



TUGAS AKHIR - TF 181801

PERANCANGAN SISTEM *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC) BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL KONVENSIONAL

EKA PUTRI NUR IKHFANI
NRP 0231154000046

Dosen Pembimbing
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T
Moch. Kamalul Wafi, S.T.,MSc.DIC

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)
BASED ON FAULT ESTIMATION SENSOR AND
ACTUATOR ON ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
CONVENTIONAL VEHICLE***

**EKA PUTRI NUR IKHFANI
NRP 0231154000046**

**Supervisor
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T
Moch. Kamalul Wafi, S.T.,MSc.DIC**

**Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Eka Putri Nur Ikhfani
NRP : 023115 40000 046
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul **“PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)* BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN SENSOR DAN AKTUATOR PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL KONVENSIONAL”** adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Surabaya, Juli 2019

Yang membuat pernyataan,



Eka Putri Nur Ikhfani
NRP. 02311540000046

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)*
BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN SENSOR DAN
AKTUATOR PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*
MOBIL KONVENSIONAL**

TUGAS AKHIR

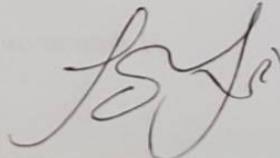
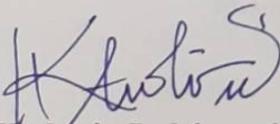
Oleh:

Eka Putri Nur Ikhfani
NRP. 0231154000046

Surabaya, 25 Juli 2019
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T **Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC**
NIP. 19760523 200012 2 001

**Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI – ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN SENSOR DAN
AKTUATOR PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*
MOBIL KONVENSIONAL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Program Studi S-1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Eka Putri Nur Ikhfani
NRP. 02311540000046

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC..... (Pembimbing II)
3. Ir. Ya'umar, M.T..... (Penguji I)
4. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T..... (Penguji II)
5. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T..... (Penguji III)

**SURABAYA
JULI, 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
BERDASARKAN ESTIMASI KESALAHAN SENSOR DAN
AKTUATOR PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*
MOBIL KONVENSIONAL**

Nama : Eka Putri Nur Ikhfani
NRP : 0231154000046
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.
Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC

Abstrak

Anti lock Braking System (ABS) merupakan teknologi keselamatan aktif yang digunakan untuk mengontrol dinamika kendaraan ketika terjadi pengereman secara mendadak. Sensor dan aktuator merupakan salah satu komponen yang terdapat dalam ABS, dimana ketika terjadi kesalahan pada komponen ini akan berpengaruh terhadap kestabilan sistem dan menurunkan tingkat *safety* (keamanan). Pada tugas akhir ini diterapkan skema *Fault Tolerant Control* (FTC) agar dapat mengkompensasi kesalahan pada sensor maupun aktuator sehingga meningkatkan performansi sistem. Sistem yang ditinjau pada tugas akhir ini menggunakan pemodelan *Quarter Car Model* (QCM). Kontroller yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *Sliding Mode Controller* dengan parameter *gain* k dan *epsilon* (ϵ) berturut-turut adalah 60 dan 0,1 dengan respon sistem : *maximum overshoot* 6% dan *settling time* 0,11s. Algoritma FTC bekerja dengan menggunakan hasil perhitungan residual \hat{f}_s dan \hat{f}_a sebagai nilai kompensasi terhadap sinyal pengukuran. Dari hasil uji respon setelah diberi kesalahan bias pada sensor dan aktuator sistem yang dilengkapi FTC mampu mengatasi kesalahan bias aktuator hingga 30%, pada sensor kendaraan hingga 100% dan kesalahan bias *wheel speed sensor* sebesar 20% serta kesalahan sensitivitas aktuator dan sensor kendaraan sebesar 5% dan 90%.

Kata kunci: *anti-lock braking system* , sensor, aktuator, *Fault Tolerant Control* (FTC)

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN OF FAULT TOLERANCE CONTROL (FTC)
BASED ON FAULT ESTIMATION OF SENSOR AND
ACTUATOR ON ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
CONVENTIONAL VEHICLE**

Name : Eka Putri Nur Ikhfani
NRP : 0231154000046
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.
Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC

Abstract

Anti lock Braking System (ABS) is an active safety technology that is used to control vehicle dynamics when sudden braking occurs. Sensors and actuators are one of the components found in ABS, where when faults occurs in this components it will affect the stability of the system and reduce the level of safety . In this final project, the Fault Tolerant Control (FTC) scheme is applied to accommodate errors on the sensors and actuators so as to improve system performance. The system reviewed in this final project used Quarter Car Model (QCM) modeling. The controller used in this final project is Sliding Mode Controller with parameters gain k and epsilon (ϵ), respectively 60 and 0.1 with the system response: maximum overshoot 6% and settling time 0.11s. The FTC algorithm works by using the the residual calculation result \hat{f}_s and \hat{f}_a as the compensation value for the measurement signal. From the results of the response test after being given a bias error on the sensor and actuator the system equipped with FTC is able to overcome the actuator bias error of up to 30%, the bias sensor error of the vehicle is up to 100% and the bias error of wheel speed sensor is 20% along sensitivity error of actuator and sensor vehicle is up to 5% and 90%.

Keywords: anti-lock braking system, sensor, actuator, Fault Tolerant Control (FTC)

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Perancangan *Fault Tolerant Control (FTC)* Berdasarkan Estimasi Kesalahan Sensor dan Aktuator pada *Anti-lock Braking System(ABS)* Mobil Konvensional ”**

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini :

1. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. dan Bapak Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC selaku Pembimbing Tugas Akhir penulis 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 Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D, selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS
4. Bapak Hendra Cordova, ST.,MT selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan di Teknik Fisika.
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
6. Kedua orang tua (Alm Bapak Hasim dan Ibu Yeni Ibtida'ati) dan Adik (aldhan dan Fida) atas kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
7. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir , Ismi Putri Angraini, Retno Indriani, Asmaul Husna, Ajeng Ayu, Klora Hanggiyai, Fatimatus Zulfa,dll.
8. Ahmad Taufiq Nur Hidayat yang selalu menemani dan mensupport penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Teman-teman Asisten Laboratorium Fisika Rekayasa
10. Seluruh teman-teman angkatan 2015 yang turut memberikan dukungannya
11. Semua pihak yang terlibat dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan laporan tugas akhir. Semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Anti-Lock Braking System (ABS)	5
2.2 Sliding Mode Control.....	12
2.3 Fault Tolerant Control	14
2.4 Observer	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Pemodelan Dinamik <i>Quarter Car Model</i>	23
3.2 Pemodelan <i>Wheel Speed Sensor</i> dan Aktuator Hidrolik ...	25
3.3 Perancangan Kontrol <i>Sliding Mode Controller</i>	26
3.4 Perancangan <i>Fault Toleran control (FTC)</i>	29
3.5 Perancangan Observer.....	30
3.6 Pengujian Kesalahan Bias dan Sensitivitas	37
BAB IV ANALISA DATA.....	41

4.1 Uji Pemodelan Anti-Lock Braking System	41
4.2 Uji Sistem Closed Loop.....	42
4.3 Hasil Uji Estimasi Observer	44
4.4 Uji Kesalahan Bias Sensor.	46
4.5 Uji Kesalahan Bias Aktuator	51
4.6 Uji Kesalahan Simultan Sensor dan aktuator	56
4.7 Uji Ketidakpastian.....	68
4.8 Uji Kesalahan Sensitivitas.....	74
BAB V PENUTUP.....	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalantertentu dengan slip rasio roda ((Lubbers, 2014).....	6
Gambar 2. 2	Gambaran umum pengendalian ABS	8
Gambar 2. 3	Komponen khusus ABS (Aly et al., 2011)	8
Gambar 2. 4	Electronic Control Unit (Jitesh, 2014).....	9
Gambar 2. 5	Wheel Speed Sensor (Wabco, 1999)	10
Gambar 2. 6	ABS modulator valve (Wabco, 1999)	11
Gambar 2. 7	Interpretasi grafik SMC(Holkar & Waghmare, 2013	12
Gambar 2. 8	Klasifikasi FTC(Patton, 1997).....	15
Gambar 2. 9	Klasifikasi FDI (Tabatabaeipour, 2011).....	16
Gambar 2.10	Observer State (Ogata, 2009)	18
Gambar 3. 1	Flowchart tugas akhir.....	21
Gambar 3. 2	Dinamika gaya yang bekerja pada quarter car model (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007)	24
Gambar 3. 3	Diagram blok SMC untuk ABS mobil konvensional.....	29
Gambar 3. 4	Diagram blok perancangan FTC.....	30
Gambar 3. 5	Struktur Observer	37
Gambar 4. 1	Grafik respon pada open loop.....	41
Gambar 4. 2	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda tanpa dilengkapi ABS.....	42
Gambar 4. 3	Respon sistem close loop dengan SMC.....	43
Gambar 4.4	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan setelah dilengkapi ABS	43
Gambar 4. 5	Estimasi kesalahan bias sensor kendaraan.....	44
Gambar 4. 6	Estimasi kesalahan bias pada sensor roda.....	45
Gambar 4. 7	Estimasi kesalahan bias pada aktuator.....	45
Gambar 4. 8	Respon slip ratio observer dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 25%	46
Gambar 4.9	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 25%	47

Gambar 4. 10	Respon hasil estimasi slip ratio observer dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 50% ...	47
Gambar 4. 11	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 50% .	48
Gambar 4. 12	Respon hasil estimasi slip ratio observer dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 100% .	48
Gambar 4. 13	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 100% .	49
Gambar 4. 14	Respon hasil estimasi slip ratio observer dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 8% .	50
Gambar 4. 15	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 8% .	51
Gambar 4. 16	Respon hasil estimasi slip ratio observer dengan kesalahan bias aktuator sebesar 5% .	52
Gambar 4. 17	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator sebesar 5% .	52
Gambar 4. 18	Respon hasil estimasi slip ratio observer dengan kesalahan bias aktuator sebesar 10% .	53
Gambar 4. 19	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator sebesar 10% .	53
Gambar 4. 20	Respon hasil estimasi slip ratio observer dengan kesalahan bias aktuator sebesar 30% .	54
Gambar 4. 21	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator sebesar 30% .	54
Gambar 4. 22	Respon hasil estimasi slip ratio dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 25% dan aktuator sebesar 5% .	56
Gambar 4. 23	Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 25% dan aktuator aktuator sebesar 5% .	57

Gambar 4. 24	Respon hasil estimasi slip ratio dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 30%	57
Gambar 4. 25	Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 30%	58
Gambar 4.26	Respon hasil estimasi observer dengan kesalahan bias sensor sebesar 25% dan aktuator sebesar 5%	60
Gambar 4. 27	Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 25% dan aktuator aktuator sebesar 5%	60
Gambar 4. 28	Respon hasil estimasi slip ratio dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 30%	61
Gambar 4. 29	Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 30%	61
Gambar 4. 30	Respon hasil estimasi slip ratio dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 10% pada detik ke-0,4.....	63
Gambar 4. 31	Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 30%	64
Gambar 4. 32	Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% kesalahan aktuator 10% serta kesalahan sensor roda 8%	65
Gambar 4. 33	kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 10% serta kesalahan sensor roda 8%.....	65
Gambar 4. 34	Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% kesalahan aktuator 10% serta kesalahan sensor roda 20%	66
Gambar 4. 35	kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan	

	aktuator aktuator sebesar 10% serta kesalahan sensor roda 20%	66
Gambar 4. 36	Respon hasil slip rasio jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan kontroller tetap hanya massa mobil	68
Gambar 4. 37	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan kontroller tetap hanya massa mobil	69
Gambar 4. 38	Respon hasil slip rasio jika diberi penumpang sebanyak 1 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang.....	69
Gambar 4. 39	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 1 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang,	70
Gambar 4. 40	Respon hasil slip rasio jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang.....	70
Gambar 4. 41	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang	71
Gambar 4. 42	Respon hasil slip rasio jika diberi penumpang sebanyak 6 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang.....	71
Gambar 4. 43	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 6 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang	72
Gambar 4. 44	Respon slip ratio dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 1%	74
Gambar 4. 45	Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 1%	75
Gambar 4. 46	Respon slip ratio dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%	75

Gambar 4. 47	Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%	76
Gambar 4. 48	Respon slip ratio dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%	77
Gambar 4. 49	Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%	77
Gambar 4. 50	Respon slip ratio dengan kesalahan sensitivitas aktuator 5%	78
Gambar 4. 51	Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 5%	78
Gambar 4. 52	Respon slip ratio dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1% dan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 10%	80
Gambar 4. 53	Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1% dan sensor kendaraan 10%	80

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Koefisien Gesek Roda Jalan (Guo et al., 2014).....	7
Tabel 3. 1	Parameter gaya yang bekerja saat pengereman (Guoetal.,2014)	24
Tabel 3. 2	Parameter koefisien gesekan pada permukaan dry asphalt (aspal kering) (Guo et al., 2014).....	25
Tabel 4. 1	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan.....	50
Tabel 4.2	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias Aktuator.....	55
Tabel 4.3	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan pada detik ke-0,3 dan aktuator pada detik ke 0,4	59
Tabel 4. 4	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan pada detik ke-0,4 dan aktuator pada detik ke 0,3	62
Tabel 4. 5	performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% aktuator sebesar10% serta kesalahan bias sensor kendaraan.....	67
Tabel 4. 6	Performansi sistem saat diberi uji ketidakpastian ...	73
Tabel 4. 7	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan.	77
Tabel 4.8	Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias Aktuator.....	79

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan merupakan alat yang digunakan untuk bermobilitas setiap orang untuk berpindah dari suatu tempat ke tempat yang lain. Penggunaan kendaraan bermotor saat ini sudah menjadi sarana populer di negara-negara berkembang seperti negara Asia khususnya Asia Tenggara tidak terkecuali di Indonesia. Di Indonesia kendaraan bermotor sudah menjadi kebutuhan pokok untuk mempermudah kegiatan sehari-hari yang awalnya hanya berorientasi sebagai kebutuhan sekunder. Masyarakat Indonesia juga semakin antusias untuk memiliki kendaraan bermotor dikarenakan aturan kementerian Perindustrian (kemenprin) mengenai kebijakan mobil murah dan ramah lingkungan atau Low Cost Green Car (LCGC) yang tertuang dalam Peraturan Menteri Perindustrian No. 33/M-IND/PER/7/2013 tentang Pengembangan Produksi Kendaraan Bermotor Roda Empat yang Hemat Energi dan Harga Terjangkau. Dalam kendaraan, umumnya mobil salah satu faktor yang paling penting adalah keamanan (*safety*). Salah satu alat safety paling penting dari Kendaraan Bermotor baik Roda Empat maupun Roda Dua adalah pengereman pada kendaraan itu sendiri. Kegagalan dari system pengereman adalah hal yang harus dihindari karena dapat menyebabkan kecelakaan yang berakibat fatal.

Teknologi sistem pengereman terkini yang telah berkembang saat ini dan telah menjadi perangkat standar kendaraan adalah system pengereman *anti-lock braking system* (ABS). ABS merupakan sistem pengereman yang berfungsi agar roda pada mobil tidak terkunci ketika pengereman secara mendadak dilakukan (Chen & Wang, 1996). Hal ini menjadikan jarak pengereman (*Stopping distance*) lebih pendek dan kendaraan masih tetap stabil atau mudah dikendalikan meskipun direm pada kondisi berbelok. Pada saat terjadi pengereman mendadak atau darurat, mobil yang dilengkapi dengan ABS tetap

stabil dikarenakan jarak penghentian mobil menjadi berkurang dan meningkatkan pengendalian kemudi kendaraan (Lee & Zak, 2002).

Komponen utama dari sistem pengereman ABS adalah *electronic controller unit* (ECU), *wheel speed sensor* dan *modulator unit*. Saat ini teknologi ABS telah banyak dikembangkan untuk mencegah terjadinya kecelakaan ketika ada pengereman secara tiba-tiba. Kegagalan sistem secara tiba-tiba juga dapat meningkatkan terjadinya kecelakaan, sehingga untuk menanggulangi hal tersebut diperlukan adanya teknologi untuk mengestimasi dan menoleransi kesalahan, meningkatkan kinerja dan efisiensi dari sistem ABS. Dalam sistem ABS terdapat sensor dan aktuator yang memiliki aksi penting untuk controller. Kesalahan maupun kegagalan pada sensor dan aktuator tentunya sangat mempengaruhi kinerja keseluruhan dari plant. Sehingga berbahaya bagi keselamatan pengendara mobil. Kesalahan dari sensor dan aktuator dapat disebabkan karena kerusakan eksternal maupun kesalahan dari kalibrasi. Teknologi yang dapat digunakan untuk mengakomodasi kesalahan pada sensor dan aktuator serta dapat menoleransi kesalahan secara otomatis adalah *Fault Tolerant Control* (FTC). FTC dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis yaitu *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) dan *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC). AFTC terdiri dari 3 tahapan yaitu *Fault Detection*, *Fault Isolation* dan *Controller Reconfiguration* (Ichikawa, Sebe, Suyama, & Indriawati, 2017). *Fault Detection* dan *Fault Isolation* digunakan untuk mengestimasi kesalahan sedangkan *Controller Reconfiguration* digunakan untuk mengkompensasi sinyal secara otomatis, sehingga sistem dapat tetap stabil.

Metode estimasi yang sering dikenal pada bidang *Fault Detection* dan *Fault Isolation* (FDI) adalah menggunakan observer. Penelitian sebelumnya yaitu tentang perancangan AFTC pada regenerative anti-lock braking system pada mobil listrik dengan kesalahan pada sensor (Rifqi, 2018) dan Perancangan Sistem *Active Fault Tolerant Control* pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* Mobil Listrik dengan Kesalahan pada

Aktuator(Dianrise, 2018). Namun pada penelitian tersebut kesalahan yang diestimasi hanya pada komponen sensor atau aktuator saja sehingga hasilnya kurang maksimal. Oleh karena itu dibuat tugas akhir mengenai Perancangan FTC pada anti-lock braking system mobil konvensional untuk estimasi kesalahan pada sensor dan aktuator .

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana merancang observer yang dapat digunakan untuk estimasi kesalahan sensor dan aktuator pada *Anti-Lock Braking System* (ABS)?
- Bagaimana merancang *Fault Tolerant Control* (FTC) pada sistem *Anti-Lock Braking System* (ABS) untuk mengakomodasi kesalahan sensor dan aktuator?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Merancang observer untuk estimasi kesalahan sensor dan aktuator pada *Anti-Lock Braking System* (ABS).
- Merancang *Fault Tolerant Control* (FTC) pada sistem *Anti-Lock Braking System* (ABS) untuk mengakomodasi kesalahan sensor dan aktuator.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah berupa *Quarter Car Model* (QCM) untuk jenis kendaraan berpenumpang.

- Sistem kontrol yang digunakan adalah *sliding mode control* .
- Nilai *setpoint slip ratio* 0,2 berdasarkan dari *slip ratio* yang optimal pada kondisi jalan aspal kering .
- Kendaraan diasumsikan dengan kondisi pengereman sampai berhenti dan berada pada lintasan lurus di kondisi , jalan datar, dan tidak bergelombang.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**

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

- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori *Anti-Lock Braking System (ABS)* , *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 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan sistem *Fault Tolerant Control (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 DASAR TEORI

2.1 Anti-Lock Braking System (ABS)

Anti-Lock Braking System (ABS) adalah teknologi keselamatan aktif yang digunakan untuk mengontrol dinamika kendaraan ketika terjadi pengereman secara mendadak. Dalam sistem ini, slip longitudinal roda diatur pada nilai optimalnya untuk menghasilkan gaya pengereman yang maksimum. Dengan menggunakan cara ini, maka jarak berhenti minimum untuk kendaraan tercapai serta stabilitasnya juga dapat dipertahankan. Sebaliknya, ketika ban terkunci selama pengereman, koefisien gesek dari jalan akan turun ke nilai gesernya, sehingga kemampuan ban untuk mempertahankan gaya pada bagian sisi ban berkurang hingga hampir nol. Akibatnya, jarak berhenti akan lama dan stabilitas arah kendaraan dalam memutar manuver akan hilang (Mirzaeinejad & Mirzaei, 2010). Agar dapat menganalisis sistem pengereman ABS pada mobil konvensional pemodelan dinamik dilakukan menggunakan pendekatan *quarter car models*. Saat dilakukan pengereman pada mobil terdapat 2 persamaan dinamis yang membengaruhi sistem ABS.

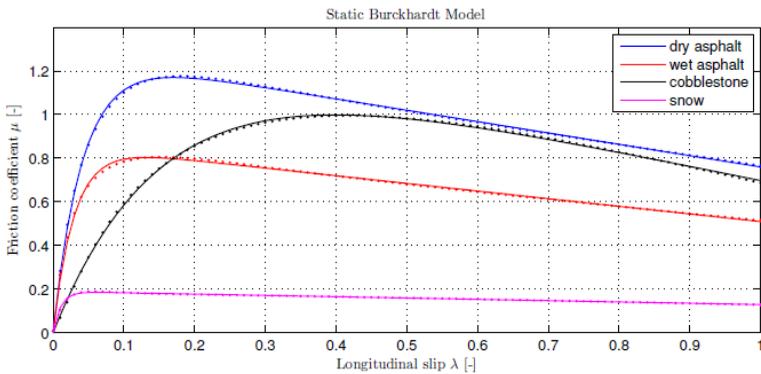
$$m \cdot \frac{dv}{dt} = - F_x \quad (2.1)$$

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

Gerak dari kendaraan dapat dimodelkan dengan persamaan hukum II Newton dan dipengaruhi oleh massa mobil (m); gaya gesek (F_x). Saat pengereman dilakukan, juga terdapat torsi pengereman yang bekerja yaitu (T_b)

Saat terjadi proses pengereman, ban menghasilkan gaya *tractive force* (gaya dorong) dimana gaya tersebut sebanding dengan gaya normal jalan yang bekerja pada ban. Perbandingan digunakan tergantung dengan variasi jalan tersebut atau koefisien jalan seperti kering, basah, bersalju, dan lainnya, serta karakteristik lekukan jalan tersebut seperti bergelombang, berlubang, atau rata, dan lainnya. Perbandingan variasi atau

koefisien permukaan jalan dapat dilihat dari grafik fungsi non-linier antara koefisien jalan (μ) dengan *rasio slip* (λ) untuk kondisi spesifik jalan tertentu. Pada Gambar 2.1 ditunjukkan bahwa untuk berbagai kondisi jalan, koefisien gesek maksimum adalah saat nilai 0,2 dan memiliki koefisien yang rendah atau sangat buruk ketika nilai rasio slip roda 1 yaitu saat roda dalam keadaan terkunci sempurna. Oleh karena itu nilai rasio slip roda dijaga agar dalam keadaan optimal yaitu bernilai 0,2 untuk memaksimalkan koefisien gesek dari kondisi jalan.



