



TUGAS AKHIR - TF 181801

**RANCANG BANGUN *FAULT TOLERANT SLIDING
MODE CONTROL* PADA *ANTI-LOCK BRAKING
SYSTEM* DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR
KECEPATAN**

**DIKKO DWI MARINDO
NRP 0231164000049**

**Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T, M.T
NIP. 19690507 199512 1 001**

**Program Studi S-1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF FAULT TOLERANT SLIDING MODE
CONTROL IN ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
WITH FAULT IN SPEED SENSOR***

**DIKKO DWI MARINDO
NRP 0231164000049**

**Supervisor
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T, M.T
NIP. 19690507 199512 1 001**

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dikko Dwi Marindo
NRP : 023116 40000 049
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa
Sistem
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul **“RANCANG BANGUN *FAULT TOLERANT SLIDING MODE CONTROL* PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR KECEPATAN”** 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, Januari 2020
Yang membuat pernyataan,



Dikko Dwi Marindo
NRP. 02311640000049

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN *FAULT TOLERANT SLIDING MODE CONTROL* PADA *ANTILOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR KECEPATAN

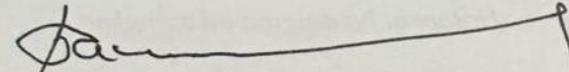
TUGAS AKHIR

Oleh:

Dikko Dwi Marindo
NRP. 0231164000049

Surabaya, 22 Januari 2020
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing,



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



Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN *FAULT TOLERANT SLIDING MODE CONTROL* PADA *ANTILOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR KECEPATAN

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 dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Dikko Dwi Marindo
NRP. 0231164000049

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T. (Pembimbing)
2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Ketua Penguji)
3. Dr. Ir. Purwadi A. Darwito, MSc. (Penguji I)
4. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T. (Penguji II)
5. Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC. (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**RANCANG BANGUN *FAULT TOLERANT SLIDING MODE*
CONTROL PADA ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR KECEPAAN**

Nama : Dikko Dwi Marindo
NRP : 0231164000049
Departemen : Teknik Fisika FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T, M.T.

Abstrak

Anti lock Braking System (ABS) adalah sistem pengereman kendaraan yang berfungsi untuk mencegah slip atau penguncian roda agar kendaraan tetap dapat dikendalikan saat terjadi pengereman secara mendadak. Sensor kecepatan merupakan komponen penting dalam ABS, ketika terjadi kesalahan akan berpengaruh terhadap kestabilan sistem dan berakibat terjadinya kegagalan sistem. Pada tugas akhir ini diterapkan skema *Fault Tolerant Sliding Mode Control* (FTSMC) untuk mengestimasi dan mengkompensasi kesalahan pada sensor kecepatan dan meningkatkan performansi sistem. FTSMC menggunakan observer sebagai estimator kesalahan sensor kecepatan. Hasil uji observer menghasilkan respon *maximum overshoot* sebesar 0,49%, *settling time* 0,0003s, dan *error steady state* 0,0002%. Pada hasil uji respon dengan menggunakan skema *Fault Tolerant Sliding Mode Control* (FTSMC) mampu mengatasi kesalahan bias pada sensor kecepatan kendaraan hingga 100% dengan waktu henti kendaraan 3,47s dan jarak henti 48,2 meter. Penerapan pada simulator *Quarter Car Model* (QCM) penggunaan *Anti-lock Braking System* (ABS) dengan skema *Fault Tolerant Sliding Mode Control* (FTSMC) mampu mencegah terjadinya slip dengan parameter performansi *maximum overshoot* sebesar 65%, dan waktu henti pada 2,1 detik.

Kata kunci: *anti-lock braking system, fault tolerant sliding mode control (FTSMC), observer, sensor*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN OF FAULT TOLERANT SLIDING MODE
CONTROL IN ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM WITH
FAULT IN SPEED SENSOR**

Name : *Dikko Dwi Marindo*
NRP : *0231164000049*
Department : *Teknik Fisika FTIRS-ITS*
Supervisors : *Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T, M.T.*

Abstract

Anti-lock Braking System (ABS) is a braking system on vehicles that serves to prevent a slip or locking on the wheels of the vehicle so that the vehicle can still be controlled when braking suddenly occurs. The speed sensor is an important component in ABS when an error occurs it will affect the stability of the system and allow system failure. In this final project, a Fault Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC) scheme is applied in order to estimate and compensate for errors in the speed sensor so that it can improve system performance. In the Fault Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC) scheme using an observer as a speed sensor error estimator. The observer test results in estimating speed sensor errors produce maximum overshoot response of 0.49%, settling time 0,0003s, and steady-state error 0,0002%. On the response test results using the Fault-Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC) scheme is able to overcome bias errors on the vehicle speed sensor up to 100% with time stops 3.47s and stopping distance 48.2 meters. Application for simulator Quarter Car Model (QCM) using Anti-lock Braking System (ABS) with Fault-Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC) scheme can prevent slip condition with performance parameter maximum overshoot 65% and braking time at 2.1 s.

Keywords: *anti-lock braking system, fault tolerant sliding mode control (FTSMC), observer, sensor*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Rancang Bangun *Fault Tolerant Sliding Mode Control* Pada *Anti-Lock Braking System* Dengan Kesalahan Pada Sensor Kecepatan ”**

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

1. Bapak Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T. 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 dan bimbingan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS
4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA 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. Keluarga yang selalu memberikan kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
7. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir
8. Teman-teman Asisten Laboratorium Fisika Rekayasa
9. Seluruh teman-teman angkatan 2016 yang turut memberikan dukungannya
10. 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, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
Abstrak.....	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Anti-Lock Braking System (ABS)</i>	5
2.2 <i>Komponen Plant Simulator Sistem ABS</i>	8
2.3 <i>Sliding Mode Control</i>	12
2.4 <i>Fault Tolerant Control</i>	15
2.5 <i>Observer</i>	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 <i>Set Up Simulator Quarter Car Model (QCM)</i>	23
3.2 <i>Pemodelan Dinamik Quarter Car Model</i>	25
3.3 <i>Pemodelan Speed Sensor dan Aktuator Hidrolik</i>	27
3.4 <i>Perancangan Kontrol Sliding Mode Controller</i>	27
3.5 <i>Perancangan Fault Tolerant Control (FTC)</i>	31
3.6 <i>Perancangan Observer</i>	31
BAB IV ANALISIS DATA	39
4.1 <i>Pengujian Simulasi Pengereman Tanpa ABS</i>	39
4.2 <i>Pengujian Simulasi Pengereman ABS</i>	40

4.3	Pengujian Estimasi Observer.....	43
4.4	Pengujian Kesalahan Bias 25%	44
4.5	Pengujian Kesalahan Bias 50%	47
4.6	Pengujian Kesalahan Bias 75%	49
4.7	Pengujian Kesalahan Bias 100%	51
4.8	Pengujian Ketidakpastian	53
4.9	Pengujian Pengereman Simulator Tanpa ABS	56
4.10	Pengujian Pengereman Simulator ABS SMC.....	57
4.11	Pengujian Pengereman Simulator ABS FTSMC	59
BAB V PENUTUP		63
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	64
DAFTAR PUSTAKA.....		65
LAMPIRAN.....		69
BIODATA PENULIS.....		87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perbandingan koefisien gesek permukaan jalan dengan slip rasio roda	6
Gambar 2.2	<i>Electronic control unit</i>	8
Gambar 2.3	<i>Wheel speed sensor</i>	9
Gambar 2.4	<i>Master silinder</i>	10
Gambar 2.5	<i>Solenoid valve</i>	10
Gambar 2.6	<i>Brake switch</i>	11
Gambar 2.7	Interpretasi grafik SMC	13
Gambar 2.8	Klasifikasi FTC	16
Gambar 2.9	Klasifikasi FDI	17
Gambar 2.10	Observer state	19
Gambar 3.1	Flowchart tugas akhir	21
Gambar 3.2	Skema plant anti-lock braking system	21
Gambar 3.3	Diagram blok untuk ABS	26
Gambar 3.4	Dinamika gaya yang bekerja pada quarter car model	26
Gambar 3.5	Diagram blok perancangan FTC	31
Gambar 3.6	Struktur observer	37
Gambar 4.1	Grafik respon slip rasio tanpa ABS	39
Gambar 4.2	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda tanpa ABS	40
Gambar 4.3	Grafik respon slip rasio ABS dengan SMC	41
Gambar 4.4	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda ABS dengan SMC	43
Gambar 4.5	Estimasi kesalahan bias sensor kendaraan	44
Gambar 4.6	Respon slip rasio dengan kesalahan bias 25% ..	45
Gambar 4.7	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 25%	46
Gambar 4.8	Respon slip rasio dengan kesalahan bias 50% ..	47

Gambar 4.9	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 50%	48
Gambar 4. 10	Respon slip rasio dengan kesalahan bias 75% ...	49
Gambar 4. 11	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 75%	50
Gambar 4. 12	Respon slip rasio dengan kesalahan bias 100% .	51
Gambar 4. 13	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 100%	52
Gambar 4. 14	Respon slip rasio dengan ketidakpastian massa kendaraan.....	53
Gambar 4. 15	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda penambahan massa 10 kg	54
Gambar 4. 16	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda penambahan massa 20 kg	55
Gambar 4. 17	Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda penambahan massa 30 kg	55
Gambar 4. 18	Grafik respon slip rasio simulator <i>Non-ABS</i>	56
Gambar 4. 19	Grafik respon kecepatan simulator <i>Non-ABS</i> ...	57
Gambar 4. 20	Grafik respon slip rasio simulator ABS dengan SMC.....	58
Gambar 4. 21	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan simulator ABS dengan SMC.....	59
Gambar 4. 22	Grafik respon slip rasio simulator ABS dengan FTSMC	60
Gambar 4. 23	Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan simulator ABS dengan FTSMC	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Koefisien gesek roda jalan	7
Tabel 4.1	Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji <i>closed loop SMC</i>	41
Tabel 4.2	Parameter performansi Observer.....	44
Tabel 4.3	Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 25%	45
Tabel 4.4	Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 50%.....	47
Tabel 4.5	Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 75%	49
Tabel 4.6	Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 100%	51
Tabel 4.7	Parameter performansi sistem dengan ketidakpastian massa kendaraan.	54
Tabel 4.8	Parameter performansi simulator ABS dengan SMC.....	58
Tabel 4.9	Parameter performansi simulator ABS dengan FTSMC.	60

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Badan Pusat Statistik (BPS) menyatakan pada tahun 2018 jumlah kendaraan bermotor di Indonesia adalah 138.855.656 unit (Statistik). Kepemilikan kendaraan bermotor adalah hal yang wajib untuk setiap rumah tangga di Indonesia. Maka wajar adanya cukup banyak kendaraan roda empat dapat kita temui di jalan sekarang. Pada tahun 2018 penjualan mobil mencapai 230.444 unit (CNN, 2018). Faktor keamanan (*safety*) adalah salah satu faktor yang menjadi perhatian dalam penggunaan kendaraan. Setiap kendaraan harus didukung oleh sistem keamanan yang cukup untuk menghindari terjadinya kejadian yang dapat merugikan pengguna kendaraan.

Angka kematian yang disebabkan oleh kecelakaan kendaraan sangat tinggi (KOMINFO, 2017). Hal ini dapat disebabkan karena faktor kondisi pengemudi dan kondisi kendaraan. Faktor kondisi kendaraan yang kurang prima dapat menyebabkan kejadian yang sangat fatal, salah satunya adalah kegagalan kendaraan dalam melakukan pengereman yang dapat menyebabkan kecelakaan. Proses pengereman dalam kondisi mendadak dapat menyebabkan roda dalam keadaan terkunci dan mengakibatkan slip sehingga kendaraan hilang kendali. Oleh karena itu sistem pengereman adalah salah satu faktor keamanan (*safety*) yang penting pada setiap kendaraan. *Anti-lock braking system* (ABS) merupakan sistem pengereman yang telah banyak digunakan. ABS merupakan sistem pengereman yang dapat mengendalikan kendaraan ketika dilakukan pengereman secara mendadak (Antic, 2010). Sistem pengereman dengan menggunakan ABS mencegah roda kendaraan untuk terkunci ketika terjadi pengereman secara mendadak atau darurat.

Sistem kinerja ABS terdapat komponen utama, yaitu *wheel speed sensor*, *vehicle speed sensor*, *hydraulic modulator* dan *electronic control unit (ECU)* (Denton, 1995). Saat terjadi proses pengereman yang mendadak, dapat mengakibatkan roda kendaraan yang berputar secara tiba-tiba terkunci. Sensor kemudian mengirimkan sinyal pada kontroler ECU yang akan memberi perintah agar valve pada hydraulic modulator terbuka, sehingga akan menyebabkan tekanan oli pengereman berkurang dan mengakibatkan roda dapat berputar kembali. Saat roda kendaraan mulai berputar kembali, sensor kembali mengirimkan sinyal pada kontroler ECU untuk menutup valve dan proses pengereman kembali terjadi. Kinerja dari *Anti-lock braking system (ABS)* untuk dapat mempertahankan nilai dari slip rasio optimal di angka 0.2 diperlukan sistem pengendalian. Sistem pengendalian yang optimal untuk digunakan pada sistem ABS adalah *Sliding Mode Controller (SMC)*. *Sliding Mode Controller (SMC)* memiliki keutamaan yaitu anti-jamming yang baik. SMC juga memiliki kekuatan atau *robust*, artinya memiliki toleransi terhadap kesalahan model sistem, perubahan dari parameter objek yang dikontrol dan tahan terhadap gangguan eksternal (Guo, Jian, & Lin, 2014). Pada penggunaan sensor kecepatan dapat terjadi kesalahan pembacaan, diantaranya kesalahan bias. Hal tersebut merupakan kejadian berbahaya dan dapat mengakibatkan kesalahan pada sistem pengereman ABS. Diperlukan sebuah sistem yang dapat mengestimasi dampak kesalahan tersebut.

Metode estimasi yang sering digunakan adalah *Fault Tolerant Control (FTC)* dengan menggunakan observer. Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan maka disusun sebuah tugas akhir ini dengan topik Rancang Bangun *Fault Tolerant Sliding Mode Control* Pada *Anti-Lock Braking System* dengan Kesalahan pada Sensor Kecepatan.

1.2 Rumusan Masalah

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

- Bagaimana merancang Observer yang dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan sensor kecepatan secara realtime pada *Anti-Lock Braking System (ABS)*?
- Bagaimana merancang *Fault Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC)* untuk mengakomodasi kesalahan sensor kecepatan secara realtime pada *Anti-Lock Braking System (ABS)*?

1.3 Tujuan

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

- Merancang Observer yang dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan sensor kecepatan pada sistem *Anti-Lock Braking System (ABS)*
- Merancang *Fault Tolerant Control Sliding Mode (FTSMC)* yang dapat digunakan untuk mengakomodasi kesalahan sensor kecepatan pada sistem *Anti-Lock Braking System (ABS)* sehingga menghasilkan respon pengereman yang tepat meskipun ada kesalahan pada komponen sensor kecepatan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah berupa *Quarter Car Model (QCM)*.
- Nilai *setpoint* 0,2 berdasarkan dari *slip ratio* yang optimal.
- *Electronic Control Unit (ECU)* menggunakan NI-DAQ 6001.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I ini terdiri dari gambaran umum yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penyusunan laporan.

2. BAB II DASAR TEORI

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

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

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

4. BAB IV ANALISIS DATA

Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan dan aplikasi pada simulator menggunakan sistem *Fault Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC)*.

5. BAB V PENUTUP

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

BAB II DASAR TEORI

2.1 *Anti-Lock Braking System (ABS)*

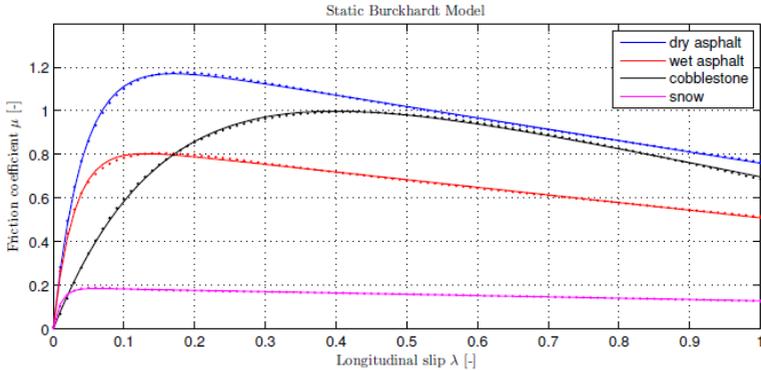
Teknologi keselamatan aktif yakni *Anti-Lock Braking System (ABS)* digunakan untuk mengendalikan dinamika kendaraan saat terjadi proses pengereman secara mendadak atau darurat. ABS diterapkan untuk kendaraan otomotif mobil dengan tujuan mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas dan meningkatkan *steerability* kendaraan selama proses pengereman (Solyon, 2002). Sistem ini mengatur slip roda tetap pada nilai optimalnya untuk mendapatkan gaya pengereman yang optimal. Pada penggunaan sistem ini maka didapatkan jarak berhenti kendaraan yang minimum serta dapat mempertahankan stabilitasnya (Mirzaeinejad, 2010). Analisa sistem pengereman ABS pada kendaraan menggunakan pemodelan dinamik pendekatan *quarter car models*. Persamaan dinamis proses pengereman sistem ABS pada kendaraan.

