



**TUGAS AKHIR - TF 1818801**

**PERANCANGAN *FUZZY SLIDING MODE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR**

**KAYI MAHDY YATTAQI**  
NRP. 02311440000102

Dosen Pembimbing:  
Dr. Katherin Indriawati ST., M.T  
NIP. 19760523 200012 2 001

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK FISIKA  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





*FINAL PROJECT - TF 1818801*

***DESIGN FUZZY SLIDING MODE FAULT  
TOLERANT CONTROL SYSTEM FOR  
REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING  
SYSTEM OF ELECTRIC VEHICLE WITH FAULT  
AT SENSOR***

KAYI MAHDY YATTAQI  
NRP. 02311440000102

*Supervisors:*  
Dr. Katherin Indriawati ST., M.T  
NIP. 19760523 200012 2 001

*STUDY PROGRAM S1 ENGINEERING PHYSICS  
ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2019*



## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kayi Mahdy Yattaqi  
NRP : 02311440000102  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“Perancangan *Fuzzy Sliding Mode Fault Tolerant Control* Pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* Mobil Listrik Dengan Kesalahan Pada Sensor ”** adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 25 Januari 2018  
Yang membuat pernyataan,



Kayi Mahdy Yattaqi  
NRP. 02311440000102

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PERANCANGAN FUZZY SLIDING MODE FAULT  
TOLERANT CONTROL PADA REGENERATIVE ANTI-  
LOCK BRAKING SYSTEM MOBIL LISTRIK DENGAN  
KESALAHAN PADA SENSOR**

**TUGAS AKHIR**

Oleh:

**Kavi Mahdy Yattaqi**

**NRP. 02311440000102**

**Surabaya, 25 Januari 2019**

**Menyetujui,  
Dosen Pembimbing**



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

**Mengetahui,  
Ketua Departemen  
Teknik Fisika FTI-ITS**



**Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D**  
**NIPN. 19780902 200312 1 002**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**PERANCANGAN FUZZY SLIDING MODE FAULT  
TOLERANT CONTROL PADA REGENERATIVE ANTI-  
LOCK BRAKING SYSTEM MOBIL LISTRIK DENGAN  
KESALAHAN PADA SENSOR**





**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Kayi Mahdy Yattaqi**  
NRP. 02311440000102

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  (Pembimbing)
2. Ir. Ya'umar, M.T.  (Ketua Penguji)
3. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.  (Penguji I)
4. Lizda Johar Mawarni  (Penguji II)

**SURABAYA**  
**Januari 2019**

**SURABAYA**  
**Januari 2019**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN *FUZZY SLIDING MODE FAULT TOLERANT CONTROL* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR**

**Nama Mahasiswa** : Kayi Mahdy Yattaqi  
**NRP** : 02311440000102  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Katherin Indriawati,S.T.,M.T  
**Abstrak**

ABS merupakan sistem pengereman pada kendaraan yang memungkinkan dilakukan pengereman tanpa takut terjadinya peristiwa penguncian pada roda ketika dilakukan pengereman darurat atau pengereman secara mendadak. Kegagalan dari *system* pengereman adalah hal yang harus dihindari karena dapat menyebabkan kecelakaan yang berakibat fatal. maka ditambahkan SMC (*sliding mode controller*) sebagai pengendali agar tidak terjadi penguncian, namun karena masih terdapat *chattering* pada sistem maka ditambahkan *fuzzy* untuk mengurangi *chattering* yang terjadi. Perancangan *fuzzy sliding mode controller* berhasil mengurangi fenomena *chattering* yang terjadi pada penggunaan *sliding mode controller*. Selain mengurangi *chattering* penggunaan *fuzzy sliding mode controller* juga memberikan perubahan parameter respon dari *slip ratio* seperti *maximum overshoot* yang bertambah 1%, *settling time* bertambah 0.06s dan juga nilai dari *error steady state* yang berkurang dari 1% menjadi sekitar 0.5%. Selain penambahan *fuzzy* dilakukan juga penambahan berupa *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) agar dapat memperbaiki kesalahan berupa bias pada sensor kecepatan kendaraan sebesar 10%, 50%, dan 75% pada sensor. Setelah dilakukan simulasi didapat bahwa AFTC dapat memperbaiki kesalahan yang terjadi pada sensor berupa bias sebesar 10%, 50%, dan 75% serta memperbaiki parameter respon dari sistem.

**Kata kunci : *Anti-Lock Braking System, Active Fault Tolerant Control, Sliding Mode Controller, Fuzzy Sliding Mode Controller, Sensor Kecepatan Kendaraan.***

**DESIGN FUZZY SLIDING MODE FAULT TOLERANT  
CONTROL FOR REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING  
SYSTEM OF ELECTRICAL VEHICLE WITH FAULT AT  
SENSOR**

**Name** : Kayi Mahdy Yattaqi  
**Student ID** : 02311440000102  
**Department** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Supervisors** : Dr. Katherin Indriawati,S.T.,M.T

*Abstract*

*ABS is a braking system on the vehicle that allows braking without fear of the occurrence of locking on the wheel when emergency braking or sudden braking is carried out. Failure from the braking system is something that must be avoided because it can cause accidents that are fatal. then added SMC (sliding mode controller) as a controller so that there is no locking, but because there is still chattering on the system, it is added fuzzy to reduce chattering. The design of fuzzy sliding mode controller has successfully reduced the chattering phenomenon that occurs in the use of sliding mode controller. In addition to reducing chattering using the fuzzy sliding mode controller, it also changes the response parameters of the slip ratio such as maximum overshoot which increases by 1%, settling time increases by 0.06s and also the steady state error decreases from 1% to around 0.5%. In addition to the addition of fuzzy additions, the addition of Active Fault Tolerant Control (AFTC) can be done to correct errors in the vehicle speed sensor by 10%, 50% and 75% on the sensor. After the simulation is obtained, AFTC can correct errors that occur in the sensor in the form of bias of 10%, 50%, and 75% and improve the response parameters of the system.*

**Keywords:** *Anti-Lock Braking System, Active Fault Tolerant Control, Sliding Mode Controller, Fuzzy Sliding Mode Controller, Vehicle Speed Sensor.*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah dipanjatkan kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dengan judul **“PERANCANGAN FUZZY SLIDING MODE FAULT TOLERANT CONTROL PADA REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR”**

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah berperan dalam penulisan ini, diantaranya:

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika FTI-ITS
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir yang telah membina dan membimbing penulis dengan baik.
3. Ibu Doty Dewi R selaku dosen wali yang telah memberikan dukungan moril kepada penulis.
4. Bapak Haris Kurnianto dan Almh Ibu Noor Farida selaku orang tua yang selalu memberi dukungan dan doa kepada penulis
5. Seluruh teman Tugas Akhir Hafid, Faris, Deden, Sovi terima kasih sudah membantu dan menemani penulis selama pembuatan Tugas akhir ini.
6. Seluruh teman teman Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2014, terima kasih telah membantu selama proses perkuliahan.
7. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Teman – teman NBF : yusril, Senko, Mbah, Dio, Husain, Ferdi, Iqbul, Pandu, Faiz, Haryo, Hafid
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran serta kritik yang

membangun sangat diharapkan oleh penulis sebagai bentuk introspeksi. Semoga laporan ini dapat menjadi manfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi mahasiswa yang akan melaksanakan penelitian serupa.

Surabaya, Desember 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
Abstrak .....	xi
<i>Abstract</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI .....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Anti-Lock Braking System (ABS)</i> .....	5
2.2 <i>Regenerative Anti-Lock Braking System (ABS)</i> .....	7
2.3 Sensor Kecepatan Roda.....	8
2.4 Electronic Control Unit .....	9
2.5 Hydraulic Control Unit .....	10
2.6 Permanent Magnetic Synchronous Motor .....	11
2.7 <i>Sliding Mode Controller</i> .....	13
2.8 <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> .....	16
2.9 <i>Active Fault Tolerant Control System</i> .....	17
2.10 <i>Observer State</i> .....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Pemodelan.....	25
3.2 Pemodelan <i>Quarter Car</i> .....	26
3.3 Perancangan Kontrol <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> ..	29
3.4 Pembuatan <i>Observer</i> .....	33
3.5 Pengujian Sistem <i>Active Fault Tolerant Control (AFTC)</i> Untuk Kesalahan Sensor .....	34
3.6 Sistem Keseluruhan Penelitian .....	35
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....	37

4.1 Pengujian Menggunakan <i>Sliding Mode Controller</i> .....	37
4.2 Pengujian Menggunakan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> .....	38
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	47
5.1 Kesimpulan .....	47
5.2 Saran.....	47
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	49
<b>LAMPIRAN</b> .....	53
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	69

