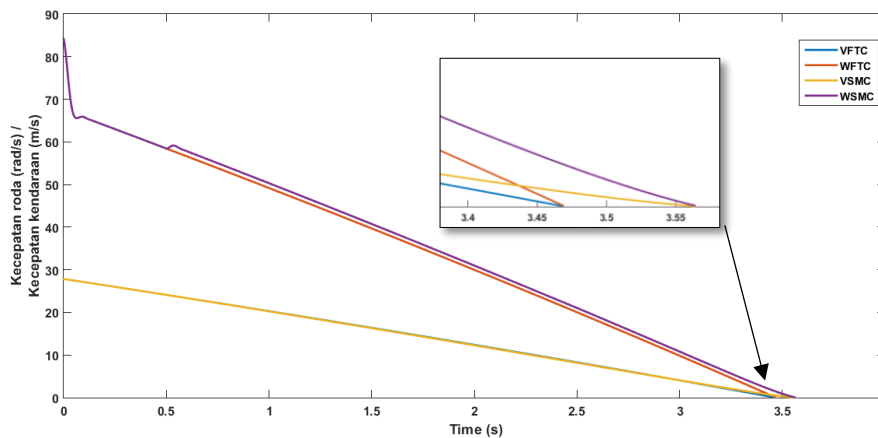
4.8 Uji Ketidakpastian

Tahap selanjutnya adalah uji ketidakpastian, dimana sistem diberikan penambahan jumlah penumpang atau massa pada mobil yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan *robust control* yang dirancang. Perbedaan pada simulasi sebelumnya yaitu pada simulasi sebelumnya massa yang diberikan hanya pada massa kendaraan saja, sedangkan pada tahap ini sistem diberikan massa penumpang dimana tiap orangnya diasumsikan memiliki rata-rata berat badan sebesar 60 kg. Simulasi diberikan penumpang sebanyak 4 orang dan 6 orang dan kesalahan bias pada aktuator dan sensor kendaraan juga diberikan pada percobaan ini dengan kesalahan aktuator sebesar 10% dan kesalahan sensor kendaraan sebesar 50%.

Hasil respon sistem setelah diberi penumpang sebanyak 4 orang serta diberi kesalahan bias pada aktuator 10% dan sensor 50% ditunjukkan pada Gambar 4.32 dan 4.33