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

Pada gambar diatas juga dapat dilihat bahwa saat kondisi jalan bersalju dan es, gesekan antara ban dan jalan mengecil sehingga memiliki μ (*breaking effort coefficient*) yang sangat rendah dan mengakibatkan resiko slip roda semakin tinggi. Berbeda dengan kondisi jalan aspal kering dan beton kering yang dapat dikatakan kondisi jalan normal, gesekan memiliki μ yang besar, sehingga resiko roda akan slip menjadi sangat rendah.

Berdasarkan penelitian(Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011) rasio slip (λ) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis yang merupakan fungsi dari kecepatan kendaraan dan putaran roda yang dapat dinyatakan pada persamaan 1.

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (2.3)$$

Dengan v adalah kecepatan kendaraan (m/s), ω adalah kecepatan angular roda (rad/s) dan R adalah jari-jari putaran roda (m). Nilai rasio slip pada kendaraan akan bernilai maksimal pada saat bernilai 1 (roda terkunci sempurna) dan bernilai minimum 0 pada saat roda berputar tanpa adanya gaya pengereman yang dilakukan.

Nilai μ berdasarkan pada penelitian (Guo, Jian, & Lin, 2014) diperoleh melalui persamaan:

$$\mu(\lambda, v) = \left[C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \right] e^{-C_4\lambda v} \quad (2.4)$$

Dimana:

C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan

C_2 = Bentuk kurva gesekan

C_3 = Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$

C_4 = Nilai karakteristik kebasahan jalan

Tabel 2. 1 Koefisien Gesek Roda Jalan (Guo et al., 2014)

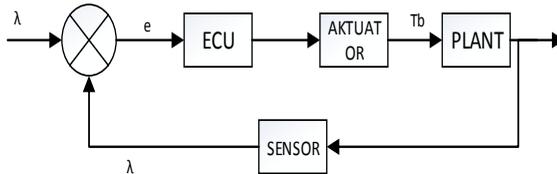
kondisi Jalan	C_1	C_2	C_3	C_4
Asapal Kering	1.029	17.16	0.523	0.03
Beton Kering	1.1973	25.168	0.5373	0.03
Salju	0.1946	94.129	0.0646	0.03
Es	0.05	306.39	0	0.03

Tabel 2.1 berisi tentang beberapa koefisien berdasarkan pada kondisi jalan. Nilai koefisien gesek yang dihasilkan mempengaruhi *tractive force* pada roda kendaraan. Namun dengan adanya kendali rasio slip yang dijaga agar tetap berada pada kisaran 0,2 maka kerja roda dapat lebih optimal dan meminimalisir tingkat keausan ban.

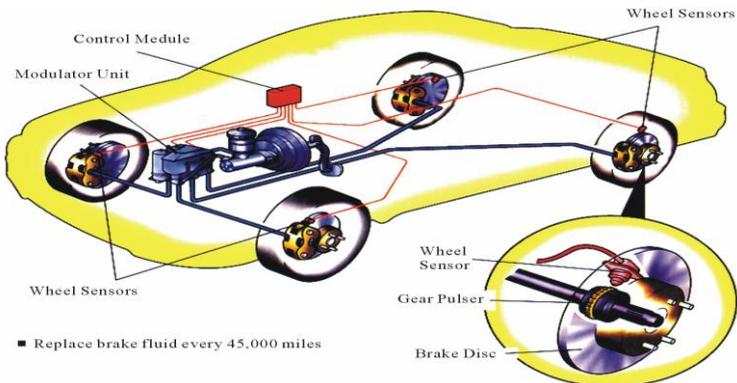
Berdasarkan tujuan utama dari adanya ABS didapatkan 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan

dari kendaraan (Harifi, Aghagolzadeh, Alizadeh, & Sadeghi, 2005). Jarak henti dari kendaraan pada proses pengereman menjadi faktor penting. Parameter yang mempengaruhi jarak henti dari kendaraan adalah massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan, dan gaya pengereman. Jarak henti pengereman dari kendaraan dapat diperkecil dengan peningkatan gaya pengereman dikarenakan setiap jenis permukaan jalan memiliki koefisien gesek dari gaya pengereman tersebut, sehingga adanya ABS dapat mengontrol kendaraan untuk mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum.

Gambaran umum dari sistem pengendalian ABS adalah ditunjukkan pada gambar 2.2 untuk gambaran umum pengendalian ABS dan Gambar 2.3 merupakan komponen dari *Anti-Lock Braking System* :



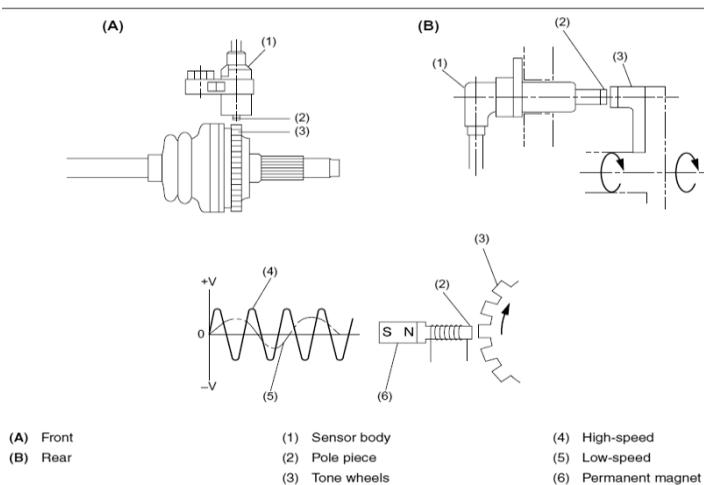
Gambar 2. 2 Gambaran umum pengendalian ABS



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

2.1.1 Electronic Control Unit (ECU)

ECU adalah bagian yang bertugas untuk memproses fungsi dari ABS. Secara umum ECU bertugas untuk menerima, menguatkan dan menyaring sinyal yang dikirim oleh sensor untuk menghitung kecepatan dan akselerasi roda, lalu secara *logic* memutuskan roda ketika hendak mengunci, dan mengaktifkan *valve* ABS pada kondisi dan waktu tertentu. ECU menggunakan kecepatan roda dan kendaraan untuk mengontrol nilai slip ratio dengan membandingkan kecepatan dari masing-masing roda. Pada saat *valve* aktif, ECU dapat mengatur tekanan udara yang menuju ruangan rem. Gambar 2.4 menunjukkan gambar serta komponen – komponen dari ECU



Gambar 2. 4 Electronic control unit (Jitesh, 2014)

2.1.2 Wheel speed Sensor

Fungsi dari wheel speed sensor yaitu untuk mendeteksi kecepatan putaran masing-masing roda melalui sensor yang terpasang pada masing-masing roda. Sehingga didapatkan input putaran dari masing-masing roda jika terdapat slip atau perbedaan

putaran antara masing- masing roda, maka dari inputan ini ECU akan memberikan sinyal masukan untuk aktuator yang selanjutnya akan dikirimkan tekanan fluida (tinggi-rendahnya tekanan) pada masing-masing sistem pengereman untuk mencegah terjadinya slip. Gambar 2.5 merupakan gambar dari wheel speed sensor pada ABS yang disambungkan pada roda .



Gambar 2. 5 Wheel speed sensor (Wabco, 1999)

Prinsip dari sensor ini dapat dipahami sebagai berikut, sinyal sinusoidal diproduksi sebagai impuls roda untuk membuka gigi yang melewati depan sensor , yang menyebabkan perubahan medan magnet. Perubahan terjadi karena gigi logam dan adanya space terbuka pada impuls roda yang melewati sensor. Komponen-komponen yang terlibat terhadap sensor kecepatan roda adalah sebagai berikut:

- a. *Toot Wheel (Roda Gigi)*
Roda gigi biasanya memiliki 100 gigi dengan jarak yang sama dan biasanya dipasang pada pusat barrel pada setiap roda yang di-*sensing*.
- b. *Sensor Holder dan Spring Clip*
Pada roda belakang , sensor dipasang pada *Sensor holder* yang di las pada rumah gandar. *Spring clip* mencengkram sensor ke dalam *holdernya*. Di roda depan, sensor dipasang

di *bushing* yang terletak pada *steering knuckle*. *Spring clip* digunakan untuk menahan sensor di dalam *bushing*.

c. Kabel Sensor Extention

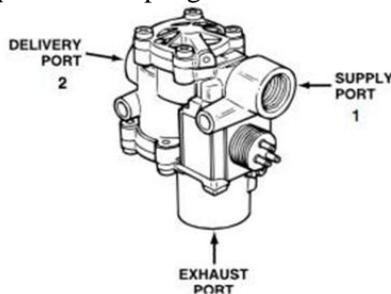
Kabel sensor ekstensi merupakan bagian dari ABS *chassis* yang digunakan untuk menghubungkan sensor ke ECU.

2.1.3 Unit Modulator

Unit Modulator *atau disebut juga dengan ABS Modulator Valve* berfungsi untuk mengatur tekanan udara ke masing-masing rem yang dikontrol oleh ABS. Pada saat pengereman normal, *ABS Modulator Valve* tidak diaktifkan sehingga udara mengalir melalui katup ABS ke ruang rem. Selama ABS beroperasi, katup ABS bertugas untuk memodulasi tekanan udara di ruang rem yang berfungsi untuk mengendalikan pengereman dan mencegah ban *lockup*. Katup ABS adalah katup udara yang dikontrol solenoida, terdiri dari dua jenis solenoida yang dioperasikan secara elektrik dan dua katup diafragma. ECU bertugas mengendalikan solenoida agar bertindak sangat cepat, karena solenoida berfungsi untuk mengendalikan diafragma, yang akan membuka atau menutup agar memberikan dan mengurangi tekanan pada ruang rem.

Valve ABS memiliki 3 ports:

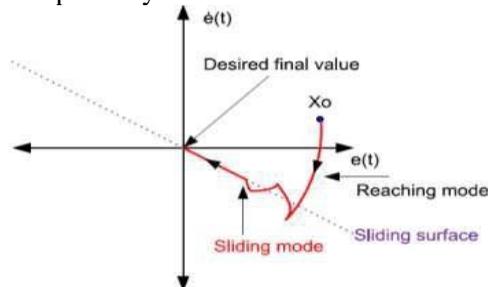
1. Supply port menerima tekanan udara dari *relay valve*.
2. Delivery port memberikan tekanan udara ke rem *chambers*.
3. Exhaust port hanya mengeluarkan tekanan udara dari sisi *delivery-port* selama pengontrolan ABS.



Gambar 2. 6 ABS modulator valve (Wabco, 1999)

2.2 Sliding Mode Control

Sliding Mode Control (SMC) merupakan metode kontrol modern yang menggunakan State Space untuk menganalisa suatu sistem (Nasir, Ismail, & Ahmad, 2010). Penggunaan metode *state space* ini relatif mudah untuk digunakan pada model sistem yang kompleks dan *multi input multi output system* (MIMO). 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 (Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh, 2016). 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 luncur (*reaching mode*) dan mempertahankan nilai tertentu. Penentuan nilai permukaan luncur 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 luncur sepenuhnya.



Gambar 2. 7 Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013)

Pada Gambar 2.7 dapat dilihat bahwa pada saat dimulai dari berbagai kondisi, *trajectory state* (X_0) akan menuju permukaan *sliding mode* (*reaching mode*), dan kemudian akan meluncur sepanjang permukaan menuju target (*sliding mode*).

Langkah pertama dalam merancang SMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*). Persamaan *sliding surface* akan mengikuti persamaan (2.5), dimana hanya dipengaruhi oleh satu parameter skalar yaitu λ yang ditentukan oleh perancang sistem dan bernilai positif konstan (Slotine & Li, 1991). n adalah besarnya order dari suatu sistem.

$$S(t) = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (2.5)$$

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

$$V = \frac{1}{2} S^2, V_0 = 0, V > 0 \quad (2.6)$$

Berdasarkan penelitian (Rahmani et al., 2016) apabila fungsi scalar yang terdapat pada $V(x,t)$ bersifat kontinu maka turunan parsial pertama fungsi tersebut memenuhi kondisi definit negatif. Berdasarkan Teorema Lyapunov yang diterapkan pada persamaan (2.8) didapatkan turunan pertama memenuhi syarat kestabilan sistem yang bersifat definit negatif dengan nilai ε (epsilon) merupakan suatu konstanta positif

$$V' = ss' \leq -\varepsilon|s| < 0 \quad (2.7)$$

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

$$sgn(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Adanya definisi dari fungsi singnum, persamaan (2.8) dapat dituliskan ke bentuk lain seperti pada persamaan (2.9) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

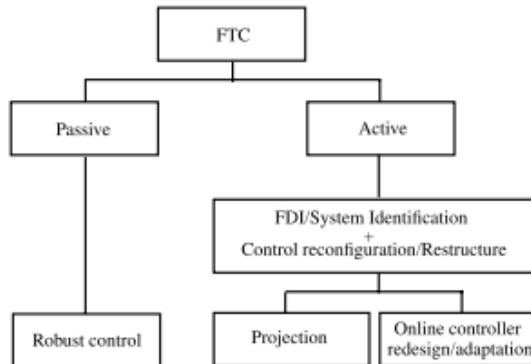
$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (2.9)$$

Dengan ε (epsilon) dan k adalah positif konstan.

2.3 Fault Tolerant Control

Desain suatu sistem kontrol terkadang dapat mengalami penurunan kinerja atau mengalami penurunan kestabilan. Hal ini terjadi karena kesalahan kecil yang tidak segera diatasi, kesalahan yang terjadi biasanya terletak pada sensor, aktuator, atau komponen yang lainnya yang menyebabkan penurunan dari performa kinerja sistem. Untuk mengatasi hal tersebut telah dilakukan pengembangan pendekatan baru untuk mengendalikan sistem. Pendekatan ini dilakukan dengan menolerir kerusakan pada komponen serta mempertahankan stabilitas dan kinerja sistem yang diinginkan. Pendekatan baru yang diterapkan dalam sistem kontrol adalah *Fault Tolerant Control* (FTC). Tujuan umum dari sistem FTC adalah merancang pengendali dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja yang diinginkan dan tidak hanya saat komponen pengendali berfungsi secara normal melainkan saat adanya kesalahan pada suatu komponen tersebut (Indriawati, Sebe, Agustinah, & Jazidie, 2015). Sistem FTC dapat Dibangun dengan 2 pendekatan yaitu *passive* dan *active*. *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) dirancang untuk mempertahankan sistem *closed loop* tetap sensitif terhadap kegagalan yang terjadi, sedangkan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) bereaksi terhadap kegagalan komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol, sehingga kestabilan dan kinerja pada sistem dapat dijaga (Ichikawa et al., 2017). Perbedaan

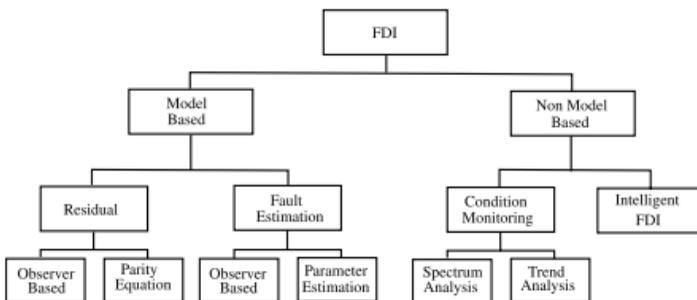
mendasar antara PFTC dan AFTC yaitu pada perancangan *Reconfigurable Control* (RC) dan *Fault Detection and Diagnosis Scheme* (FDD) dimana perancangan tersebut diperlukan pada sistem AFTC sedangkan sistem PFTC tidak memerlukan perancangan tersebut. Berikut merupakan gambar klasifikasi dari FTC:



Gambar 2. 8 Klasifikasi FTC(Patton, 1997)

Secara umum, sebuah sistem FTC aktif terdiri atas beberapa bagian sub-sistem seperti teknik deteksi/diagnosis kesalahan; mekanisme rekonfigurasi kontroler; dan kontroler (*reconfigurable controller*). Ketiga bagian tersebut harus bekerja secara berkesinambungan. Ketika sebuah kesalahan terdeteksi, unit FDI menentukan dimana letak kesalahan tersebut, yaitu isolasi kesalahan, kemudian algoritma estimasi kesalahan yang bekerja secara *on-line* diaktifkan. Berdasarkan pada estimasi ini, kontroler dirancang ulang untuk mengkompensasi pengaruh kesalahan. Kontroler ini disebut sebagai *reconfigurable controller* yang biasanya berupa kontroler digital dengan parameter dan/atau struktur dapat diubah secara mudah seperti yang diperintahkan

oleh mekanisme rekonfigurasi kontroler. FDI dibagi menjadi 2 bagian yaitu berdasarkan model dan tidak berdasarkan model seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Model dapat berupa deskripsi secara matematis dari sistem atau dapat juga secara kualitatif menggunakan pohon kesalahan (*fault trees*). Metode menggunakan model kuantitatif dibagi ke dalam 3 kategori utama, yaitu metode estimasi *state*, estimasi parameter, dan *space parity*



Gambar 2. 9 Klasifikasi FDI (Tabatabaeipour, 2011)

2.4 Observer

Observer adalah sebuah subsistem untuk merekonstruksi vektor *state* dari plant. Pada dasarnya model matematis dari observer sama dengan model plant, kecuali pada vektor state dari plant terdapat perbedaan antara state awal dengan estimasi output. Selain itu observer juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem observer mempresentasikan model matematis sistem dalam persamaan ruang keadaan (Ogata, 2009).

Ketika terjadi kesalahan pada sensor dan aktuator, observer akan mengestimasi perbedaan antara keluaran yang diukur dengan estimasi keluaran. Dampak kesalahan aktuator dan sensor dapat direpresentasikan sebagai vektor input tak- diketahui yang beraksi pada dinamika sistem atau pada pengukuran. Sebuah

kesalahan aktuator berhubungan dengan perubahan sebuah input kontrol global yang diterapkan pada sistem, sedangkan sebuah kesalahan sensor berhubungan dengan perubahan sebuah output pengukuran global sistem. Pada umumnya, sistem dinamik dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) yang dapat didefinisikan secara umum untuk sistem diskrit seperti di bawah ini (Ogata, 2009)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.10)$$

$$\dot{y}(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.11)$$

Dengan:

- A = matriks keadaan
- B = matriks kendali
- C = matriks keluaran
- D = matriks gangguan
- $u(t)$ = masukan kendali
- $\dot{y}(t)$ = vektor keluaran
- $\dot{x}(t)$ = vektor keadaan

Model matematis dari *observer* sama seperti model matematis pada sistem namun dengan penambahan gain *observer* (K_e) sehingga menjadi persamaan sebagai berikut,

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_e(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.12)$$

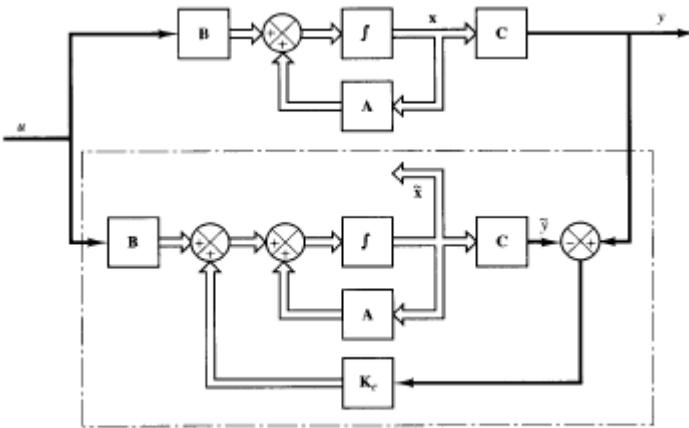
$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (2.13)$$

Dengan:

- $\hat{x}(t)$ = estimasi *state* $\dot{x}(t)$
- K_e = *gain observer*
- $\hat{x}(t)$ = estimasi *state* $x(t)$
- $\hat{y}(t)$ = estimasi $y(t)$

Ketika terjadi kesalahan pada sensor maupun aktuator, *observer* akan mengestimasi perbedaan antara keluaran yang diukur dengan estimasi keluaran. Error inisial atau *initial error* adalah perbedaan antara inisial keadaan dengan inisial akan

terestimasi. *Gain observer* adalah matriks untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran y aktual dan y estimasi sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata, 2009). Dalam menentukan nilai *gain observer* dipengaruhi oleh nilai *pole*. Model matematis *observer* sama seperti model matematis pada sistem sehingga *observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Diagram blok sistem *observer* dapat dilihat pada Gambar 2.10 dibawah.



Gambar 2. 10 Observer state (Ogata, 2009)

Akibat dari kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut dan didefinisikan pada (2.18) dan (2.19), dimana matriks tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada (2.14) dan (2.15) .

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a \quad (2.14)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s \quad (2.15)$$

Tipe kesalahan sensor dan aktuator dimodelkan pada persamaan berikut:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta \quad (2.16)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.17)$$

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 (2.17) dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = A_z[y(t) - z(t)] \quad (2.18)$$

$$\dot{z}(t) = A_z[Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.19)$$

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 (2.19) dapat mendefinisikan persamaan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan persamaan matriks yang sudah di ekspansi. Persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.20).

$$\dot{x}_a(t) = A_a X_a(t) + B_a U(t) + E_a f(t) \quad (2.20)$$

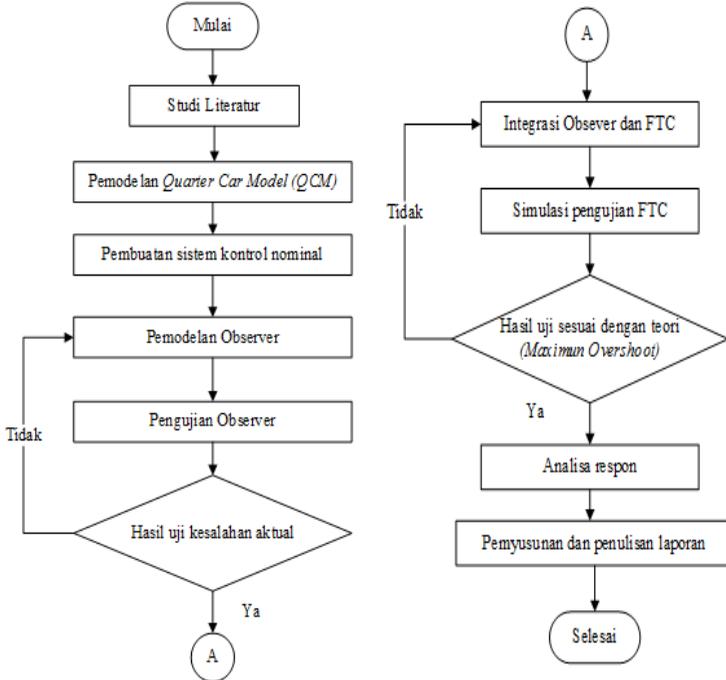
Untuk mendapatkan nilai dari *gain observer* maka dipakai ekspansi melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan persamaan (2.21)

$$\hat{\dot{x}}(t) = A_a \hat{X} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x (Y - \hat{Y}) \quad (2.21)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui *flowchart* yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Flowchart tugas akhir

a. Studi Literatur

Tahapan awal dimulai dari mengumpulkan studi literatur. Yaitu dengan mengumpulkan literatur dan referensi yang relevan mengenai *anti-lock braking system* pada mobil konvensional, *Fault Tolerant Control* pada mobil konvensional, dan *Sliding Mode Control (SMC)*.