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>System Anti-Lock Braking System</i> (Maliye, 2014) .7	7
Gambar 2.2	<i>Regenerative Anti-Lock Braking System Configuration</i> (Maliye, 2014) .....	8
Gambar 2.3	<i>Wheel Speed Sensor</i> .....	9
Gambar 2.4	<i>Electronic Control Unit</i> (Matsushita, Kondo, Yasuda, & Watanabe, 1994) .....	10
Gambar 2.5	<i>Permanent Magnetic Synchronous Motor</i> (Freescale).....	12
Gambar 2.6	Diagram blok <i>Fuzzy Sliding Mode Control</i> (Guo, et al., 2014).....	17
Gambar 2.7	<i>Active Fault Tolerant Control</i> (Jiang & Yu, 2012) .....	18
Gambar 2.8	Skema <i>reconfigurable controller</i> (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016).....	19
Gambar 2.9	<i>Extended State Observer</i> (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016) .....	22
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	24
Gambar 3. 2	Diagram blok <i>regenerative anti-lock braking system</i> .....	25
Gambar 3. 3	Pemodelan Gerak Bola .....	27
Gambar 3. 4	<i>Membership Function Input</i> .....	32
Gambar 3. 5	<i>Membership Function Output</i> .....	33
Gambar 3. 6	<i>Observer</i> .....	34
Gambar 3. 7	Diagram Blok Penelitian .....	35
Gambar 4. 1	Respon <i>slip ratio SMC</i> tanpa kesalahan .....	37
Gambar 4. 2	Respon <i>slip ratio FSMC</i> tanpa kesalahan.....	38
Gambar 4. 3	Respon <i>slip ratio</i> gabungan .....	39
Gambar 4. 4	Respon <i>Slip Ratio</i> Kesalahan Bias 10% .....	40
Gambar 4. 5	Laju Pengereman Kesalahan Bias 10% .....	40
Gambar 4. 6	Respon <i>Slip Ratio</i> Kesalahan Bias 50% .....	41
Gambar 4. 7	Laju pengereman kesalahan bias 50% .....	42
Gambar 4. 8	Respon <i>slip ratio</i> kesalahan bias 75% .....	42
Gambar 4. 9	Laju pengereman kesalahan bias 75% .....	43

Gambar 4. 10 Respon *slip ratio* kesalahan bias gabungan ..... 44  
Gambar 4. 11 Laju pengereman kesalahan bias gabungan..... 45

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Pemodelan Mobil .....	28
Tabel 3. 2 Parameter kurva gesekan (Guo, Jian, & Lin, 2014) ...	28
Tabel 3. 3 <i>Rule fuzzy logic controller</i> .....	33
Tabel 4. 1 Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji <i>close loop SMC</i> .....	38
Tabel 4. 2 Parameter performansi sistem pengendalian untuk <i>FSMC</i> .....	39
Tabel 4. 3 Parameter performansi sistem pengendalian <i>FSMC</i> bias 10% .....	40
Tabel 4. 4 Parameter performansi sistem pengendalian <i>FSMC</i> bias 50% .....	41
Tabel 4. 5 Parameter performansi sistem pengendalian <i>FSMC</i> bias 75% .....	43
Tabel 4. 6 Performansi Respon sistem Kesalahan gabungan .....	45



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Penggunaan bahan bakar fosil pada zaman yang modern ini masih terbilang cukup tinggi. Tingginya konsumsi bahan bakar minyak (BBM) di Indonesia salah satunya disebabkan kendaraan bermotor yang menjadi sarana transportasi wajib untuk dimiliki dan sudah menjadi kebutuhan untuk memudahkan dalam beraktivitas setiap harinya. Dengan kemajuan teknologi yang ada sekarang kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV) merupakan salah satu solusi untuk mengurangi dampak *negative* dari kendaraan yang berbahan bakar minyak bumi.

Dalam kendaraan listrik, salah satu faktor yang paling penting adalah keamanan (*safety*). Salah satu alat keamanan paling penting dari kendaraan baik konvensional maupun *electric vehicle* adalah pengereman pada kendaraan itu sendiri. Kegagalan dari *system* pengereman adalah hal yang harus dihindari karena dapat menyebabkan kecelakaan yang berakibat fatal.

Dengan kemajuan teknologi pada bidang keamanan di dunia otomotif yang saat ini banyak digunakan adalah pengereman menggunakan *anti-lock braking system* (ABS). ABS merupakan sistem pengereman pada kendaraan yang memungkinkan dilakukan pengereman tanpa takut terjadinya peristiwa penguncian pada roda ketika dilakukan pengereman darurat atau pengereman secara mendadak (Chen & Wang, 1996). Hal ini memberikan pengaruh berupa jarak pengereman (*Stopping distance*) lebih kecil dan kendaraan masih tetap stabil atau mudah dikendalikan meskipun direm pada kondisi berbelok ataupun jalan licin. Dengan demikian, penggunaan ABS pada mobil dapat mengurangi jarak penghentian mobil dan meningkatkan manuverabilitas jika dibandingkan dengan mobil yang tidak memiliki ABS (Lee & Zak, 2002). Selain

terdiri dari system pengereman gesekan (*friction*) ABS pada mobil listrik juga dilengkapi dengan komponen pengereman *regenerative* (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007). Sistem pengereman *regenerative* memiliki arti sistem yang dapat merubah energi kinetik ketika terjadi perlambatan pada mobil menjadi energi listrik yang akan disimpan dan dapat digunakan kembali. Berdasarkan hasil penelitian, penyimpanan energi yang berhasil dicapai oleh sistem mencapai 8%-25% dari total energi yang digunakan kendaraan, tetapi hal ini masih tergantung dengan siklus pengaturan sistem kontrolnya (yao, zhong, & sun, 2006).

Umumnya ABS terdiri dari beberapa bagian seperti *electronic controller unit* (ECU), *wheel speed sensor*, *modulator unit*, dan beberapa komponen pengereman. *Modulator unit* berfungsi sebagai aktuator pada pengereman *regenerative* ABS sedangkan *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) digunakan sebagai motor untuk dilakukannya pengereman hidraulik. Beberapa keuntungan dari digunakannya *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) yaitu memiliki tingkat efisiensi serta daya listrik yang tinggi (Lingzhi, Chengdong, & Genping, 2017). Untuk meningkatkan kinerja dari sistem ABS agar dapat mempertahankan nilai slip rasio di angka 0.2 maka diperlukan sistem pengendalian. Salah satu jenis sistem pengendalian yang familiar digunakan pada ABS adalah *sliding mode controller* (SMC). Seperti yang diketahui, SMC memiliki kelebihan berupa anti-jamming yang baik. Selain itu, SMC memiliki kekuatan yang kuat, artinya, sangat tidak peka terhadap kesalahan model dan perubahan parameter objek yang dikontrol serta adanya gangguan eksternal. Namun, kekurangan dari digunakannya SMC adalah masalah osilasi, yang disebabkan oleh karakteristik diskrit yang melekat (Guo, Jian, & Lin, 2014).

Pada penelitian sebelumnya dilakukan perancangan AFTC pada ABS *regenerative* mobil listrik yang menjelaskan sistem



pengereman ABS untuk mengestimasi kesalahan pada sensor (Pinandhito, 2018). *Sliding mode controller* (SMC) yang digunakan pada penelitian sebelumnya masih memiliki kekurangan karena masih dapat ditemui fenomena *chattering* pada sistem SMC tersebut. Maka dari itu dibuatlah tugas akhir dengan mendesain *Sliding mode controller* (SMC) dengan menambahkan *Fuzzy Logic Control* sebagai input untuk dapat mengoptimalkan kinerja dari *regenerative Anti-lock braking system* pada EV agar dapat meningkatkan faktor keamanan yang ada pada mobil listrik.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka permasalahan pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana merancang *Fuzzy Sliding Mode Control* untuk memperbaiki kinerja yang terjadi pada sensor pada *Anti-Lock Braking System* (ABS)?
2. Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk mengatasi kesalahan sensor pada *Anti-Lock Braking System* (ABS)?

## 1.3 Tujuan

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

1. Merancang *Fuzzy Sliding Mode Control* untuk memperbaiki kinerja sensor pada *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS).
2. Merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk mengatasi kesalahan pada sensor pada *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS).

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan yang digunakan berupa *Quarter Car Model* (QCM) untuk jenis kendaraan berpenumpang.
2. Kendaraan diasumsikan berjalan pada lintasan lurus dengan permukaan jalan aspal kering.
3. Besar *setpoint* senilai 0,2 dengan berdasarkan pada *slip ratio* optimum untuk berbagai kondisi jalan.
4. Variabel yang dikendalikan berupa *slip ratio*.
5. Variabel yang dimanipulasi berupa torsi pengereman.
6. Kesalahan berupa bias dan sensitivitas pada *vehicle speed sensor* dengan nilai 10%, 50%, 75%.

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 *Anti-Lock Braking System* (ABS)

*Anti-Lock Braking System* merupakan sistem keamanan (*safety*) pada mobil untuk mencegah terjadinya slip dan penguncian roda. Ketika terjadi proses pengereman, umumnya roda akan terkunci maka biasanya terjadi pengurangan drastis dalam hal kendali dan arah laju roda kendaraan pada permukaan sehingga menjadi tidak normal. Untuk melakukan analisa pada sistem *regenerative* ABS maka dilakukan pemodelan sistem kendaraan listrik dilakukan menggunakan pendekatan dengan metode *quarter car models*. Pada peristiwa pengereman, terdapat 2 persamaan sistem dinamis yang bekerja dan mempengaruhi sistem *regenerative* ABS, yaitu:

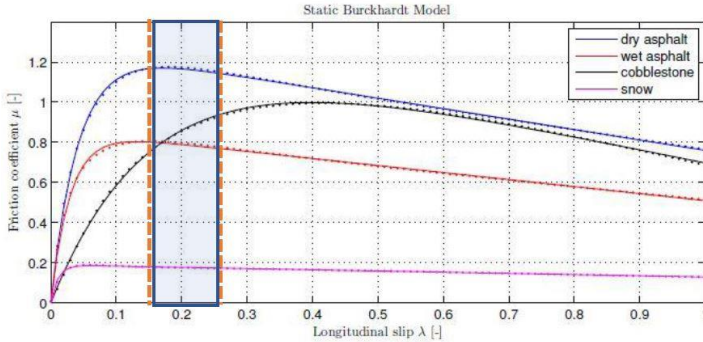
$$ma = -(F_b + F_a + F_f) \quad (2.1)$$

$$J_{\omega f} \dot{\omega f} = F_b \cdot R - \dot{T}_h - T_m - T_f \quad (2.2)$$

Persamaan gerak dinamis dari sistem didapat berdasarkan persamaan hukum II Newton yang dipengaruhi oleh massa mobil ( $m$ ); Gaya pengereman roda ( $F_b$ ); gaya gesek aerodinamik ( $F_a$ ); serta gaya *rolling resistance* ( $F_f$ ). Pada saat pengereman, akan dihasilkan torsi pengereman pada roda. Torsi pengereman yang bekerja pada saat proses pengereman adalah *braking torque* ( $F_b \cdot R$ ); torsi pengereman hydraulic ( $T_h$ ); torsi pengereman motor ( $T_m$ ); serta torsi yang dihasilkan oleh gaya *rolling resistance* roda ( $T_f$ ) yang memberikan efek pengereman pada roda.