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

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

Pemodelan gerak dinamis kendaraan menggunakan persamaan hukum II Newton. Saat proses pengereman dilakukan terdapat torsi pengereman yaitu (T_b). Saat proses pengereman pada kendaraan akan menghasilkan gaya *tractive force* oleh roda. Gaya tersebut sebanding dengan gaya normal jalan pada ban. Perbandingan variasi atau koefisien permukaan jalan dapat dilihat dari grafik fungsi non-linier antara koefisien gesek jalan (μ) dengan *rasio slip* (λ) untuk kondisi spesifik jalan tertentu. Pada Gambar 2.1 menunjukkan berbagai kondisi jalan, koefisien gesek maksimum bernilai 0,2 dan memiliki koefisien yang

rendah ketika slip rasio roda bernilai 1 yaitu ketika roda dalam keadaan terkunci. Nilai slip rasio roda dijaga agar tetap dalam keadaan optimal dengan nilai 0,2 untuk dapat memaksimalkan koefisien gesek.



Gambar 2.1 Perbandingan koefisien gesek permukaan jalan dengan slip rasio roda (Lubbers, 2014)

Pada gambar diatas dapat diketahui saat kondisi jalan licin, koefisien gesekan antara ban dengan jalan kecil dan memiliki μ (*breaking effort coefficient*) yang rendah, sehingga resiko roda slip tinggi. Saat kondisi jalan yang normal, koefisien gesekan memiliki μ yang besar, sehingga resiko untuk roda slip menjadi rendah.

Slip rasio (λ) dapat dinyatakan dengan bentuk persamaan yang merupakan fungsi kecepatan kendaraan dengan putaran roda.

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

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 koefisien gesekan roda (μ) dengan slip rasio (λ) berdasarkan pada penelitian (Guo, Jian, & Lin, 2014) diperoleh melalui persamaan:

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

Dengan:

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

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 menunjukkan koefisien gesek berdasarkan pada variasi kondisi jalan. Nilai dari koefisien gesek mempengaruhi nilai *tractive force* roda kendaraan. Pengendalian slip rasio dijaga agar tetap pada kisaran 0,2 agar kinerja roda dapat lebih optimal.

Berdasarkan tujuan utama dari adanya ABS didapatkan 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan dari kendaraan (Harifi, A., Aghagolzadeh, A., Alizadeh, G., & Sadeghi, M, 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.

2.2 Komponen *Plant Simulator* Sistem ABS

Sistem *Anti-Lock Braking System* (ABS) pada *plant simulator* memiliki komponen seperti berikut

- ***Electronic Control Unit (ECU)***

ECU merupakan bagian terpenting sistem pengereman yang berfungsi untuk memproses ABS. ECU berfungsi untuk menerima sinyal dari sensor untuk diproses dalam fungsi kecepatan dan akselerasi roda, kemudian menentukan ketika roda hendak terkunci dan mengaktifkan *solenoid valve* ABS. ECU menggunakan kecepatan angular roda dan kendaraan untuk mengendalikan nilai slip ratio dengan melakukan perbandingan kecepatan. Saat *valve* aktif, ECU mengatur tekanan fluida yang menuju ruangan rem. Gambar 2.2 merupakan DAQ 6001 yang berfungsi sebagai ECU pada plant.

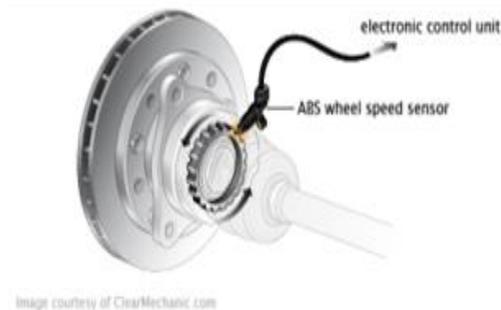


Gambar 2.2 *Electronic control unit* (Instrument, 2014)

- **Wheel Speed Sensor**

Wheel speed sensor memiliki fungsi untuk mendeteksi kecepatan putaran masing-masing roda melalui sensor yang terpasang pada masing-masing roda. Sehingga akan didapatkan input putaran dari roda, ketika terdapat slip putaran, maka dari kondisi inputan ini ECU memberikan sinyal inputan kepada actuator yang kemudian akan mengirimkan tekanan fluida berupa tinggi-rendahnya tekanan pada sistem pengereman untuk mencegah terjadinya slip.

Sensor yang digunakan pada plant ini adalah *proximity* sensor. Pemasangan sensor ditempatkan pada piringan bergigi dan terhubung langsung dengan poros roda. Putaran roda dan piringan bergigi akan sama sehingga menghasilkan perubahan fluks pada sensor. Frekuensi dan amplitudo sinyal dari sensor dapat merepresentasikan kecepatan putara roda. Gambar 2.3 merupakan gambar dari wheel speed sensor pada ABS yang disambungkan pada roda .

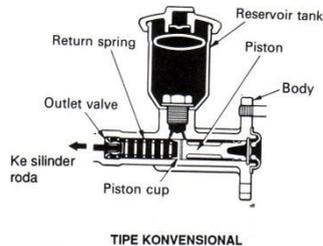


Gambar 2.3 *Wheel speed sensor* (Wabco, 1999)

- **Silinder Master**

Master silinder berfungsi sebagai pengatur tekanan hidrolis dari pedal rem yang nantinya digunakan untuk menekan piston

pada silinder roda. Master Silinder terdapat pada jenis rem hidraulik. Pada master silinder terdapat tabung untuk menampung fluida rem. Gambar 2.4 merupakan gambar master silinder.



Gambar 2.4 Master silinder (Ribowo, 2012)

- **Solenoid Valve**

Solenoid Valve merupakan *control element* yang sering digunakan pada sistem fluida seperti pada *pneumatic system* maupun *hydraulic system*. Solenoid valve memiliki prinsip kerja menggunakan katup listrik sebagai penggerak, ketika koil mendapat suplai tegangan, maka koil memiliki medan magnet sehingga menggerakkan piston dibagian dalamnya. Solenoid valve pneumatik yang digunakan dalam plant ini memiliki tegangan kerja DC sebesar 24 VDC seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Solenoid valve (Frank, 1996)

- ***Brake Switch***

Brake switch berfungsi untuk memutus maupun menyambungkan aliran listrik dari aki ke lampu rem ketika pedal rem aktif, switch akan terdorong oleh pegas dan kemudian memerintahkan aliran listrik untuk menyalakan lampu rem. Ketika pedal rem tidak aktif, maka aliran listrik terputus dan lampu rem otomatis mati.

Brake switch yang digunakan pada plant memiliki dua buah kaki untuk menghubungkan kabel dengan aki seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Brake switch* (Automotive, 2014)

- ***Hydraulic Control Unit***

Hydraulic Control Unit memiliki komponen yaitu katup *hydraulic* rem *Anti-lock Braking System* (ABS) dan modulator tekanan pengereman. Katup *hydraulic* rem *Anti-lock Braking System* (ABS) berfungsi untuk mendistribusikan tekanan fluida rem menuju roda. Modulator tekanan pengereman yaitu komponen berbentuk valve yang bergerak untuk membuka dan menutup *hydraulic circuit* yang menghubungkan *master cylinder* dengan rem.

Saat proses pengereman terjadi, valve masukan *master cylinder* akan membuka dan tekanan *outlet* rem dan pompa akan menutup sehingga memberikan kerja pada rem. ECU akan

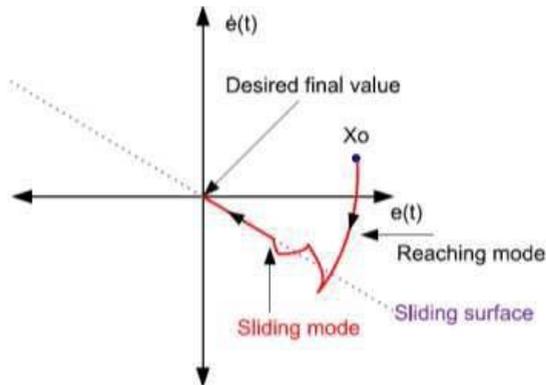
mengendalikan bukaan dari *outlet valve* antara rem dan tekanan pompa agar tidak berlebih pada rem sehingga nilai dari slip rasio dapat dijaga.

Valve pada sistem ABS memiliki tiga fungsi utama dalam performa sistem. Fungsi pertama untuk membuka dan memberi jalur aliran fluida hidrolis dari pedal atau pompa menuju sistem pengereman. Fungsi kedua untuk mengatur tekanan yang diberikan ke sistem pengereman dengan menutup katup dan menahan tekanan berlebih dari pedal rem. Fungsi ketiga untuk mengurangi tekanan hidrolis pada sistem pengereman dengan membuka katup dan mengarahkan fluida hidrolis agar dilepas dari sistem pengereman

2.3 Sliding Mode Control

Sliding Mode Control (SMC) merupakan suatu metode kontrol modern dengan menggunakan *state space* untuk menganalisa sebuah *system* (Nasir, A. N. K, Ismail, R., Ahmad, M. A., 2010). Penggunaan metode *state space* ini relatif lebih mudah dalam penggunaan pada model sistem yang kompleks dan sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO). SMC dikenal dengan kekuatan dan juga 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, M., Ghanbari, A., Etefagh, M. M., 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 lancar sepenuhnya.



Gambar 2.7 Interpretasi grafik SMC (Holkar, K. S., Waghmare, L. M., 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, J.-J. E. & Li, W., 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, M., Ghanbari, A., Etefagh, M. M., 2016) apabila fungsi skalar yang terdapat pada $(x,)$ 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.

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

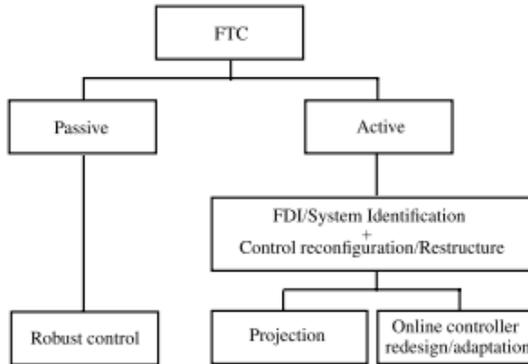
Adanya definisi dari fungsi singnum, persamaan (2.8) dapat dituliskan ke bentuk lain seperti pada persamaan (2.9) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

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

Dengan ε (epsilon) dan k adalah positif konstan.

2.4 *Fault Tolerant Control*

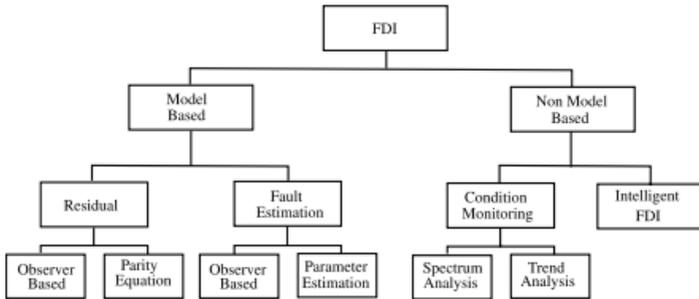
Desain suatu sistem kontrol terkadang dapat mengalami penurunan kinerja atau mengalami penurunan kestabilan. Hal ini terjadi karena kesalahan kecil yang tidak segera diatasi, kesalahan yang terjadi biasanya terletak pada sensor, aktuator, atau komponen yang lainnya yang menyebabkan penurunan dari performa 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, K., Sebe, N., Agustinah, T., Jazidie, A, 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. 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)

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

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

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

Dengan:

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

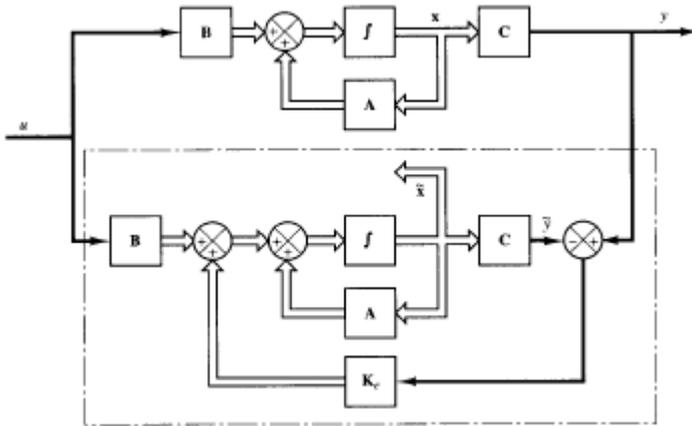
K_e = *gain observer*

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

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

Ketika terjadi kesalahan pada sensor, *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 mengkorelasi 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 direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut dan didefinisikan pada persamaan (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 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 $f_s(t)$.

Melalui persamaan (2.17) dapat didefinisikan persamaan baru sebgai 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 dapat didefinisikan sebagai $f = \begin{bmatrix} F_x \\ f_s \end{bmatrix}$.

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) .

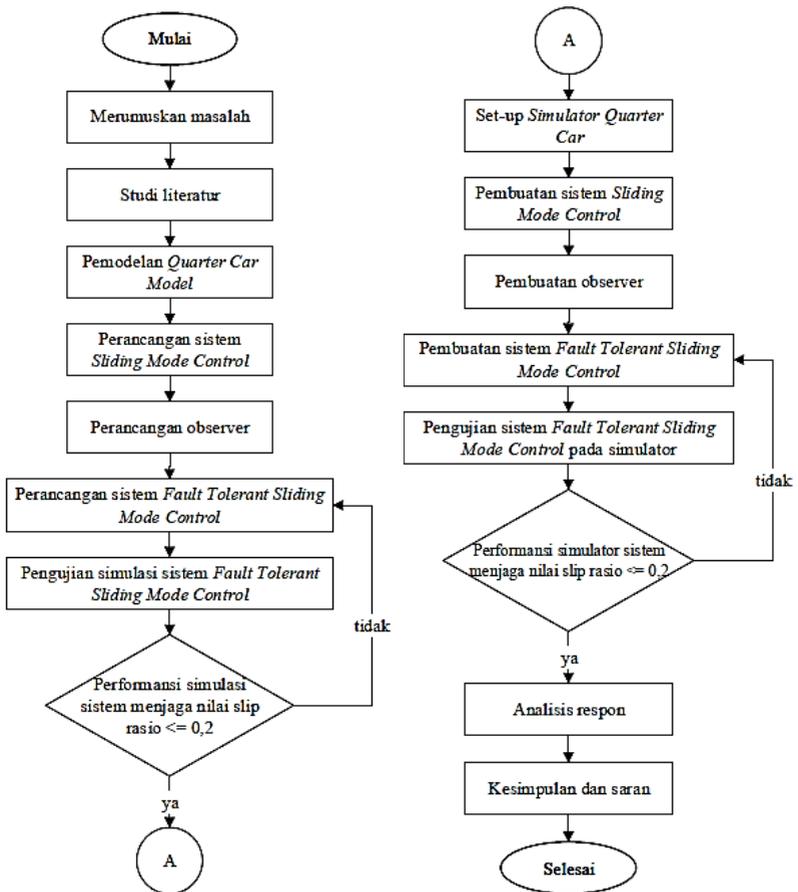
$$\dot{x}_a(t) = A_a X_a(t) + B_a U(t) + E_a f(t) \quad (2.20)$$

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

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

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:

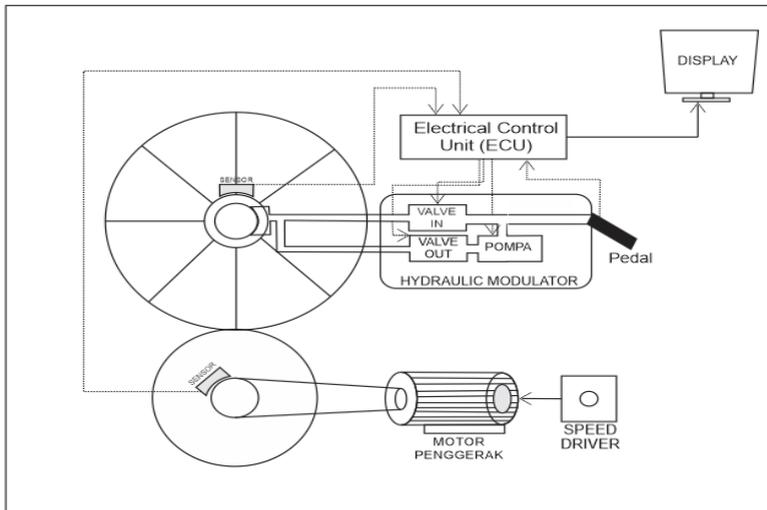


Gambar 3.1 *Flowchart* tugas akhir

- 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. Pemodelan dan Set Up *Quarter Car Model*
Set Up terdiri dari kendaraan, roda, aktuator hidrolik, sensor kecepatan kendaraan, sensor kecepatan roda.
- c. Perancangan dan Pembuatan Sistem *Sliding Mode Control*
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 dan Pembuatan *Observer*
Perancangan dan pembuatan *observer* dilakukan untuk mengestimasi kesalahan yang ada. Perancangan berdasarkan berdasarkan pada pemodelan matematis yang digunakan.
- e. Perancangan dan pembuatan *Fault Tolerant Sliding Mode Control (FTSMC)*
Bagian ini yaitu melakukan perancangan *Fault Tolerant Sliding Mode Control*. Perancangan dan pembuatan FTSMC dilakukan dengan mensimulasikan model yang mempresentasikan plant dengan parameter model plant yang ditentukan.
- f. Pengujian Performansi *Fault Tolerant Sliding Mode Control*
Pengujian FTSMC dilakukan dengan simulasi dan aplikasi hasil perancangan dengan plant simulator ABS.
- g. 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 Set Up Simulator *Quarter Car Model* (QCM)

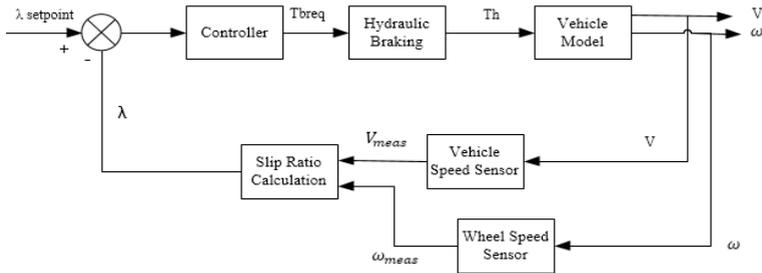
Simulator *Quarter Car Model* (QCM) ABS yang digunakan dalam penelitian ini hanya menggunakan satu buah roda saja. Pada simulator ABS ini terdapat beberapa komponen utama antara lain dua buah sensor kecepatan yaitu (*wheel speed sensor*) yang berfungsi untuk mengukur kecepatan putaran roda (roda bagian atas) dan kecepatan kendaraan (roda bagian bawah), kemudian ada dua buah solenoid *valve* dan satu pompa yang merupakan kesatuan dari *hydraulic modulator* dan *Electrical Control Unit* (ECU) yang menggunakan DAQ 6001 berfungsi sebagai pengendali dari sistem ABS.



Gambar 3.2 Skema plant anti-lock braking system (Wicaksono, 2019)

Gambar 3.2 merupakan skema keseluruhan dari Simulator *Quarter Car Model* (QCM) *anti-lock braking system* dengan *speed driver* akan menjalankan roda sehingga menghasikan kecepatan putar roda dan kecepatan kendaraan. Dua buah sensor *proximity* kemudian akan melakukan pengukuran kecepatan pada

masing – masing roda. Ketika dilakukan pengereman ECU akan menerima data kecepatan putar roda dan kecepatan kendaraan lalu melakukan aksi terhadap *hydraulic modulator* dan menjalankan algoritma *sliding mode control* dan kemudian data dapat disimpan dalam bentuk array untuk ditampilkan pada *display* dalam bentuk grafik respon.



Gambar 3.3 Diagram blok untuk ABS (Eka Putri, 2019)

Sensor *proximity* ini berfungsi menghasilkan sinyal *High* dan *Low*. Jika bernilai *high* maka adanya *ring* yang terdeteksi oleh sensor (*signal trigger*) dan ketika bernilai *low* sensor tidak mendeteksi adanya *ring* yang melewati sensor. Nilai yang diukur oleh sensor adalah waktu putaran *ring* untuk mencapai satu putaran. Semakin cepat roda berputar maka waktu yang dibutuhkan sensor untuk menerima sinyal lebih cepat begitu pula sebaliknya semakin lambat roda berputar maka waktu yang dibutuhkan sensor untuk mengukur semakin lambat.

Electrical Control Unit (ECU) sangat berperan penting dalam Simulator *Quarter Car Model* (QCM) *anti-lock braking system* ini. ECU yang digunakan yaitu DAQ 6001, semua data yang didapatkan dari sensor akan diproses oleh ECU seperti data kecepatan roda, kecepatan kendaraan, *slip ratio*, algoritma kontrol, kemudian memberikan aksi ke setiap *valve* dan pompa.

Ketika pada saat melakukan pengereman secara mendadak dan akan terjadi *slip*, maka ECU melakukan aksi kepada *input* solenoid *valve* untuk menutup dan *output* solenoid *valve* untuk terbuka serta menyalakan pompa. Sehingga pada roda tidak terjadi *lock* atau terkunci.

3.2 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. 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 yang bekerja pada sistem pengereman untuk *quarter car model* ditunjukkan dengan Gambar 3.4 adalah gaya *frictional* (F_x). Persamaan dari gerak horizontal mobil yang terjadi akibat gaya tersebut ditunjukkan dengan persamaan berikut ini.

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

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

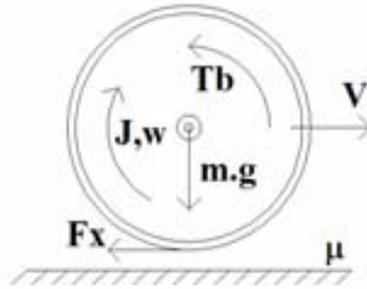
Dengan nilai gaya yang bekerja pada *quarter car model* antara lain sebagai berikut.

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

Dengan :

m	= Massa kendaraan	(kg)
g	= Gaya gravitasi	(m/s^2)
V	= Kecepatan kendaraan	(m/s)

μ = Koefisien gesek permukaan jalan
 R = Jari-jari roda (m)



Gambar 3.4 Dinamika gaya yang bekerja pada quarter car model (Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N., 2007)

Pemodelan gerak rotasi roda untuk *quarter car model* yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 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)

Perhitungan μ pada persamaan F_x didapatkan dari persamaan non-linear 2.4.

Pemodelan gerak rotasi kendaraan untuk *quarter car model* memerlukan informasi *slip ratio*, yang mana *slip ratio* akan dikendalikan sebesar 0.2 berdasarkan penelitian (Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N., 2007). Slip ratio mewakili perbedaan antara

kecepatan roda dan kecepatan relative pada kendaraan terhadap permukaan jalan, yang dapat dinyatakan pada persamaan (2.3).

3.3 Pemodelan 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 hidrolik. Torsi Pengereman hidrolik dihasilkan oleh tekanan fluida yang memiliki dinamika sistem orde satu. Sehingga persamaan dinamik dari sistem pengereman hidrolik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{T_b(s)}{T_{hf}(s)} = \frac{1}{\tau_h s + 1} \quad (3.5)$$

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

$$\frac{T_b(s)}{T_{hf}(s)} = \frac{1}{0.01s + 1} \quad (3.6)$$

3.4 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 (3.7) sampai dengan (3.9) merupakan persamaan yang merepresentasikan model matematis gerak longitudinal dan gerak rotasi dari dari roda pada sistem ABS.

$$m \cdot a = \Sigma F \quad (3.7)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -F_x \quad (3.8)$$

$$F_x r - T_b = J\dot{\omega} \quad (3.9)$$

Persamaan rasio slip dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda_i = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (3.10)$$

Kemudian persamaan (3.10) didiferensialkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{R\dot{\omega}}{V} + \frac{R\omega \cdot \dot{V}}{V^2} \quad (3.11)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.9) dan persamaan (3.10) pada persamaan (3.11) sehingga didapatkan:

$$\dot{\lambda}_i = -F_x \frac{R^2}{J} \cdot \frac{1}{V} + \frac{R}{J} \cdot \frac{1}{V} \cdot T_b - \frac{R\omega}{mV^2} \cdot F_x \quad (3.12)$$

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:

$$S(t) = \lambda_{setpoint}(t) - \lambda(t) \quad (3.13)$$

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

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.14)$$

Dengan:

ε = konstanta *robustness* sistem

k = gain maksimum output controller

Fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Kemudian substitusi persamaan (3.12) dan (3.13) pada persamaan (3.14), sehingga didapatkan:

$$\lambda_{setpoint} - \left(-F_x \frac{R^2}{J} \cdot \frac{1}{V} + \frac{R}{J} \cdot \frac{1}{V} \cdot T_b - \frac{R\omega}{mV^2} \cdot F_x \right) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad (3.16)$$

Sehingga didapatkan persamaan T_b sebagai berikut:

$$T_{breq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mV}\hat{F}_x + \frac{JV}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.17)$$

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

$$T_{breq} = T_{beq} + T_{bhit} \quad (3.18)$$

Dengan T_{beq} merupakan estimasi input kontrol ekuivalen berdasarkan persamaan (3.17) dapat diperoleh sebagai:

$$T_{beq} = R\hat{F}_x - \frac{J\omega}{mV}\hat{F}_x \quad (3.19)$$

\hat{F}_x merupakan gaya friksi dengan berturut-turut mengacu pada persamaan (3.3) dan (3.4) serta koefisien gaya gesek yang tergantung pada kondisi permukaan jalan.

T_{bhit} adalah input kontrol *hitting* untuk memenuhi *sliding condition* ketika terjadi ketidakpastian dinamik pada T_{beq} , Persamaan dari T_{bhit} berdasarkan persamaan (3.17) di definisikan sebagai berikut:

$$T_{bhit} = \frac{JV}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(S) + k(S)] \quad (3.20)$$

Dengan:

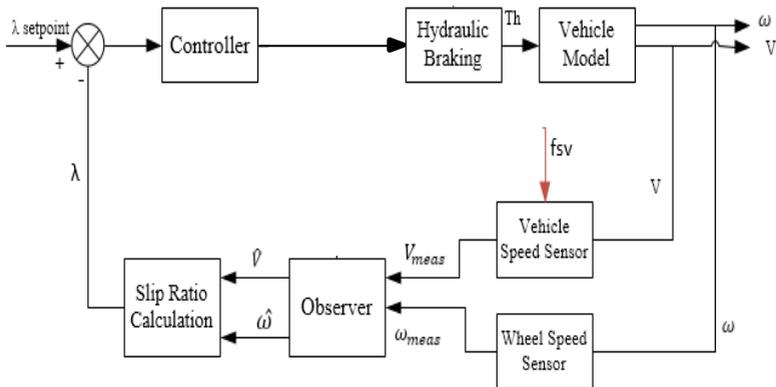
$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

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

Pada aplikasi simulator *anti-lock braking system* (ABS) sebagai *plant*, *output* dari *plant* ada dua yaitu kecepatan roda (ω) dan kecepatan kendaraan (V). Pada persamaan (3.17) nilai S sebagai *error* dari *Sliding Mode Control*. Pada persamaan (3.5) nilai J dan m didapatkan dari pemodelan sistem yang disimulasikan dengan *trial and error* untuk mendapatkan respon yang mendekati dengan *real plant*. Nilai dari sgn (*signum*) disini berfungsi untuk memaksa *trajectory state plant* menuju *sliding surface*. Oleh karena itu sistem *Sliding Mode Control* ini banyak digunakan pada sistem pengereman dengan *Anti-lock Braking System* karena memiliki respon yang baik dibandingkan dengan sistem kontrol yang lain.

3.5 Perancangan *Fault Tolerant 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. Diagram blok dari sistem observer dengan adanya kesalahan pada sensor ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Diagram blok perancangan FTC

3.6 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 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:

$$-F_x = m\dot{V} \quad (3.22a)$$

$$\dot{V} = -F_x/m \quad (3.22b)$$

Model gerak rotasi didefinisikan sebagai berikut:

$$F_x r - T_b = J\dot{\omega} \quad (3.23a)$$

$$\dot{\omega} = (F_x r - T_b)/J \quad (3.23b)$$

Persamaan dinamik torsi hidrolik dituliskan :

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

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

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

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

$$T_b(s) = 100 T_{hf}(s) - 100 T_b(s) \quad (3.24)$$

Dari ketiga persamaan (3.23b), (3.24b) dan (3.25) dengan mendefinisikan state sistem adalah \dot{V} , $\dot{\omega}$, dan T_b diperoleh bentuk *state space* sistem adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{T}_b \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -100 & 0 \\ 0 & -1/j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/m & 0 \\ 0 & 100 \\ r/j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ T_{hf} \end{bmatrix} \quad (3.25a)$$

Atau dituliskan:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.25b)$$

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 :

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T_b \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.26a)$$

Atau bisa ditulis:

$$\dot{y} = Cx(t) + Du(t) \quad (3.26b)$$

Dengan:

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

Efek dari kesalahan sensor 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, K., Sebe, N., Agustinah, T., Jazidie, A, 2015):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (3.27)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (3.28)$$

Observer dibangun berdasarkan model plant. Observer dapat digunakan untuk megestimasi nilai sebenarnya dari state sistem melalui gain. Sehingga model observer untuk gerak rotasi roda didefinisikan sebagai:

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{1}{j} (-\hat{T}_b + P_\omega (\omega_{meas} - \hat{\omega}) + \hat{F}_x \cdot r) \quad (3.29)$$

$$\dot{\hat{F}}_x = K_{i\omega} (\omega_{meas} - \hat{\omega}) \quad (3.30)$$

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:

$$\dot{z} = A_z [V_{meas} - z] \quad (3.31)$$

Kemudian struktur observer dibangun berbasis augmented state space 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 :

$$\dot{\hat{V}} = \frac{1}{m}(-\hat{F}_x + P_v(z - \hat{z})) \quad (3.32)$$

$$\dot{\hat{f}}_{sv} = K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.33)$$

$$\dot{\hat{z}} = A_z(\hat{V} + \hat{f}_{sv} - z) + K_{iv}(z - \hat{z}) \quad (3.34)$$

Sehingga persamaan state space observer dapat ditulis:

$$\dot{\hat{x}} = A_a \hat{X}_a + B_a U + E_a \hat{F}_a + K_P \cdot e \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{V}} \\ \dot{\hat{z}} \\ \dot{\hat{T}}_b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_z & -A_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{V} \\ \hat{z} \\ \hat{T}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \end{bmatrix} T_{hf} \\ &+ \begin{bmatrix} r/j & 0 \\ -1/m & 0 \\ 0 & A_z \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{F}_x \\ \hat{f}_{sv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_\omega/j & 0 \\ 0 & P_v/m \\ 0 & K_{iz} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\omega \\ e_z \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Dengan:

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

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

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

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

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

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

$$\dot{\hat{y}} = C_a \hat{X}_a \quad (3.36)$$

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

Dengan :

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

Dan persamaan gain dapat dituliskan kembali :

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

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

Sehingga ditulis dalam bentuk state space menjadi

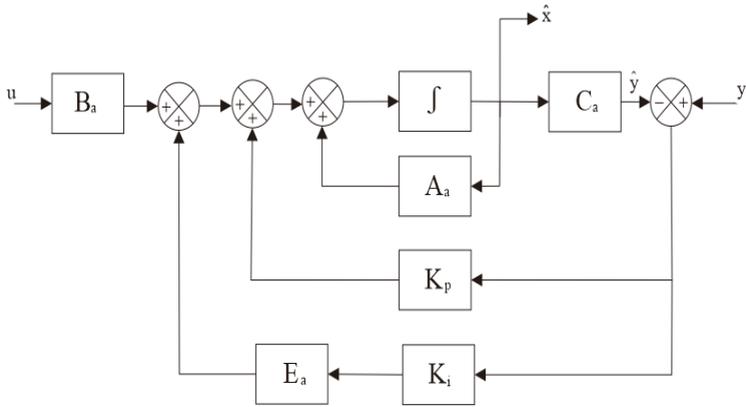
$$\dot{\hat{F}}_a = K_i \cdot e \quad (3.37)$$

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

Dengan :

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

Sehingga berdasarkan persamaan matriks didapatkan struktur observer sebagai berikut:



Gambar 3.6 Struktur observer

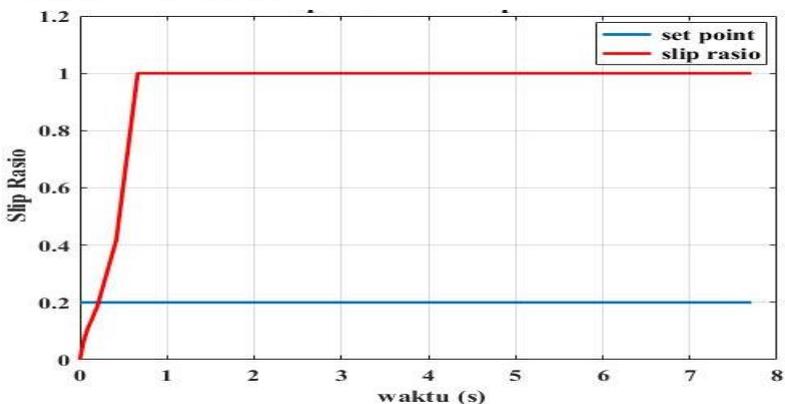
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA

Pada bab ini akan menjelaskan hasil dan analisa data dari perancangan *Fault Tolerant Sliding Mode Control* (FTSMC) pada sistem *Anti-Lock Braking System* (ABS) yang telah dilakukan dengan menggunakan simulasi pada perangkat lunak *Matlab R2016a* yang kemudian akan dilakukan uji performansi dari system *Anti-Lock Braking System*. Uji performansi dilakukan untuk mengetahui FTSMC yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik atau tidak dalam mengestimasi dan mengakomodasi kesalahan pada sensor. Kemudian aplikasi pada simulator QCM.