- b. *Quarter Car Model*
 Pemodelan terdiri dari model kendaraan, model roda, dan model *anti-lock brake system*, pemodelan aktuator hidrolik, dan pemodelan observer. Pemodelan didapatkan berdasarkan literatur yang didapat. Outputan yang didapat dari pemodelan ini adalah slip ratio (λ). Pemodelan akan disimulasikan pada fitur Simulink pada perangkat lunak Matlab.
- c. *Pembuatan Sistem Kontrol*
 Sistem pengendalian dengan menggunakan *sliding mode control* akan ditambahkan pada ABS dan disimulasikan pada Simulink pada perangkat lunak Matlab. Pada sistem kontrol ini slip ratio dijaga agar tidak lebih dari 0,2
- d. *Perancangan Observer*
 Dalam penelitian ini, Perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan yang ada. Perancangan berdasarkan berdasarkan pada pemodelan matematis yang digunakan.
- e. *Pengujian Observer*
 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*.
- f. *Perancangan Fault Tolerant Control (FTC)* untuk Kesalahan pada Sensor dan Aktuator
 Bagian ini yaitu melakukan perancangan *Fault Tolerant Control(FTC)* menggunakan *Bias Fault Estimation*. Pendekatan yang digunakan yaitu pendekatan *active fault tolerant control (AFTC)*. AFTC dirancang dengan memberikan kesalahan pada sensor dan aktuator serta mengkompensasi sinyal pada sistem sehingga AFTC dapat memperbaiki sinyal kesalahan yang diberikan secara otomatis.
- g. *Pengujian Performansi Skema FTC*

Pengujian FTC dilakukan dengan mensimulasikan model yang mempresentasikan plant dengan parameter model plant yang ditentukan. Hasil penelitian berupa perbandingan numerik pada sistem estimasi kesalahan sensor dan aktuator sebelum dan setelah adanya observer tunggal.

h. Penyusunan dan Penulisan Laporan

Penyusunan Laporan Tugas akhir merupakan pembukuan serta dokumentasi dari semua langkah yang telah ditempuh dalam mengerjakan tugas akhir berupa sebuah tulisan ilmiah.

3.1 Pemodelan Dinamik *Quarter Car Model*

Pemodelan yang digunakan pada Anti-lock Braking System (ABS) adalah pemodelan *Quarter Car Model* yang artinya pemodelan yang digunakan hanya satu roda saja yang mewakili keseluruhan. 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 dengan Gambar 3.5 adalah gaya *frictional* (F_x). Persamaan dari gerak horizontal mobil yang terjadi akibat gaya tersebut ditunjukkan dengan persamaan berikut ini.

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

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

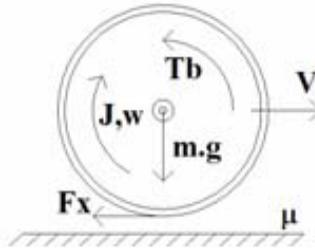
Dengan nilai gaya yang bekerja pada *quarter car model* antara lain sebagai berikut.

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.3)$$

Dengan :

m	= Massa kendaraan <i>quarter car model</i>	(kg)
g	= Gaya gravitasi	(m/s ²)
V	= Kecepatan kendaraan	(m/s)
μ	= Koefisien gesek permukaan jalan	

R = Jari-jari roda (m)



Gambar 3. 2 Dinamika gaya yang bekerja pada quarter car model (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007)

Pemodelan gerak rotasi roda untuk *quarter car model* yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 dengan persamaan seperti berikut ini:

$$F_x r - T_b = J\dot{\omega} \quad (3.4)$$

Dengan:

T_b = torsi pengereman

J = momen inersia roda

ω = kecepatan angular roda (rad/s)

Tabel 3. 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
c_t	rolling resistance (kg/s)	201.39
τ_h	Torsi hidrolik <i>time constan</i> (s)	0.01
V	Kecepatan Kendaraan (m/s)	27.78
w	Kecepatan Roda (rad/s)	84.18

Perhitungan μ pada persamaan Fx didapatkan dari persamaan non-linear sebagai berikut:

$$\mu(\lambda, V) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda V} \quad (3.5)$$

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 $\lambda = 1$,

C_4 = nilai karakteristik kelembaman.

λ = slip ratio

Tabel 3. 2 Parameter koefisien gesekan pada permukaan dry asphalt (aspal kering) (Guo et al., 2014)

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

Pemodelan gerak rotasi kendaraan untuk *quarter car model* memerlukan informasi *slip ratio*, yang mana *slip ratio* akan dikendalikan sebesar 0.2 berdasarkan penelitian (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007). Slip ratio mewakili perbedaan antara kecepatan roda dan kecepatan relative pada kendaraan terhadap permukaan jalan, yang dapat dinyatakan pada persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (3.6)$$

3.2 Pemodelan *Wheel Speed Sensor* dan *Aktuator Hidrolik*

Pemodelan pada *Wheel Speed Sensor* menggunakan nilai pembilang dan penyebut sebesar 1 agar nilai keluaran dari sensor

menuju unit pengendali mempresentasikan nilai *slip ratio* yang terukur.

Setelah dilakukan pemodelan *Wheel Speed Sensor*, tahap selanjutnya yaitu memodelkan aktuator hidrolis. Torsi Pengereman hidrolis dihasilkan oleh tekanan fluida yang memiliki dinamika sistem orde satu. Sehingga persamaan dinamik dari sistem pengereman hidrolis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{T_h(s)}{T_{hf}(s)} = \frac{1}{\tau_h s + 1} \quad (3.7)$$

Dengan memasukkan parameter τ_h sesuai tabel 3.1 maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{T_h(s)}{T_{hf}(s)} = \frac{1}{0.01s + 1} \quad (3.8)$$

3.3 Perancangan Kontrol *Sliding Mode Controller*

Langkah awal yang dilakukan untuk merancang *sliding mode controller* adalah menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*) agar spesifikasi dari desain plant terpenuhi. Langkah 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.

$$m \cdot a = \Sigma F \quad (3.9)$$

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

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

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:

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

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

$$\dot{\lambda}_i = -F_x \frac{R^2}{J} \cdot \frac{1}{V} + \frac{R}{J} \cdot \frac{1}{V} \cdot T_b - \frac{R\omega}{mV^2} \cdot F_x \quad (3.14)$$

Nilai rasio slip digunakan sebagai *sliding surface*, karena nilai rasio slip dikendalikan agar tetap berada pada kondisi idealnya. 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:

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

Disubstitusikan persamaan (3.14) dan (3.15) pada persamaan (3.16), sehingga didapatkan:

$$\lambda_{setpoint} - \left(-F_x \frac{R^2}{J} \cdot \frac{1}{V} + \frac{R}{J} \cdot \frac{1}{V} \cdot T_b - \frac{R\omega}{mV^2} \cdot F_x \right) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad (3.18)$$

Sehingga didapatkan persamaan T_b sebagai berikut:

$$T_{breq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mV}\hat{F}_x + \frac{JV}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.19)$$

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 (3.19) 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 dengan berturut-turut mengacu pada persamaan (3.3) dan (3.4). Kedua estimasi ini mengandung ketidakpastian dalam masa 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} , Persamaan dari T_{bhit} berdasarkan persamaan (3.19) di definisikan sebagai berikut:

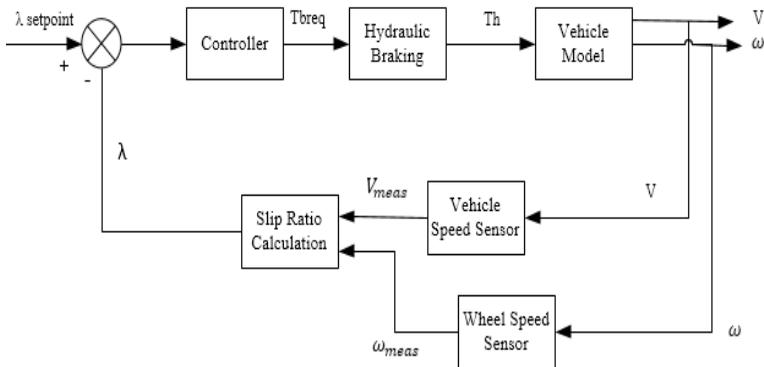
$$T_{bhit} = \frac{JV}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.23)$$

Dengan:

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

ε merupakan gain *sliding* dan k merupakan gain *error*.

Diagram blok dari SMC untuk ABS Mobil konvensional adalah ditunjukkan pada Gambar 3.3 dengan output dari controller merupakan sinyal kontrol berupa torsi pengereman (T_{breq}) yaitu terdiri dari T_{beq} yang merupakan estimasi input kontrol ekivalen dan T_{bhit} merupakan input *control hitting* untuk memenuhi *sliding condition* terjadi ketidakpastian dinamik pada T_{beq} .

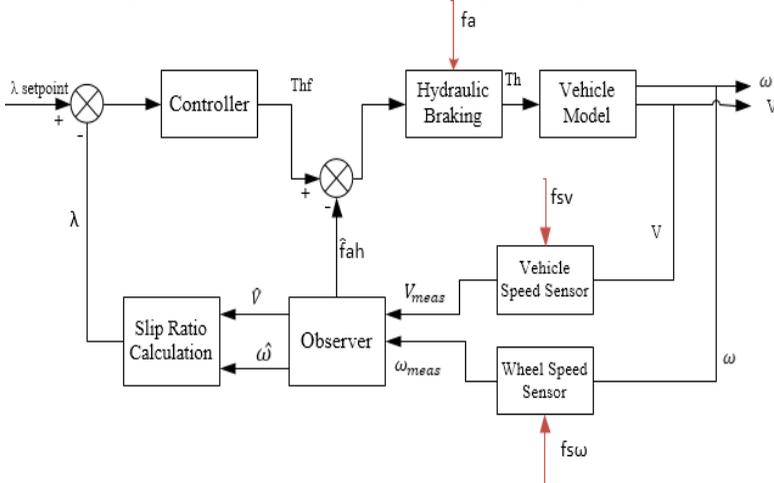


Gambar 3. 3 Diagram blok SMC untuk ABS mobil konvensional

3.4 Perancangan *Fault Toleran control* (FTC)

Perancangan sistem *fault tolerant control* (FTC) dilakukan dengan mendesain Observer menggunakan parameter variabel pengukuran berupa kecepatan dari putaran roda dan kecepatan dari kendaraan yang diukur menggunakan sensor wheel speed. Tujuan dari perancang yaitu untuk membandingkan

performansi kontrol 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

3.5 Perancangan Observer

Pada sistem ABS, terdapat dua sensor yang digunakan, yaitu wheel speed sensor dan vehicle speed sensor. Kedua nilai hasil pengukuran ini menentukan perhitungan slip ratio dari kendaraan. Dengan demikian, kesalahan pada kedua sensor ini dapat mengakibatkan memburuknya respon sistem kontrol. Meskipun SMC merupakan robust controller, namun kesalahan sensor yang dapat diakomodasi oleh kontroler ini terbatas nilainya sesuai tingkat ketidakpastian yang ditentukan. Tugas akhir ini mengajukan pendekatan observer untuk memberikan estimasi dari nilai pengukuran yang benar.

Perancangan *observer* digunakan untuk mengestimasi kesalahan sensor dan aktuator saat terjadi pengereman. Perancangan dimulai dengan mengubah fungsi alih dari kecepatan

gerak rotasi dan persamaan torsi kedalam bentuk *state space* sebagai berikut:

Kecepatan kendaraan didefinisikan sebagai berikut:

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

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

Model 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 dituliskan :

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

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

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

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

$$T_h(s) = 100 T_{hf}(s) - 100 T_h(s) \quad (3.27)$$

Dari ketiga persamaan (3.25b), (3.26b) dan (3.27) dengan mendefinisikan state sistem adalah \dot{V} , $\dot{\omega}$, dan T_b diperoleh bentuk *state space* sistem adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{T}_b \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100 & 0 \\ 0 & -1/j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/m & 0 \\ 0 & 100 \\ r/j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_{hf} \end{bmatrix} \quad (3.28a)$$

Atau dituliskan:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.28b)$$

Dengan:

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

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

State output dapat dituliskan :

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.29a)$$

Atau bisa ditulis:

$$\dot{y} = Cx(t) + Du(t) \quad (3.29b)$$

Dengan:

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

Efek dari kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor, dimana matriks tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (3.28) dan persamaan (3.29) sebagai berikut (Indriawati et al., 2015):

$$\dot{x}(t) = (t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (3.30)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (3.31)$$

Observer dibangun berdasarkan model plant. Torsi pengereman T_b bisa diketahui nilainya dari sinyal kontrol, sedangkan gaya friksi F_x tidak dapat diketahui nilainya. Oleh karena itu, F_x dianggap sebagai gangguan dan harus diestimasi selain kesalahan sensor dan kecepatan wheel. Dengan demikian, kondisi observability tidak dapat terpenuhi jika kedua gangguan tersebut diestimasi. Penelitian ini memilih F_x sebagai variabel yang diestimasi, karena dua alasan. Pertama, F_x diperlukan untuk mengestimasi vehicle speed . Kedua, kesalahan sensor dalam roda dapat dianggap sebagai gangguan inersia roda (j) di mana j lebih kecil dari massa kendaraan m , sehingga dampak dari perubahan ini tidak besar. 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 sebenarnya 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:

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{j}(-\widehat{Tb} + P_\omega(\omega_{meas} - \hat{\omega}) + \widehat{F_x}.r) \quad (3.32)$$

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

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

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

Kemudian struktur observer dibangun berbasis augmented state space dengan struktur PI dengan gain yang digunakan adalah gain K_i dan gain K_p yang didapatkan dengan

menggunakan metode lqr, tuning *trial and error*, persamaan observer untuk gerak kendaraan yang berlaku adalah :

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

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

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

Kesalahan aktuator dapat dianggap sebagai gangguan yang muncul di persamaan state. Dengan demikian, estimasi kesalahan aktuator hidrolik f_{ah} dilakukan dengan cara yang sama dengan estimasi gaya friksi F_x , namun menggunakan model dinamik sistem hidrolik sesuai pada persamaan (3.27) sebagai berikut :

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

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

Persamaan (3.32) sampai (3.39) dituliskan kembali :

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

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

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

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

Sehingga persamaan state space observer dapat ditulis:

$$\dot{\hat{x}} = A_a \hat{X}_a + B_a U + E_a \hat{F}_a + K_p \cdot e \quad (3.40)$$

$$\hat{\dot{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\dot{\omega}} \\ \hat{\dot{v}} \\ \hat{\dot{z}} \\ \hat{\dot{T}}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_z & -P_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{v} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \end{bmatrix} T_{hdem}$$

$$+ \begin{bmatrix} r/j & 0 & 0 \\ -1/m & 0 & 0 \\ 0 & P_z & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{F}_x \\ \hat{f}_{sv} \\ \hat{f}_{ah} \end{bmatrix}$$

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

Dengan:

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

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

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

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

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

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

$$\hat{y} = C_a \widehat{X}_a \quad (3.41)$$

$$\dot{\hat{y}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{z}} \\ \dot{\hat{T}}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{V} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_h \end{bmatrix}$$

Dengan :

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

Dan persamaan gain dapat dituliskan kembali :

$$\begin{aligned} \hat{F}_x &= K_{i\omega}(\omega_{meas} - \hat{\omega}) \\ \hat{f}_{sv} &= K_{iv}(z - \hat{z}) \\ \hat{f}_{ah} &= K_{ih}(T_h - \hat{T}_h) \end{aligned}$$

Segingga ditulis dalam bentuk state space menjadi

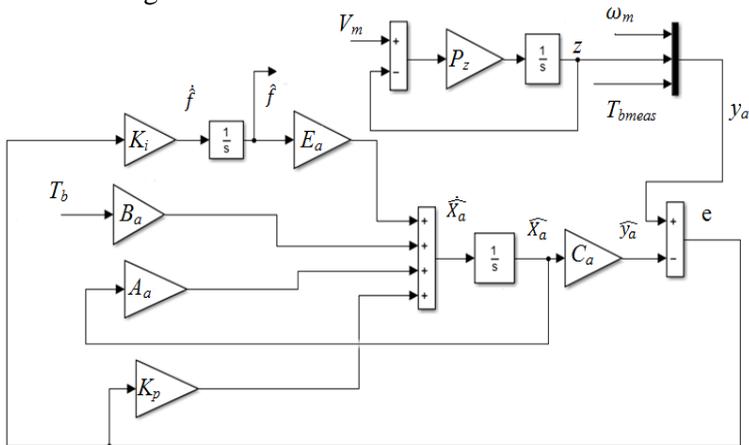
$$\dot{\hat{F}}_a = K_i \cdot e \quad (3.42)$$

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

Dengan :

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

Sehingga berdasarkan persamaan matriks didapatkan struktur observer sebagai berikut:



Gambar 3. 5 Struktur Observer

3.6 Pengujian Kesalahan Bias dan Sensitivitas

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan model *plant* ABS mobil konvensional dan dengan memberi kesalahan bias dan kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan serta kesalahan bias dan sensitivitas pada aktuator. Kesalahan bias dapat berupa penambahan sinyal awal (*initial signal*) yang tidak diharapkan sehingga pembacaan sensor tidak sesuai. Kesalahan sensitivitas merupakan kesalahan pada sensor berupa kesalahan pembacaan, dimana keluaran yang diberikan tidak sesuai dengan nilai seharusnya. Hal ini dikarenakan kurang sensitifnya sensor sehingga tidak mampu sepenuhnya menanggapi perubahan besaran fisis yang terjadi. Sedangkan pada aktuator hidraulik, kesalahan sensitivitas merupakan kesalahan pada bukaan *valve*. Pengujian kesalahan bias pada sensor pada sistem dilakukan dengan cara menambahkan kesalahan yang diberikan saat sistem sudah mencapai stabil, sedangkan pengujian kesalahan sensitivitas dilakukan dengan cara mengalikan sinyal yang diterima dengan konstanta sebesar $(1 - f)$ dianggap sensor dan aktuator kehilangan sensitivitasnya pada saat sistem sudah stabil.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah FTC yang telah dirancang sudah dapat melakukan kompensasi kesalahan dengan baik, baik pada sensor maupun pada aktuator.

Kesalahan pada sensor dan aktuator yang diberikan diperoleh melalui persamaan :

$$y_m = y_{true} + f_s \quad (3.43)$$

$$U = U_{nom} + f_a \quad (3.44)$$

Dengan :

y_m = output pengukuran

y_{true} = output benar sebelum masuk sensor

f_s = kesalahan pada sensor

U = input pengukuran

U_{nom} = input benar

f_a = kesalahan pada aktuator

Jika terdapat kesalahan pada sensor maka informasi tersebut akan diketahui oleh observer sehingga observer tersebutlah yang akan melakukan proses *reconfigurable control* sehingga informasi yang dihasilkan oleh sensor akan diakumulasi oleh informasi hasil dari observer.

Kesalahan bias adalah penyimpangan nilai pembacaan atau *error* pada pembacaan *output* sistem pengukuran yang secara konsisten (*error steady state*) pada satu sisi pembacaan yang benar. Kesalahan bias pada sensor merupakan penyimpangan pembacaan nilai sensor dari nilai sebenarnya. Sedangkan kesalahan bias pada aktuator merupakan kesalahan berupa kebocoran pada aktuator hidraulik. Pengujian pertama yang dilakukan adalah pengujian kesalahan bias sensor kendaraan dengan kesalahan yang diberikan sebesar 25%, 50%, dan 100% dan pengujian kesalahan bias sensor roda yang diberikan sebesar 8%. Kemudian dilanjutkan dengan pengujian yang kedua yaitu kesalahan bias pada aktuator sebesar 5%, 10% dan 30%. Pengujian ketiga yaitu diberikan kesalahan simultan, pada kesalahan simultan dilakukan kesalahan bias pada sensor

kendaraan dan aktuator yaitu pada awalnya sensor kendaraan yang salah pada detik ke 0,3 kemudian aktuator yang salah pada detik ke 0,5 dan sebaliknya serta kesalahan pada sensor kendaraan dan aktuator yang diberikan pada detik yang sama. Kemudian dilakukan juga pengujian kesalahan bias pada sensor roda sebesar 8% dan 20%, sensor kendaraan serta aktuator sebesar 100% dan 10%. Selanjutnya dilakukan pengujian *uncertainty*, pengujian *uncertainty* yang dilakukan berupa berubahnya jumlah penumpang yang berpengaruh terhadap massa *vehicle* dan momen inerti pada roda. Pengujian *uncertainty* yang dilakukan untuk menguji ke robust an dari SMC. Pengujian selanjutnya yang dilakukan yaitu pengujian kesalahan sensitivitas pada aktuator dan sensor, kesalahan yang diberikan untuk sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% serta kesalahan aktuator sebesar 1% dan 5% dan kesalahan sensitivitas aktuator dan sensor kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor sebesar 10% dan aktuator sebesar 1%.

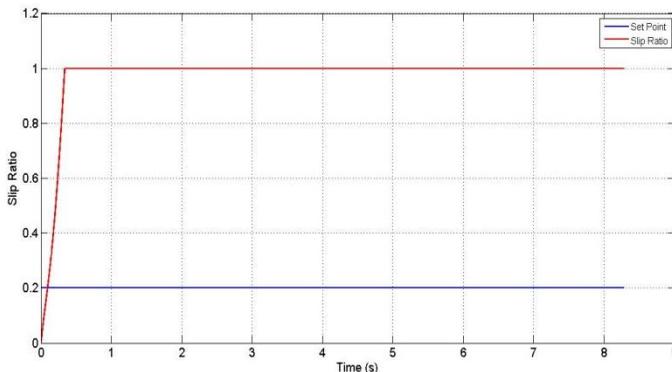
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISA DATA

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai analisa data hasil perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC) pada sistem Anti-Lock Braking System (ABS) mobil konvensional yang telah dilakukan dengan menggunakan simulasi pada perangkat lunak *Matlab R2014a* yang selanjutnya akan dilakukan uji performansi dari sistem. Uji performansi dilakukan untuk mengetahui apakah FTC yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik atau tidak dalam mengakomodasi kesalahan pada aktuator maupun pada sensor.