Ketika dilakukan pengereman, kendaraan akan menghasilkan gaya *tractive force* pada ban. Gaya ini memiliki nilai yang sebanding dengan gaya normal pada jalan. Berdasarkan berbagai kondisi jalan, koefisien gesek yang ideal adalah pada kondisi nilai *slip ratio* ( $\lambda$ ) roda bernilai 0,2 dan akan memiliki nilai terendah pada nilai 1 yaitu ketika roda mengalami penguncian. Untuk menjaga agar nilai dari *slip-ratio* pada roda tetap pada nilai 0,2

maka digunakan sistem anti-lock. Nilai koefisien *slip ratio* berdasarkan kondisi jalan, dijelaskan pada **Gambar 2.1**.



**Gambar 2. 1** Koefisien gesek roda berdasarkan kondisi jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014)

*Slip ratio* ( $\lambda$ ) dapat dinyatakan dengan persamaan matematis yang merupakan fungsi dari kecepatan kendaraan dan kecepatan putaran roda yang dapat dinyatakan pada persamaan 2.3.

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (2.3)$$

Diketahui bahwa  $v$  adalah kecepatan dari kendaraan (m/s),  $\omega$  adalah kecepatan sudut dari roda (rad/s) dan  $R$  adalah jari-jari roda (m). Besarnya nilai dari *slip ratio* pada kendaraan yang terkunci sempurna, nilai dari slip rasionya bernilai 1 sedangkan ketika roda berputar bernilai 0. Perbandingan antara koefisien gesek dari roda dan *slip ratio* dinyatakan dalam:

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

Dengan:

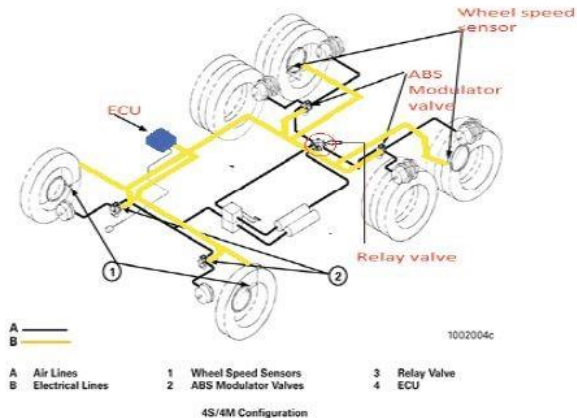
$C_1$ = nilai maksimum kurva gesek

$C_2$ = bentuk kurva gesek

$C_3$ = perbedaan antara kurva gesek pada nilai maksimum dan pada saat  $\lambda=1$

$C_4$ = nilai karakteristik kebasahan jalan.

Nilai koefisien dari gesek mempengaruhi besarnya nilai *tractive force* pada roda kendaraan. Namun dengan menggunakan kendali, *slip ratio* yang dijaga agar tetap pada kisaran 0,2 maka kerja roda dapat lebih optimal serta meminimalisir keausan ban.



**Gambar 2. 2** *System Anti-Lock Braking System* (Maliye, 2014)

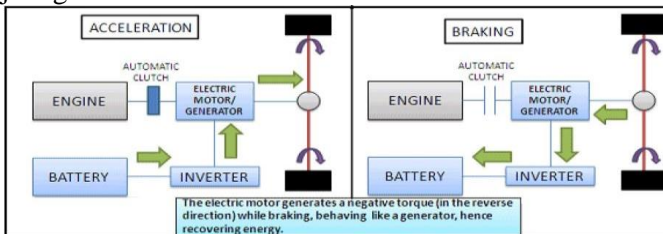
Berdasarkan **Gambar 2.2** dijelaskan komponen komponen dari sistem *anti-lock braking system* yang terdiri dari *wheel speed sensor*, *Modulator valve*, *Relay valve*, dan *Electronic Control Unit*.

## 2.2 *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS)

Seiring berjalannya waktu serta perkembangan teknologi yang semakin canggih, ABS mengalami peningkatan kemampuan untuk mengkonversi energi kalor yang dihasilkan selama pengereman untuk dikonversi menjadi energi listrik yang kemudian akan disimpan di dalam baterai. Kemampuan ini kemudian disebut *regenerative ABS*. *Regenerative ABS* dapat juga diartikan sebagai sebuah teknologi dalam bidang pengereman kendaraan yang bertujuan untuk mencapai tingkat akselerasi minimum dan optimal serta efisien tanpa mempengaruhi stabilitas maupun kemampuan kendali kemudi kendaraan dengan tingkat keselamatan maksimum yang mampu menyimpan energi kalor terbuang pada saat pengereman menjadi

energi listrik (Guo, Jian, & Lin, 2014). Pada *EV* sistem pengereman ABS sudah dilengkapi dengan sistem *regenerative*. Sistem *regenerative* pada *EV* yaitu merubah fungsi dari motor dalam sebuah *EV* untuk bekerja berkebalikan yaitu menjadi generator. Sistem pengereman ini menggunakan motor listrik, dengan cara menghasilkan torsi negatif ke roda kendaraan dan mengubah energi mekanik dari motor menjadi energi listrik untuk dilakukan pengisian baterai.

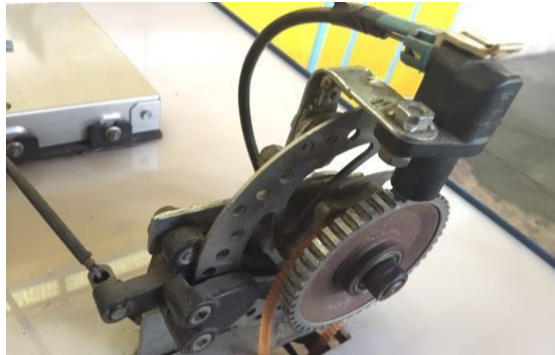
Sistem pengereman *regenerative* ABS terdiri dari beberapa komponen penting didalamnya yang ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Pada gambar tersebut ditunjukkan sistem pengereman *regenerative* ABS, baik sistem saat dalam kondisi berjalan maupun dalam keadaan pengereman, serta perubahan dari motor ketika menjadi generator.



**Gambar 2.3** *Regenerative Anti-Lock Braking System Configuration* (Maliye, 2014)

### 2.3 Sensor Kecepatan Roda

Sensor merupakan elemen *sensing* pada setiap sistem pengendalian, dalam hal ini sensor yang digunakan adalah sensor kecepatan rotasi ban dari sistem ABS yang terletak di ujung roda. Kendaraan yang memiliki sistem ABS pada pengeremannya umumnya memiliki empat sensor pada pinggiran roda di tiap sisi. Untuk peletakan detail dari sensor kecepatan roda bergantung pada tipe suspensi yang digunakan. Pada kendaraan dengan suspense bertipe *spring* sensor kendaraan terletak pada as ganda di depan, sedangkan untuk yang bertipe suspense udara (*air suspension*) letak sensor berada pada bagian belakang dari roda. Hasil dari sensor ini selanjutnya akan diteruskan ke *electronic control unit* (ECU) untuk menentukan waktu dari ABS akan diaktifkan.

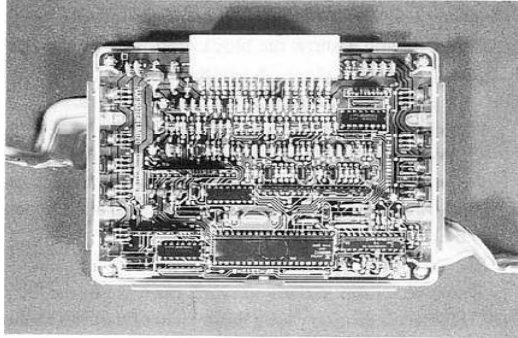


**Gambar 2. 4** Skema sensor kecepatan roda (Pinandhito, 2018)

## 2.4 Electronic Control Unit

ECU merupakan salah satu komponen pada sistem pengereman *regenerative* ABS. ECU berfungsi sebagai penerima sinyal yang berasal dari sensor untuk diproses dalam fungsi kecepatan untuk mengestimasi kecepatan dari kendaraan. ECU juga berfungsi untuk melakukan kendali pada nilai *slip ratio* agar tetap optimum pada setiap aliran tekanan *solenoid valve* agar diatur modulator tekanan pada *disk brake* di tiap roda.