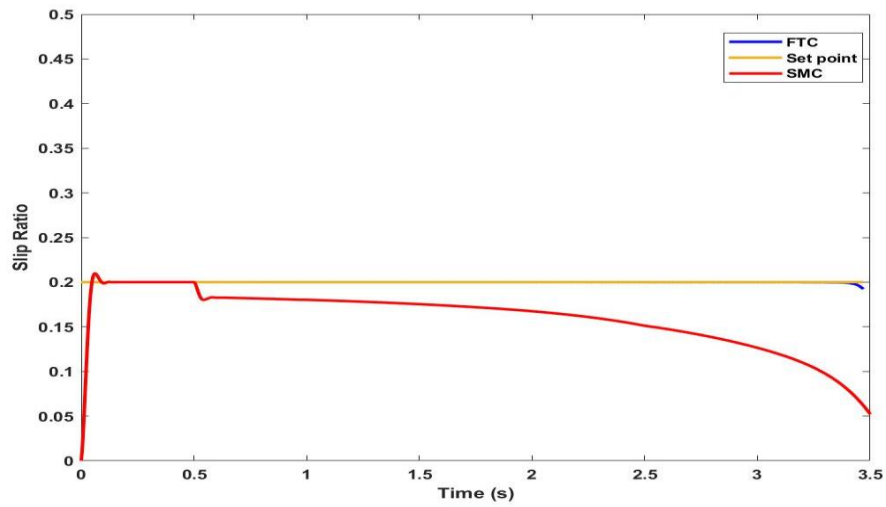


Gambar 4.32 Respon slip rasio jika diberikan 4 penumpang

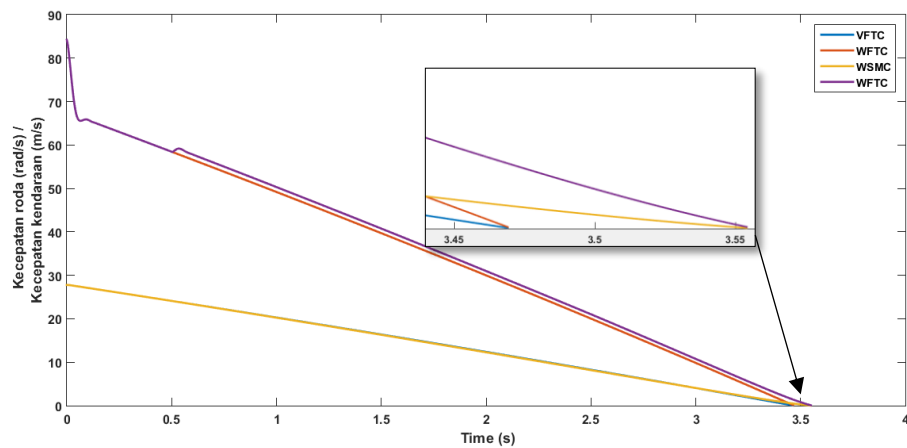


Gambar 4.33 Kecepatan kendaraan dan roda jika diberikan 4 penumpang

Hasil respon selanjutnya yaitu ketika sistem diberi massa maksimum mobil atau kapasitas mobil sebanyak 6 orang, serta diberi kesalahan bias pada aktuator 10% dan sensor kendaraan sebesar 50% ditunjukkan pada Gambar 4.34 dan 4.35.



Gambar 4. 34 Respon slip rasio jika diberikan 6 penumpang



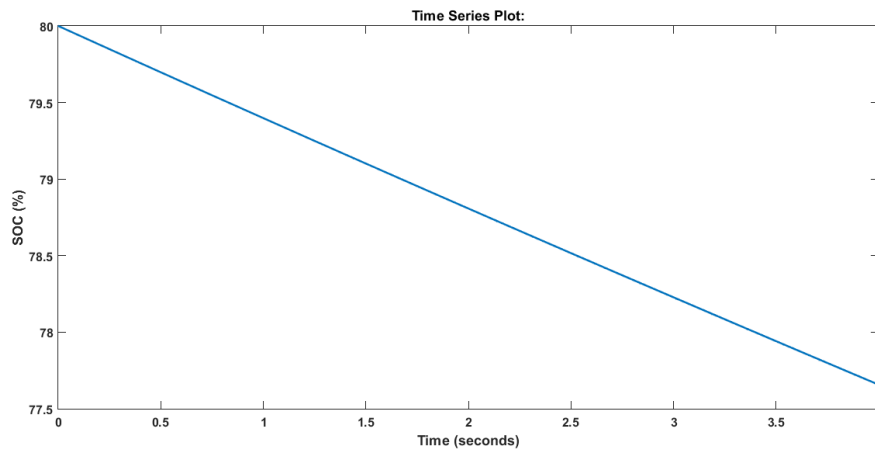
Gambar 4. 35 Kecepatan kendaraan dan roda jika diberikan 6 penumpang

Tabel 4. 5 Performansi uji ketidakpastian

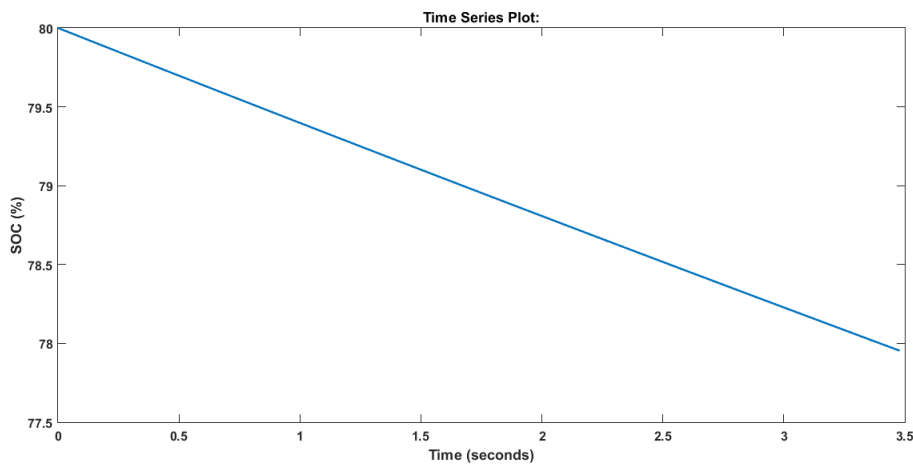
Jumlah Penumpang	Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
4	3,46 s	3,55 s
6	3,46 s	3,55 s