4.1 Uji Pemodelan Anti-Lock Braking System

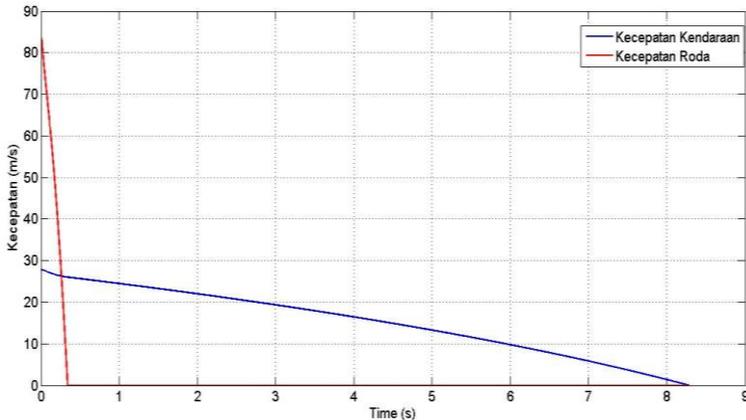
Pada Pengujian pemodelan ABS dilakukan uji loop terbuka yang digunakan untuk pengujian *quarter car model* dengan jurnal sebelumnya yang telah melakukan penelitian tentang ABS. Rasio slip akan terus naik hingga nilai maksimal yaitu pada nilai 1 yang menunjukkan kendaraan kehilangan kemampuan *steerability*-nya karena roda terkunci sempurna. Hal ini terjadi karena saat kendaraan masih mengalami kecepatan yang tinggi sedangkan roda sudah dalam keadaan berhenti.



Gambar 4. 1 Grafik respon pada open loop

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat pemodelan telah sesuai karena nilai *Slip ratio* naik sebesar 1 saat detik 0,34 yang menunjukkan bahwa kendaraan mengalami *lock*.

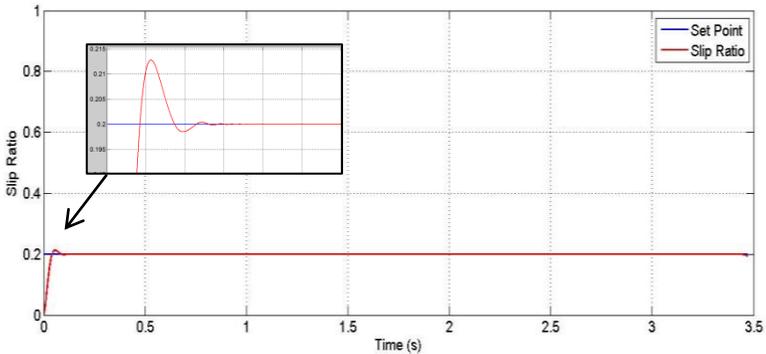
Pada uji kecepatan roda dan kendaraan tanpa dilengkapi *Anti-Lock Braking System (ABS)* menunjukkan hasil pengereman yang kurang baik karena pada saat kecepatan kendaraan masih berada pada kecepatan 26,25 m/s roda sudah mengalami *locking*. Pada detik ke 0,34s kecepatan roda sudah berhenti sedangkan kecepatan kendaraan berhenti pada detik ke 8,28 sehingga selisih waktunya 7.94s 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

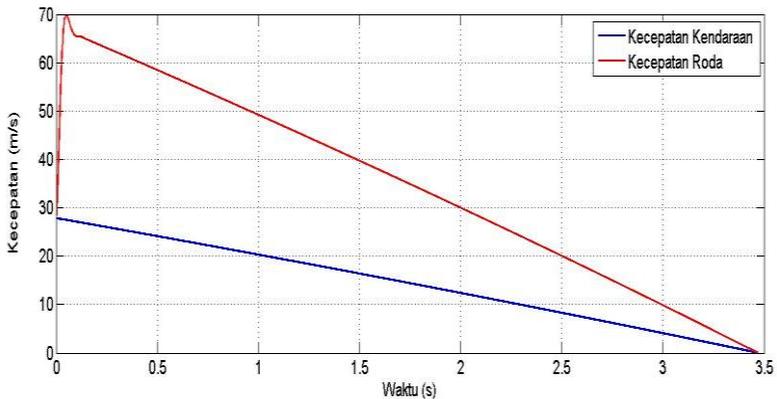
4. 2 Uji Sistem Closed Loop

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)*.



Gambar 4. 3 Respon sistem close loop dengan SMC

Grafik 4.3 menunjukkan hasil uji *close loop* dengan SMC dengan nilai ε dan k berturut-turut adalah 0,1 dan 60 dengan respon sistem ,*maximum overshoot* 6% , *settling time* 0,11 s, dan error steady state sebesar 0. Hasil grafik menunjukkan bahwa respon berada pada area set point dan jarak waktu berhenti kendaraan berada pada detik ke 3.46.



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

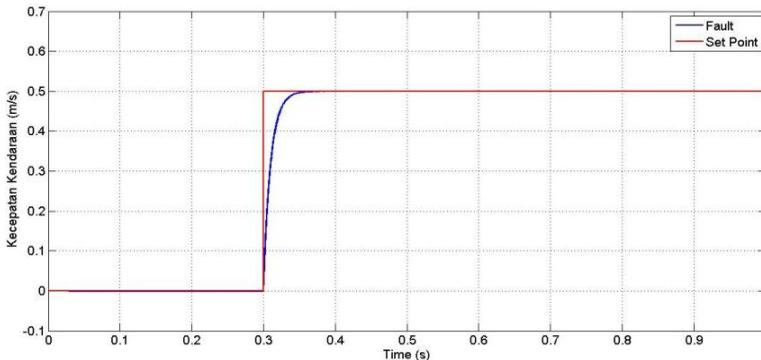
Grafik hasil uji kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan dilengkapi ABS dapat dilihat pada Gambar 4.4 Dengan

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 3,46 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 dilakukan untuk mengetahui kemampuan observer yang telah dirancang dalam mengestimasi *state* dan kesalahan yang diberikan pada sensor maupun aktuator.

Simulasi pertama yang dilakukan adalah simulasi pada sistem dengan kesalahan sensor kendaraan.

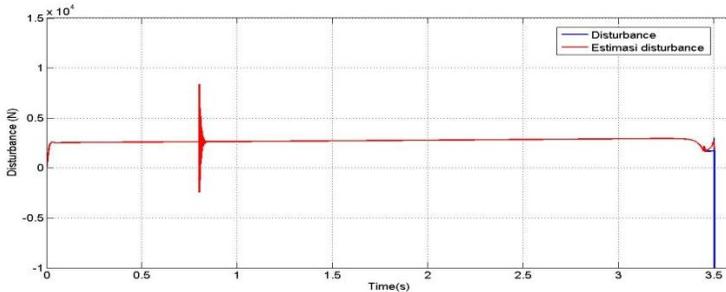


Gambar 4. 5 Estimasi kesalahan bias sensor kendaraan

Gambar 4.5 merupakan grafik hasil estimasi observer dengan kesalahan bias pada sensor kendaraan sebesar 0.5 pada detik ke-0,3s . Dari gambar dapat dilihat bahwa observer yang dirancang sudah dapat mengestimasi kesalahan bias kendaraan yang diberikan, yaitu grafik mengalami kenaikan sebesar 0.5 pada detik ke-0,3s, dengan waktu untuk menuju stabil (*settling time*) sebesar 0,025 s.

Simulasi selanjutnya yang dilakukan pada *plant* saat terjadi kesalahan bias pada sensor roda, Grafik dari hasil estimasi

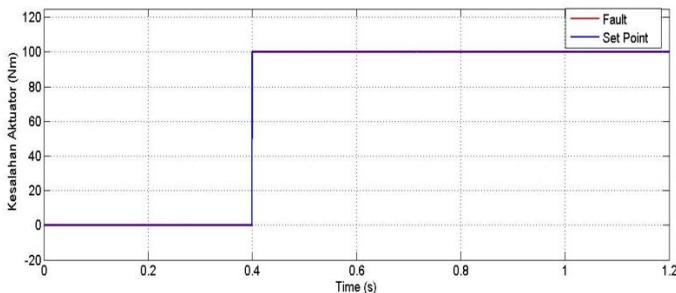
observer setelah diberi kesalahan bias pada sensor roda ditunjukkan pada Gambar 4.6 .



Gambar 4. 6 Estimasi disturbance saat diberi kesalahan bias pada sensor roda

Gambar 4.6 adalah hasil estimasi kesalahan bias oleh observer saat diberi kesalahan sensor roda sebesar 0,2 pada detik ke-0,8 .pada gambar 4.6 terdapat 2 grafik, grafik yang berwarna biru berupa *disturbance* yang berupa gaya gesek yang terdapat pada roda, Dari grafik yang dihasilkan menunjukkan bahwa observer sudah dapat mengestimasi kesalahan yang diberikan, yaitu mengalami osilasi saat diberikan kesalahan pada detik ke 0,8.

Simulasi yang terakhir yaitu saat *plant* diberikan kesalahan bias pada aktuator . Grafik dari hasil estimasi observer setelah diberi kesalahan bias pada aktuator ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Estimasi kesalahan bias pada aktuator

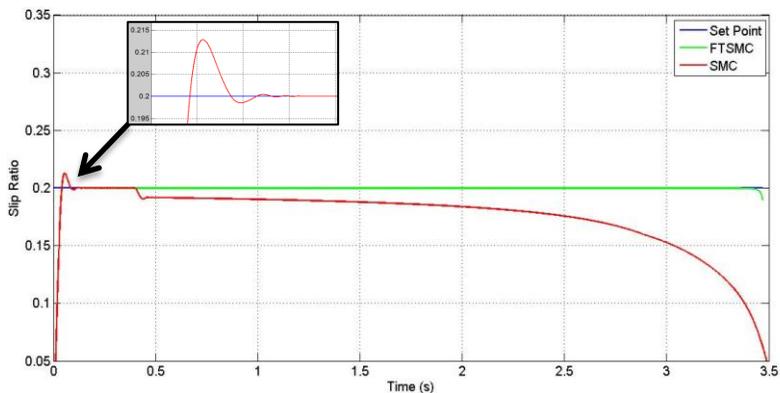
Gambar 4.7 merupakan hasil estimasi kesalahan bias oleh observer saat diberi kesalahan bias aktuator sebesar 10% yaitu 100 pada detik ke 0,4. Dari grafik yang dihasilkan menunjukkan bahwa observer yang dirancang sudah dapat mengestimasi kesalahan yang diberikan, yaitu grafik mengalami kenaikan sebesar 100 saat detik ke 0,4.

4.4 Uji Kesalahan Bias Sensor.

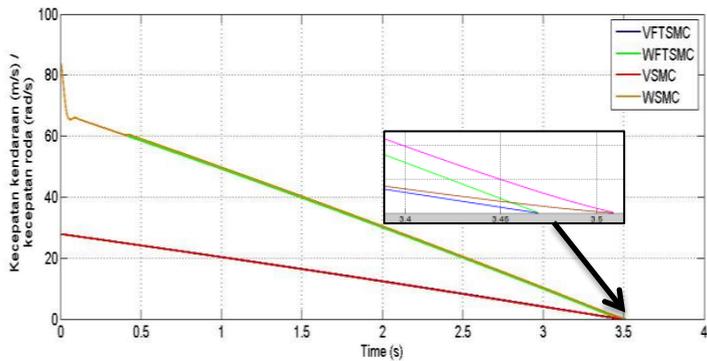
Pada sistem ini terdapat dua sensor yaitu sensor kendaraan dan sensor roda. Kesalahan bias sensor kendaraan yang diberikan adalah sebesar 25%, 50% dan 100%, sedangkan kesalahan bias sensor roda yang diberikan sebesar 8%. Kesalahan yang diberikan tersebut berarti mempresentasikan bertambahnya nilai pada keluaran pembacaan sensor sebesar sebesar 25%, 50%, 100% (meneruskan dua kali sinyal masukan pada sinyal *outputnya*) dan 8%.

4.4.1 Uji Kesalahan Bias Sensor Kendaraan

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.4 dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 25% ,ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.

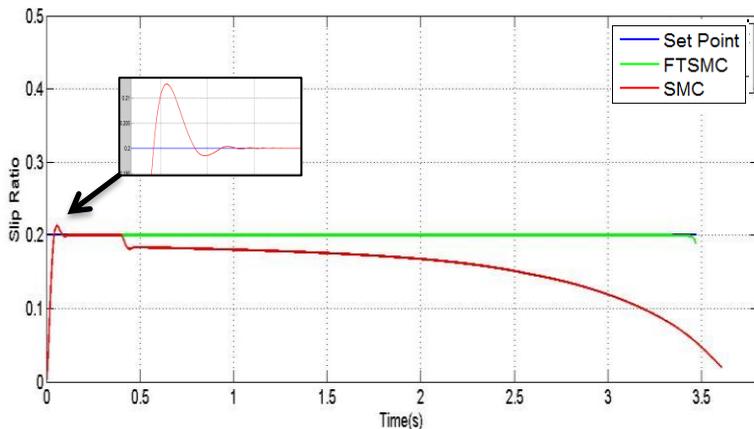


Gambar 4. 8 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 25%

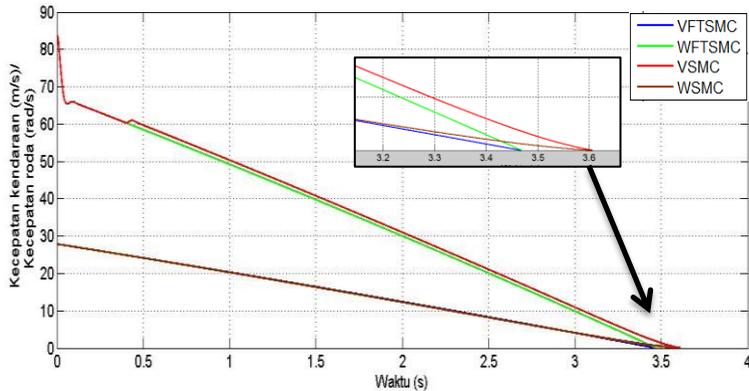


Gambar 4. 9 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 25% .

Simulasi selanjutnya yaitu ketika diberi kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 50% pada detik ke 0.4, yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.

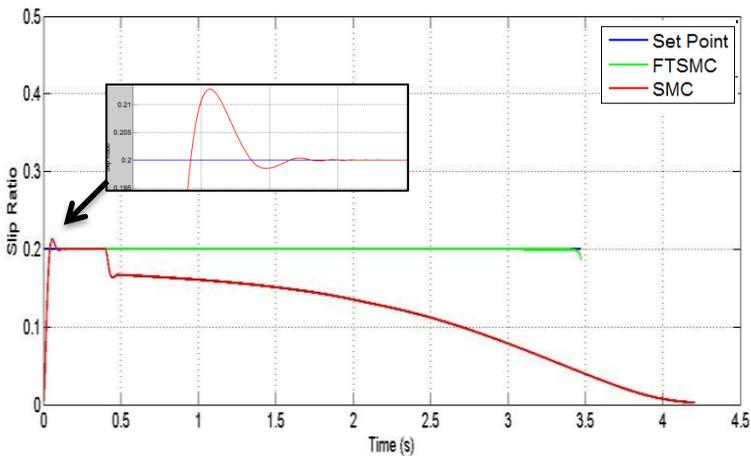


Gambar 4. 10 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 50%

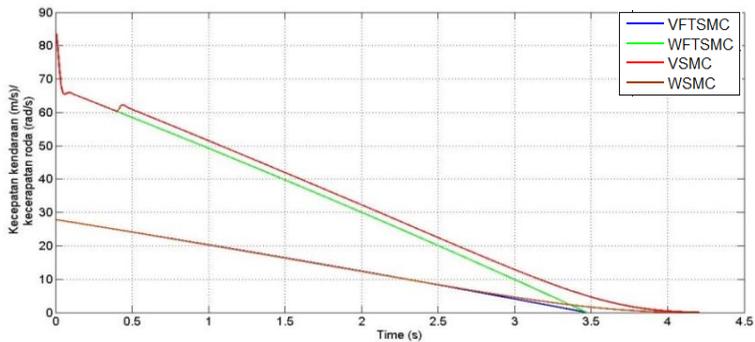


Gambar 4. 11 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 50% .

Hasil uji respon sistem saat diberi kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% pada detik ke 0,4 ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan 4.13 .



Gambar 4. 12 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 100%



Gambar 4.13 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 100%

Gambar 4.8 sampai dengan 4.13 merupakan hasil uji respon sistem setelah diberi kesalahan bias pada sensor kendaraan sebesar 25%,50%dan 100% pada detik ke 0,4s. Gambar untuk respon rasio slip dengan FTC ditunjukkan dengan grafik warna hijau dan tanpa dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna merah. Sedangkan untuk gambar hasil simulasi kecepatan, grafik yang dilengkapi FTC ditunjukkan dengan warna biru dan warna hijau serta yang tidak dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik warna merah dan jingga. Dari Gambar 4.8 sampai dengan gambar 4.13 dapat dilihat bahwa algoritma FTC mampu mengkompensasi kesalahan, yaitu untuk respon rasio slip ketika sistem dilengkapi dengan FTC saat diberi kesalahan bias pada sensor kendraan sebesar 25%,50%dan 100% sistem masih bisa stabil berada pada nilai set poinnya 0,2. Hal lain ditunjukkan pada grafik tanpa FTC atau hanya menggunakan SMC saja, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan saat diberi kesalahan nilai slip rasionya mulai turun dan saat kendaraan berhenti nilai slip rasionya mendekati 0 . Parameter performansi sistem saat diberi kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 25%,50%dan 100% ditunjukkan pada Tabel 4.1.

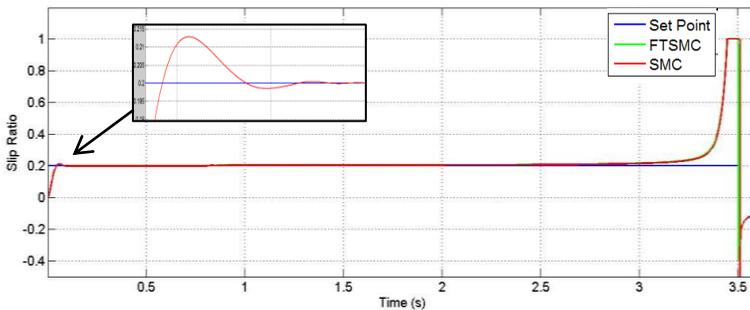
Tabel 4. 1 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan

Kesalahan Bias sensor kendaraan	Maximum Overshoot		Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
25%	6,4 %	6,4%	3,47 s	3,51s
50%	6,4 %	6,4%	3,47s	3,606s
100%	6,4 %	6,4%	3,47s	4,42s

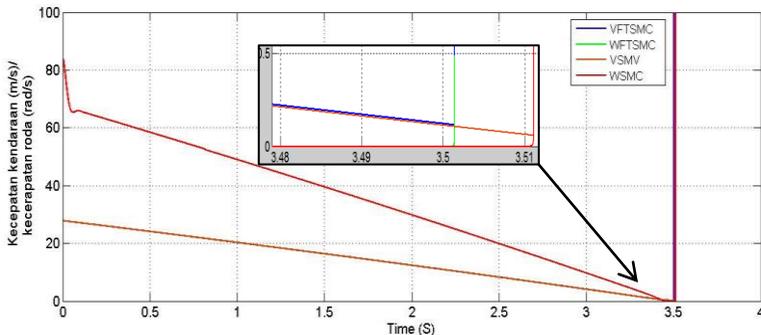
Dari Tabel 4.1 dapat diketahui sistem yang dilengkapi dengan FTC memiliki waktu berhenti lebih cepat dibandingkan dengan sistem tanpa dilengkapi dengan FTC dan memiliki waktu berhenti yang sama yaitu pada detik ke 3,47 meskipun diberikan kesalahan yang berbeda. Lain halnya dengan sistem tanpa dilengkapi FTC besar kesalahan yang diberikan berpengaruh terhadap waktu berhenti kendaraan semakin besar kesalahan yang diberikan maka waktu berhenti dari kendaraan akan semakin lama juga.

4.4.2 Uji Kesalahan Bias Sensor Roda

Uji respon selanjutnya yaitu dengan memberikan kesalahan bias pada sensor roda. Kesalahan bias yang diberikan sebesar 8% pada detik ke 0,8. Hasil uji respon sistem ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan 4.14.



Gambar 4. 14 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 8%



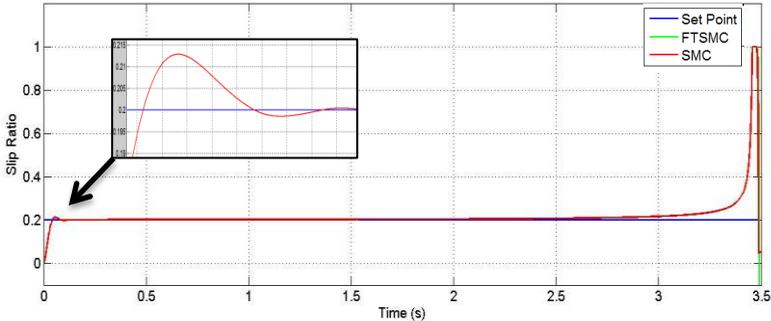
Gambar 4. 15 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias sensor roda sebesar 8%

Dari Gambar 4.14 dan 4.15 dapat diketahui respon sistem setelah diberi kesalahan bias pada sensor roda sebesar 8% pada detik ke 0,8. Untuk respon slip ratio hasil respon yang dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau 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 hijau dan yang tidak dilengkapi dengan FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna merah dan jingga. Dari respon yang telah dihasilkan, sistem yang dilengkapi FTC maupun tidak dilengkapi FTC atau hanya menggunakan SMC saja masih bisa stabil, ditunjukkan dengan respon rasio slip sistem ABS stabil berada pada nilai set pointnya dengan *maximum overshoot* sebesar 6,4%. Namun memiliki waktu berhenti yang berbeda, yaitu sistem yang dilengkapi FTC memiliki waktu berhenti yang sedikit lebih pendek dibandingkan dengan sistem yang tidak dilengkapi FTC. Sistem yang dilengkapi FTC berhenti pada detik ke-3,5 sedangkan sistem tanpa dilengkapi FTC berhenti pada detik ke-3,51.

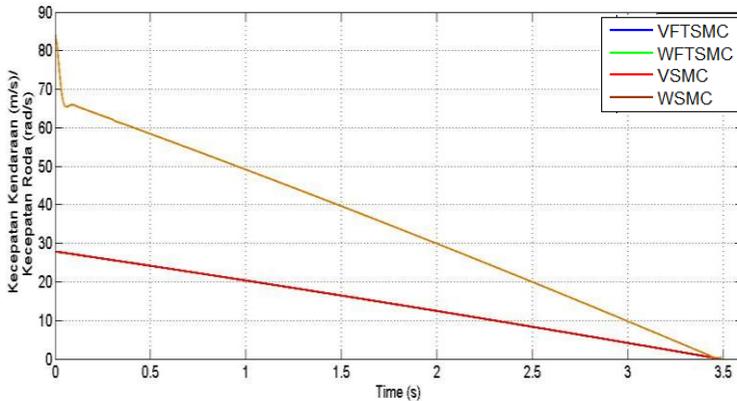
4.5 Uji Kesalahan Bias Aktuator .