Algoritma AFTC pada EV diharapkan mampu mengestimasi kesalahan sensor dengan cepat. Hal ini dikarenakan pada saat pengereman keras, algoritma dalam AFTC membutuhkan komunikasi data serial yang cepat agar tidak terjadi penguncian. Sering berkembangnya zaman, komunikasi data serial dilakukan dengan mengirimkan data secara bit per bit yang biasanya disebut *baud rate* pada kecepatan tertentu (bit per detik), pengiriman dilakukan melalui pengirim (Tx) dan diterima oleh sebuah penerima (Rx) dalam rentang waktu yang ditentukan. *Baud rate* merupakan sinyal perubahan yang terjadi pada nilai pengukuran sensor. *Baud rate* bergantung pada koneksi tegangan serta frekuensi dari sinyal yang ditransmisikan. Nilai *baud rate* yang tinggi memiliki tingkat kecocokan yang tinggi untuk digunakan dalam sistem ECU karena responnya yang cepat terhadap perubahan hasil sensor per detiknya.



**Gambar 2. 5** *Electronic Control Unit* (Matsushita & dkk, 1994)

Komunikasi yang terjadi dapat terjalin dua arah, hal ini dikarenakan ECU yang memiliki kemampuan untuk berfungsi sebagai pengirim dan penerima. Dalam sebuah ECU data yang dialirkan secara paralel dan dilakukan penerimaan secara serial, oleh karena itu dibutuhkan *interface* untuk mengubah jalur paralel menjadi serial. Rangkaian RS232 dapat mengubah jalur paralel menjadi serial yang ditunjukkan oleh IC 6850 atau memiliki istilah *Asynchronous Communications Interface Adapter* (UART).

## **2.5 Hydraulic Control Unit**

Selain ECU, pada ABS terdapat juga sebuah *Hydraulic Control Unit* (HCU). Komponen ini memiliki 2 bagian penting yaitu katup rem hidrolik dan modulator tekanan untuk pengereman. Modulator tekanan pengereman merupakan sebuah valve yang dapat bergerak untuk membuka dan menutup sirkuit yang menghubungkan *master silinder* dan rem. Sementara untuk katup rem hidrolik, berfungsi untuk mendistribusikan fluida ke setiap roda. Pada saat valve melakukan pengereman, masukan pada *master silinder* akan membuka dan menyebabkan pompa dan outlet dari rem akan menutup sehingga akan memberikan kerja pada rem. Lalu ECU akan melakukan pengendalian pada bukaan *outlet valve* antara rem dan tekanan pompa untuk menghindari adanya tekanan yang berlebih sehingga nilai dari *slip ratio* dapat terkendali.



Terdapat fungsi yang berbeda pada beberapa katup, diantaranya:

- *Supply Port*

Bagian yang berfungsi untuk menerima tekanan udara dari *relay valve*.

- *Delivery Port*

Bagian yang berfungsi sebagai pemberi tekanan udara menuju ruangan rem.

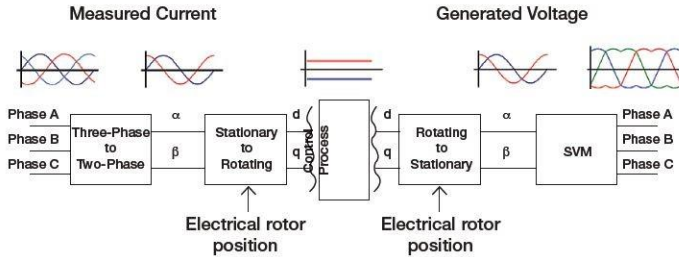
- *Exhaust Port*

Bagian yang berfungsi mengalirkan tekanan udara dari sisi *delivery port* saat ABS kontrol saja (Wabco, 2013).

Pada ABS, *valve* yang digunakan memiliki 3 fungsi untuk menunjang performa pengereman. Fungsi pertama sebagai pembuka dan pemberi jalan untuk fluida hidrolis dari pedal atau pompa untuk mencapai system. Fungsi kedua adalah untuk mengatur besarnya tekanan untuk diberikan ke system pengereman. Fungsi ketiga yaitu untuk mengurangi tekanan hidrolis pada sistem pengereman. Hal ini dilakukan dengan cara membuka katup untuk kemudian mengarahkan fluida hidrolis untuk dikeluarkan dari system pengereman.

## **2.6 Permanent Magnetic Synchronous Motor**

Pada mobil listrik, umum digunakan mesin yang berjenis *Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)*. Pada saat kendaraan berjalan, motor akan berfungsi sebagai penggerak kendaraan. Sedangkan, pada saat pengereman *regenerative*, motor akan bekerja berkebalikan menjadi generator untuk menghasilkan listrik. Pada PMSM terdapat converter yang berfungsi untuk mengubah arus AC yang berasal dari putaran pada generator menjadi DC untuk kemudian diarahkan ke baterai. Umumnya PMSM memiliki *reduction gear* agar putaran rotor dari PMSM memiliki rasio yang sesuai dengan putaran roda agar tidak terjadi *Skidding* pada saat mobil berjalan.



**Gambar 2. 6** *Permanent Magnetic Synchronous Motor*  
(Freescale, n.d.)

Persamaan torsi motor pada saat pengereman *regenerative* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$T_{mavail} = \frac{T_m \max \cdot i \cdot K_{\omega m} \cdot K_{soc}}{\eta t} \quad (2.5)$$

Dengan:

$T_m \max$  = nilai maksimum mampu torsi motor

$i$  = nilai transmisi ratio pada EV

$k_{\omega m}$  = nilai konstanta kecepatan rotor

$k_{soc}$  = nilai konstanta SOC baterai

$\eta t$  = efisiensi transmisi

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi *regenerative*, salah satu diantaranya adalah SOC (*State of Charge*) dari baterai, kecepatan sudut, dan temperature dari motor. Tujuan SOC adalah untuk menjaga agar tidak terjadi *overcharging* yang dapat berpengaruh terhadap umur dari baterai (Peng, Zhang, Yin, & Zhang, 2008).

Torsi motor yang disalurkan pada tiap roda dipengaruhi oleh parameter nilai  $k_{\omega m}$  dan  $k_{soc}$  yang mengatur lamanya waktu *charging* pada baterai EV. Hal ini dilakukan agar pada saat proses *regenerative braking* dilakukan tidak memberikan efek *overcharge* pada baterai dan mencegah beban berlebihan akibat kecepatan putar rotor. Tujuan dari nilai konstan  $k_{soc}$  yaitu untuk membatasi waktu proses *charge* pada baterai pada saat dilakukan

pengereman agar tidak terjadi *overcharging* yang akan memberikan efek berupa menurunnya kinerja baterai.

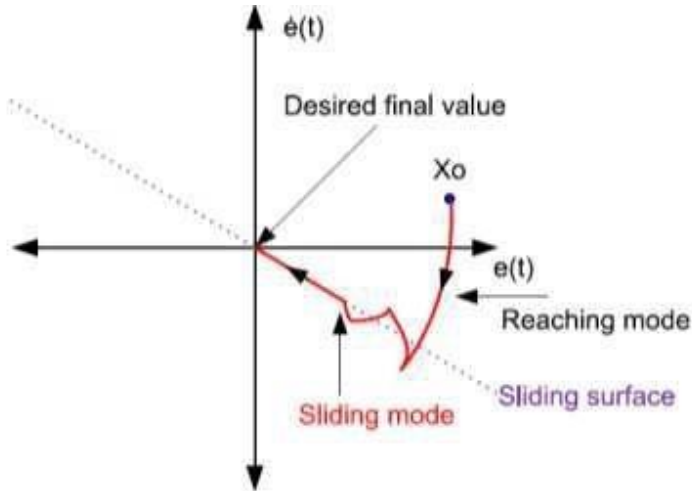
Gaya elektrik yang dihasilkan, bergantung juga dengan besarnya kecepatan angular motor pada saat terjadi proses pengereman, Karena percepatan putaran motor berpengaruh pada pengereman EV yang bekerja bersama sama dengan pengereman *hydraulic*.

Pada saat system *regenerative* bekerja maksimal dan masih terdapat *torque demand* berlebih untuk pengemernam maka torsi yang berlebih akan dibebankan pada system pengereman mobil pada umumnya yaitu pengereman *hydraulic (Th)*. Namun ketika *torque demand* sudah mencapai nilai *torque braking* maka motor pengereman akan dikendalikan *regenerative braking* secara penuh.

## **2.7 Sliding Mode Controller**

*Sliding mode control (SMC)* adalah sebuah teori kontrol yang menggunakan pendekatan *state space* untuk menganalisa sebuah sistem (Nasir, Ismail, & Ahmad, 2010). Penggunaan metode *state space* ini relatif mudah untuk digunakan pada model sistem yang kompleks dan *multi input multi output system (MIMO)*. SMC dikenal dengan ketahanannya pada *high tracking trajectory* dan *robust* untuk mengestimasi paramater, diagnosis kesalahan, dan kontrol. Metode SMC ini dikembangkan untuk membangun sistem kontrol pada model yang kompleks dengan sistem dinamik nonlinear derajat tinggi yang bekerja dalam keadaan tidak tentu (Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh, 2016). Cara kerja SMC dalam mengendalikan sebuah sistem adalah dengan cara mengendalikan *trajectory state* dari sebuah sistem untuk menuju permukaan lancar (*sliding surface*) sekaligus mempertahankan pada nilai tertentu. Penentuan nilai dari sebuah *sliding surface* diperlukan pertimbangan pada *state* dari sistem dengan menggunakan *state space* yang terdiri dari *eror* dan turunan pertama dari *error* itu sendiri. *Trajectory State (Xo)* akan menuju ke permukaan dari *sliding mode (reaching mode)*, untuk kemudian akan meluncur sepanjang permukaan sesuai target yang

ditentukan (*sliding mode*). Proses tersebut dijelaskan pada **Gambar 2.7**.