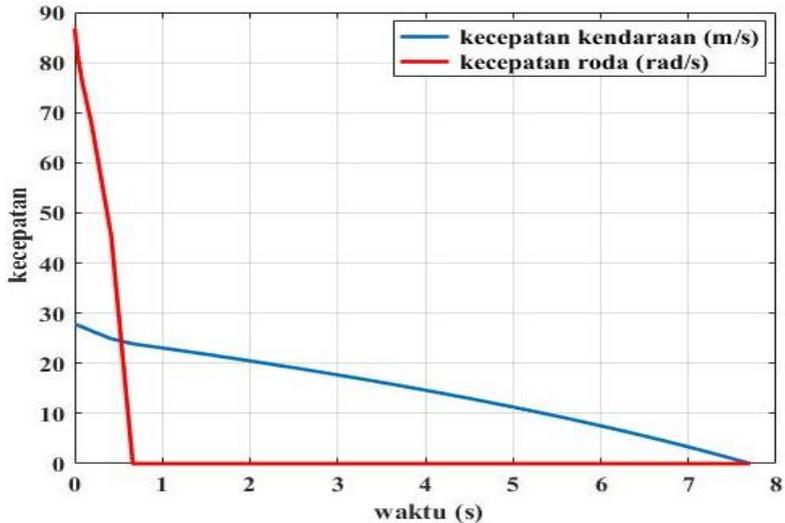
4.1 Pengujian Simulasi Pengereman Tanpa ABS

Pada pengujian pemodelan *Anti-Lock Braking System* dilakukan uji *openloop*. Nilai dari slip rasio akan terus meningkat hingga nilai maksimal pada nilai 1 yang menunjukkan bahwa kendaraan kehilangan *steerability*-nya karena roda telah terkunci. Hal ini dapat terjadi karena ketika kendaraan masih dalam kecepatan yang tinggi sedangkan roda secara mendadak sudah dalam keadaan berhenti.



Gambar 4.1 Grafik respon slip rasio tanpa ABS

Respon uji *openloop* pemodelan *Anti-Lock Braking System* pada gambar 4.1 telah sesuai karena nilai slip rasio naik sebesar 1 saat detik ke 0,66 yang menunjukkan bahwa roda telah terkunci.

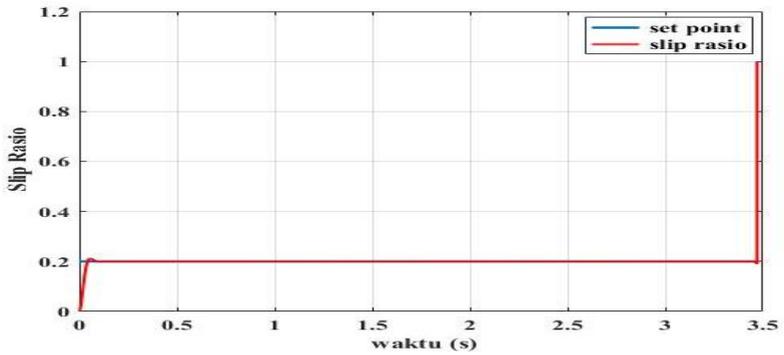


Gambar 4.2 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda tanpa ABS

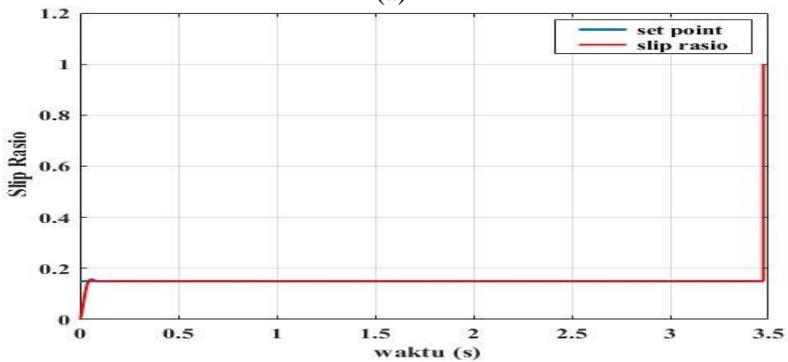
Grafik respon kecepatan tanpa dilengkapi *Anti-Lock Braking System* dapat dilihat pada Gambar 4.2. Pada uji kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda tanpa *Anti-Lock Braking System* menunjukkan hasil pengereman yang kurang baik karena ketika kecepatan kendaraan masih berada pada kecepatan 23,89 m/s (86 km/jam) roda sudah berhenti atau terkunci. Pada detik ke 0,66 roda sudah berhenti sedangkan kecepatan kendaraan berhenti pada detik ke 7,7 dengan jarak henti kendaraan sejauh 106,9 m.

4.2 Pengujian Simulasi Pengereman ABS

Pada pengujian *Anti-Lock Braking System* dilakukan uji *closed loop* untuk mengetahui pengendalian slip rasio sudah stabil sesuai dengan *setpoint*.



(a)



(b)

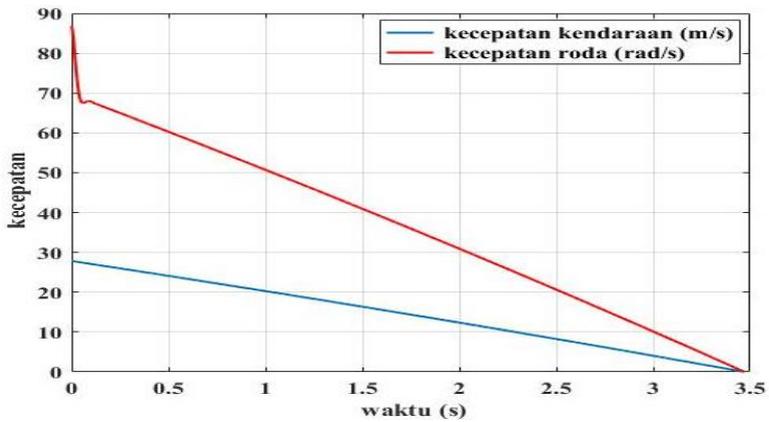
Gambar 4.3 Grafik respon slip rasio ABS dengan SMC

Tabel 4.1 Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji *closed loop SMC*

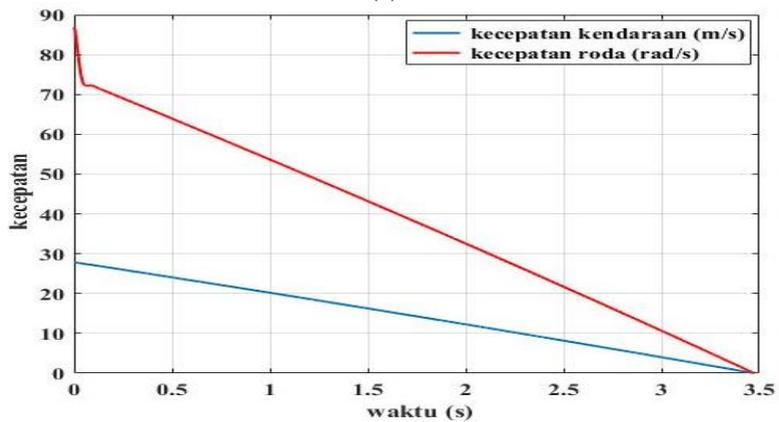
<i>Setpoint</i>	Parameter Performansi	Nilai
0,2	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	<i>Settling Time</i>	0,15s
	<i>Error Steady State</i>	0%
	Jarak Henti	48,2 m
0,15	<i>Maximum Overshoot</i>	5,4%
	<i>Settling Time</i>	0,147s
	<i>Error Steady State</i>	0%
	Jarak Henti	48,3 m

Gambar 4.3 menunjukkan hasil uji *closed loop* dengan *Sliding Mode Control*. Pada saat dilakukan pengereman, maka kecepatan angular roda akan menurun dan mengakibatkan nilai slip rasio meningkat hingga mencapai nilai maksimum, kemudian kontroller melakukan pengendalian dengan menjaga nilai slip rasio sesuai dengan *setpoint* yang diberikan. Hasil respon sistem sudah memenuhi kriteria performansi kontrol yaitu *tracking setpoint*. Pada gambar 4.3 (a) menunjukkan respon slip rasio ABS ketika diberikan nilai *setpoint* 0,2 dengan waktu berhenti kendaraan pada 3,47 detik, pada gambar 4.3 (b) menunjukkan respon slip rasio ABS ketika diberikan nilai *setpoint* 0,15 dengan waktu berhenti kendaraan pada 3,476 detik. Nilai optimum dari slip rasio adalah 0,2 dengan waktu henti kendaraan yang lebih singkat yakni selama 3,47 detik. Respon sistem yang dihasilkan memiliki parameter performansi yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik hasil uji *closed loop* kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dilengkapi *Anti-Lock Braking System* dengan kecepatan awal 27,78 m/s (100 km/jam). Dapat diketahui bahwa saat dilengkapi *Anti-Lock Braking System*, roda tidak mengalami *locking* sehingga kecepatan kendaraan maupun kecepatan angular roda memiliki respon yang lebih baik dengan mencapai titik henti secara bersamaan. Pada gambar 4.4 (a) merupakan grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda ketika diberikan nilai *setpoint* slip rasio sebesar 0,2 memiliki waktu henti kendaraan dan roda secara bersamaan pada detik ke-3,47 dengan jarak henti kendaraan 48,2 m. Pada gambar 4.4 (b) merupakan grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda ketika diberikan nilai *setpoint* slip rasio sebesar 0,15 memiliki waktu henti kendaraan dan roda secara bersamaan yang lebih lama yakni pada detik ke-3,476 dengan jarak henti kendaraan yang lebih jauh yakni 48,3 m.



(a)

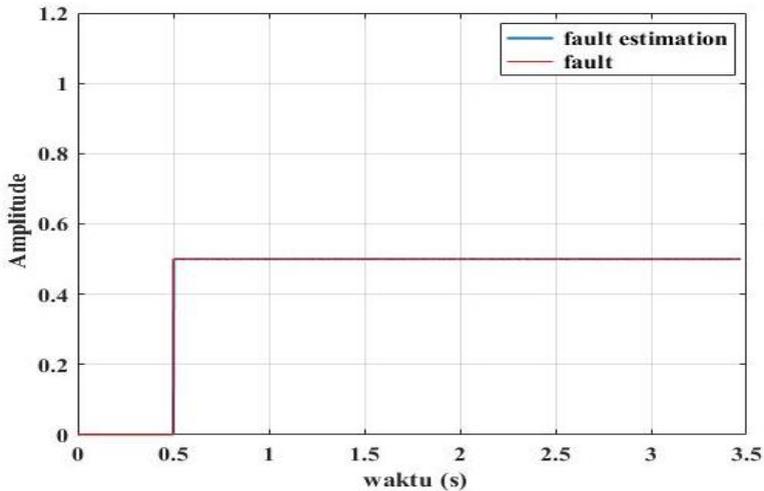


(b)

Gambar 4.4 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda ABS dengan SMC

4.3 Pengujian Estimasi Observer

Pada pengujian estimasi observer yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui kemampuan observer yang telah dirancang dalam mengestimasi *state* dan kesalahan yang diberikan pada sensor. Simulasi yang dilakukan adalah simulasi pada *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan pada sensor kecepatan.



Gambar 4.5 Estimasi kesalahan bias sensor kecepatan

Tabel 4.2 Parameter performansi Observer

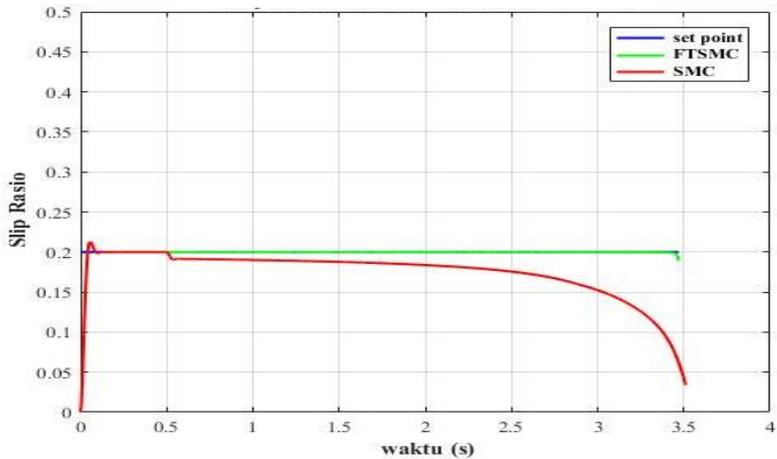
Parameter Performansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	0,49%
<i>Settling Time</i>	0,0003s
<i>Error Steady State</i>	0,0002%

Gambar 4.5 menunjukkan grafik dari hasil estimasi observer yang telah dirancang dengan kesalahan bias sebesar 0,5 pada detik ke-0,5 pada sensor kecepatan. Dapat diketahui bahwa observer yang telah dirancang sudah mampu melakukan estimasi dengan kesalahan bias pada sensor kecepatan yang diberikan yaitu grafik respon observer mengalami kenaikan sebesar 0.5 pada detik ke-0,5. Respon observer yang dihasilkan memiliki parameter performansi yang dapat dilihat pada tabel 4.2.

4.4 Pengujian Kesalahan Bias 25%

Pada tahap ini dilakukan analisa *Anti-Lock Braking System* yang diberikan kesalahan bias pada sensor kecepatan sebesar 25%

di detik ke-0,5. Perbandingan dilakukan antara penggunaan *Sliding Mode Control* dengan *Fault Tolerant Sliding Mode Control*.