Uji kesalahan bias pada aktuator dilakukan dengan hanya memberikan kesalahan pada aktuator, sedangkan sensor kendaraan dan sensor roda dianggap tidak salah. Kesalahan yang

diberikan adalah sebesar 5%,10% dan 30%. Uji respon saat diberi kesalahan aktuator sebesar 5% pada detik ke-0,3 ditunjukkan pada Gambar 4.16.

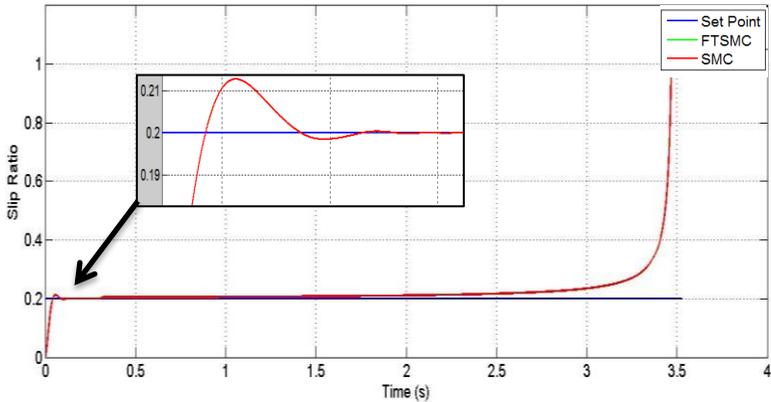


Gambar 4. 16 Respon rasio slip dengan kesalahan bias aktuator sebesar 5%

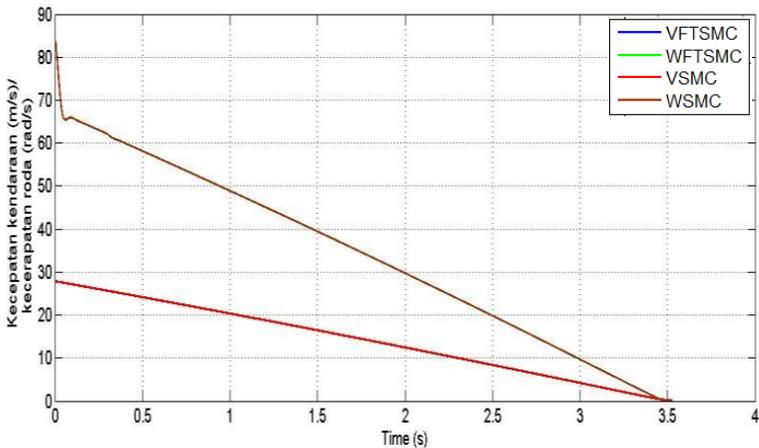


Gambar 4. 17 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator sebesar 5%

Hasil uji respon ketika diberi kesalahan bias aktuator sebesar 10% saat detik ke-0,3 dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan 4.19.

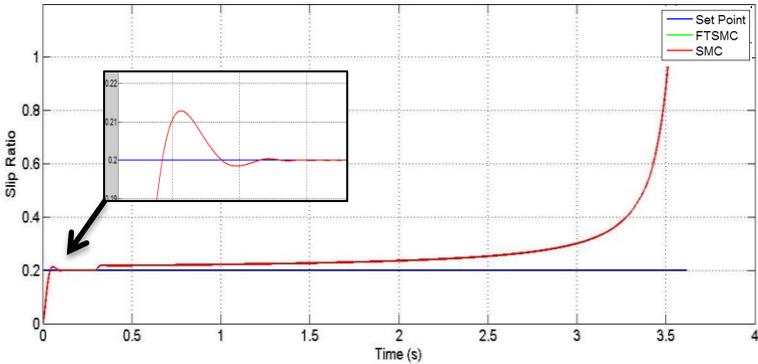


Gambar 4. 18 Respon rasio slip dengan kesalahan bias aktuator sebesar 10%



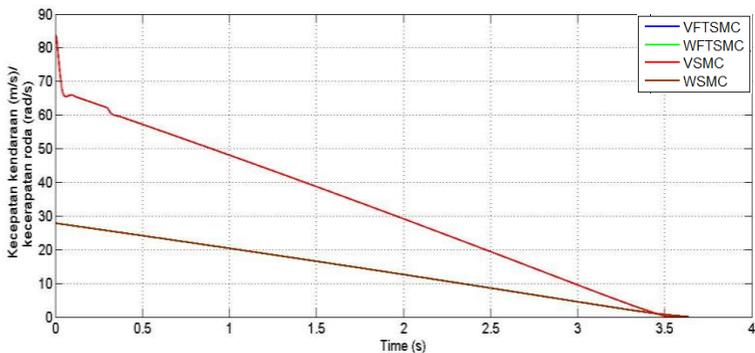
Gambar 4. 19 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator sebesar 10%

Hasil uji respon ketika diberi kesalahan bias aktuator sebesar 30% saat detik ke-0,3 dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan 4.21.



Gambar 4. 20 Respon rasio slip dengan kesalahan bias aktuator sebesar 30%

Hasil uji respon kecepatan kendaraan maupun kecepatan roda ketika diberi kesalahan bias aktuator sebesar 30% ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4. 21 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan bias aktuator sebesar 30%

Gambar 4.16 sampai dengan 4.21 merupakan hasil respon sistem ketika diberi kesalahan pada aktuator sebesar 5%, 10% dan 30%. Terdapat dua gambar pada setiap kesalahan yang diberikan gambar pertama merupakan grafik slip ratio yang merupakan variabel yang dikendalikan dalam penelitian ini dan gambar yang

ke-dua merupakan grafik dari kecepatan kendaraan serta kecepatan angular roda yang digunakan untuk mengetahui pada detik ke berapa kendaraan berhenti. Untuk respon slip ratio hasil respon yang dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau 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 hijau dan yang tidak dilengkapi dengan FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna merah dan jingga. Dari respon yang tealah didapatkan grafik ketika menggunakan FTC dan ketika tidak menggunakan FTC memiliki respon yang sama, baik pada respon slip ratio maupun pada grafik kecepatan. Besar kesalahan yang diberikan berpengaruh terhadap respon slip ratio yaitu saat diberi kesalahan sebesar 5%, hasil respon pada detik ke 0,6 slip ratio 0,201 sedangkan saat diberi kesalahan 10%, hasil respon pada detik ke 0,6 sebesar 0,205 dan saat diberi kesalahan sebesar 30% , hasil respon pada detik ke 0,6 sebesar 0,218. Performansi dari sistem saat diberi kesalahan aktuator sebesar 5%, 10% dan 30% dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias Aktuator.

Kesalahan Bias Aktuator	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
5%	6,4 %	6,4%	3,48 s	3,48 s
10%	6,4 %	6,4%	3,52 s	3,52 s
30%	6,4 %	6,4%	3,63 s	3,63 s

Dari Tabel 4.2 dapat diketahui ketika sistem diberi kesalahan bias pada aktuator saat menggunakan FTC dan tidak menggunakan FTC menunjukkan hasil yang sama baik dari performansi *maximum overshoot* maupun waktu berhenti dari kendaraan. Besar kesalahan bias aktuator yang diberikan berpengaruh terhadap waktu berhenti dari mobil, semakin besar

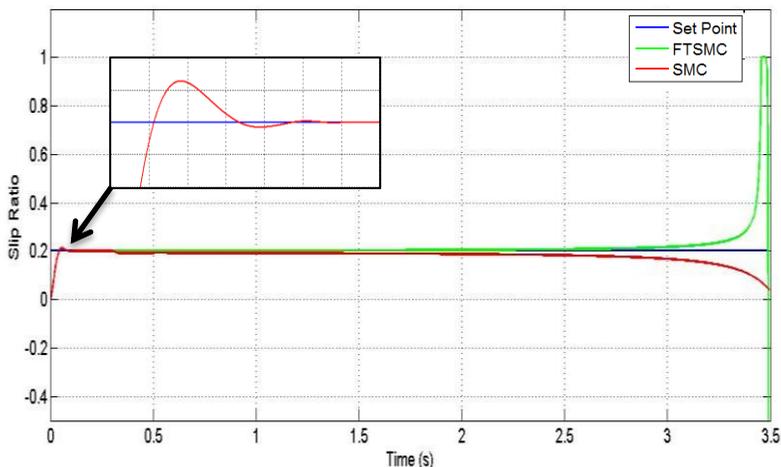
kesalahan bias aktuator yang diberikan maka semakin lama juga waktu berhenti kendaraan.

4.6 Uji Kesalahan Simultan Sensor dan aktuator .

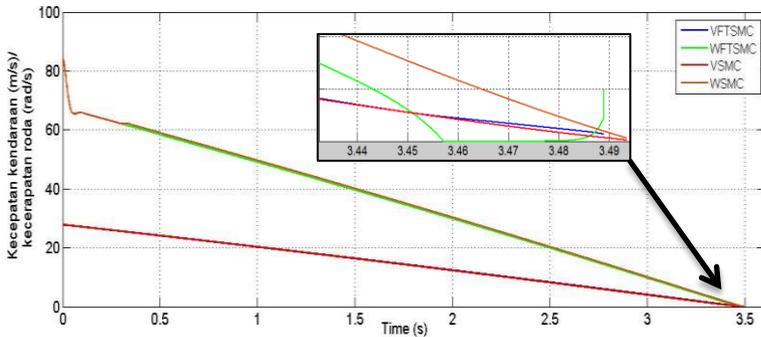
Kesalahan secara simultan pada aktuator dan sensor kendaraan diberikan waktu yang berbeda yaitu pada awalnya sensor dulu yang salah kemudian aktuator dan sebaliknya serta diberikan kesalahan pada waktu yang sama. Simulasi terakhir yang dilakukan yaitu ketika diberi kesalahan pada sensor roda juga.

4.6.1 Uji Kesalahan Sensor Kendaraan Pada Detik Ke-0,3 dan Aktuator Pada Detik Ke-0,5

Uji kesalahan secara simultan yang pertama yaitu dilakukan dengan memberikan kesalahan bias sensor kendaraan pada detik ke 0,3s dan kesalahan pada aktuator pada detik ke 0,5s. Kesalahan yang diberikan pada sensor kendaraan sebesar 25% dan kesalahan bias aktuator sebesar 5% ditunjukkan pada Gambar 4.21 dan 4.22 berikut:

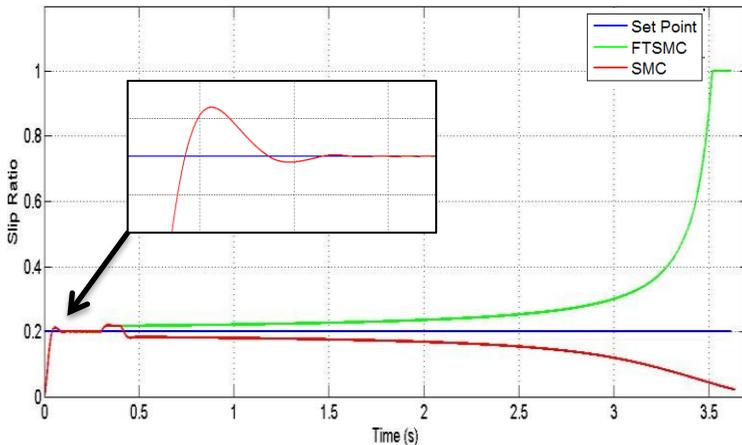


Gambar 4. 22 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 25% dan aktuator sebesar 5%

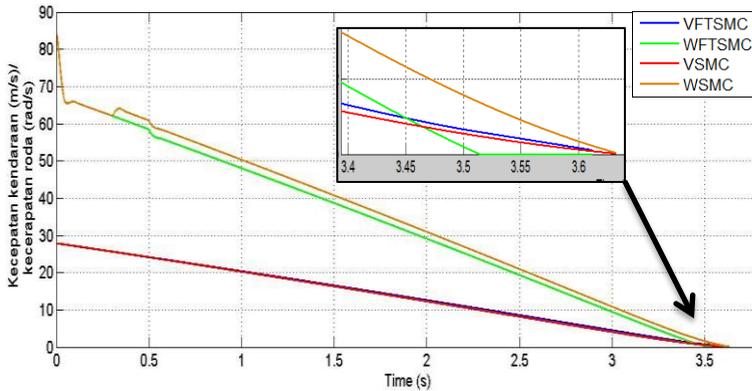


Gambar 4. 23 Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 25% dan aktuator aktuator sebesar 5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan yang diberikan dengan kesalahan sensor kendaraan sebesar 100% saat detik ke 0.3 dan kesalahan aktuator sebesar 30% pada detik ke 0.5 ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan 4.25.



Gambar 4. 24 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 30%



Gambar 4. 25 Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 30%

Gambar 4.22 sampai dengan 4.25 merupakan hasil respon sistem dengan kesalahan bias yang diberikan pada sensor kendaraan dahulu kemudian pada aktuator. Terdapat dua gambar pada setiap kesalahan yang diberikan gambar pertama merupakan grafik slip ratio yang merupakan variabel yang dikendalikan dalam penelitian ini dan gambar yang ke dua merupakan grafik dari kecepatan kendaraan serta kecepatan angular roda yang digunakan untuk mengetahui pada detik ke berapa kendaraan berhenti. Untuk respon slip ratio hasil respon yang dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau 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 hijau dan yang tidak dilengkapi dengan FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna merah dan jingga. Kesalahan bias yang diberikan pada Gambar 4.22 dan 4.23 adalah sebesar 25% untuk sensor kendaraan dan 5 % untuk aktuator, Sedangkan pada Gambar 4.24 dan 4.25 sebesar 100% untuk sensor kendaraan dan 30% untuk aktuator, sedangkan untuk mengetahui hasil respon kesalahan sensor kendaraan sebesar 25%, 50% dan 100% dengan kesalahan bias

aktuator sebesar 5%,10% dan 30% dapat dilihat pada lampiran B. Dari respon yang telah didapatkan dapat diketahui bahwa algoritma FTC mampu mengkompensasi kesalahan bias pada sensor kendaraan dan aktuator dengan baik. Hal tersebut ditunjukkan dengan respon rasio slip sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya yaitu 0,2 setelah diberikan kesalahan. Hal yang berbeda ditunjukkan dengan grafik berwarna merah yang menunjukkan respon tanpa diberikanya FTC, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan pada saat kendaraan akan berhenti nilai slip rasionya mendekati 0. Selain itu, 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-0,3 dan aktuator pada detik ke-0,5 sdengan besar kesalahan sensor 25% dan 10% serta aktuator 5% dan 30% dapat dilihat pada Tabel 4.3.

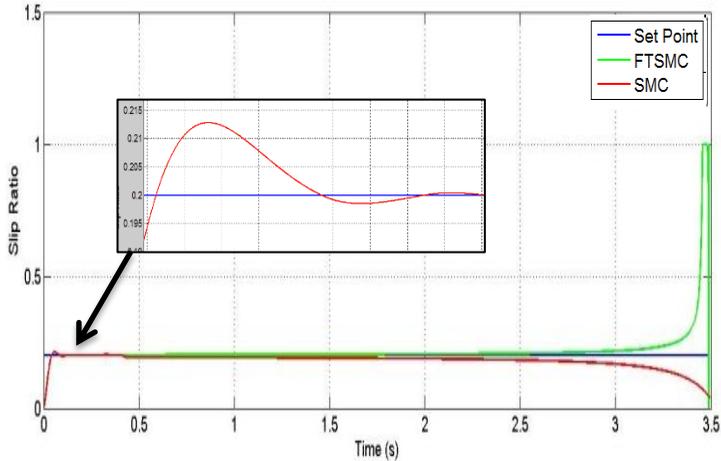
Tabel 4.3 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan pada detik ke-0,3 dan aktuator pada detik ke 0,4

Kesalahan Bias Sensor	Kesalahan Bias Aktuator	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
		SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
25%	5%	6,4 %	6,4%	3,48 s	3,49 s
100%	30	6,4 %	6,4%	3,61 s	3,63 s

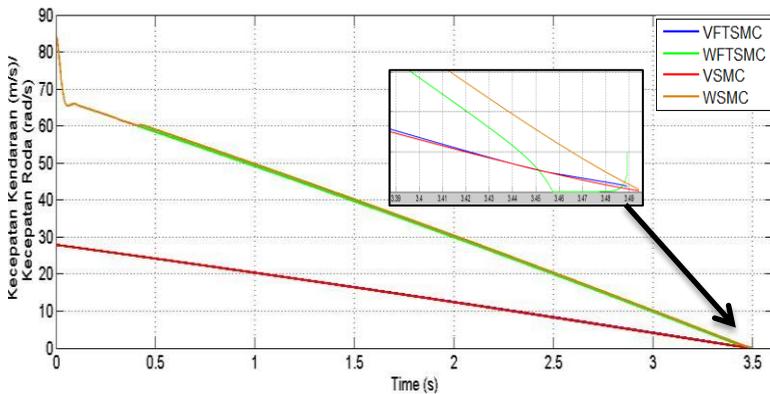
4.6.2 Uji Kesalahan Sensor Kendaraan Pada Detik Ke-0,4 dan Aktuator Pada Detik Ke-0,3.

Uji kesalahan secara simultan selanjutnya adalah dengan aktuator dulu yang salah baru sensor yaitu kesalahan bias aktuator pada detik ke-0,3 kemudian kesalahan sensor kendaraan pada detik ke-0,4. Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan sensor kecepatan pada detik ke 0.4 dengan kesalahan bias sebesar 25% dan pada detik ke 0.3

untuk kesalahan aktuator sebesar 5% ditunjukkan pada Gambar 4.26 dan 4.27.

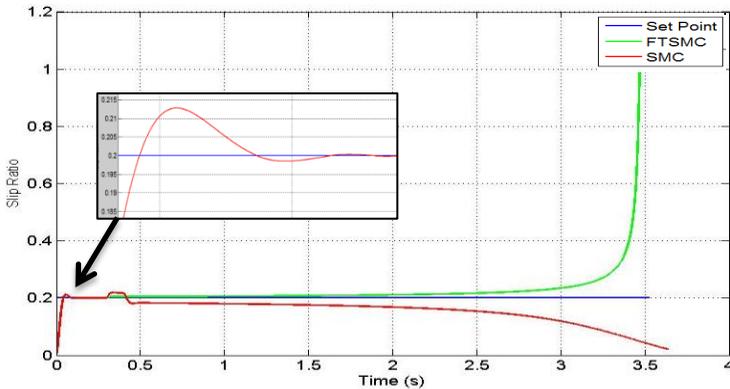


Gambar 4.26 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor sebesar 25% dan aktuator sebesar 5%

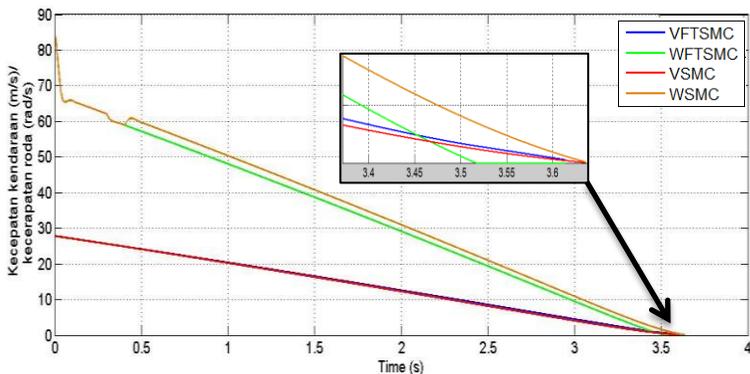


Gambar 4. 27 Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 25% dan aktuator sebesar 5%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan yang diberikan dengan kesalahan sensor kendaraan sebesar 100% saat detik ke 0.4 dan kesalahan aktuator sebesar 30% pada detik ke 0.3 ditunjukkan pada Gambar 4.28 dan 4.29.



Gambar 4. 28 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 30%



Gambar 4. 29 Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator sebesar 30%

Gambar 4.28 sampai dengan 4.29 merupakan hasil respon sistem dengan kesalahan bias yang diberikan pada aktuator dahulu kemudian pada sensor. Kesalahan bias yang diberikan pada Gambar 4.26 dan 4.27 adalah sebesar 25% untuk sensor kendaraan dan 5 % untuk aktuator, Sedangkan pada Gambar 4.28 dan 4.93 sebesar 100% untuk sensor kendaraan dan 30% untuk aktuator, sedangkan untuk mengetahui hasil respon kesalahan sensor kendaraan sebesar 25%, 50% dan 100% dengan kesalahan bias aktuator sebesar 5%,10% dan 30% dapat dilihat pada lampiran B. Dari grafik yang telah didapatkan dapat diketahui bahwa algoritma FTC mampu mengkompensasi kesalahan sensor maupun aktuator dengan baik . Hal tersebut ditunjukkan dengan respon rasio slip sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya. Hal yang berbeda ditunjukkan dengan grafik berwarna merah yang menunjukkan respon tanpa diberikanya FTC, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan nilai slip rasionya mulai turun pada saat kendaraan akan berhenti yaitu mendekati 0. Selain itu sistem yang dilengkapi FTC memiliki waktu berhenti sedikit lebih cepat dibandingkan dengan sistem tanpa dilengkapi FTC. Performansi dari sistem saat diberi kesalahan bias sensor pada detik ke-0,3 dan aktuator pada detik ke-0,5 sdengan besar kesalahan sensor 25% dan 10% serta aktuator 5% dan 30% dapat dilihat pada Tabel 4.4.

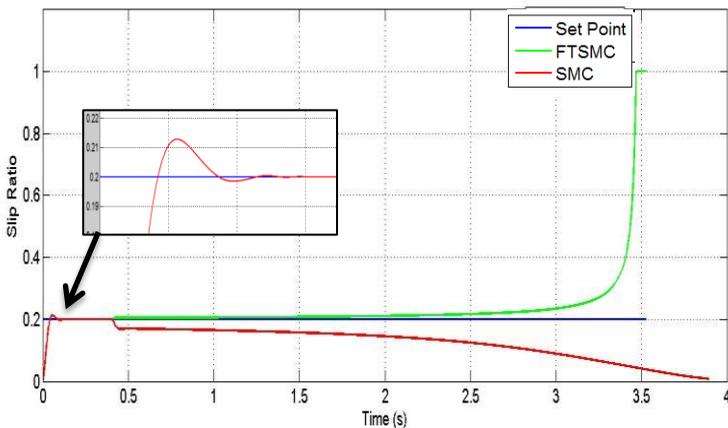
Tabel 4. 4 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan pada detik ke-0,4 dan aktuator pada detik ke 0,3

Kesalahan Bias Sensor	Kesalahan Bias Aktuator	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
		SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
25%	5%	6,4 %	6,4%	3,48 s	3,49 s
100%	30	6,4 %	6,4%	3,61 s	3,63 s

4.6.3 Hasil Uji Kesalahan Bias Aktuator 10% dan sensor Kendaraan Sebesar 100% Pada Detik ke-0,4.

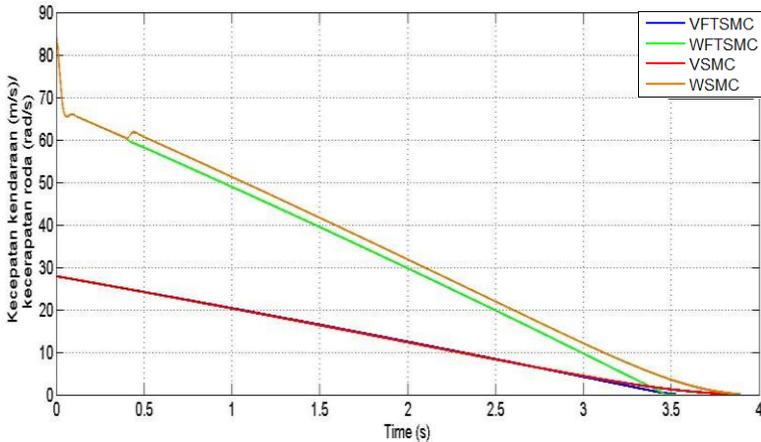
Kesalahan bias yang diberikan pada aktuator dan sensor pada waktu yang bersamaan yaitu pada detik ke-0,4 dengan kesalahan bias aktuator sebesar 10% dan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100%. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah Algoritma FTC masih dapat mengkompensasi kesalahan jika diberikan kesalahan pada detik yang sama atau waktu yang bersamaan.