4.9 Respon *State of Charge* pada Baterai

Penelitian ini memiliki kelebihan dimana adanya *regenerative braking* pada ABS, sehingga saat adanya pengereman mendadak dapat menghasilkan listrik dari motor yang menjadi generator, sehingga listrik yang dihasilkan akan masuk sebagai pengisian baterai.



Gambar 4. 36 Grafik respon SOC *battery* dengan kesalahan aktuator dan sensor



Gambar 4. 37 Grafik respon SOC *battery*

Pada Gambar 4.36 dan 4.37 ditunjukkan nilai *state of charge* (SOC) yaitu bukti bahwa pada sistem *regenerative* ABS dengan diberi kesalahan sensor dan aktuator ini dapat menghasilkan listrik yang akan masuk sebagai baterai. Dimana pada saat dilakukan pengereman, baterai mengalami pengurangan nilai SOC dikarenakan motor pada mobil listrik akan menghasilkan torsi balik dan akan memberikan beban terhadap kerja roda. Torsi balik pada motor listrik ini digunakan

sistem *regenerative* untuk melakukan pengisian (*charging*) pada battery, sehingga *energy saving* pada sistem *regenerative* ini sebesar 2,05% ketika diberikan kesalahan aktuator 10% dan sensor 100% dan 2,34% ketika tanpa kesalahan.

Halaman memang sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa data yang telah dilakukan, didapat kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC) pada sistem pengereman hybrid mobil listrik dengan kesalahan pada sensor dan aktuator sebagai berikut:

- Telah dilakukan perancangan *observer* dengan memberikan kesalahan sensor dan aktuator pada sistem pengereman hybrid pada mobil listrik secara simulasi. Hasil uji *close loop observer* respon grafik *maximum overshoot* 6%, *settling time* 0.11 s, dan *error steady state* sebesar 0. Hasil respon estimasi *observer* pada kesalahan sensor memiliki *settling time* sebesar 0,05 detik, sedangkan untuk hasil estimasi kesalahan aktuator sudah dapat *tracking* sesuai dengan kesalahan *actual* dari *plant*.
- Telah dilakukan perancangan algoritma FTC berupa perancangan *observer* dengan memberikan kesalahan sensor dan aktuator dengan hasil uji berikut:
 1. Sistem diberi kesalahan bias pada sensor kecepatan kendaraan sebesar 30%, 50% dan 100%. Performansi sistem yang dilengkapi FTC, kendaraan berhenti pada detik ke-3,471. Sedangkan yang dilengkapi FTC berturut-turut berhenti pada detik ke-3,5s, 3,84s, dan 4,2s. *Maximum overshoot* untuk semua kasus adalah sama besar yaitu 5,35%.
 2. Sistem yang dilengkapi FTC dapat mengkompensasi kesalahan sensor kecepatan roda maksimal sebesar 20%
 3. Semakin besar kesalahan bias aktuator yang diberikan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan kendaraan untuk berhenti. Dengan kesalahan bias maksimum yang dapat dikompensasi oleh FTC sebesar 50%.
 4. Sistem diuji dengan diberi kesalahan secara simultan ketika diberi kesalahan aktuator terlebih dahulu setelah itu kesalahan sensor. Sistem yang dilengkapi FTC memiliki respon yang lebih baik dibandingkan

dengan sistem tanpa dilengkapi FTC. Ketika diberi kesalahan sensor sebesar 50% dan kesalahan aktuator sebesar 5% sistem yang dilengkapi dengan FTC berhenti pada detik ke-3,46 sedangkan tanpa dilengkapi FTC berhenti pada detik ke-3,48.