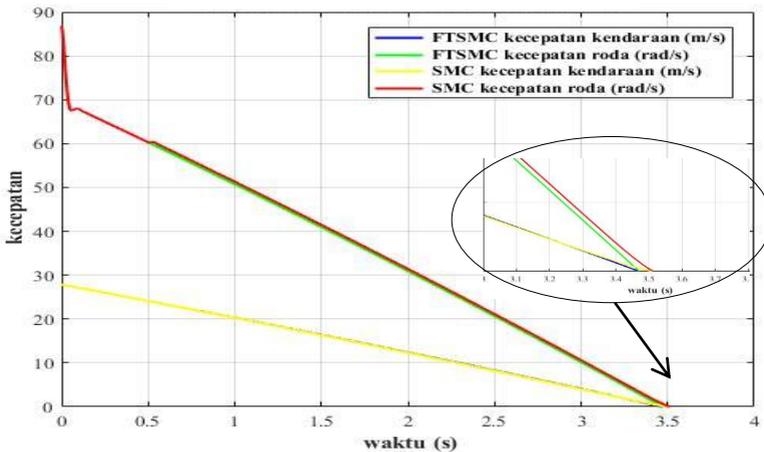
Gambar 4.6 Respon slip rasio dengan kesalahan bias 25%

Tabel 4.3 Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 25%

Sistem Pengendalian	Parameter Performansi	Nilai
<i>Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,51s
	Jarak Henti	48,7 m
<i>Fault Tolerant Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,47s
	Jarak Henti	48,2 m

Pada gambar 4.6 menunjukkan grafik respon slip rasio pada *Anti-Lock Braking System*. Penggunaan algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* menghasilkan respon yang lebih baik jika dibandingkan dengan algoritma *Sliding Mode Control* dengan

parameter performansi yang ditunjukkan pada tabel 4.3. Algoritma *Sliding Mode Control* tidak mampu mengkompensasi kesalahan bias sensor sebesar 25% dengan respon sistem yang tidak mampu *tracking setpoint* pada nilai 0,2 setelah penambahan kesalahan di detik ke-0,5. Penggunaan Algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* mampu mengkompensasi kesalahan bias sebesar 25% pada sensor kecepatan.

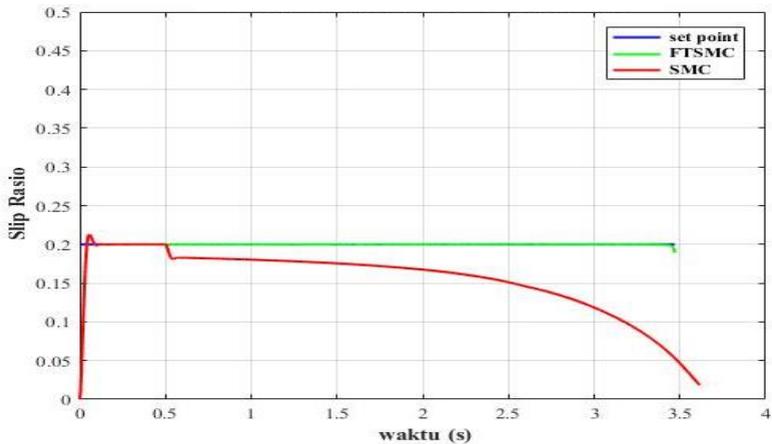


Gambar 4.7 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 25%

Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda pada *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan bias 25% dapat dilihat pada Gambar 4.7. Algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* memiliki respon henti dari kecepatan kendaraan maupun kecepatan angular roda yang sama yaitu pada 3,47 detik dengan jarak henti kendaraan sejauh 48,2 meter, sedangkan penggunaan algoritma *Sliding Mode Control* memiliki respon henti yang lebih lambat yaitu pada 3,51 detik dengan jarak henti kendaraan sejauh 48,7 meter.

4.5 Pengujian Kesalahan Bias 50%

Analisa *Anti-Lock Braking System* dengan diberikan kesalahan bias pada sensor kecepatan sebesar 50% di detik ke-0,5. Perbandingan dilakukan antara penggunaan *Sliding Mode Control* dengan *Fault Tolerant Sliding Mode Control*.



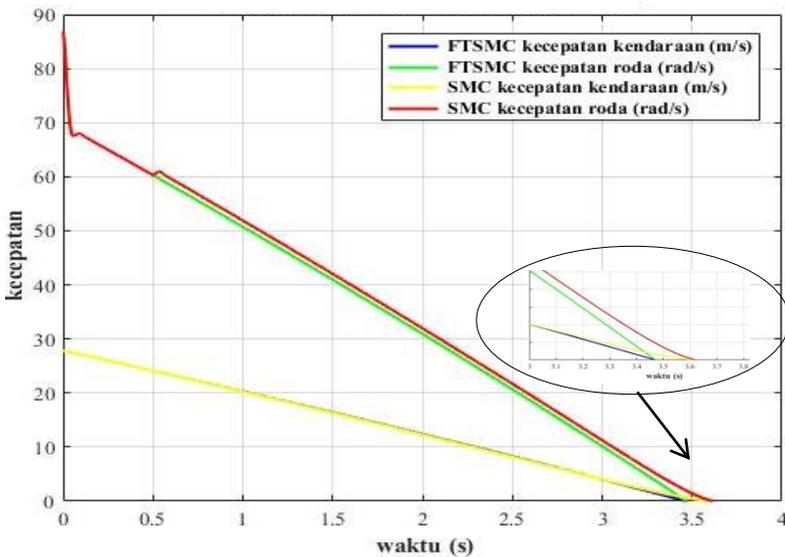
Gambar 4.8 Respon slip rasio dengan kesalahan bias 50%

Tabel 4.4 Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 50%

Sistem Pengendalian	Parameter Performansi	Nilai
<i>Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,62s
	Jarak Henti	50,3 m
<i>Fault Tolerant Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,47s
	Jarak Henti	48,2 m

Algoritma *Sliding Mode Control* tidak mampu mengkompensasi penambahan kesalahan bias sensor sebesar 50% berakibat pada perubahan respon slip rasio mulai detik ke-0,5

dikarenakan sensor mengalami kesalahan pembacaan sehingga nilai slip rasio dari sistem juga mengalami perubahan dan tidak mampu *tracking setpoint* pada nilai 0,2. Penggunaan algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* menghasilkan respon yang lebih baik jika dibandingkan dengan algoritma *Sliding Mode Control* dengan parameter performansi yang ditunjukkan pada tabel 4.4.

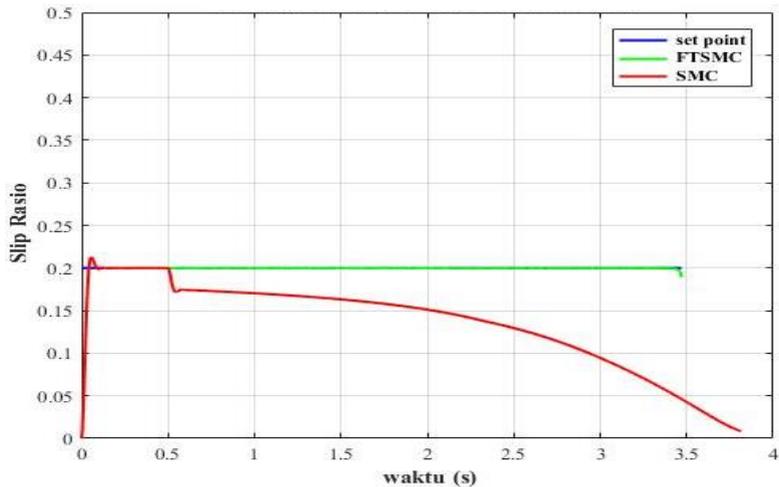


Gambar 4.9 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 50%

Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda pada *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan bias 50% dapat dilihat pada Gambar 4.2. Algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* memiliki respon henti yang lebih cepat dibandingkan dengan algoritma *Sliding Mode Control* yaitu 3,47 detik.

4.6 Pengujian Kesalahan Bias 75%

Perbandingan respon *Anti-Lock Braking System* dilakukan antara penggunaan *Sliding Mode Control* dengan *Fault Tolerant Sliding Mode Control* yang diberikan kesalahan bias pada sensor kecepatan sebesar 75% di detik ke-0,5.



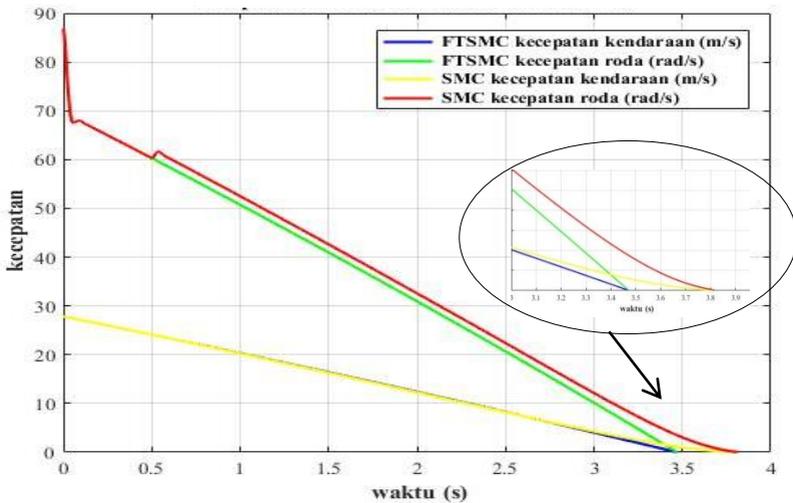
Gambar 4.10 Respon slip rasio dengan kesalahan bias 75%

Tabel 4.5 Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 75%

Sistem Pengendalian	Parameter Performansi	Nilai
<i>Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,81s
	Jarak Henti	52,9 m
<i>Fault Tolerant Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,47s
	Jarak Henti	48,2 m

Pada pemberian kesalahan bias sensor sebesar 75%, respon slip rasio dari sistem ditunjukkan pada gambar 4.10. Sistem

dengan algoritma *Sliding Mode Control* terjadi perubahan respon slip rasio mulai detik ke-0,5 dikarenakan sensor mengalami kesalahan pembacaan sehingga nilai slip rasio dari sistem juga mengalami perubahan dan tidak mampu *tracking setpoint* pada nilai 0,2. Penggunaan algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* menghasilkan respon yang lebih baik karena mampu *tracking setpoint* pada nilai 0,2 dengan parameter performansi yang ditunjukkan pada tabel 4.5.

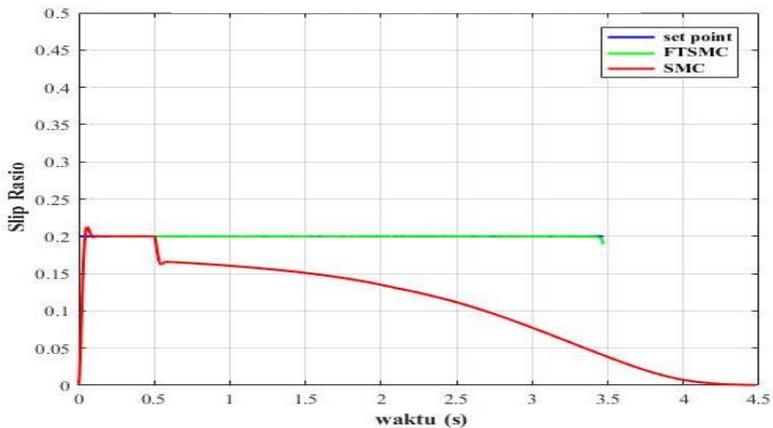


Gambar 4.11 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 75%

Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda pada *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan bias 75% dapat dilihat pada Gambar 4.11. Algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* memiliki respon henti yang lebih cepat yaitu 3,47 detik dengan jarak henti 48,2 meter dibandingkan dengan algoritma *Sliding Mode Control* yang memiliki respon henti 3,81 detik dengan jarak henti 52,9 meter.

4.7 Pengujian Kesalahan Bias 100%

Pada tahap ini dilakukan perbandingan respon *Anti-Lock Braking System* antara penggunaan *Sliding Mode Control* dengan *Fault Tolerant Sliding Mode Control* dengan diberikan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 100% pada detik ke-0,5.



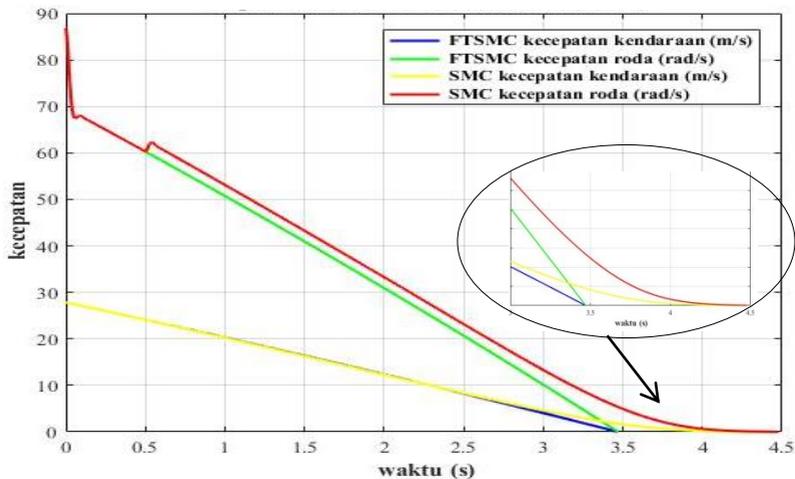
Gambar 4.12 Respon slip rasio dengan kesalahan bias 100%

Tabel 4.6 Parameter performansi sistem dengan kesalahan bias 100%

Sistem Pengendalian	Parameter Performansi	Nilai
<i>Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	4,48s
	Jarak Henti	62,2 m
<i>Fault Tolerant Sliding Mode Control</i>	<i>Maximum Overshoot</i>	6,45%
	Waktu Henti	3,47s
	Jarak Henti	48,2 m

Pada pemberian kesalahan bias sensor sebesar 100%, respon slip rasio dari sistem ditunjukkan pada gambar 4.12. Sistem

dengan algoritma *Sliding Mode Control* terjadi perubahan respon slip rasio mulai detik ke-0,5 dikarenakan sensor mengalami kesalahan pembacaan sehingga nilai slip rasio dari sistem juga mengalami perubahan dan tidak mampu *tracking setpoint* pada nilai 0,2. Penggunaan algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* menghasilkan respon yang lebih baik karena mampu *tracking setpoint* pada nilai 0,2 dengan parameter performansi yang ditunjukkan pada tabel 4.6.

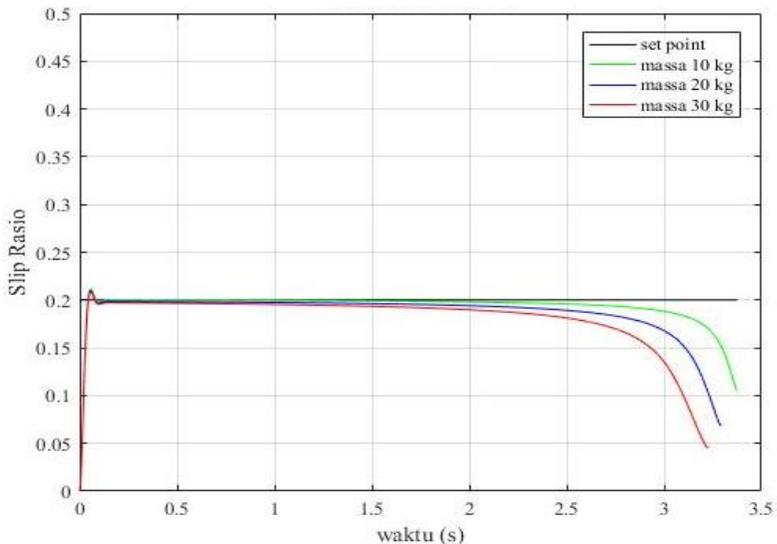


Gambar 4.13 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan kesalahan bias 100%

Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda pada *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan bias 100% dapat dilihat pada Gambar 4.13. Algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* memiliki respon henti yang lebih cepat yaitu 3,47 detik dengan jarak henti kendaraan sejauh 48,2 meter dibandingkan dengan algoritma *Sliding Mode Control* yang memiliki respon henti 4,48 detik dengan jarak henti kendaraan sejauh 62,2 meter.

4.8 Pengujian Ketidakpastian

Pada pengujian ketidakpastian *Fault Tolerant Sliding Mode Control* yang digunakan pada *Anti-Lock Braking System* untuk mengetahui kemampuan *robust control* yang dirancang. Uji dilakukan dengan melakukan penambahan jumlah massa yang hanya dilakukan pada pemodelan kendaraan, sedangkan pemodelan pada *controller* tetap menggunakan massa awal.