Hasil respon sistem setelah diberi kesalahan bias pada aktuator sebesar 10% dan kesalahan sensor sebesar 100% pada waktu yang bersamaan yaitu pada detik ke-0,4 adalah ditunjukkan pada grafik 4.30.



Gambar 4. 30 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 10% pada detik ke-0,4

Hasil respon selanjutnya merupakan respon kecepatan yaitu respon kecepatan kendaraan dan respon kecepatan roda, dengan dilengkapi FTC dan tanpa dilengkapi FTC. Dari respon kecepatan dapat diketahui kapan mobil berhenti ketika dilakukan pengereman.

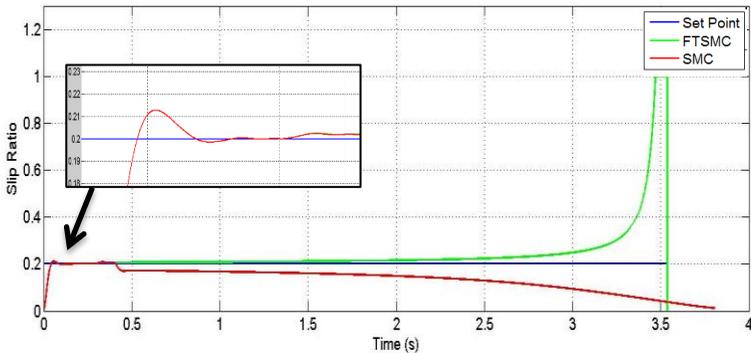


Gambar 4. 31 Grafik kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 30%

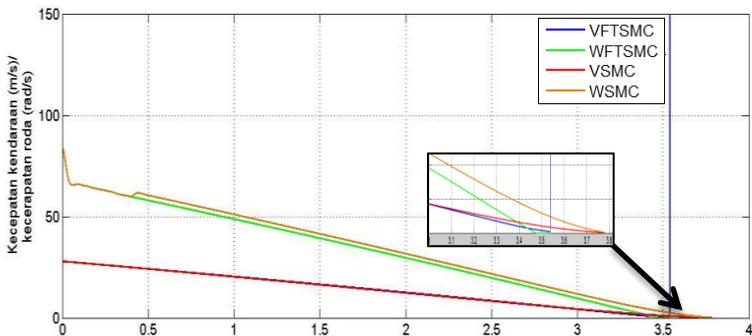
Gambar 4.30 dan 4.31 merupakan grafik respon hasil simulasi pada Matlab dengan kesalahan bias yang diberikan sebesar 10% untuk aktuator dan 100% untuk sensor kendaraan dengan kesalahan pada detik ke 0,4. dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa algoritma FTC masih dapat mengkompensasi kesalahan sensor dan aktuator setelah diberi kesalahan bias aktuator sebesar 10% dan sensor sebesar 100% pada waktu yang bersamaan. Hal tersebut ditunjukkan dengan respon rasio slip sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya, dengan *maximum overshoot* sebesar 6,5% dan waktu berhenti kendaraan berada pada detik ke 3,5. Hal lain ditunjukkan pada grafik tanpa FTC atau hanya menggunakan SMC saja, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan saat diberi kesalahan nilai slip rasionya mulai turun dan saat kendaraan berhenti nilai slip rasionya mendekati 0 dan waktu berhentinya sedikit lebih lama yaitu pada detik ke-3.89

4.6.4 Hasil Uji Kesalahan bias aktuator 10% , kesalahan bias sensor sebesar 100% dan kesalahan sensor roda.

Hasil respon sistem setelah diberi kesalahan bias pada aktuator sebesar 10%, kesalahan sensor sebesar 100% serta kesalahan wheel sebesar 8% adalah ditunjukkan pada Gambar 4.32 dan 4.33.

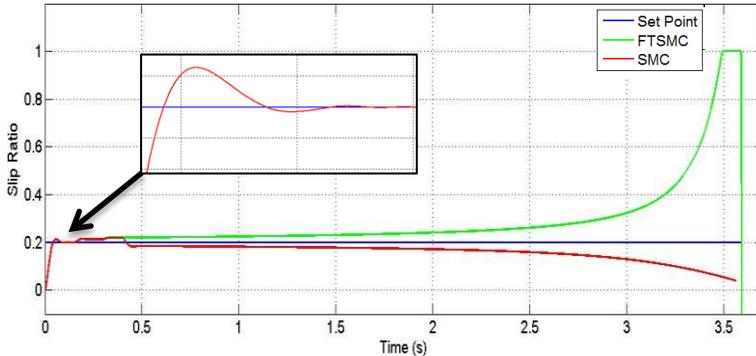


Gambar 4. 32 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% kesalahan aktuator 10% serta kesalahan sensor roda 8%

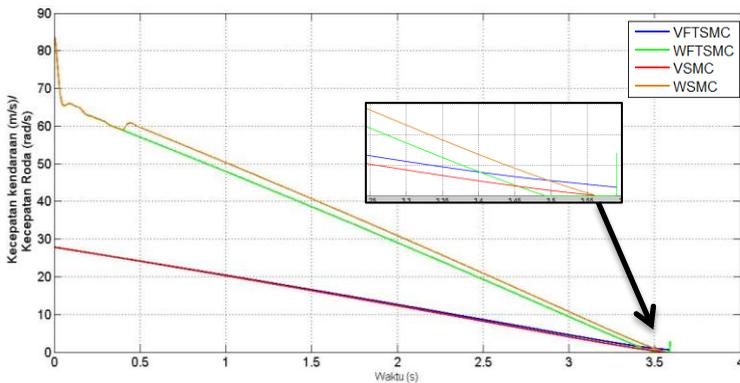


Gambar 4. 33 kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 10% serta kesalahan sensor roda 8%

Hasil respon sistem setelah diberi kesalahan bias pada aktuator sebesar 10%, kesalahan sensor sebesar 100% serta kesalahan wheel sebesar 20% adalah ditunjukkan pada Gambar 4.34 dan 4.35.



Gambar 4. 34 Respon rasio slip dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% kesalahan aktuator 10% serta kesalahan sensor roda 20%



Gambar 4. 35 kecepatan angular roda dan kendaraan dengan kesalahan bias sensor kendaraan 100% dan aktuator aktuator sebesar 10% serta kesalahan sensor roda 20%

Gambar 4.32 sampai dengan 4.35 menunjukkan bahwa ketika diberi kesalahan bias pada sensor roda sebesar 8% dan 20% pada detik ke 0,15 , kesalahan bias sensor kecepatan kendaraan pada detik ke 0,4 dan kesalahan bias aktuator pada detik ke 0,3. Dari grafik dapat dilihat bahwa ketika diberi kesalahan sensor kendaraan sebesar 8% Algoritma FTC masih dapat mengkompensasi kesalahan yang diberikan hal tersebut ditunjukkan sistem masih dapat kembali stabil. namun slip ratio sedikit mengalami kenaikan yaitu ketika tanpa diberi kesalahan sensor roda nilai slip ratio pada detik ke 1,27 sebesar 0,202 sedangkan jika diberi kesalahan pada sensor roda nilai slip rasionya pada detik ke 1,27 sebesar 0,21. Hal lain ditunjukkan pada grafik tanpa FTC atau hanya menggunakan SMC saja, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan saat diberi kesalahan nilai slip rasionya mulai turun dan saat kendaraan berhenti nilai slip rasionya mendekati 0. Ketika sistem diberi kesalahan bias pada sensor roda sebesar 20% sistem yang dilengkapi FTC masih dapat mengkompensasi kesalahan namun kurang maksimal, hal ini ditunjukkan dengan waktu berhenti kendaraan yan menggunakan FTC sedikit lebih lama. Untuk mengetahui performansi dari sistem dengan pemberian kesalahan bias pada sensor kendaraan sebesar 100% dan aktuator sebesar 10% serta sensor roda sebesar 8% dan 20% dapat dilihat pada tabel 4.5

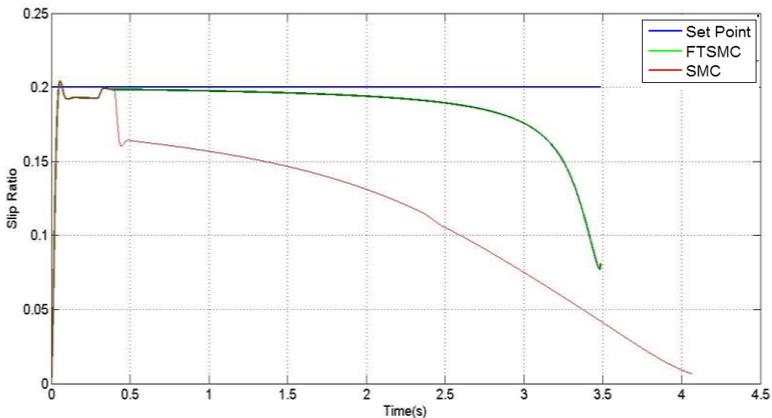
Tabel 4. 5 performansi setelah diberikan kesalahan bias sensor kendaraan sebesar 100% aktuator sebesar10% serta kesalahan bias sensor kendaraan.

Kesalahan Bias Sensor roda	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
8%	6,3 %	6,3%	3,49 s	3,8 s
20%	6,4 %	6,4%	3,6 s	3,56 s

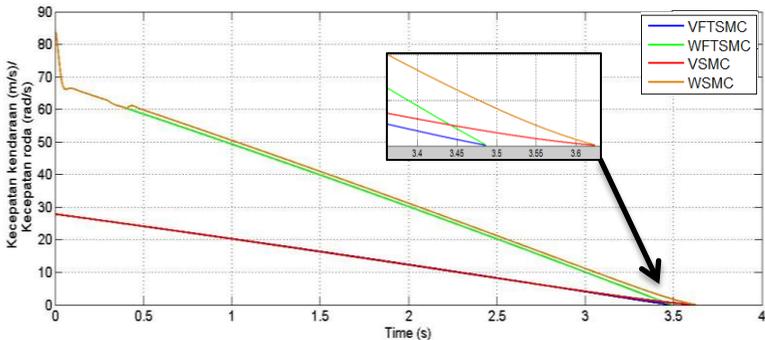
4.7 Uji Ketidakpastian

Uji ketidakpastian dilakukan untuk mengetahui kemampuan *robust control* yang telah di rancang. Pengujian dilakukan dengan penambahan jumlah penumpang pada mobil. Perbedaan pada simulasi sebelumnya yaitu pada simulasi sebelumnya massa yang diberikan pada controller dan kendaraan hanya massa kendaraan saja, sedangkan pada simulasi saat ini ditambahi dengan massa penumpang dimana tiap orangnya diasumsikan memiliki rata-rata berat badan sebesar 60 kg (Muljati, Triwinarto, Utami, & Hermina, 2016). Simulasi yang pertama yaitu ketika diberikan penumpang sebanyak 4 orang . Penambahan massa dilakukan hanya pada *vehicle plant* ,sedangkan pada controllernya tetap hanya diberi massa kendaraan saja. 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 sebesar 10% dan sensor kendaraan sebesar 50 % ditunjukkan pada Gambar 4.34 dan 4.35.

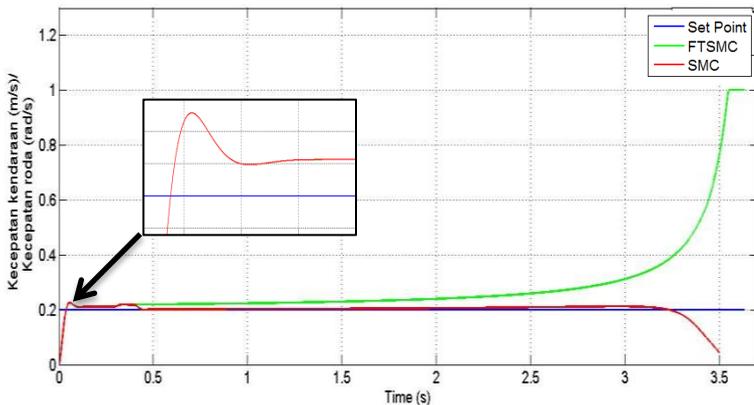


Gambar 4. 36 Respon hasil rasio slip jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan controller tetap hanya massa mobil

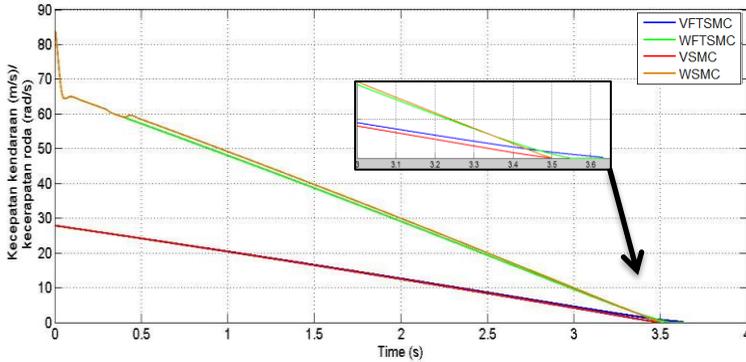


Gambar 4. 37 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan kontroller tetap hanya massa mobil

Hasil respon selanjutnya yaitu ketika sistem diberi penumpang sebanyak 1 orang dan pada controller diberi massa maksimum mobil atau kapasitas mobil sebanyak 6 orang, serta diberi kesalahan bias pada aktuator sebesar 10% dan sensor kendaraan sebesar 50 % ditunjukkan pada grafik 4.36 dan 4.37.

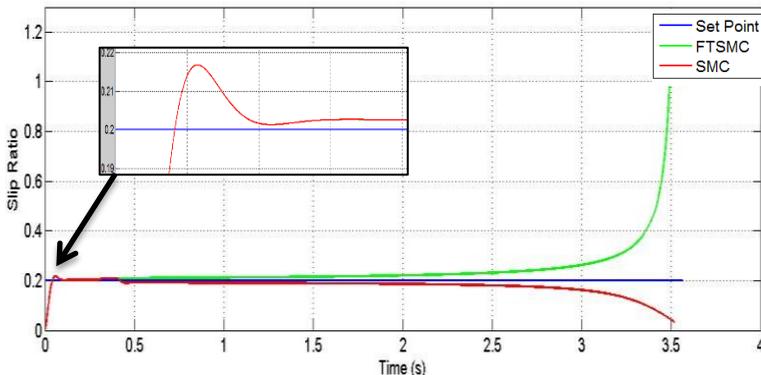


Gambar 4. 38 Respon hasil rasio slip jika diberi penumpang sebanyak 1 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang

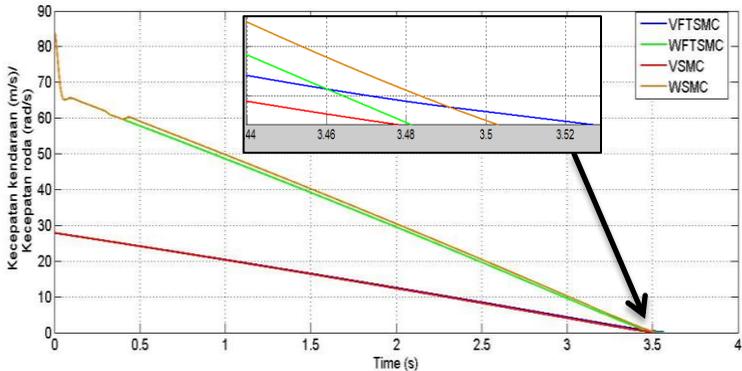


Gambar 4. 39 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 1 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang,

Hasil respon selanjutnya yaitu ketika sistem diberi penumpang sebanyak 4 orang dan pada controller diberi massa maksimum mobil atau kapasitas mobil sebanyak 6 orang, serta diberi kesalahan bias pada aktuator sebesar 10% dan sensor kendaraan sebesar 50 % ditunjukkan pada Gambar 4.38 dan 4.39.

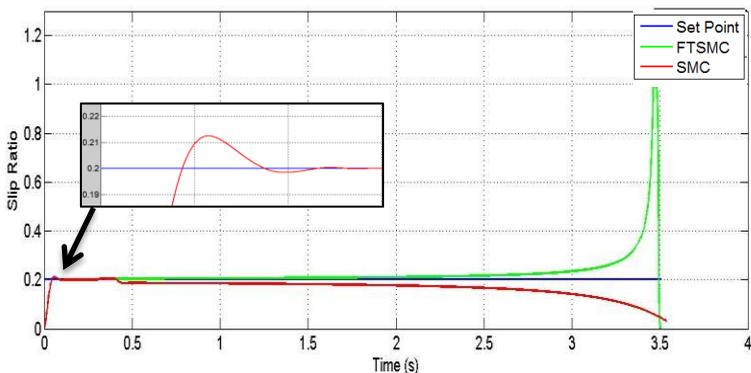


Gambar 4. 40 Respon hasil rasio slip jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan kontroller diberi massa maksimum yaitu 6 orang

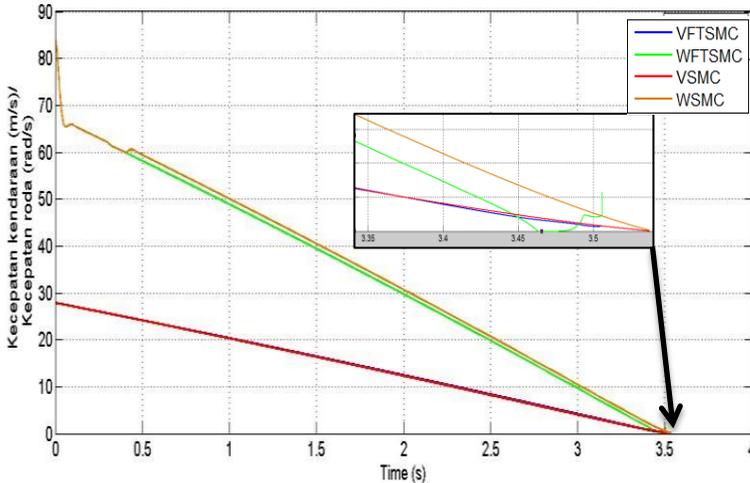


Gambar 4. 41 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 4 orang dan controller diberi massa maksimum yaitu 6 orang

Hasil respon selanjutnya yaitu ketika sistem diberi penumpang sebanyak 6 orang dan pada controller diberi massa maksimum mobil atau kapasitas mobil sebanyak 6 orang, serta diberi kesalahan bias pada aktuator sebesar 10% dan sensor kendaraan sebesar 50 % ditunjukkan pada Gambar 4.40 dan 4.41.



Gambar 4. 42 Respon hasil ratio slip jika diberi penumpang sebanyak 6 orang dan controller diberi massa maksimum yaitu 6 orang.



Gambar 4. 43 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda jika diberi penumpang sebanyak 6 orang dan controller diberi massa maksimum yaitu 6 orang

Gambar 4.34 sampai dengan 4.41 menunjukkan hasil simulasi ketidakpastian serta diberi kesalahan bias pada sensor sebesar kendaraan 50% dan kesalahan aktuator sebesar 10%. Uji ketidakpastian yang diberikan yaitu dengan penambahan jumlah penumpang pada sistem. Pada Gambar 4.34 sampai dengan 4.41 diberikan ketika kondisi controller tidak diberi massa tambahan atau massanya tetap pada massa mobil saja sedangkan pada *vehicle plant* diberi massa sebanyak 4 penumpang, Kemudian massa controller dimaksimalkan yaitu sesuai kapasitas mobil sebanyak 6 orang dengan jumlah penumpang sebanyak 1,4 dan 6. Sedangkan untuk hasil respon ketika controller diberi massa maksimal dan penumpang diberi sebanyak 2,3 dan 5 dapat dilihat pada lampiran B. Performansi dari sistem ketika diberi uji ketidakpastian adalah ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4. 6 Performansi sistem saat diberi uji ketidakpastian

Jumlah Penumpang	Jumlah penumpang pada kontroller	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
		SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
1	Tidak ada	5,3 %	5,3 %	3,5 s	3,56 s
3	Tidak ada	3,1 %	3,1 %	3,47 s	3,6 s
4	Tidak ada	2 %	2%	3,48 s	3,62 s
1	6	12,8 %	12,8 %	3,64 s	3,5 s
2	6	10,6 %	10,6 %	3,6 s	3,5 s
3	6	10%	10%	3,58 s	3,51 s
4	6	8,4 %	8,4 %	3,56 s	3,52 s
5	6	6,25 %	6,25 %	3,53 s	3,52 s
6	6	6,2 %	6,2 %	3,5 s	3,54 s

Dari tabel 4.5 dapat diketahui bahwa ketika sistem diberi tambahan penumpang, namun pada kontroller diberikan tetap pada massa kendaraan, sistem yang diberikan penumpang lebih banyak memiliki respon *Maximum Overshoot* lebih kecil baik dari sistem yang menggunakan FTC maupun sistem tanpa dilengkapi FTC. Hal lain ditunjukkan pada performansi waktu berhenti, sistem yang dilengkapi FTC memiliki waktu berhenti yang lebih pendek dibandingkan dengan sistem tanpa diberi FTC yaitu hanya menggunakan SMC aja. Hasil performansi sistem ketika kontroller diberikan massa yang maksimal, sedangkan pada kendaraan diberikan massa yang berbeda2 yaitu mulai dari 1 penumpang sampai dengan diberi massa maksimal yaitu 6 penumpang, menunjukkan respon yang lebih baik ketika sistem tanpa dilengkapi FTC. Hal tersebut ditunjukkan dengan waktu berhenti dari kendaraan dengan tanpa dilengkapi FTC lebih pendek dibandingkan dengan sistem yang dilengkapi FTC. Karakteristik respon yaitu *Maximum Overshoot* semakin berkurang ketika diberi tambahan penumpang. Dari hasil respon maupun performansi dari sistem dapat diketahui bahwa Algoritma FTC yang telah dirancang dapat mengkompensasi ketidakpastian yang telah diberikan sehingga dapat mengatasi masalah *robust*

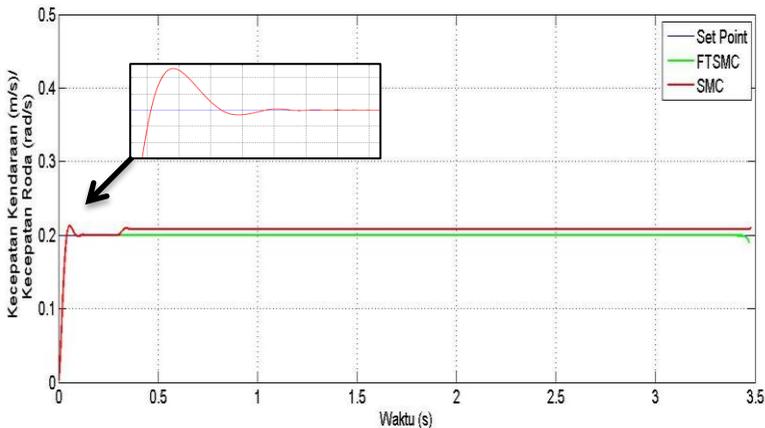
control. Dari Tabel 4.5 dapat dilihat sistem dengan tanpa pemberian tambahan massa pada controller memiliki performansi *Maximum Overshoot* waktu berhenti yang lebih baik dibandingkan dengan sistem yang diberi tambahan penumpang maksimum pada controller.