**Gambar 2.7** Interpretasi grafik SMC (Liu & Wang, 2012)

Hal pertama yang diperlukan dalam merancang SMC adalah penentuan persamaan permukaan (*sliding surface*). Lebih lanjut, *sliding surface* Persamaan ini dipengaruhi oleh satu parameter skalar, yaitu  $\lambda$  yang ditentukan berdasarkan perancangan sistem dan memiliki nilai positif konstan. Dan  $n$  merupakan besarnya nilai orde dari sistem yang digunakan.

$$S = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (2.6)$$

Untuk menstabilkan sebuah sistem non-linier yang mengalami perubahan terhadap waktu, dibutuhkan teori kestabilan Lyapunov. Fungsi Lyapunov mendefinisikan bahwa sebuah fungsi bernilai definit positif apabila memenuhi syarat  $V=0$ ,  $V>0$ .

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.7)$$

Berdasarkan penelitian dari (Rahmani, et al., 2016), teori kestabilan Lyapunov menganggap bahwa sistem didefinisikan sebagai  $\dot{x} = f(x, t)$  dengan  $f(0, t) = 0$  untuk semua  $t$ . Jika nilai dari fungsi skalar pada  $V(x, t)$  bersifat kontinu, maka turunan parsial pertama fungsi memiliki kondisi definit negatif. Pada keadaan ini, sistem mengalami *uniformly asymptotic stable*. Berdasarkan teori kestabilan Lyapunov dari penelitian (Rahmani, et al., 2016) yang diterapkan dipersamaan (2.7) untuk persamaan (2.8) dapat memenuhi syarat kestabilan sistem yang bersifat definit negatif. Nilai  $\varepsilon$  (epsilon) merupakan suatu konstanta positif.

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq -\varepsilon |s| < 0 \quad (2.8)$$

Fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x) &= \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \\ \text{sgn}(x) &= \frac{|x|}{x} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ditinjau dari definisi fungsi signum, persamaan (2.9) dapat dituliskan dengan bentuk persamaan lainnya seperti pada persamaan (2.10) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s), \varepsilon > 0 \quad (2.10)$$

Persamaan *sliding surface* adalah fungsi *error*. Nilai orde yang diberikan adalah  $n = 2$ , persamaan (2.6) dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$S(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (2.11)$$

Melalui fungsi *error* dan turunannya, serta  $r$  merupakan posisi ideal, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (2.12)$$

Variabel *state*  $x(t)$  memenuhi persamaan *state space* berikut.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.13)$$

$A$  dan  $B$  merupakan matriks *state* dan matriks input, serta  $u(t)$  merupakan sinyal input (kontrol). Kemudian, dengan memperoleh turunan pertama dari persamaan (2.11) dan substitusi persamaan (2.12) dan persamaan (2.13), didapatkan persamaan berikut.

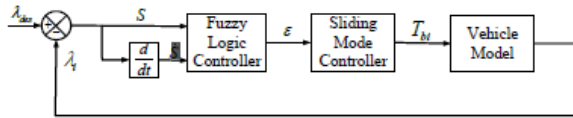
$$\dot{s} = \ddot{r}(t) - Ax(t) - Bu(t) + \lambda[\dot{r}(t) - \dot{x}(t)] \quad (2.14)$$

Adanya *constant rate reaching law*, maka persamaan (2.15) dapat disamakan dengan persamaan (2.14) yang kemudian diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$u(t) = \frac{1}{B} [\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + \ddot{r}(t) - Ax(t) + \lambda(\dot{r}(t) - \dot{x}(t))] \quad (2.15)$$

## 2.8 Fuzzy Sliding Mode Controller

*Fuzzy Logic Control* (FLC) digunakan pada metode *Sliding Mode Controller* untuk menentukan nilai dari parameter  $\varepsilon$  dari hukum pendekatan eksponensial. *Fuzzy Logic Control* Mamdani dirancang dengan dua input dan satu output. Kedua input adalah fungsi dari sliding mode (S) dan turunan pertama dari fungsi tersebut dengan output berupa parameter  $\varepsilon$  (Guo, Jian, & Lin, 2014).

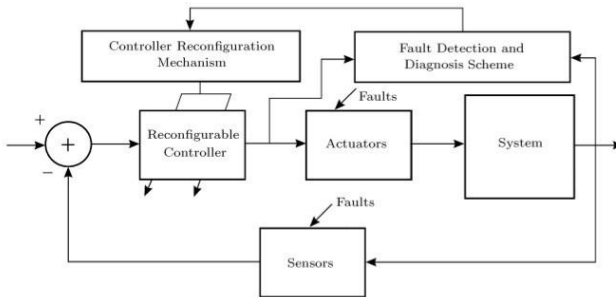


**Gambar 2. 8** Diagram blok *Fuzzy Sliding Mode Control* (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Pada **Gambar 2.8** menjelaskan fungsi kinerja dari *fuzzy sliding mode controller*. Input dari sistem fuzzy tersebut berasal dari sliding surface ( $S$ ) dan turunan pertama dari sliding surface tersebut. Sliding surface merupakan error dari sistem tersebut yang nilainya berasal dari slip rasio yang diinginkan dan slip rasio terukur yang berasal dari vehicle model. Output dari sistem fuzzy tersebut merupakan nilai epsilon ( $\epsilon$ ) yang merupakan konstanta robust dari sistem *sliding mode controller*. *Sliding mode controller* memberikan output berupa referensi torsi pengereman yang nantinya akan masuk ke *vehicle model* dan akan dihitung slip rasio dari sistem tersebut.

## 2.9 Active Fault Tolerant Control System

*Fault tolerant control* merupakan sebuah sistem yang memiliki kemampuan berupa dapat mengakomodasi kesalahan pada komponen secara otomatis sambil tetap mempertahankan kestabilan dan performansi sistem yang telah ditetapkan. Sistem dari FTC itu sendiri dibagi menjadi dua, yaitu aktif dan pasif. FTC pasif memiliki kemampuan berupa dapat mengakomodir kesalahan namun tidak secara *on-line*, hal ini dikarenakan jumlah toleransi kesalahan yang dapat diakomodir oleh jenis ini memiliki batas tertentu. Sedangkan untuk FTC aktif, perlu dilakukan perancangan ulang sistem kendali karena dapat menggunakan informasi kesalahan secara *on-line* untuk menjaga kestabilan dan performansi yang telah ditetapkan sebelumnya atau mencapai performansi terdegradasi yang diijinkan (Lunze & H, 2008).



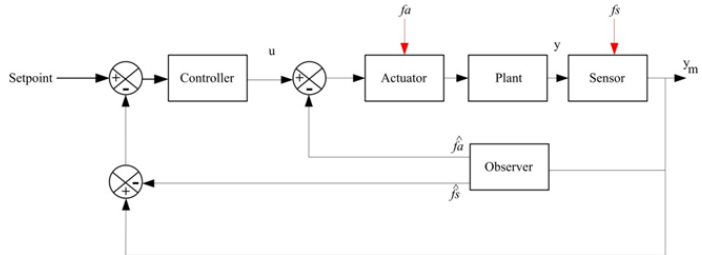
**Gambar 2.9** Active Fault Tolerant Control (Jiang & Yu, 2012)

Pada **Gambar 2.9** dijelaskan sistem AFTC. Perbedaan dari FTC aktif dan FTC pasif dapat dilihat berdasarkan komponen *Reconfigurable Control (RC)* dan *Fault Detection and diagnosis (FDD)*. Hal ini karena perancangan FTC aktif bertujuan untuk dapat langsung bereaksi terhadap kegagalan komponen dengan merekonfigurasi aksi control sehingga dapat menjaga kestabilan dan performansi dari sistem. Pada umumnya sistem FTC aktif terdiri dari beberapa bagian seperti teknik deteksi/diagnosis kesalahan, mekanisme kendali rekonfigurasi, dan *reconfigurable controller*. Ketiga bagian yang disebutkan sebelumnya diharuskan dapat bekerja secara berkesinambungan. Ketika terjadi kesalahan, unit FDI akan menentukan letak kesalahan, lalu mengisolasi kesalahan untuk kemudian algoritma estimasi kesalahan akan langsung bekerja secara *on-line* dapat diaktifkan. Untuk merancang skema FDD desain harus memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap kegagalan sistem dan *robust* terhadap ketidakpastian model, kondisi operasi yang berbeda serta gangguan dari luar sistem. Untuk perancangan RC, sebisa mungkin dapat memulihkan performansi dari sistem setelah terjadinya kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan waktu tunda pada *fault detection*.

Sistem AFTC dapat dikelompokkan menjadi metode proyeksi dan metode *automatic redesign*. pada metode proyeksi memungkinkan untuk dihitung terlebih dahulu ketika dilakukan pendesainan (*pre-computed control law*). Sedangkan pada



*automatic redesign*, kesalahan yang terjadi dilakukan kompensasi dengan cara menyintesa strategi control baru secara *on-line*.