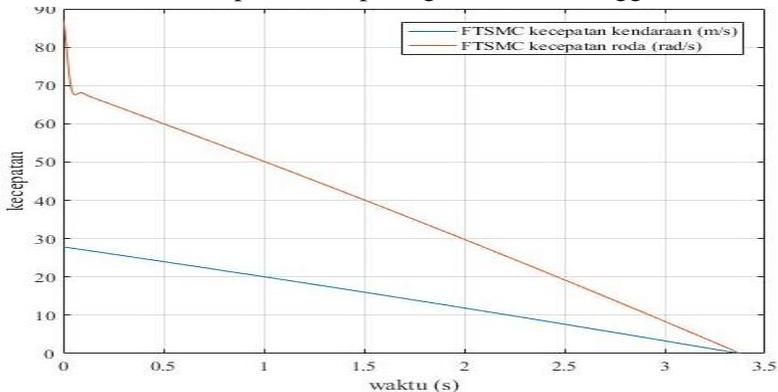
Gambar 4.14 Respon slip rasio dengan ketidakpastian massa kendaraan

Gambar 4.14 menunjukkan hasil simulasi uji ketidakpastian massa kendaraan. Dapat diketahui bahwa ketika sistem diberi massa berlebih penggunaan *Fault Tolerant Sliding Mode Control* masih dapat mengkompensasi perubahan massa kendaraan sehingga *Anti-Lock Braking System* masih dapat menjaga agar nilai slip rasio tetap dibawah 1. Dengan parameter performansi dari sistem ditunjukkan pada tabel 4.7.

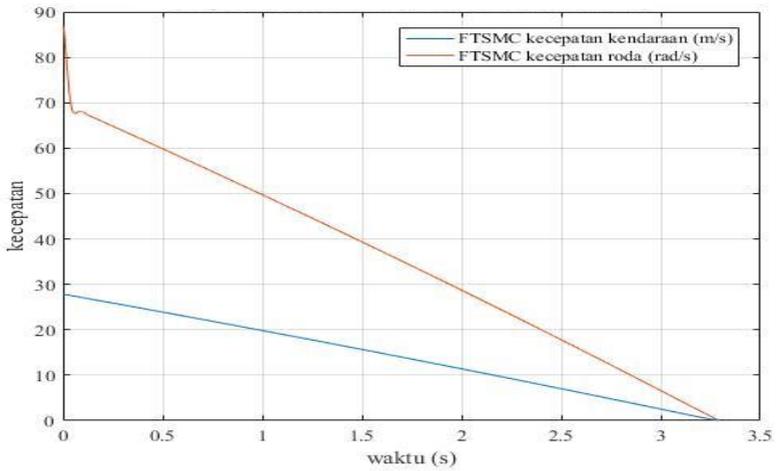
Tabel 4.7 Parameter performansi sistem dengan ketidakpastian massa kendaraan

Sistem Pengendalian	Ketidakpastian massa	Parameter Performansi	Nilai
<i>Fault Tolerant Sliding Mode Control</i>	10 kg	<i>Maximum Overshoot</i>	5,7%
		Waktu Henti	3,38s
		Jarak Henti	46,9 m
	20 kg	<i>Maximum Overshoot</i>	4,95%
		Waktu Henti	3,29s
		Jarak Henti	45,7 m
	30 kg	<i>Maximum Overshoot</i>	4,2%
		Waktu Henti	3,23s
		Jarak Henti	44,8 m

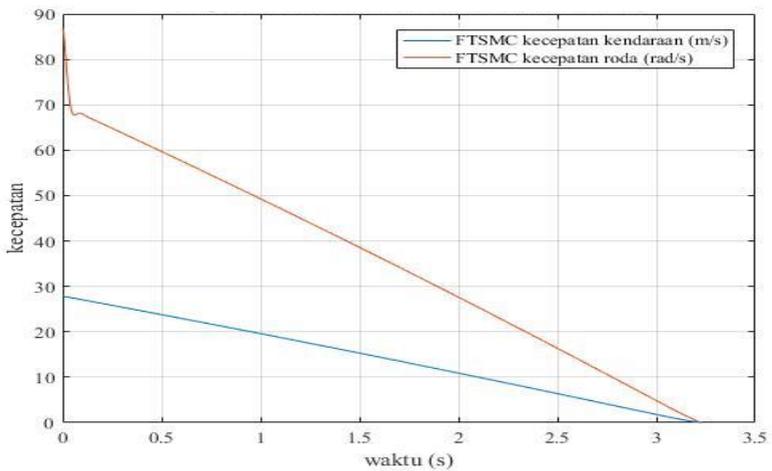
Pada tabel 4.7 dapat diketahui bahwa penambahan massa mempengaruhi performansi dari sistem *Fault Tolerant Sliding Mode Control*. Penambahan jumlah massa mempengaruhi waktu henti dari kendaraan, dengan semakin banyak penambahan massa mengakibatkan waktu henti yang semakin cepat. Grafik kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda untuk ketidakpastian massa kendaraan dapat dilihat pada gambar 4.15 hingga 4.17.



Gambar 4.15 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan penambahan massa 10 kg



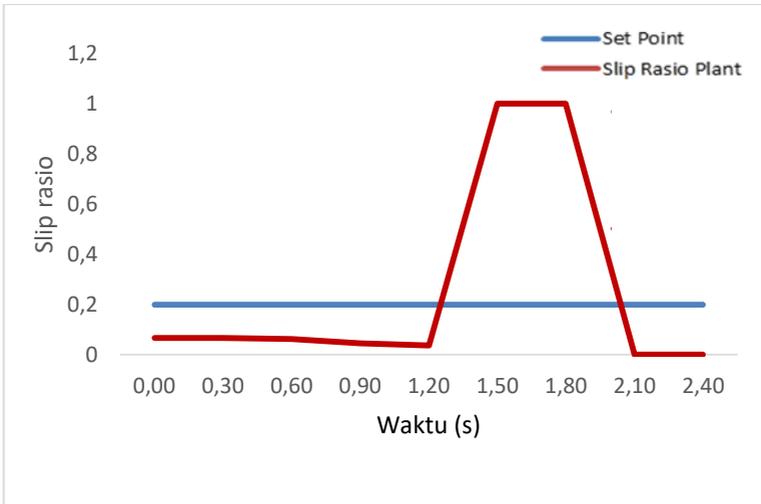
Gambar 4.16 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan penambahan massa 20 kg



Gambar 4.17 Grafik respon kecepatan kendaraan dan kecepatan angular roda dengan penambahan massa 30 kg

4.9 Pengujian Pengereman Simulator Tanpa ABS

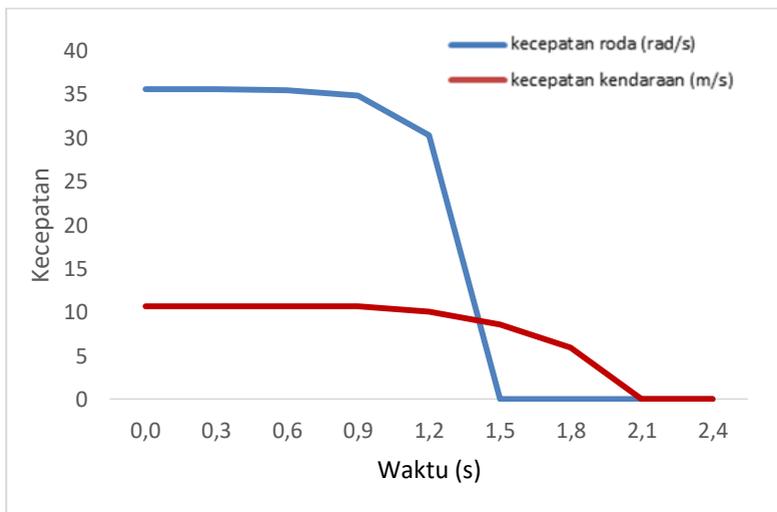
Pada pengujian Simulator *Quarter Car Model* (QCM) tanpa *anti-lock braking system* (ABS) dilakukan uji loop terbuka yang digunakan dengan Labview. Data yang diperoleh diplot menggunakan ms.excel. Rasio slip akan terus naik hingga nilai maksimal yaitu pada nilai 1 yang menunjukkan kendaraan kehilangan 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 4.18 Grafik respon slip rasio simulator *Non- ABS*

Pada percobaan *open loop* menggunakan T_s (*Time sampling*) sebesar 0,3 detik. Pada Gambar 4.18 dapat dilihat grafik nilai slip rasio Simulator *Quarter Car Model* (QCM) *Non-anti-lock braking system* (ABS) telah sesuai karena nilai *slip ratio* naik sebesar 1 saat detik ke 1,5 yang menunjukkan bahwa kendaraan mengalami *lock*.

Pada uji kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan tanpa dilengkapi *Anti-Lock Braking System* (ABS) menunjukkan hasil pengereman yang kurang baik karena pada saat kecepatan kendaraan masih berada pada kecepatan 8,5 m/s roda sudah mengalami *locking*. Pada detik ke 1,5 kecepatan roda sudah berhenti sedangkan kecepatan kendaraan berhenti pada detik ke 2,1. Grafik respon kecepatan tanpa dilengkapi ABS dapat dilihat pada Gambar 4.19.

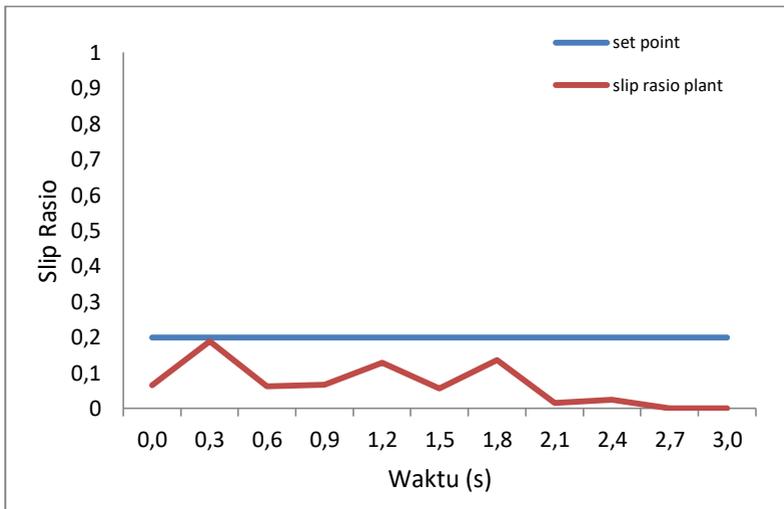


Gambar 4.19 Grafik respon kecepatan simulator *Non- ABS*

4.10 Pengujian Pengereman Simulator ABS SMC

Pengujian untuk mengetahui pengendalian slip rasio sudah bekerja untuk menjaga nilai slip rasio dibawah 1, dilakukan uji *closed loop*. Gambar 4.20 merupakan grafik hasil uji *closed loop* simulator menggunakan *anti-lock braking system* (ABS) algoritma SMC dengan diberikan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 50%.

Pada saat dilakukan pengereman nilai slip rasio naik sehingga harus dilakukan aksi yang dapat menghindari menuju *lock*. Seiring aksi yang diberikan untuk menjaga slip dengan nilai 0,2. Hasil grafik menunjukkan bahwa respon tidak berada pada area set point dikarenakan terdapat kesalahan pembacaan dari sensor kecepatan yang diberikan dan menyebabkan kesalahan juga pada control yang diberikan sehingga jarak waktu berhenti kendaraan berada pada detik ke-2,7.

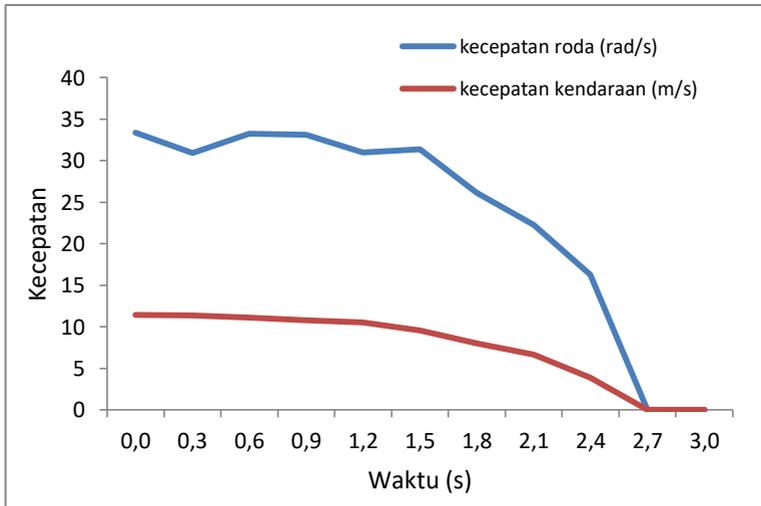


Gambar 4.20 Grafik respon slip rasio simulator ABS dengan SMC

Parameter performansi sistem dengan menggunakan algoritma *Sliding Mode Control* (SMC) dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Parameter performansi simulator ABS dengan SMC

Parameter Perfomansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	0%
Waktu Henti	2,7 detik



Gambar 4.21 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan simulator ABS dengan SMC

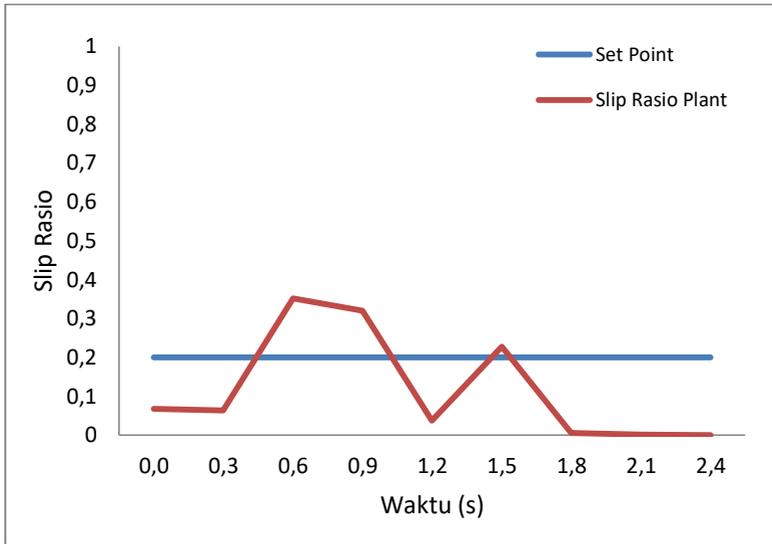
Pada grafik respon kecepatan sistem dilengkapi ABS SMC dapat dilihat pada gambar 4.21. Dapat diketahui bahwa saat dilengkapi ABS dengan algoritma SMC, kecepatan kendaraan maupun kecepatan angular roda mendapatkan respon dengan mencapai titik henti secara bersamaan pada detik ke-2,7 sehingga roda tidak mengalami *locking* walaupun diberikan kesalahan sensor sebesar 50%.

4.11 Pengujian Pengereman Simulator ABS FTSMC

Pengujian untuk mengetahui pengendalian slip rasio sudah bekerja untuk menjaga nilai slip rasio dibawah 1, dilakukan uji *closed loop*. Gambar 4.22 merupakan grafik hasil uji *simulator* ABS dengan pengendalian FTSMC diberikan kesalahan bias sensor kecepatan sebesar 50%.

Gambar 4.22 menunjukkan grafik hasil uji *close loop* dengan FTSMC. Pada saat dilakukan pengereman, sehingga slip ratio

naik hingga mencapai 0,35 hal ini menunjukkan bahwa sistem dalam keadaan akan mencapai slip, sehingga harus dilakukan aksi yang dapat menghindari menuju *lock*.