5. Saat diuji ketidakpastian dengan menambahkan massa atau penumpang pada sistem diketahui bahwa sistem FTSMC merupakan sistem *robust*. Ketika terdapat tambahan penumpang, sistem tidak terjadi slip dan kestabilan sistem terjaga.
6. Saat uji kesalahan sensitivitas, FTC mampu mengkompensasi aktuator maksimum sebesar 5% dan sensor kendaraan sebesar 90%. Sedangkan saat diberi kesalahan sensitivitas pada sensor roda, sistem tidak stabil.

5.2 Saran

Adapun terdapat saran dalam proses tugas akhir ini untuk digunakan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Pemodelan *regenerative* ABS dengan kesalahan aktuator dan sensor pada *full car model* sehingga dapat memrepresentasikan pemodelan mobil sesungguhnya

DAFTAR PUSTAKA

- Aly, A. A., Zeidan, E.-S., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 02(03), 186–195. <https://doi.org/10.4236/ica.2011.23023>
- Co-investigator, N. (2013). Active Braking Control Systems Design for Vehicles. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- 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(10), 6459–6476. <https://doi.org/10.3390/en7106459>
- Ichikawa, M., Sebe, N., Suyama, K., & Indriawati, K. (2018). A bias fault estimation of actuators and sensors by optimization with ℓ_0 norm constraint. *2017 Asian Control Conference, ASCC 2017, 2018-Janua*, 1443–1448. <https://doi.org/10.1109/ASCC.2017.8287385>
- Indriawati, K., Sebe, N., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2015). Robust Fuzzy Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Series Motor Speed Drive. *International Review of Automatic Control (I. RE. A. CO.)*, 8(6), 375–385.
- Jie, Y., Zaimin, Z., & Zechang, S. (2006). A fuzzy logic based regenerative braking regulation for a fuel cell bus. *2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES, 1*, 22–25. <https://doi.org/10.1109/ICVES.2006.371546>
- Jitesh, S. (2014). Antilock braking system (ABS). *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(4), 254.
- Lubbers, K. H. . (2014). *Design and Analysis of a Model Based Low Level Slip Controller Based on a Hybrid Braking System*.
- Nasir, A. N. K., Raja Ismail, R. M. T., & 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*, 46(10), 400–405.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1055422>
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering 5th Edition*.
- Patton, R. J. (1997). Fault-Tolerant Control: The 1997 Situation. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18), 1029–1051. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)42536-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)42536-5)
- Peng, D., Zhang, Y., Yin, C.-L., & Zhang, J.-W. (2008). Combined control of a regenerative braking and antilock braking system for hybrid electric vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 9(6), 749–757. <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0089-3>
- R.Isermann. (1997). Supervision FDD Methods - An Introduction. *Control Engineering Practice*, 5(5), 639–652. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(97\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)00046-4)
- S.Holkar, K., & M. Waghmare, L. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Applications*, 78(4), 1–5. <https://doi.org/10.5120/13474-0992>
- Swaroop, D., Gerdes, J. C., & Hedrick, J. K. (n.d.). Fault tolerant control of automatically controlled vehicles in response to brake system failures. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications*, 705–710. <https://doi.org/10.1109/CCA.1997.627741>
- Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An introduction to regenerative braking of electric vehicles as anti-lock braking system. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 5, 944–948.
- Wabco. (1999). Anti-lock braking system training program. *Meritor Wabco*, 7–106.
- WABCO. (2011). *Anti-Lock Braking System (ABS) and Anti-Slip Regulation (ASR)*. 2, 36. <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/01/94/8150101943.pdf>
- Wellstead, P. E. (1997). Analysis and redesign of an antilock brake system controller. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 144(5), 413–426. <https://doi.org/10.1049/ip-cta:19971441>

LAMPIRAN

Lampiran A

Script mfile MATLAB 2015b Sistem Pengendalian Pengereman Hybrid
sebagai Regenerative ABS