4.8 Uji Kesalahan Sensitivitas

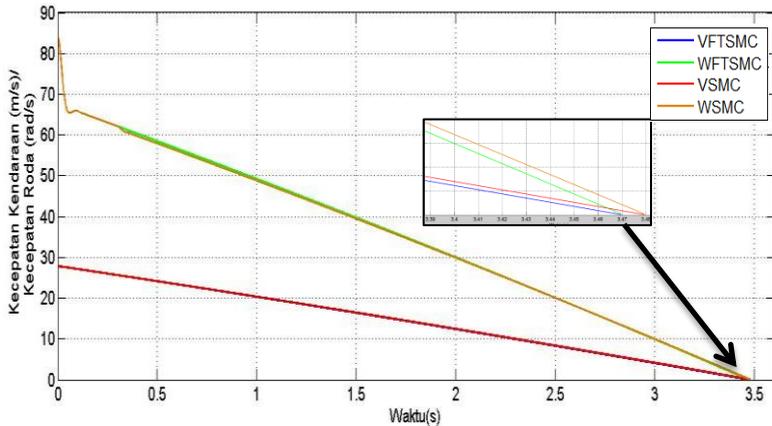
Uji kesalahan sensitivitas pada sistem yang diberikan pada sensor kendaraan dan aktuator. Dengan kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% pada detik ke-0,3s, Serta kesalahan sensitivitas pada aktuator yang diberikan sebesar 1% dan 5%. Dan kesalahan sensitivitas pada sensor dan aktuator yang diberikan sebesar 10% dan 1%.

4.8.1 Uji Kesalahan Sentivitas Pada Sensor

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.3 dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan sebesar 1% ,ditunjukkan pada Gambar 4.42 dan Gambar 4.43.

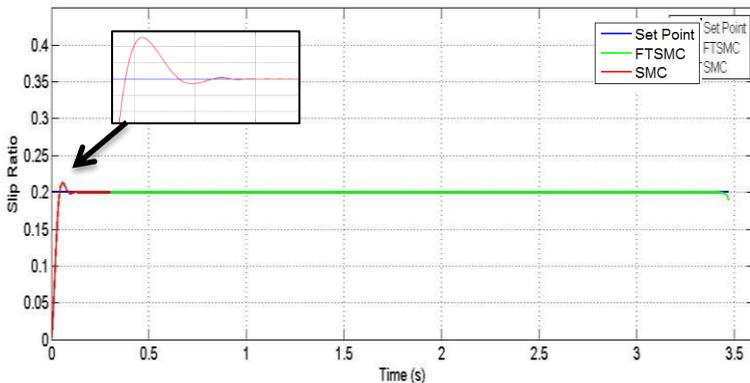


Gambar 4. 44 Respon rasio slip dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 1%

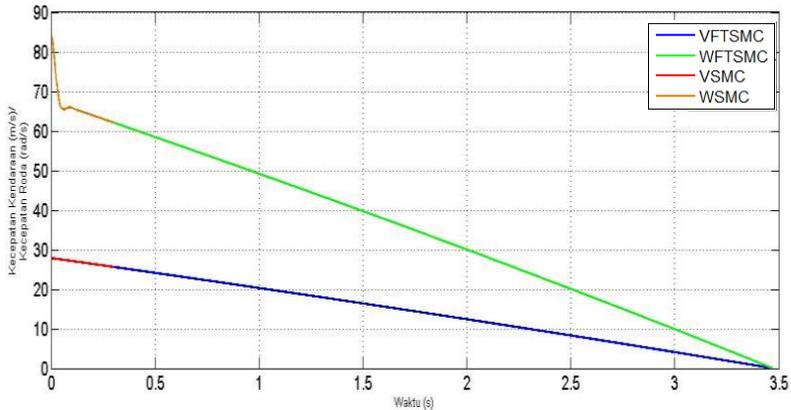


Gambar 4. 45 Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 1%

Hasil respon selanjutnya yaitu ketika sistem diberi kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 90% pada detik ke-0,3s ditunjukkan pada Gambar 4.44 untuk respon rasio slip dan 4.45 untuk respon kecepatan kendaraan maupun kecepatan roda.



Gambar 4. 46 Respon rasio slip dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%



Gambar 4. 47 Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 90%

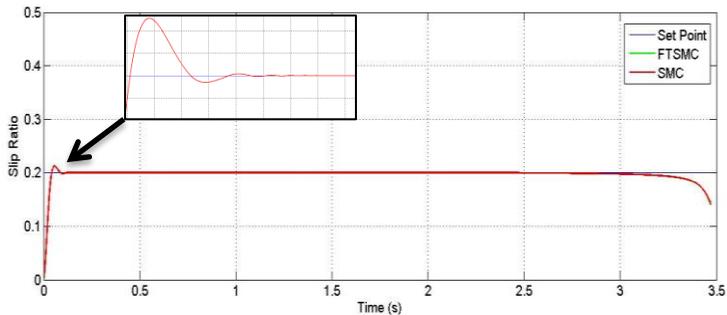
Gambar 4.42 sampai dengan 4.45 merupakan hasil uji respon sistem setelah diberi kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% pada detik ke 0,3s. Dari Gambar 4.42 sampai dengan gambar 4.45 dapat dilihat bahwa algoritma FTC mampu mengkompensasi kesalahan sensitivitas yang diberikan, yaitu untuk respon rasio slip ketika sistem dilengkapi dengan FTC, saat diberi kesalahan bias pada sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% sistem masih bisa stabil yaitu berada pada nilai set poinnya 0,2. Hal lain ditunjukkan pada grafik tanpa FTC atau hanya menggunakan SMC saja, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan saat diberi kesalahan nilai slip rasionya mulai naik ketika diberi kesalahan sensitivitas 1% dan saat diberi kesalahan 90% slip rasionya tidak dapat kembali ke keadaan semula sehingga berhenti pada detik ke 0,3.. Parameter performansi sistem saat diberi kesalahan sensitivitas sensor kendaraan sebesar 1% dan 90% ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 7 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan.

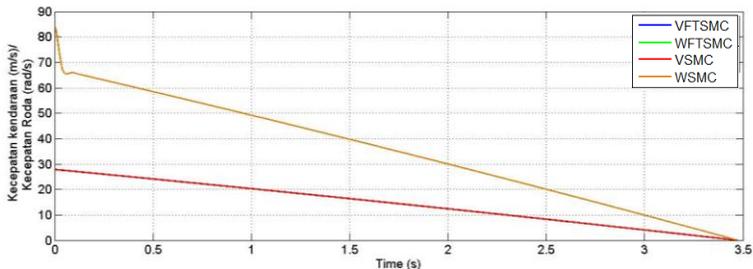
Kesalahan sensitivitas sensor	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
1%	6,4 %	6,4%	3,47 s	3,48 s
90%	6,4 %	6,4%	3,47 s	-

4.8.2 Uji Kesalahan Sentivitas Pada Aktuator

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan sensitivitas pada detik ke 0.3 dengan kesalahan sensitivitas aktuator sebesar 1% ,ditunjukkan pada Gambar 4.46 dan Gambar 4.47

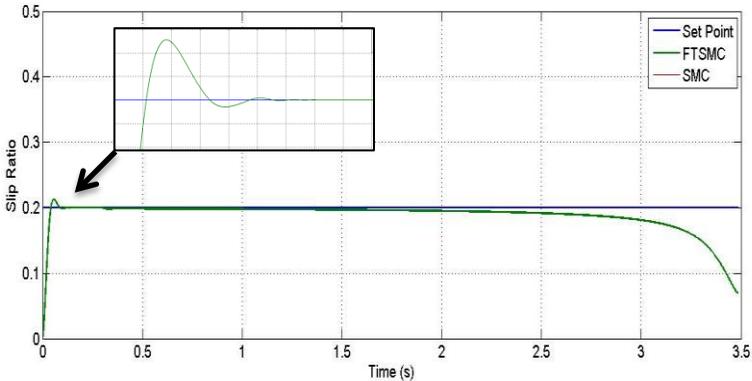


Gambar 4. 48 Respon slip ratio dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%



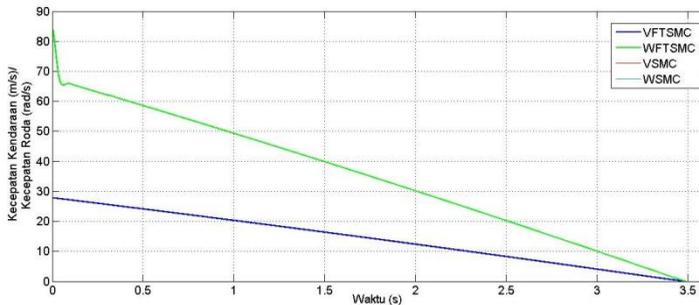
Gambar 4. 49 Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1%

Hasil respon selanjutnya yaitu ketika sistem diberi kesalahan sensitivitas pada sensor kendaraan sebesar 5% pada detik ke-0,3s ditunjukkan pada Gambar 4.48 untuk respon rasio slip dan 4.49 untuk respon kecepatan kendaraan maupun kecepatan roda.



Gambar 4. 50 Respon rasio slip dengan kesalahan sensitivitas aktuator 5%

Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda setelah diberi kesalahan sensitivitas pada aktuator sebesar 5% dapat dilihat pada Gambar 4.49 .



Gambar 4. 51 Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 5%

Gambar 4.46 sampai dengan 4.49 merupakan hasil respon sistem ketika diberi kesalahan pada aktuator sebesar 1% dan 5%. Terdapat dua gambar pada setiap kesalahan yang diberikan gambar pertama merupakan grafik slip ratio yang merupakan variabel yang dikendalikan dalam penelitian ini dan gambar yang ke-dua merupakan grafik dari kecepatan kendaraan serta kecepatan anguler roda yang digunakan untuk mengetahui pada detik ke berapa kendaraan berhenti. Untuk respon slip ratio hasil respon yang dilengkapi FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna hijau 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 hijau dan yang tidak dilengkapi dengan FTC ditunjukkan dengan grafik berwarna merah dan jingga. Dari respon yang tealah didapatkan grafik ketika menggunakan FTC dan ketika tidak menggunakan FTC memiliki respon yang sama, baik pada respon slip ratio maupun pada grafik kecepatan. Besar kesalahan yang diberikan berpengaruh terhadap respon slip ratio yaitu saat diberi kesalahan sebesar 1%, hasil respon pada detik ke 3 slip ratio 0,1975 sedangkan saat diberi kesalahan 5% hasil respon pada detik ke 3 sebesar 0,181. Performansi dari sistem saat diberi kesalahan aktuator sebesar 1% dan 5% dapat dilihat pada Tabel 4.7.

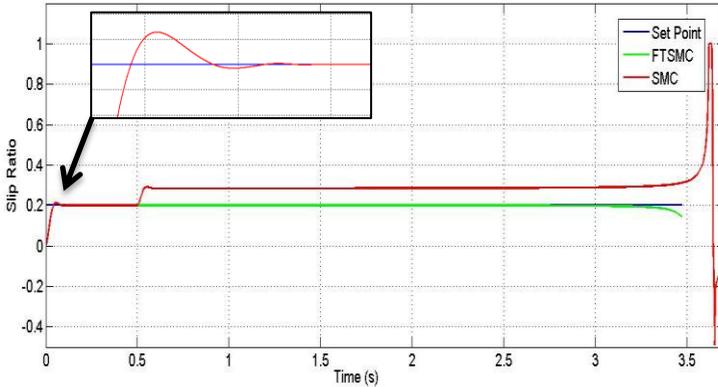
Tabel 4.8 Parameter performansi setelah diberikan kesalahan bias Aktuator.

Kesalahan sensitivitas sensor	<i>Maximum Overshoot</i>		Waktu Berhenti	
	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC	SMC dengan FTC	SMC tanpa FTC
1%	6,4 %	6,4%	3,47 s	3,47 s
5%	6,4 %	6,4%	3,48 s	3,48 s

4.8.3 Uji Kesalahan Sentivitas Pada Sensor dan Aktuator

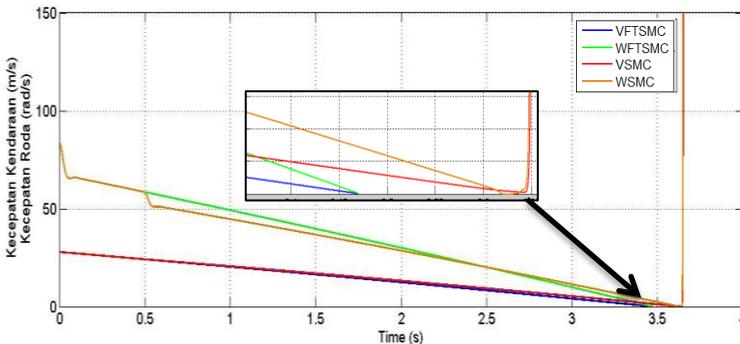
Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan sensitivitas pada aktuator dan

sensor dengan besar kesalahan sensitivitas berturut-turut sebesar 1% dan 10% detik ke 0,3 untuk aktuator dan detik ke 0,5 untuk sensor ,ditunjukkan pada Gambar 4.50 dan Gambar 4.51.



Gambar 4. 52 Respon rasio slip dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1% dan kesalahan sensitivitas sensor kendaraan 10%

Selanjutnya untuk respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda setelah diberi kesalahan sensitivitas pada aktuator sebesar 1% dan sensor kecepatan kendaraan sebesar 10% dapat dilihat pada Gambar 4.51



Gambar 4. 53 Respon kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan dengan kesalahan sensitivitas aktuator 1% dan sensor kendaraan 10%

Gambar 4.50 sampai dengan 4.51 merupakan hasil respon sistem dengan kesalahan sensitivitas yang diberikan pada aktuator dan pada sensor pada detik ke-0,3 untuk aktuator dan detik ke-0,5 untuk sensor kendaraan. Kesalahan sensitivitas yang diberikan a sebesar 10% untuk sensor kendaraan dan 1 % untuk aktuator, Dari grafik yang telah didapatkan dapat diketahui bahwa algoritma FTC mampu mengkompensasi kesalahan sensitivitas sensor maupun aktuator dengan baik . Hal tersebut ditunjukkan dengan respon rasio slip sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya yaitu 0,2 dengan waktu berhenti kendaraan pada detik ke-3,46. Hal yang berbeda ditunjukkan dengan grafik berwarna merah yang menunjukkan respon tanpa diberikanya FTC, pada grafik tersebut menunjukkan bahwa kesalahan yang diberikan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan nilai slip rasionya mulai naik saat diberi kesalahan pada detik ke-0,5 sebesar 0,28. selain itu kecepatan kendaraan maupun kecepatan pada roda naik kembali setelah berhenti pada detik ke-3,6. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem tanpa dilengkapi FTC sangat tidak stabil ketika diberikan kesalahan sensitivitas pada sensor dan aktuator. Nilai *maximum overshoot* baik sistem yang menggunakan FTC maupun yang tidak menggunakan FTC sebesar 6,4%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data yang telah dilakukan, didapat kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan *Fault Tolerant Control* (FTC) pada *Anti-Lock Braking System* mobil konvensional dengan kesalahan pada sensor dan aktuator sebagai berikut:

- Telah dilakukan perancangan observer dengan memberikan kesalahan sensor dan aktuator pada sistem *Anti-lock Braking System* pada mobil konvensional secara simulasi. Gain proportional observer yang digunakan pada observer adalah P_ω sebesar 9×10^2 , P_v sebesar 10^5 , P_{Tb} sebesar 9×10^2 , dan P_{iz} sebesar 10^6 .
- Algoritma FTC yang dirancang mampu mengkompensasi kesalahan yang diberikan yang ditunjukkan dengan hasil uji berikut:
 - 1) Saat sistem diberi kesalahan bias pada sensor kendaraan saja sebesar 25%, 50%, dan 100% . Performansi sistem yang dilengkapi FTC lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa dilengkapi FTC, yaitu sistem yang dilengkapi dengan FTC semua berhenti pada detik ke-3,47s . Sedangkan sistem tanpa FTC berturut-turut berhenti pada detik ke-3,51s, 3,61s, dan 4,42s. *Maximum Overshoot* untuk kedua kasus adalah sama yaitu sebesar 6,4%.
 - 2) Kesalahan bias pada sensor kecepatan roda yang dapat dikompensasi oleh FTC maksimal sebesar 20%.
 - 3) Semakin besar kesalahan bias aktuator yang diberikan , maka semakin lama waktu yang dibutuhkan kendaraan untuk berhenti. Ketika diberi kesalahan bias sebesar 5%, 10%, dan 30% sistem berturut-turut berhenti pada detik ke-3,48s, 3,52s, dan 3,63s. Dengan kesalahan bias maksimum yang dapat dikompensasi oleh FTC sebesar 30%.

- 4) Saat sistem diuji secara simultan sistem ketika diberi kesalahan aktuator dahulu atau sensor dahulu memiliki performansi dan waktu berhenti yang sama. Sistem yang dilengkapi FTC memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa dilengkapi FTC. Hal ditunjukkan dengan waktu berhenti kendaraan ketika diberi kesalahan bias aktuator sebesar 30% dan sensor kendaraan sebesar 100% sistem yang dilengkapi FTC berhenti pada detik ke-3,61 sedangkan tanpa dilengkai FTC berhenti pada detik ke-3,63.
- 5) Dari uji ketidakpastian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa sistem FTSMC merupakan kontrol robust karena ketika diberikan uji ketidak pastian berupa penambahan penumpang serta diberi kesalahan sistem masih bisa stabil. Ketika Δm sama dengan 0 (di kontroller tanapa ada tambahan penumpang) sistem tidak terjadi slip sehingga sistem lebih stabil, saat Δm tidak sama dengan 0 (kontroller diberi tambahan massa maksimum sebanyak 6 orang) sistem terjadi slip ketika akan berhenti.
- 6) Pada uji Sensitivitas FTC mampu mengkompensai kesalahan aktuator maksimum sebesar 5% dan sensor kendaraan sebesar maksimum 90% . Sedangkan saat sistem diberi kesalahan sensitivitas pada sensor roda sistem tidak stabil.

5.2 Saran

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

- Pemodelan ABS dengan menggunakan pemodelan 4 roda dengan menggunakan metode observer lain yang dapat digunakan pada sistem yang unobservability.