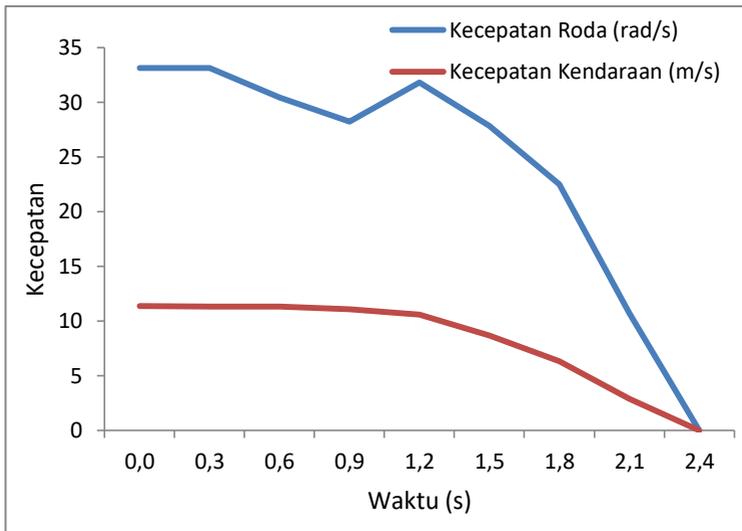


Gambar 4.22 Grafik respon slip rasio simulator ABS dengan FTSMC

Seiring aksi yang diberikan untuk menjaga slip diangka 0,2. Hasil grafik menunjukkan bahwa respon berada pada area set point dan jarak waktu berhenti kendaraan berada pada 2,1 detik. Parameter performansi sistem dengan menggunakan algoritma *Fault Tolerant Sliding Mode Control* (FTSMC) dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Parameter performansi simulator ABS dengan FTSMC

Parameter Perfomansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	65%
Waktu Henti	2,1 detik



Gambar 4.23 Grafik kecepatan angular roda dan kecepatan kendaraan setelah dilengkapi ABS dengan FTSMC

Grafik hasil uji kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dilengkapi ABS dengan algoritma FTSMC dapat dilihat pada Gambar 4.23. Dapat diketahui bahwa saat dilengkapi ABS kecepatan kendaraan maupun kecepatan angular roda mendapatkan respon yang lebih baik dengan mencapai titik henti secara bersamaan pada 2,1 detik sehingga roda tidak mengalami *locking*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data yang telah dilakukan, didapat kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai rancang bangun *Fault Tolerant Sliding Mode Control* pada *Anti-Lock Braking System* dengan kesalahan pada sensor kecepatan sebagai berikut:

- Perancangan *Anti-lock Braking System* dengan *Sliding Mode Control* mampu mencegah terjadinya slip pada roda dengan parameter performansi *maximum overshoot* 6,45%, *settling time* 0,15s, dan *error steady state* 0% dengan waktu henti 3,47s dan jarak henti 48,2 meter.
- Pada perancangan observer dengan memberikan kesalahan sensor kecepatan pada sistem *Anti-lock Braking System* secara simulasi. Observer dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada *system* dengan parameter performansi *maximum overshoot* 0,49%, *settling time* 0,0003s, dan *error steady state* 0,0002%.
- Algoritma FTSMC yang dirancang mampu mengkompensasi kesalahan yang diberikan yang ditunjukkan dengan hasil uji sistem saat diberi kesalahan bias pada sensor kecepatan sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100% dengan waktu henti 3,47s. Performansi sistem dengan FTSMC lebih baik dengan waktu henti dan jarak henti yang lebih singkat dibandingkan dengan sistem SMC.
- Penggunaan ABS pada simulator *Quarter Car* mampu mencegah terjadinya slip atau *locking* pada roda. Performansi sistem dengan algoritma FTSMC lebih baik dengan waktu henti yang lebih singkat sebesar 2,1s dibandingkan sistem dengan menggunakan algoritma SMC dengan waktu henti 2,7s.

5.2 Saran

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

- Menggunakan sensor kecepatan dengan lebih banyak titik deteksi sehingga dapat meningkatkan akurasi pengukuran kecepatan dengan *time sampling* yang lebih baik agar didapatkan respon pengeraman yang lebih baik.
- Digunakan pemodelan *Full Car Model* untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Antic, D. (2010). Sliding Mode Control of Anti-Lock Braking System : An Overview. *Automatic Control and Robotics*, 9, 41-58.
- Automotive, C. (2014). *Patent No. J5352620*. USA.
- CNN, I. (2018). *CNN*. Retrieved August 28, 2019, from <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20190122095805-384-362703/penjualan-lcgc-2018-datsun-dan-suzuki-suram>
- Denton, T. (1995). *Automobile Electrical & Electronics System*. Colchester: Arnold.
- Eka Putri, N. I. (2019). *Perancangan Fault Tolerant Control (FTC) Berdasarkan Estimasi Kesalahan Sensor dan Aktuator pada Anti-lock Braking System (ABS) Mobil Konvensional*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Frank, D. P. (1996). *Activities manual for industrial electronics*. McGraw Hill.
- Guo, J., Jian, X., & Lin, G. (2014). Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicle with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*, 6459-6476.
- Harifi, A., Aghagolzadeh, A., Alizadeh, G., & Sadeghi, M. (2005). Designing a sliding mode controller for Anti-lock Braking System. *The International Conference* (pp. 258-261). EUROCON.
- Holkar, K. S., Waghmare, L. M. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Applications*, 78.
- 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*, 375-385.

- Instrument, N. (2014). *Patent No. 374369A-01*. USA.
- KOMINFO, K. K. (2017, Augst). *Kementrian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia*. Retrieved Augst 28, 2019, from https://kominfo.go.id/content/detail/10368/rata-rata-tiga-orang-meninggal-setiap-jam-akibat-kecelakaan-jalan/0/artikel_gpr
- Liu, J., & Wang, X. (2012). *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Lubbers, K. H. (2014). Design and Analysis of a Model Based Low Level Slip Controller Based on a Hybrid Braking System. *Delft University of Technology*.
- Mirzaeinejad, H. &. (2010). A Novel Nethod for non-linear control of wheel slip in Anti-lock Braking System. *Control Engineering Practice*, 918-926.
- 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*, 400-405.
- Ogata, K. (2009). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River.
- 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*, 164-176.
- Ribowo, A. (2012, June 4). Retrieved December 26, 2019, from ribowoagung.blogspot.com:
www.ribowoagung.blogspot.com
- Slotine, J.-J. E. & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Solyon, S. (2002). Synthesis of a Model Based Tire Slip Controller. *Departement of Automotive Control*.
- Statistik, B. P. (n.d.). *Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor*. (Badan Pusat Statistik) Retrieved August 28, 2019, from <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/1133>
- 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, IEEE*, 944–948.
- Wabco, M. (1999). *Anti-Lock Braking System Training Program*. USA: Student Manual.
- Wicaksono, H. A. (2019). *Rancang bangun kontrol proporsional integral (PI) dan sliding mode control (SMC) pada anti-lock braking system (ABS)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran A

SCRIPT mfile MATLAB R2016a ABS

```
% Definisi parameter ABS
m = 342.5;
m1 = 352.5;
ma = 362.5;
mb = 372.5;
r = 0.32;
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;
Az = 100;
tau = 0.01;

figure(1);
y=ScopeData1(:,2);
x=ScopeData1(:,1);
plot(x,y,'LineWidth',1.5);
hold on;
y1=ScopeData1(:,3);
x=ScopeData1(:,1);
plot(x,y1,'LineWidth',1.5,'color','red');
ylabel('\bf kecepatan');
xlabel('\bf waktu (s)');
title('Respon Sistem SMC ABS');
legend('\bf kecepatan kendaraan (m/s)', '\bf
kecepatan roda (rad/s)');
```

```

set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;
hold off;
figure(2);
y=f1f1smc(:,2);
x=f1f1smc(:,1);
plot(x,y,'LineWidth',2);
hold on;
y1=f1f1smc(:,3);
x=f1f1smc(:,1);
plot(x,y1,'LineWidth',1.5,'color','red');
ylim([0 1.2]);
ylabel('\bf Slip Rasio')
xlabel('\bf waktu (s)')
title('Respon Sistem SMC ABS')
legend('\bf set point','\bf slip rasio');
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;
hold off;

figure(1);
y=ftsmc1(:,2);
x=ftsmc1(:,1);
plot(x,y,'linewidth',1.5,'color','blue');
hold on;
y1=ftsmc1(:,3);
x=ftsmc1(:,1);
plot(x,y1,'linewidth',1.5,'color','green');
hold on;
y2=smc1(:,2);
x1=smc1(:,1);
plot(x1,y2,'linewidth',1.5,'color','yellow');
hold on;
y3=smc1(:,3);
x1=smc1(:,1);
plot(x1,y3,'linewidth',1.5,'color','red');
xlim([3 4.5]);
ylim([0 20]);

```

```

ylabel('\bf kecepatan')
xlabel('\bf waktu (s)')
title('Respon Sistem ABS Kesalahan Bias
100%')
legend('\bf FTSMC kecepatan kendaraan
(m/s)', '\bf FTSMC kecepatan roda
(rad/s)', '\bf SMC kecepatan kendaraan
(m/s)', '\bf SMC kecepatan roda (rad/s)');
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;
hold off;

figure(2);
y=ftsmcslip(:,2);
x=ftsmcslip(:,1);
plot(x,y,'linewidth',1.5,'color','blue');
hold on;
y1=ftsmcslip(:,3);
x=ftsmcslip(:,1);
plot(x,y1,'linewidth',1.5,'color','green');
hold on;
y2=smcslip(:,3);
x1=smcslip(:,1);
plot(x1,y2,'linewidth',1.5,'color','red');
% hold on;
% y3=ftsmcslip(:,3);
% x2=ftsmcslip(:,1);
% plot(x2,y3,'color','red');
ylim([0 0.5]);
ylabel('\bf Slip Rasio')
xlabel('\bf waktu (s)')
title('Respon Sistem ABS Kesalahan Bias
100%')
legend('\bf set point', '\bf FTSMC', '\bf
SMC');
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;

```

```
hold off;
```

```
figure(3);
y=f1f1smc2(:,2);
x=f1f1smc2(:,1);
plot(x,y,'linewidth',1.5);
hold on;
y1=f1f1smc2(:,3);
x=f1f1smc2(:,1);
plot(x,y1,'color','red');
ylim([0 1.2]);
ylabel('\bf Amplitude')
xlabel('\bf waktu (s)')
title('Respon Observer')
legend('\bf fault estimation','\bf fault');
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;
hold off;
```

```
figure(1);
y=ftsmc130(:,2);
x=ftsmc130(:,1);
plot(x,y);
hold on;
y1=ftsmc130(:,3);
x=ftsmc130(:,1);
plot(x,y1);
hold on;
y2=smc1(:,2);
x1=smc1(:,1);
plot(x1,y2);
hold on;
y3=smc1(:,3);
x1=smc1(:,1);
plot(x1,y3);
xlim([3 4]);
ylim([0 20]);
```

```

ylabel('kecepatan')
xlabel('waktu (s)')
title('Respon Sistem ABS Penambahan Massa 30 kg')
legend('FTSMC kecepatan kendaraan (m/s)', 'FTSMC
kecepatan roda (rad/s)')
'SMC kecepatan kendaraan (m/s)', 'SMC kecepatan
roda (rad/s)');
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;
hold off;

```

```

figure(2);
y=ftsmcslip10(:,2);
x=ftsmcslip10(:,1);
plot(x,y,'color','black');
hold on;
y1=ftsmcslip10(:,3);
x=ftsmcslip10(:,1);
plot(x,y1,'color','green');
hold on;
y2=ftsmcslip20(:,3);
x1=ftsmcslip20(:,1);
plot(x1,y2,'color','blue');
hold on;
y3=ftsmcslip30(:,3);
x2=ftsmcslip30(:,1);
plot(x2,y3,'color','red');
ylim([0 0.5]);
ylabel('Slip Rasio')
xlabel('waktu (s)')
title('Robustness FTSMC')
legend('set point', 'massa 10 kg', 'massa 20
kg', 'massa 30 kg');
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
grid on;
hold off;

```

```
%Parameter Observer
```

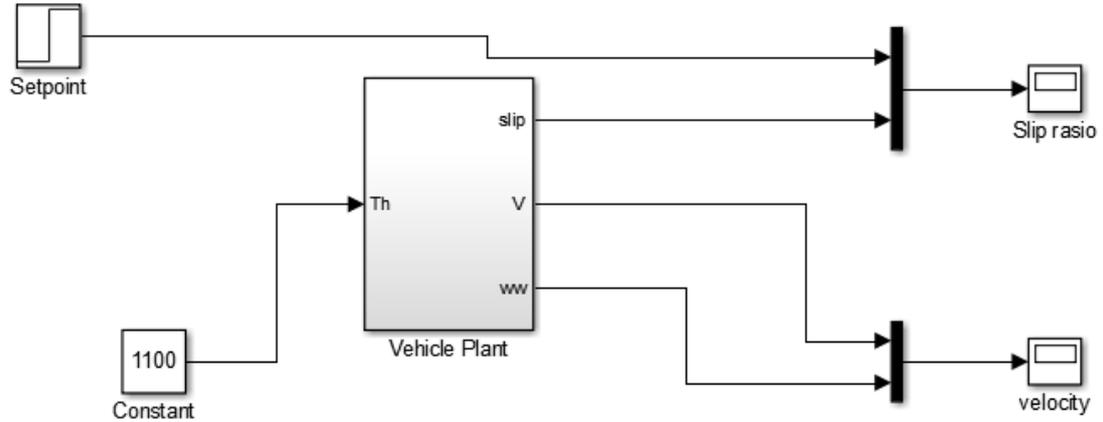
```
A = [0 0 0; 0 -100 0; 0 -1/j 0] ;%Matriks A
```

```
B = [-1/m 0;0 100;r/j 0]; %Matriks B
```

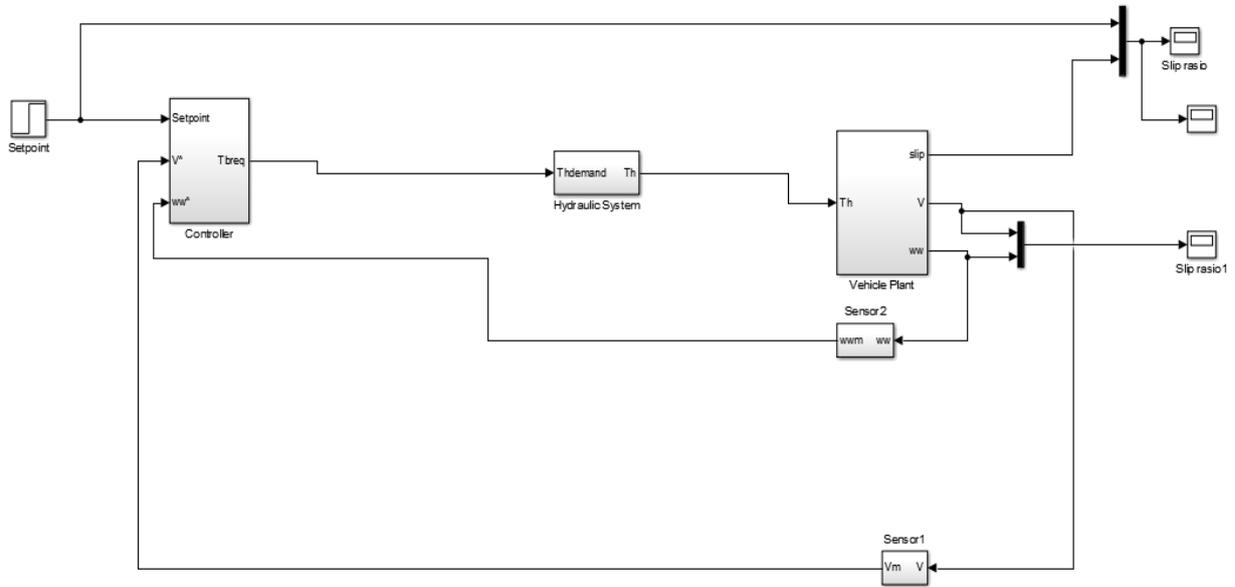
```
C = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1] ;%Matriks C
D= [0 0 ;0 0;0 0];

%% extended
% Abar = 1*eye(p);
Aa = [0 0 0 -1/j; 0 0 0 0;0 Az -Az 0;0 0 0 -
1/tau];
Ba = [0;0;0;1/tau];
Ca = [1 0 0 0; 0 0 1 0];
Ea = [r/j 0;-1/m 0;0 Az;0 0];
%% gain observer
Kp = [1000/j 0;
      0 1e5/m;
      0 1e6;
      0 0];
Ki= [9*1e7 0;0 1*1e8];
```

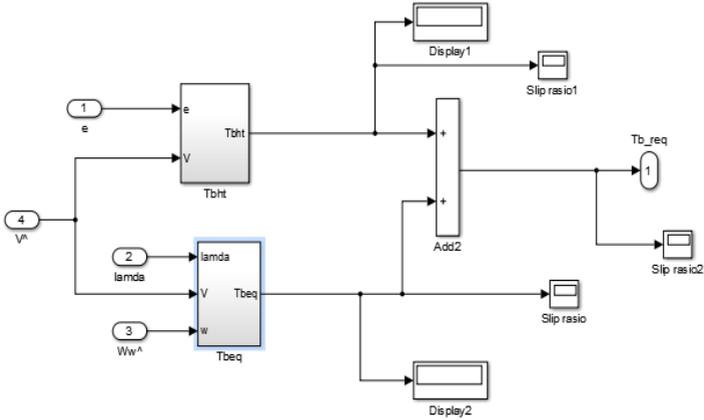
SIMULINK MATLAB R2014b *OPENLOOP VEHICLE PLANT*