**Gambar 2. 10** Skema *reconfigurable controller* (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016)

Sinyal kendali yang terdapat pada AFTC akan dilakukan rekonfigurasi secara *realtime* sehingga sistem akan tetap berada pada nilai yang dituju meskipun terdapat gangguan. Kesalahan yang terjadi pada sistem akan diakomodasi dengan merekonfigurasi mekanisme yang dirancang agar dapat memulihkan kestabilan sistem dengan cepat. Ketika terjadi kesalahan pada sensor saat proses pengukuran maka kesalahan tersebut akan didagnosa sehingga sinyal kesalahan akan dikompensasikan oleh *estimation compensation*. *Estimation Compensation* sendiri memiliki input berupa sinyal kontrol dan sinyal hasil pengukuran. Sedangkan untuk keluaran dari *estimation compensation* digunakan untuk merekonfigurasi sinyal dari sensor yang mengalami kesalahan. Blok rekonfigurasi berfungsi untuk memulihkan sinyal output dari sensor sebelum dilakukan pengolahan oleh pengontrol sehingga *plant* yang telah terjadi kesalahan agar tetap beroperasi ideal. Maka dapat disimpulkan *plant* rekombinasi  $\mathcal{ERP}$ , yang dapat di lihat dari pasangan sinyal  $(U_c, Y_c)$ , yang terlihat dari sinyal  $(U_c, Y_f)$ . Rekonfigurasi kontrol dapat dilakukan dengan menambahkan *design state observer*. Hal ini dapat dilihat berdasarkan persamaan berikut:

### 2.10 Observer State

*Observer* adalah algoritma yang berfungsi untuk mengestimasi keadaan (*state*) dari variabel yang tidak dapat terukur berdasarkan model matematis dari sistem. Pada buku

(Ogata, 2010), *observer* berfungsi untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem dan *observer* merepresentasikan model matematis sistem pada persamaan ruang keadaan (*state space*) sistem yaitu pada persamaan (2.18) dan (2.19) berikut ini.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.18)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) \quad (2.19)$$

Dimana:

$A$  = matriks keadaan (*state*) yang merepresentasikan fungsi alih dari *plant*

$B$  = matriks nilai masukan

$C$  = matriks hasil pengukuran

$D$  = matriks nilai keluaran dari *noise*

$x$  = *state*

$u$  = kontrol *input*

$y$  = *output* sistem

$\dot{x}$  = Perubahan *state* terhadap waktu

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. Sehingga, model matematis dari *observer* dapat dituliskan pada persamaan

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x} + Bu + K_e(Y - C\hat{x}) \quad (2.20)$$

Dimana:

$\hat{x}$  = keadaan estimasi

$C\hat{x}$  = keadaan estimasi keluaran

$K_e$  = Gain matriks *Observer*

Efek dari kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut dan didefinisikan pada persamaan (2.21) dan persamaan (2.22), dimana vector kesalahan tersebut bertindak pada persamaan state dan persamaan *output*

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

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

Tipe kesalahan sensor dan aktuator dimodelkan sebagai berikut:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta(t) \quad (2.23)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.24)$$

$s_f(t)$  merupakan sinyal kesalahan,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah konstanta. Penambahan kesalahan  $f(t)$ , termasuk  $f_a(t)$  dan  $f_s(t)$

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

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

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

Persamaan (2.26) tersebut dapat mendefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah diekspansi, persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.28).

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

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_n \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0_n \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0_n \\ 0_n & A_z \cdot F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$Y_a = Z = C_a \cdot X_a \quad [0 \quad C] \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = Z$$

Dimana:

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0_n \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0_n \end{bmatrix}$$

$$C_a = [0_n \quad C]$$

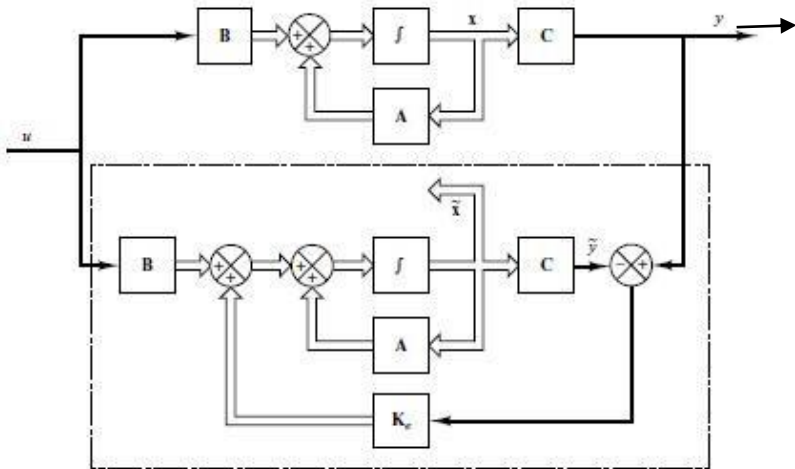
$$E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0_n \\ 0_n & A_z \cdot F_s \end{bmatrix}$$

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

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = A_a \hat{\mathbf{X}} + B_a \mathbf{u} + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}) \quad (2.29)$$

Sehingga matriks yang sudah di ekspansi ditunjukkan seperti pada persamaan berikut:

$$\widehat{A}_a = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0_n & 0_n \end{bmatrix}, \widehat{C}_a = [C_a \quad 0_n] \quad (2.30)$$



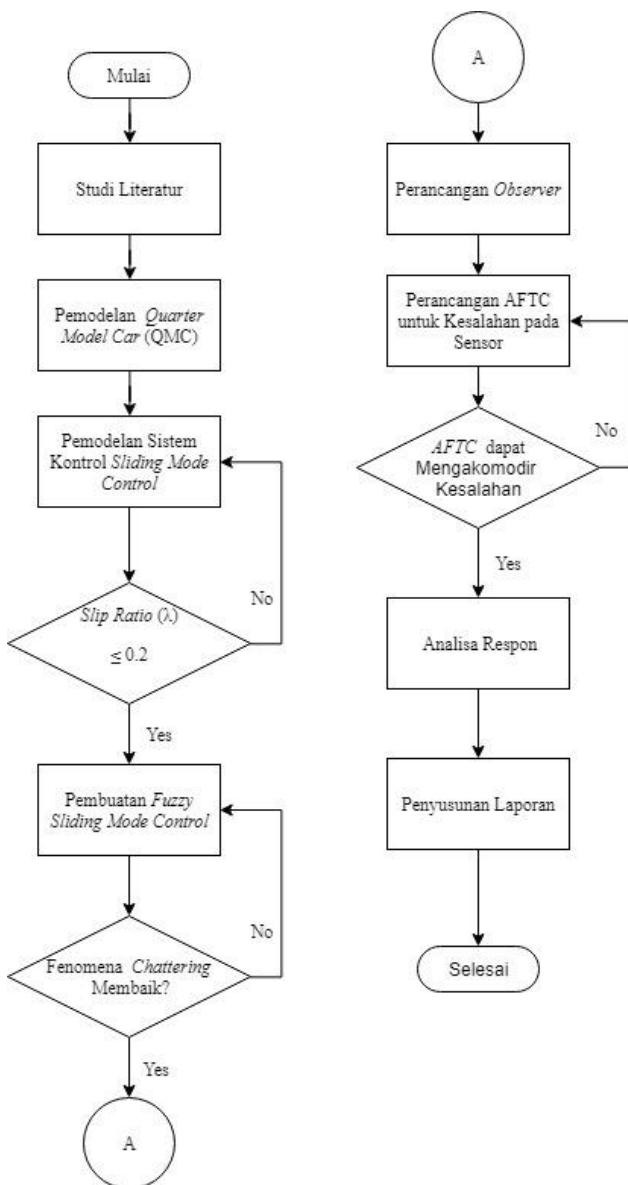
**Gambar 2. 11** *Extended State Observer* (Ogata, 2010)

Pada **Gambar 2.11** menunjukkan diagram blok dari sistem dan *observer state*. *Observer* disini diwakilkan dengan gambar K dimana pada gambar tersebut dijelaskan bahwa *observer* memiliki nilai *gain observer*. *Gain observer* adalah matriks yang digunakan untuk menoreksi perbedaan antara nilai dari  $y$  keadaan aktual dan  $y$  keadaan estimasi, sehingga dapat digunakan untuk estimasi dari *state* tak terukur (Ogata, 2010). Parameter yang berpengaruh dalam penentuan nilai *gain observer* adalah nilai *pole* yang digunakan untuk menyatakan sistem dalam kondisi stabil yang berada pada nilai yang tidak lebih dari 1 atau -1 pada sumbu riil dan imajiner.

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi untuk mencapai tujuan tugas akhir ini dijabarkan melalui diagram alir yang dijelaskan pada gambar 3.1 yang menjelaskan tahap tahap dari tugas akhir ini. Pada tahap pertama dilakukan proses studi literatur berdasarakan tema tugas akhir ini yaitu mengenai sistem pengereman pada kendaraan listrik berdasarkan yang terdapat pada buku, jurnal, dan penelitian yang telah dilakukan mengenai pengereman pada mobil listrik khususnya mengenai *regenerative ABS*, *Fuzzy Sliding mode control*, dan *Active Fault Tolerant Control*. Kemudian pada langkah selanjutnya dilakukan pemodelan dari *Electric Vehicle* dengan pendekatan *Quarter Model Car* serta pada sistem sensor dan actuator di sistem pengereman *regenerative ABS* untuk kemudian dilakukan simulasi pada Simulink Matlab R2016a. Untuk proses validasi data pengereman, digunakan nilai *slip ratio* optimal yaitu 0.2 untuk merepresentasikan *plant* yang sesungguhnya.