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*, 2(03), 186.
- Chen, C.-K., & Wang, Y.-C. (1996). Fuzzy control for the anti-lock brake system. In *Fuzzy Systems Symposium, 1996. Soft Computing in Intelligent Systems and Information Processing., Proceedings of the 1996 Asian* (pp. 67–72).
- Dianrise, S. (2018). *Perancangan Sistem Active Fault Tolerant Control pada Regenerative Anti-Lock Braking System Mobil Listrik dengan Kesalahan pada Aktuator*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 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.
- Harifi, A., Aghagolzadeh, A., Alizadeh, G., & Sadeghi, M. (2005). Designing a sliding mode controller for antilock brake system. In *Computer as a Tool, 2005. EUROCON 2005. The International Conference on* (Vol. 1, pp. 258–261).
- Holkar, K. S., & Waghmare, L. M. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Applications*, 78(4).
- Ichikawa, M., Sebe, N., Suyama, K., & Indriawati, K. (2017). A bias fault estimation of actuators and sensors by optimization with ℓ_0 norm constraint. In *Control Conference (ASCC), 2017 11th Asian* (pp. 1443–1448).
- 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.
- Jitesh, S. (2014). Antilock braking system (ABS). *International*

- Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 3(4), 253.
- Lee, Y., & Zak, S. H. (2002). Designing a genetic neural fuzzy antilock-brake-system controller. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 198–211.
- Liu, J., & Wang, X. (2012). *Advanced sliding mode control for mechanical systems: design, analysis and MATLAB simulation*. Springer Science & Business Media.
- Lubbers, K. H. B. (2014). *Design and Analysis of a Model Based Low Level Slip Controller Based on a Hybrid Braking System*. Delft University of Technology.
- Mirzaeinejad, H., & Mirzaei, M. (2010). A novel method for non-linear control of wheel slip in anti-lock braking systems. *Control Engineering Practice*, 18(8), 918–926.
- Muljati, S., Triwinarto, A., Utami, N., & Hermina. (2016). Gambaran Median Tinggi Badan Dan Berat Badan Menurut Kelompok Umur Pada Penduduk Indonesia Yang Sehat Berdasarkan Hasil RISKESDAS 2013 (Description Of Median Number Of Weight And Height Classified By Age Group On Healthy Indonesian Citizens Based On RISKE, 2013(2), 137–144.
- Nasir, A. N. K., Ismail, R., & 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*, 71, 400–405.
- Ogata, K. (2009). *Modern control engineering*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Patton, R. J. (1997). Fault-tolerant control: the 1997 situation. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18), 1029–1051.
- Rahmani, M., Ghanbari, A., & Ettefagh, M. M. (2016). Robust adaptive control of a bio-inspired robot manipulator using bat algorithm. *Expert Systems with Applications*, 56, 164–176.
- Rifqi, M. P. (2018). *Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC) Pada Regenerative Anti-Lock Braking System Pada*

- Mobil Listrik Dengan Kesalahan Pada Sensor*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Slotine, J.-J. E. & Li, W., 1991. *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Tabatabaeipour, S. (2011). *Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Hybrid Systems*.
- Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An introduction to regenerative braking of electric vehicles as anti-lock braking system. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE* (pp. 944–948).
- Wabco, M. (1999). *Anti-Lock Braking System Training Program. Student Manual, USA*

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran A

SCRIPT mfile MATLAB R2014a ABS

```

% Definisi parameter regenerative ABS pada
EV
m = 342.5;
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 plant
A = [0 0 0; 0 -100 0; 0 -1/j 0] ;
B = [-1/m 0;0 100;r/j 0];
Fx = [-1/m; r/j; 0];
C = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1] ;
D= [0 0 ;0 0;0 0];

n = length(A);
p = size(C,1);
mu = size(B,2);
fa = size(Fx,p);

```

```

%% extended
Aa = [0 0 0 -1/j; 0 0 0 0;0 pz -pz 0;0 0 0 -
1/tau];
Ba = [0;0;0;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];

Dd = [0 0 1 ]'*0;

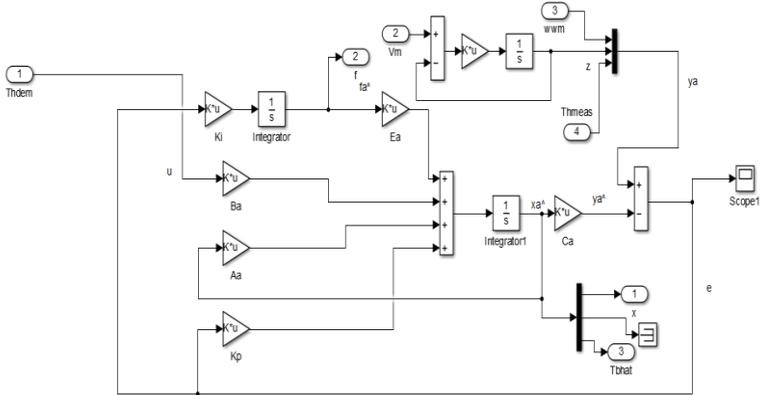
dd = size(Dd,2);
fx = size(Fx,2);

Abar = 1*eye(p);
Da = [Dd; zeros(p,dd)];
Bo = [Da zeros(n+p,fa); zeros(fa,dd)
eye(fa)];

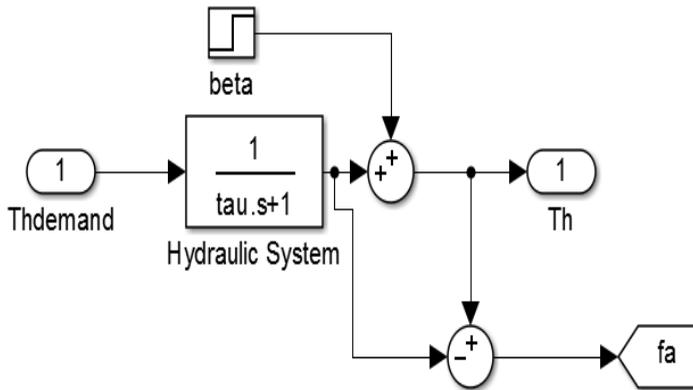
%Gain Observer
Kp = [900/j 0 0;
      0 1e5/m 0;
      0 1e6 0;0 0 900*1/tau];
Ki= [9*1e7 0 0;0 1*1e6 0;0 0 9*1e4];

```

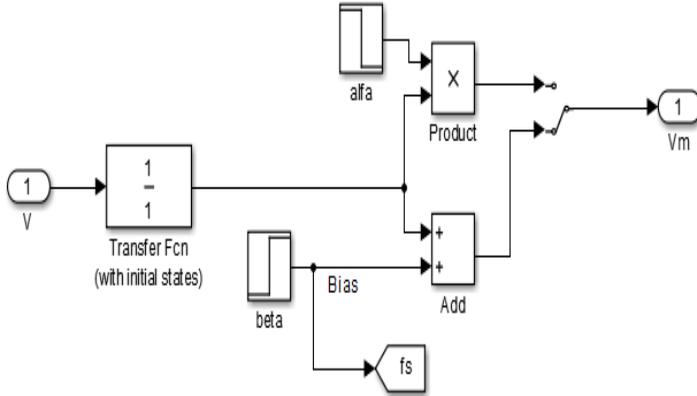

SIMULINK MATLAB R2014a *OBSERVER* ABS



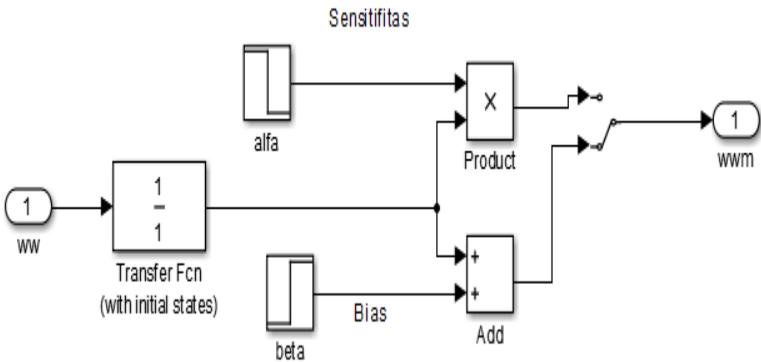
SIMULINK MATLAB R2014a RANGKAIAN AKTUATOR



SIMULINK MATLAB R2014a RANGKAIAN SENSOR KENDARAAN



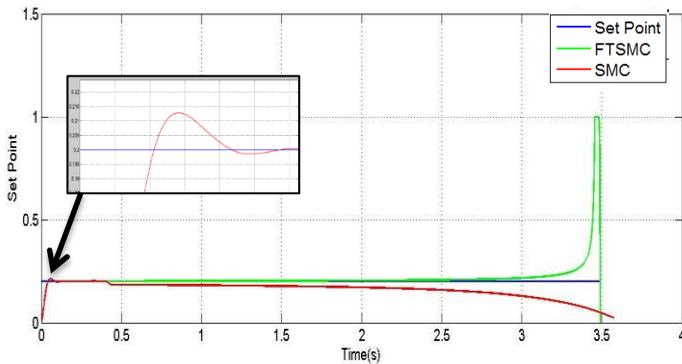
SIMULINK MATLAB R2014a RANGKAIAN SENSOR RODA



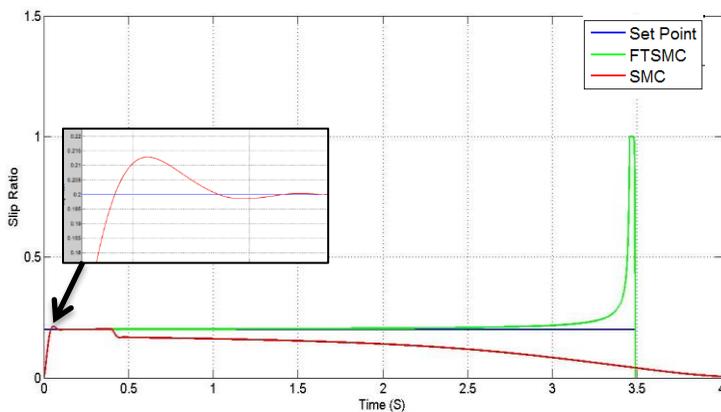
Lampiran B

HASIL RESPON

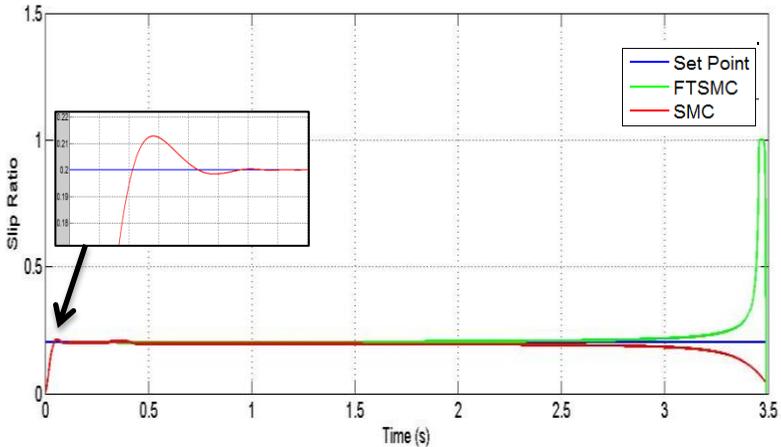
1. Respon hasil estimasi observer dengan kesalahan bias sensor sebesar 50% pada detik ke-0,4s dan aktuator sebesar 5% pada detik ke-0,3s.



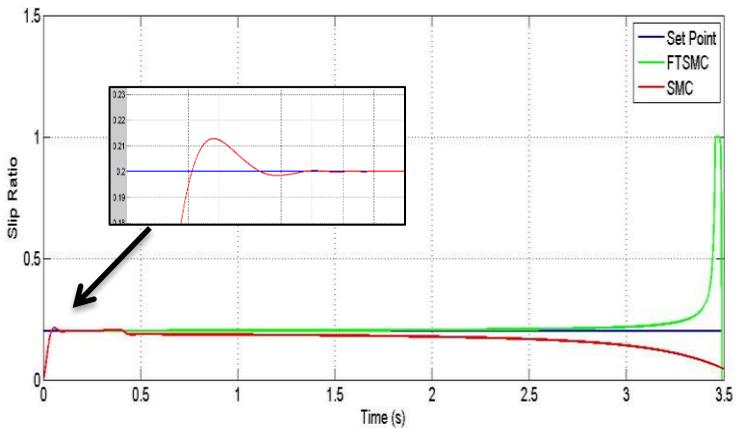
2. Respon hasil estimasi observer dengan kesalahan bias sensor sebesar 100 % pada detik ke-0,4s dan aktuator sebesar 5% pada detik ke-0,3s.



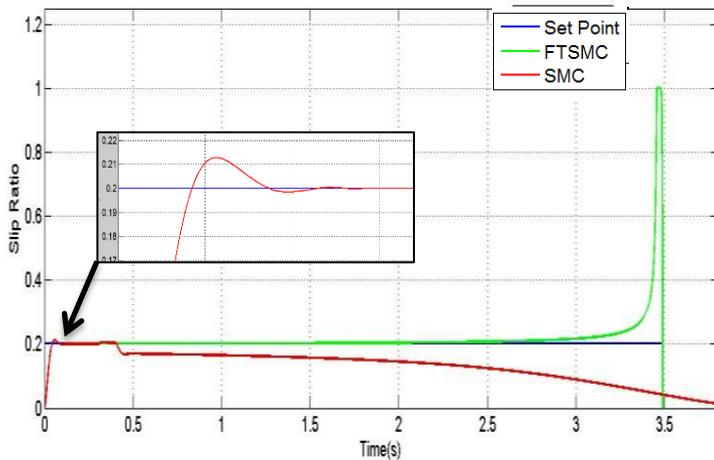
3. Respon hasil estimasi observer dengan kesalahan bias sensor sebesar 25 % pada detik ke-0,4s dan aktuator sebesar 10% pada detik ke 0,3s.



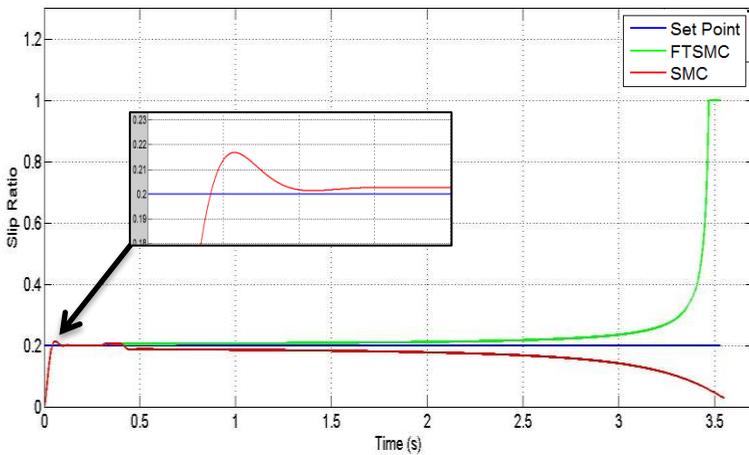
2. Respon hasil estimasi observer dengan kesalahan bias sensor sebesar 50 % pada detik ke-0,4s dan aktuator 10% pada detik ke-0,3s.



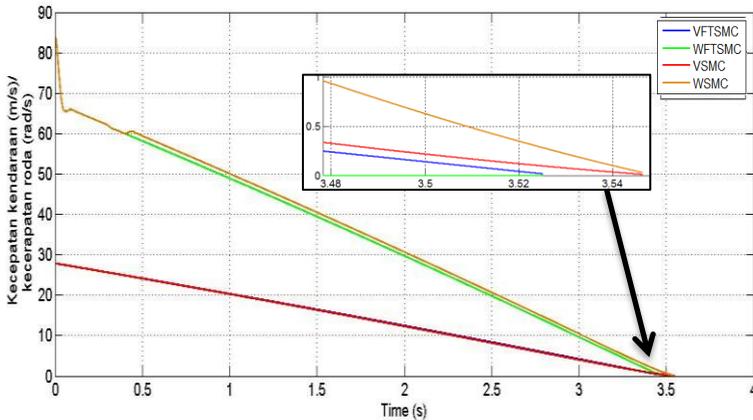
3. Respon hasil estimasi observer dengan kesalahan bias sensor sebesar 100 % pada detik ke-0,4s dan aktuator 10% pada detik ke-0,3s



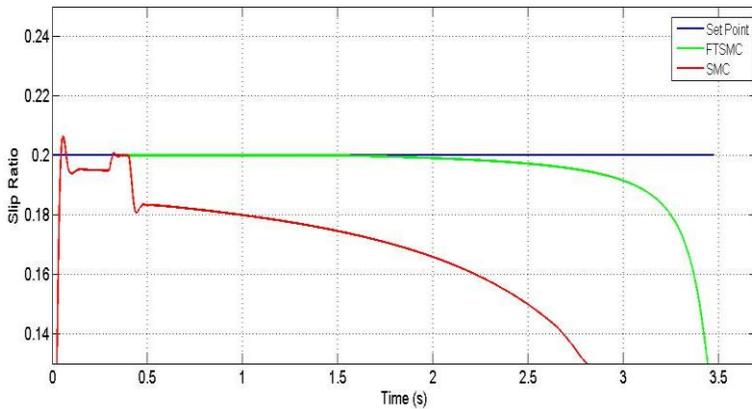
4. Respon Slip ratio dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 1 penumpang dan massa controller tetap massa mobil.



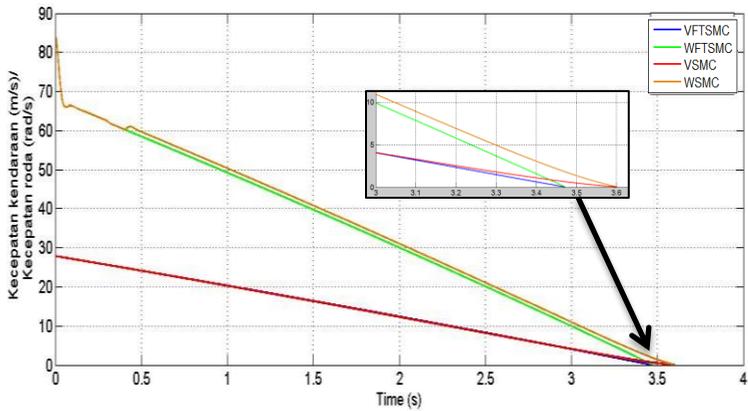
- Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 1 penumpang dan massa controller tetap massa mobil.



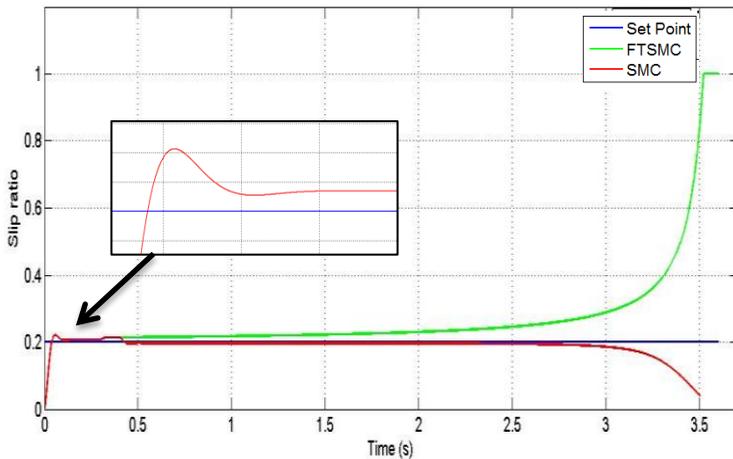
- Respon slip ratio dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 3 penumpang dan massa controller tetap massa mobil.



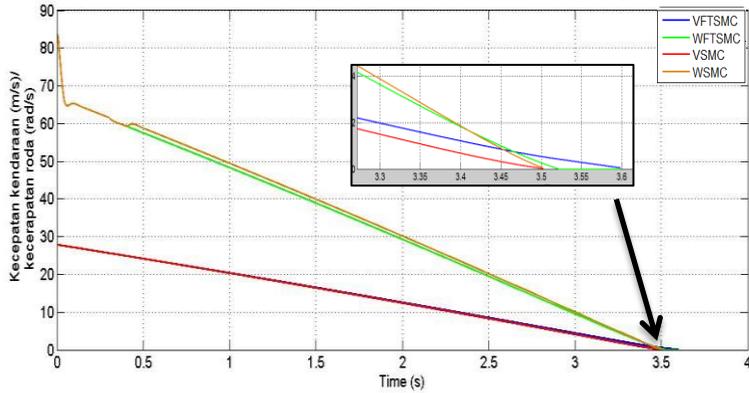
7. Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 3 penumpang dan massa controller tetap massa mobil.



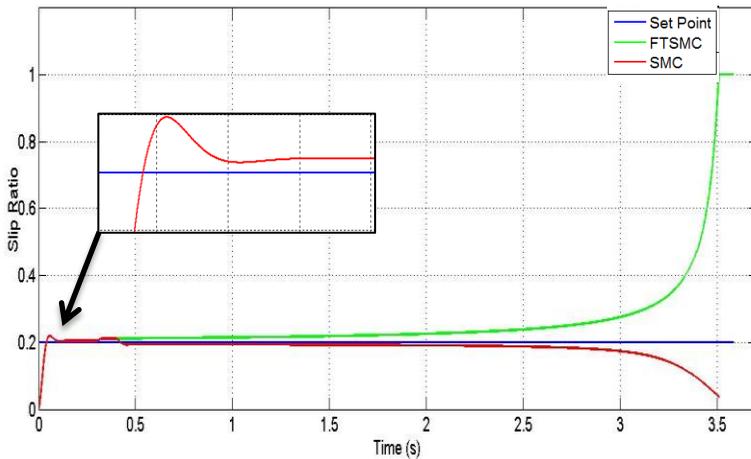
8. Respon slip ratio dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 2 penumpang dan massa controller diberikan massa maksimal yaitu 6 orang.



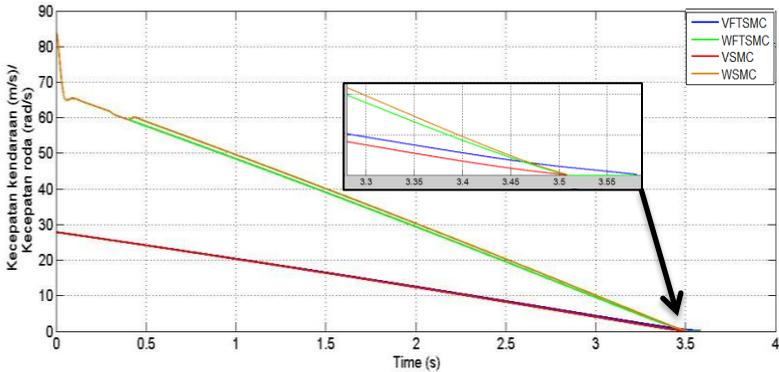
9. Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 2 penumpang dan massa controller diberikan massa maksimal yaitu 6 orang.



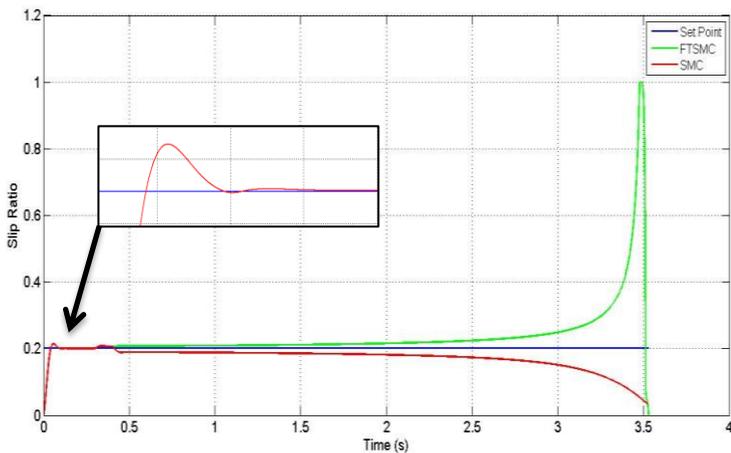
10. Respon slip ratio dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 3 penumpang dan massa controller diberikan massa maksimal yaitu 6 orang.



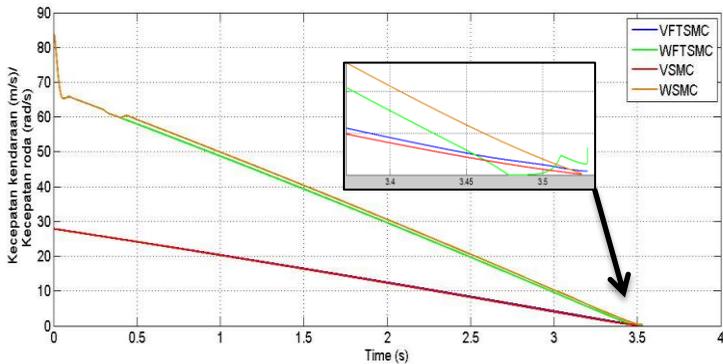
11. Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 3 penumpang dan massa controller diberikan massa maksimal yaitu 6 orang.



12. Respon slip ratio dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 5 penumpang dan massa controller diberikan massa maksimal yaitu 6 orang.



13. Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan pemberian massa kendaraan sebanyak 5 penumpang dan massa kontroller diberikan massa maksimal yaitu 6 orang.



BIODATA PENULIS



Nama penulis Eka Putri Nur Ikhfani. Penulis dilahirkan di Jember, pada tanggal 5 Februari 1997 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara dari almarhum ayahanda Hasim dan Ibunda Yeni Ibtida'ati. Saat ini penulis tinggal di Jember. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Kesilir 04 hingga tahun 2009, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Ambulu hingga tahun 2012, pendidikan menengah atas di SMAN Ambulu hingga tahun 2015, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang. Pada bulan Juli 2019, penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Perancangan Fault Tolerant Control (FTC) Berdasarkan Estimasi Kesalahan Bias Sensor Dan Aktuator Pada Anti-lock Braking System Mobil Konvensional. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email: ekaputriikhfani@gmail.com.