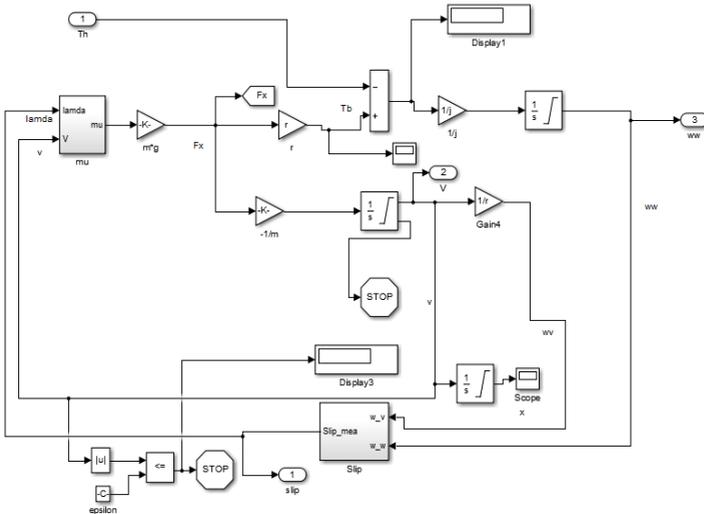
SIMULINK MATLAB R2014b *SLIDING MODE CONTROL IN ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*



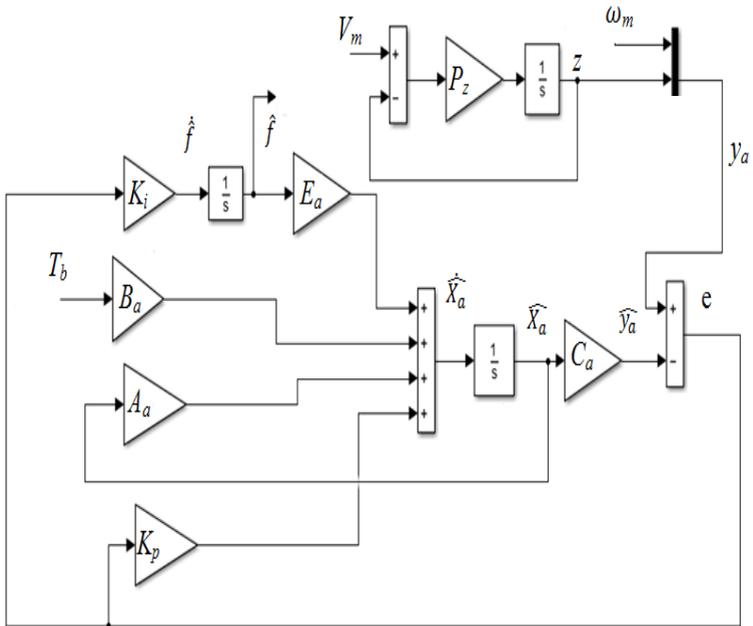
SIMULINK MATLAB R2014a *SLIDING MODE CONTROLLER (SMC)*



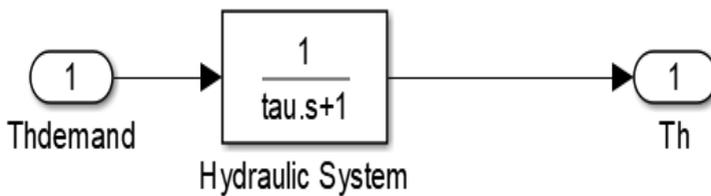
SIMULINK MATLAB R2014a *QUARTER CAR MODEL ELECTRIC VEHICLE*



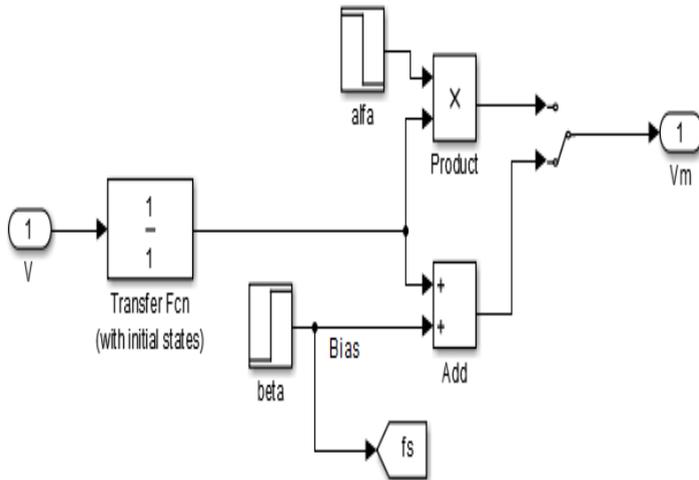
SIMULINK MATLAB R2014a OBSERVER ABS



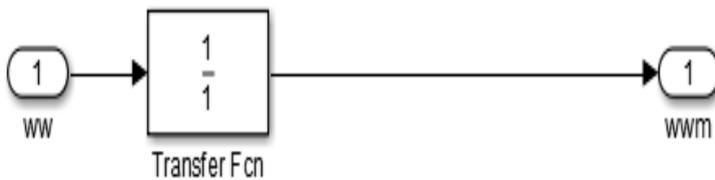
SIMULINK MATLAB R2014a RANGKAIAN AKTUATOR



SIMULINK MATLAB R2014a RANGKAIAN SENSOR KENDARAAN



SIMULINK MATLAB R2014a RANGKAIAN SENSOR RODA

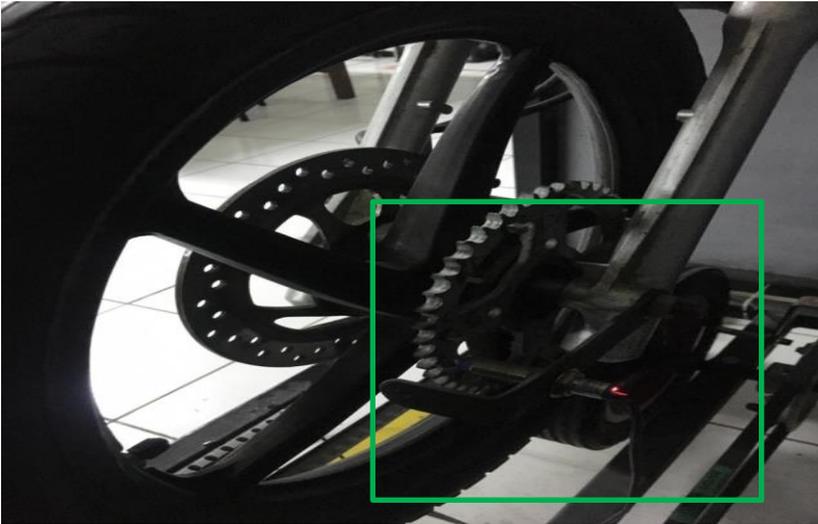


Lampiran B

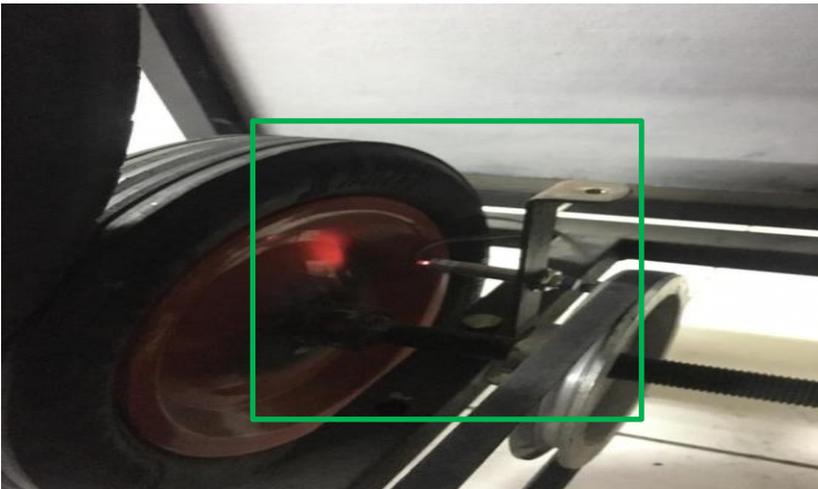
SIMULATOR QUARTER CAR MODEL (QCM) ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM



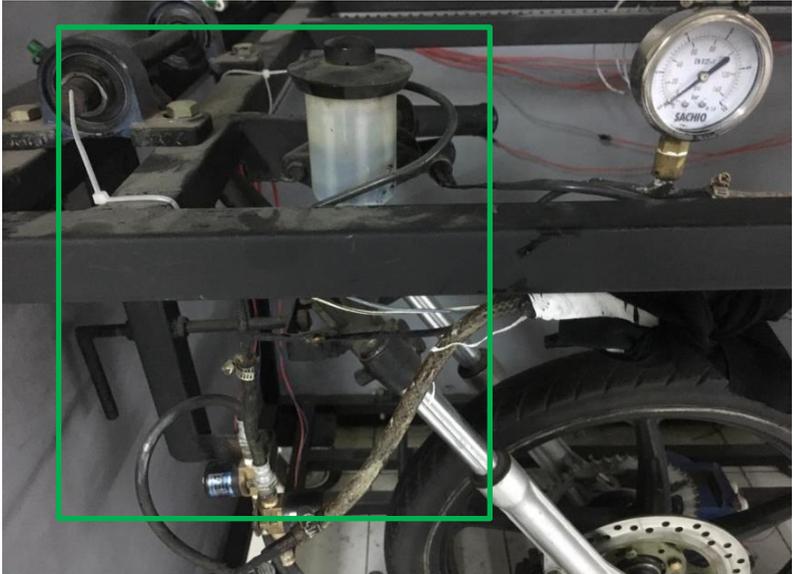
SENSOR KECEPATAN PUTARAN RODA



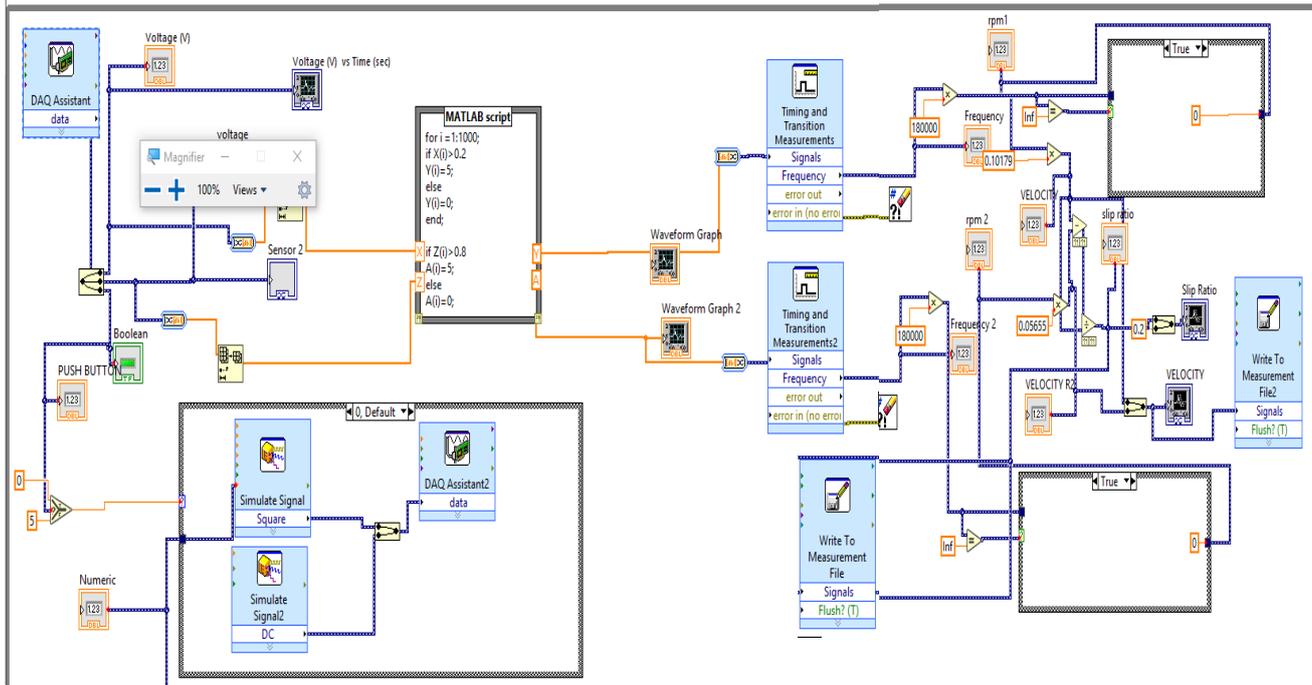
SENSOR KECEPATAN KENDARAAN



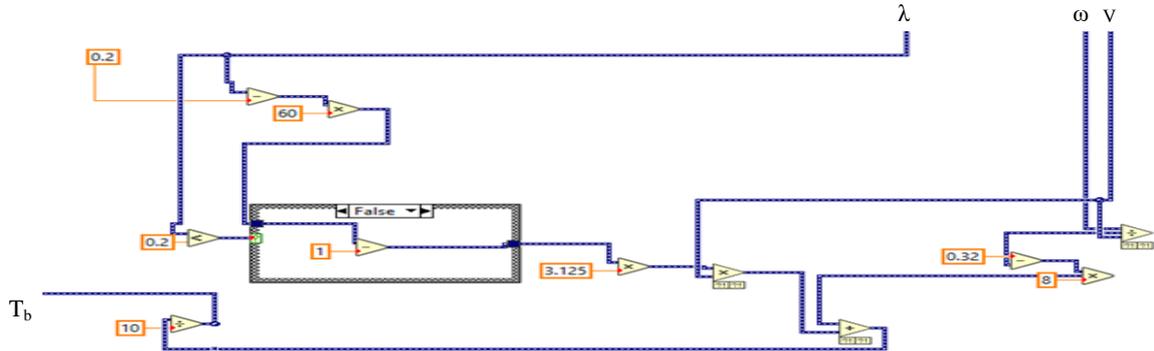
HYDRAULIC MODULATOR



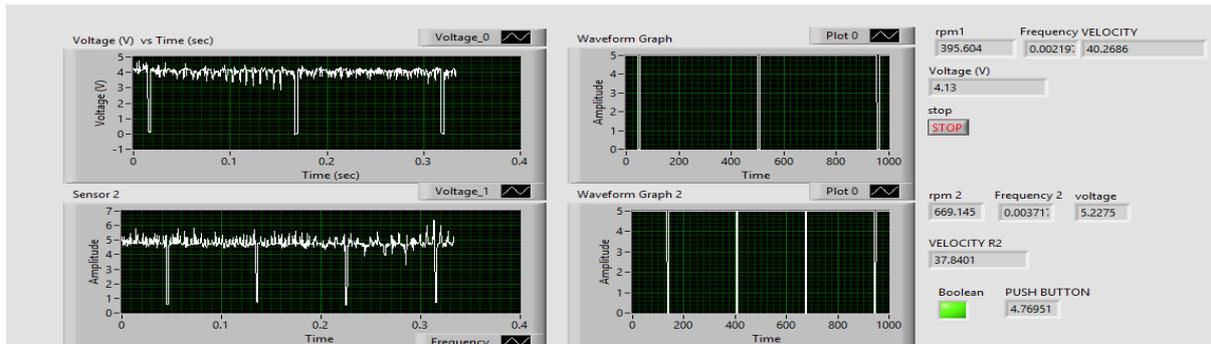
PROGRAMMING TOOLS LABVIEW



SLIDING MODE CONTROL



FRONT PANEL LABVIEW



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Dikko Dwi Marindo yang akrab disapa Dikko. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara, terlahir di kota Purworejo pada tanggal 13 April 1998. Penulis menempuh pendidikan di SDN Geluran III lulus tahun 2010, SMPN 2 Taman lulus tahun 2013, dan SMAN 1 Taman, lulus tahun 2016. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2016. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi dan event Engineering Physics Week dan Integrated Petroleum days. Selain aktif dalam berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Bahan, selama periode 2018-2019 & kepala divisi Lab Development pada periode 2019-2020. Pengalaman *internship program* di PT.POMI, PT UBJ O&M, dan PT PERTAMINA HULU SANGA-SANGA. Bidang minat penulis dalam studi adalah instrumentasi dan kontrol. Penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Rancang Bangun *Fault Tolerant Sliding Mode Control Pada Anti-lock Braking System Dengan Kesalahan Pada Sensor Kecepatan*. Penulis dapat dihubungi di email dikkodwi377@gmail.com.