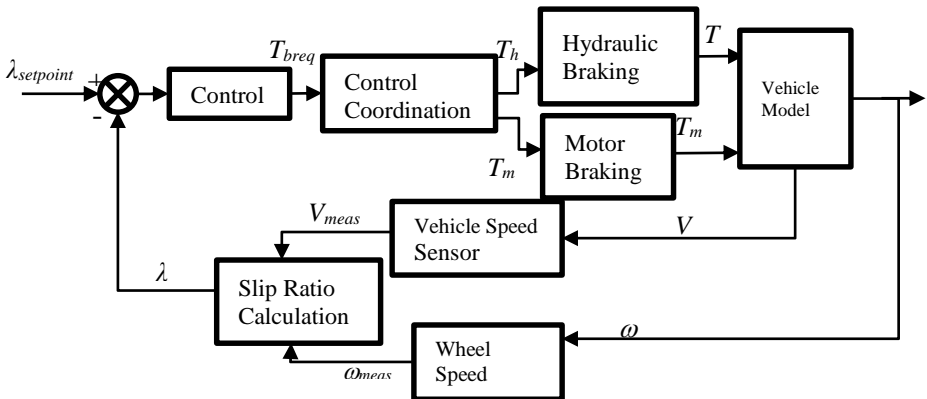
Pada simulasi sistem pengendalian *loop* tertutup digunakan pengendali jenis *Sliding Mode Controller* dengan tambahan *Fuzzy Logic* pada parameter epsilon. Parameter *epsilon* ( $\epsilon$ ) berfungsi sebagai *signum* pada pengendali. Adapun untuk parameter *epsilon* ( $\epsilon$ ) pada sistem *SMC* didapat melalui *fuzzy logic* agar nilai dari *epsilon* dapat menyesuaikan berdasarkan input dari sistem. Setelah pemodelan pada *controller* selesai, dilakukan pemodelan *observer* untuk melakukan perbandingan antara respon pada *plant* yang diberi kesalahan dengan *plant* yang tidak diberi kesalahan. Kesalahan yang diberikan pada sistem ini berupa kesalahan pada bias dan sensitivitas dari komponen *wheel speed sensor* dengan besarnya kesalahan sebesar 10%, 50%, dan 75%. Perancangan pada *observer* dilakukan dengan representasi dari *plant* sesungguhnya yang diharapkan dapat menjadi kompensasi apabila terjadi kesalahan sensor. Perbaikan pada *observer* dilakukan apabila ketidakstabilan respon sistem tidak seperti yang ditinjau.



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian

### 3.1 Pemodelan

Pemodelan sistem dinamok pada kendaraan roda empat, umumnya dibagi menjadi tiga jenis pemodelan yaitu *quarter car*, *half car* dan *full car model*. Pada penelitian ini jenis pemodelan yang digunakan adalah jenis pendekatan *quarter car model*. *Quarter car model* adalah pemodelan yang dilakukan disalah satu roda pada mobil. Selain memodelkan kendaraan dengan pendekatan *quarter car model*, pemodelan juga meliputi pemodelan *permanent magnet synchronous motor* dan pemodelan sensor



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

**Gambar 3.2** menjelaskan bahwa input berupa setpoint masuk kedalam *controller* yang pada penelitian ini berupa sistem SMC dan FSMC lalu output *controller* tersebut berupa torsi referensi yang dihasilkan lalu masuk kedalam *coordination* yang berguna menganalisa sinyal dari *controller* untuk mengatur torsi yang akan digunakan oleh aktuator hidrolik dan motor. Aktuator hidrolik dan motor akan mengeluarkan output berupa torsi yang terukur dari aktuator hidrolik dan motor yang dimana dilanjutkan ke pemodelan kendaraan. Pada kendaraan akan mengeluarkan

kecepatan kendaraan dan kecepatan roda yang diukur oleh kedua sensor kecepatan tersebut yang nantinya akan dikalkulasikan menjadi slip rasio yang terukur.

### 3.2 Pemodelan *Quarter Car*

Dilakukan pemodelan menggunakan *Quarter Car Model* dikarenakan *plant* ini diasumsikan memiliki karakteristik dan dimensi yang sama pada keempat roda. Hal ini terjadi karena pada sistem kendali *regenerative ABS*, karakteristik gaya yang mempengaruhinya antara lain, gaya *rolling resistance* ( $F_r$ ), gaya *frictional force* ( $F_x$ ), *braking force* ( $F_b$ ).

$$F_r = c_t \cdot V \quad (3.1)$$

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.2)$$

$$F_b = \frac{T_b}{R} \quad (3.3)$$

dengan:

$C_t$  = rolling resistance(kg/s)

$V$  = Kecepatan kendaraan(m/s)

$m$  = massa satu roda (kg)

$g$  = percepatan gravitasi(m/s<sup>2</sup>)

$\mu$  = koefisien gesek permukaan jalan

$R$  = jari jari roda(m)

Sehingga pemodelan kendaraan secara translasi dapat dimodelkan persamaan 3.4 sebagai hukum Newton II.

$$-(F_x + F_f + F_b) = m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3.4)$$

Perhitungan  $\mu$  pada persamaan  $F_x$  didapatkan dari persamaan non-linear sebagai berikut.

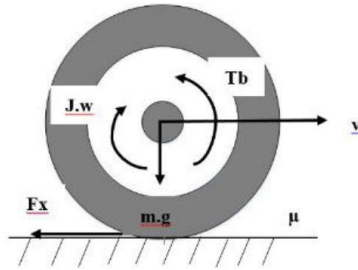
$$\mu(\lambda) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda} \quad (3.5)$$

$C_1$  adalah nilai kurva gesek,  $C_2$  merupakan bentuk kurva gesek,  $C_3$  merupakan perbedaan kurva gesek antara nilai maksimum dengan ketika  $\lambda=1$ , dan  $C_4$  merupakan nilai



karakteristik kebasahan jalan (Guo, Jian, & Lin, 2014) Nilai kurva gesek pada permukaan jalan berbeda-beda tergantung dari kondisi jalan seperti pada Tabel 3.2.

Selanjutnya dilakukan pemodelan sistem gerak roda pada sistem *regenerative* ABS. Dimana pada EV roda berfungsi menghubungkan torsi internal sistem dengan gerakan longitudinal kendaraan. Dalam memodelkan sistem roda pada *regenerative* ABS digunakan model gerak rotasi roda pada persamaan 3.4 menyatakan bahwa percepatan (perubahan kecepatan) angular roda berbanding lurus dengan total torsi yang bekerja pada suatu roda dan berbanding terbalik dengan momen inersia roda.



**Gambar 3. 3** Pemodelan Gerak Bola

$$Fx.r - Tb = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.6)$$

Dengan:

$r$  = jari-jari roda

$Tb$  = torsi pengereman

$J$  = momen inersia

$\omega$  = kecepatan angular roda

Dengan nilai parameter gaya yang bekerja pada saat pengereman antara lain:

**Tabel 3. 1** Parameter Pemodelan Mobil

Parameter	Deskripsi	Nilai
M	Massa Mobil	342,5 Kg
A	Luas Area	3,1 m <sup>2</sup>
R	Jari Jari roda	0,33 m
C <sub>r</sub>	Koefisien resistansi aerodinamik	0,3
C <sub>t</sub>	Koefisien resistansi putaran	0,01
J	Momen Inersia Roda	3,5 kg.m <sup>2</sup>
G	Gaya gravitasi	9,8 m/s <sup>2</sup>

Berdasarkan Tabel 3.1 didapat nilai parameter friksi antara roda dan jalan pada berbagai kondisi jalan. Namun pada tugas akhir ini digunakan nilai parameter friksi untuk kondisi jalan beraspal dan kering dengan parameter  $C_1$  hingga  $C_4$  yang ditunjukkan pada Tabel 3.2, kemudian dilakukan substitusi ke persamaan 3.5 untuk menghasilkan nilai gaya gesek pada setiap titik pengereman.

**Tabel 3. 2** Parameter kurva gesekan (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
C <sub>1</sub>	Nilai maksimal kurva gesekan	1.029
C <sub>2</sub>	Bentuk kurva gesekan	17.16
C <sub>3</sub>	Perbedaan kurva gesekan pada $\lambda=2$	0.523
C <sub>4</sub>	Nilai Karakteristik kebasahan	0.03

Permukaan jalan yang dilalui roda dianggap lurus dan tidak bergelombang sehingga  $\theta$  dapat dianggap  $0^\circ$  dan gaya pada  $F_s$  bernilai nol. Sehingga, gaya-gaya yang akan bekerja pada gerak kendaraan adalah gaya *rolling resistance* ( $F_f$ ), gaya pengereman pada roda ( $F_x$ ), serta gaya pengereman pada ( $F_b$ ).

### 3.2.1 Pemodelan *Permanent Synchronous Motor*

Pada pengereman sistem *regenerative* yang dilakukan motor listrik sistem kerja motor akan melakukan *switch* untuk merubah fungsi kerja motor menjadi generator. Hal tersebut akan menghasilkan torsi motor ( $T_m$ ) dan akan membebani torsi yang bekerja pada masing-masing roda, sehingga akan menghasilkan gaya pengereman.