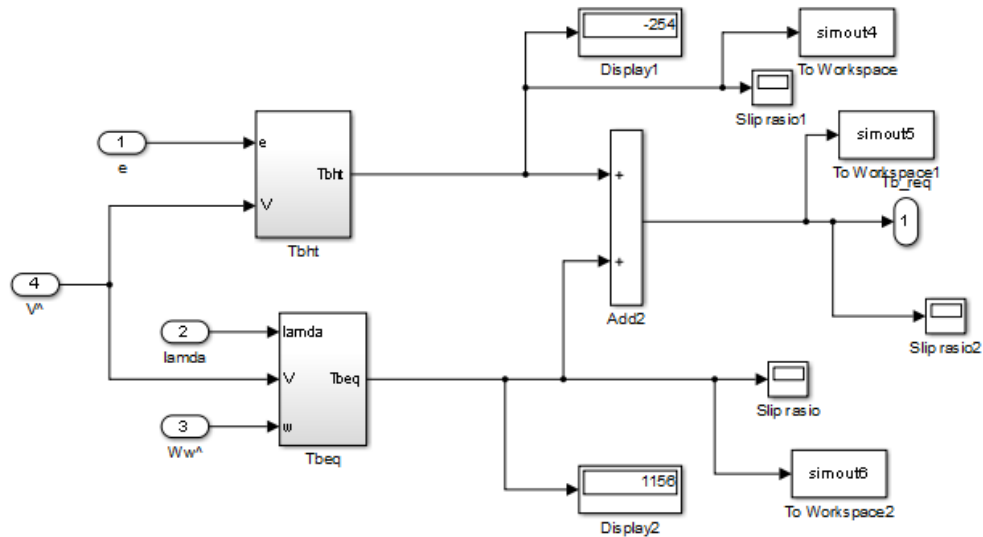
```
% Definisi parameter
m = 342.5;
m1 = 357.5;
ma = 402.5;
mb = 432.5;
r = 0.33;
Af = 3.1;
cr = 0.3;
ct = 0.01;
j = 3.5;
g = 9.8;
Rr = 201.39/4;
c1 = 1.029;
c2 = 17.16;
c3 = 0.523;
c4 = 0.03;
ctrl = 1;
pz = 100;
tau = 0.01;

%State space sistem
A = [-0.098 0 0; 0 -100 0; 0 -1/j 0] ;%Matriks A
B = [-1/m 0;0 100;r/j 0]; %Matriks B
C = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1] ;%Matriks C
D= [0 0 ;0 0;0 0];

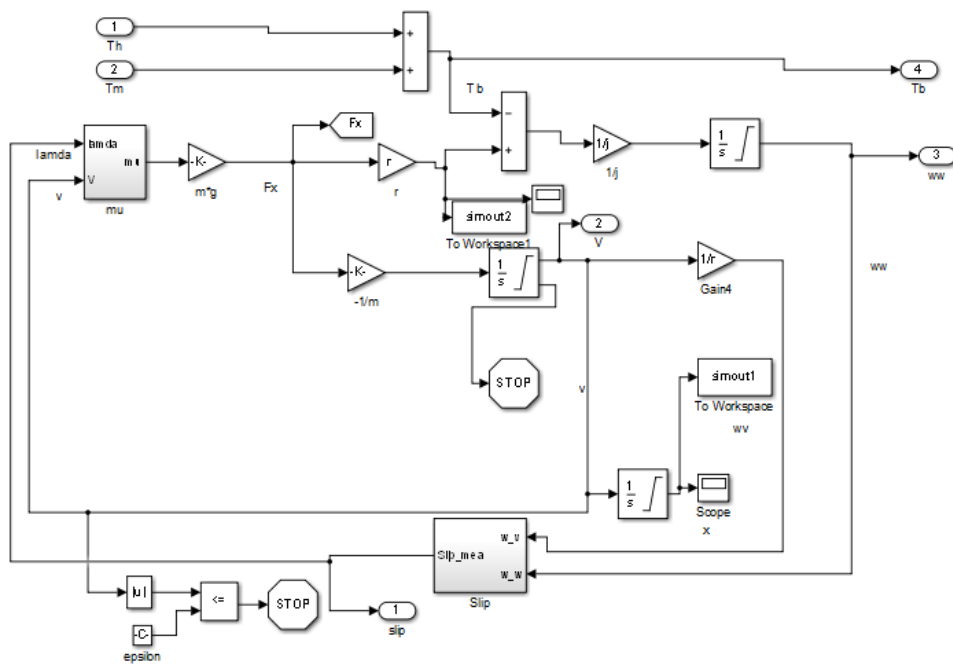
%% extended
Aa = [0 0 0 -1/j; 0 0 0 0;0 pz -pz 0;0 0 0 -1/tau];
Ba = [0 0;0 0;0 0;1/tau 1/tau];
Ca = [1 0 0 0; 0 0 1 0;0 0 0 1];
Ea = [r/j 0 0 ;-1/m 0 0;0 pz 0;0 0 1/tau];

%% gain observer
Kp = [900/j 0 0;
      0 1e5/m 0;
      0 1e6 0;
      0 0 900*1/tau];
Ki= [9*1e7 0 0;
     0 1*1e6 0;
     0 0 9*1e4];
```

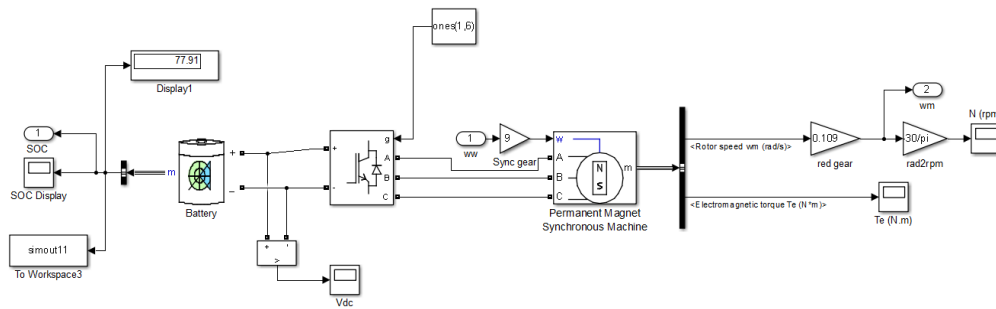

SIMULINK MATLAB R2015
SLIDING MODE CONTROLLER



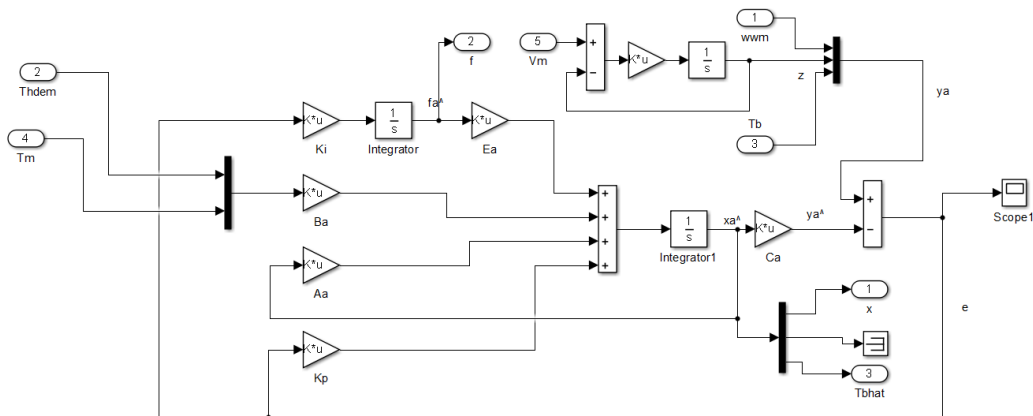
SIMULINK MATLAB R2015
QUARTER CAR MODEL



SIMULINK MATLAB R2015
PLANT MOTOR



SIMULINK MATLAB R2015
OBSERVER



BIODATA PENULIS



Nama penulis Yoanne Ayuningtias Sania. Penulis dilahirkan di Gresik, pada tanggal 8 Agustus 1998 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara dari ayahanda Ahmad Latif dan ibunda Arminelly. Saat ini penulis tinggal di Gresik. Penulis menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Sidokumpul 3 Gresik, pendidikan menengah pertama di SMPN 2 Gresik, pendidikan menengah atas di SMA Darul Ulum 2 Jombang, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang. Pada bulan Juli 2020, penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC) pada Sistem Pengeraman Hybrid dengan Kesalahan Aktuator dan Sensor pada Mobil Listrik. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email: yoannesania@gmail.com