Nilai torsi motor yang akan disalurkan pada masing-masing roda akan bergantung pada 2 parameter yaitu nilai  $k_{\omega m}$  dan  $k_{soc}$  yang dijelaskan pada persamaan 3.14.

$$K_{soc} = \begin{cases} 1 & SOC \leq 0,8 \\ 10(0,9 - SOC) & 0,8 < SOC \leq 0,9 \\ 0 & 0,9 < SOC < 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

Sedangkan faktor yang dapat mempengaruhi kecepatan sudut motor berasal dari rendahnya gaya elektrik motor (voltase) yang dihasilkan pada saat kecepatan rotasi rendah. Faktor bobot  $K_{\omega m}$  pada kecepatan sudut motor dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$K_{\omega m} = \begin{cases} 0 & \omega_m \leq 50 \text{ rad/s} \\ (\omega_m - 50)/50 & 50 < \omega_m \leq 100 \text{ rad/s} \\ 1 & 0,9 < 100 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (3.9)$$

Pada saat kerja sistem *regenerative* sudah maksimal dan masih ada *torque demand* berlebih maka torsi berlebih yang akan dibebankan pada roda saat pengereman sepenuhnya dilakukan oleh sistem hydraulic ( $T_h$ ) seperti mobil pada umumnya. Namun pada saat *torque demand* sudah mencapai nilai mampu torsi pengereman motor maka pengereman akan sepenuhnya dilakukan oleh sistem *regenerative braking*.

### 3.3 Perancangan Kontrol *Fuzzy Sliding Mode Controller*

Langkah pertama dalam membangun FSMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*). Untuk kemudian dapat merekonstruksi gain switched feedback agar

mengedalikan trajectory state plant menuju sliding surface. Persamaan (3.10) hingga (3.13) merepresentasikan model matematis dari gerak longitudinal kendaraan maupun gerak rotasi roda pada sistem ABS. Dengan adanya motor listrik maka persamaan (3.12) akan menjadi persamaan (3.13) dengan adanya torsi dari motor.

$$m \cdot a = \sum F \quad (3.10)$$

$$m \cdot \dot{v} = -4(F_x + F_a + F_f) \quad (3.11)$$

$$F_x \cdot R - T_h = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.12)$$

$$J \cdot \dot{\omega} = F_b \cdot R - T_b - T_f \quad (3.13)$$

Adapun persamaan *slip ratio* dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut:

$$\lambda_i = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (3.14)$$

Selanjutnya adalah persamaan (3.14) dideferensialkan menjadi persamaan (3.15). kemudian persamaan (3.11) dan (3.13) disubstitusi pada persamaan (3.15) dan akan menghasilkan persamaan (3.16).

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{R\dot{\omega}}{V} + \frac{R\omega \cdot \dot{V}}{V^2} \quad (3.15)$$

$$\dot{\lambda}_i = \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_b - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_b - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{mv^2} F_f \quad (3.16)$$

Pada tugas akhir ini nilai slip rasio akan dikendalikan agar tetap pada kondisi idealnya. Untuk mendapatkan nilai *slip ratio* terukur ( $\dot{\lambda}_i$ ) yang sesuai dengan *slip ratio* yang diinginkan ( $\lambda_{des}$ ), maka *slip ratio* digunakan sebagai *sliding surface* yang didefinisikan sebagai berikut:

$$S = \lambda_{des} - \lambda_i \quad (3.17)$$

Dengan fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$sgn(S) = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ -1 & S < 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

Adanya definisi dari fungsi singnum, persamaan (3.18) dapat dituliskan ke bentuk lain seperti pada persamaan (3.19) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

$$\dot{S} = -\varepsilon sgn(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.19)$$

Dengan:

$\varepsilon$  = konstanta robustness sistem

$k$  = gain maksimum output kontroler

Dimana  $\varepsilon$  (epsilon) dan  $k$  adalah positif konstan. Kemudian, Fungsi error dan turunan dari *slip ratio* disubstitusikan dengan persamaan (3.16) dan (3.17), sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut.

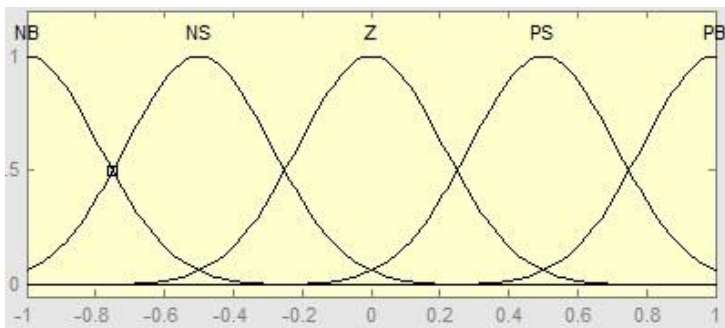
$$\lambda_{des} - \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_b - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_b - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{mv^2} F_f = -\varepsilon sgn(S) - kS \quad (3.20)$$

Karena sinyal kontrol yang digunakan pada sistem merupakan sinyal kontrol yang digunakan untuk mengatur preasure dari sebuah sistem pengereman yang nantinya menuju ke aktuator maka preasure pengereman (Pref) input digunakan sebagai masukan sinyal kontrol aktuator:

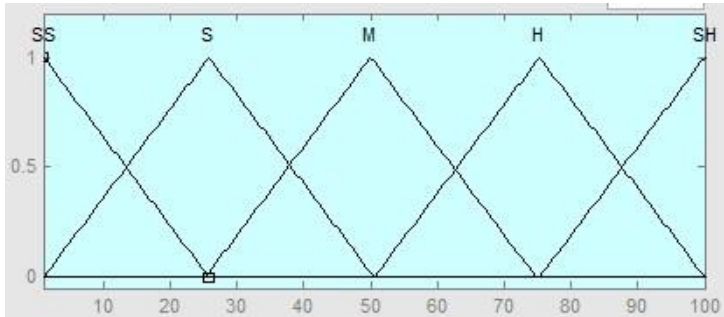
$$P_{ref} = -T_f + R \cdot F_b + \frac{J \cdot \omega}{mV} \sum F_b + \frac{J \cdot \omega \cdot V}{m} \cdot C_a + \frac{J \cdot \omega}{mV} \cdot F_f + \frac{J \cdot V}{R} [\varepsilon sgn(\lambda_{des} - \lambda_i) + k(\lambda_{des} - \lambda_i)] \quad (3.21)$$

Fuzzy digunakan pada sliding mode ini untuk menentukan nilai  $\varepsilon$  (epsilon) berdasarkan nilai  $S$  (*sliding surface*) dan  $\dot{S}$  turunan dari eror tersebut. Langkah pertama yang dilakukan adalah penentuan domain input  $S$  dan  $\dot{S}$  dengan range  $[-1,1]$  dan domain

output yang merupakan nilai epsilon  $\varepsilon$  dengan range [1,100]. Output tersebut dibagi menjadi 5 bagian *membership function* yaitu: [ SS, S, M, H, SH] yang dimana SS, S, M, H, SH merepresentasikan *super small, small, medium, high, super high*. Input Fuzzy tersebut juga dibagi menjadi 5 bagian *membership function*: [NB,NS,ZE,PS,PB] yang merepresentasikan *negative big, negative small, zero, positive small, positive big*. Bentuk dari *membership function* pada output menggunakan triangular dan kedua input menggunakan *gaussian*. Penentuan bentuk ini ditentukan dengan proses *trial and eror* untuk menemukan hasil yang terbaik. Dimana dilakukan percobaan menggunakan bentuk *trimp* untuk *membership function input* namun hasil yang diberikan memiliki nilai yang kurang baik, dan juga dilakukan pengujian menggunakan *membership function* tipe *Gaussian* untuk *output* sistem, dan hasil yang dihasilkan kurang baik. Hal ini dikarenakan sifat dari titik puncak pada penggunaan *membership function* tipe *Gaussian* dan tipe *trimp* mengalami perbedaan nilai, dimana tipe *Gaussian* memiliki beberapa nilai sedangkan *trimp* hanya satu nilai pada tiap puncaknya. Sehingga didapat hasil terbaik dengan menggunakan *membership function Gaussian type* pada *input* dan *membership function trimp type* pada output.



**Gambar 3. 4** *Membership Function Input*



**Gambar 3. 5** Membership Function Output

Fuzzy mamdani digunakan pada tugas akhir ini dengan menggunakan fungsi and pada rule base tersebut. Rule base pada fuzzy ini memiliki 25 rule base. Sumbu X menunjukan besar error yang telah di normalisasi dan sumbu Y menunjukan derajat keanggotaan pada fuzzy.

**Tabel 3. 3** Rule fuzzy logic controller

$\varepsilon$		S				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\dot{S}$	NB	SS	SS	S	M	M
	NS	SS	S	M	M	M
	ZE	S	M	M	M	M
	PS	S	M	M	S	S
	PB	M	M	H	SH	SH

Penjelasan Rule base, terdapat pada Lampiran

### 3.4 Pembuatan Observer

Pada sistem pengereman ABS, digunakan dua jenis sensor, yaitu *wheel speed sensor* dan *vehicle speed sensor*. Kedua sensor tersebut menghasilkan nilai *slip ratio* dari kendaraan. Dengan begitu apabila terdapat kesalahan pada salah satu atau kedua sensor tersebut maka akan memberikan akibat berupa memburuknya sistem kontrol yang digunakan.

Pada penelitian ini observer mengestimasi kesalahan pada *vehicle speed* yang mengacu pada persamaan (3.4). Agar kesalahan

sensor vehicle speed  $f_{sv}$  muncul di persamaan state, maka digunakan augmented state seperti pada:

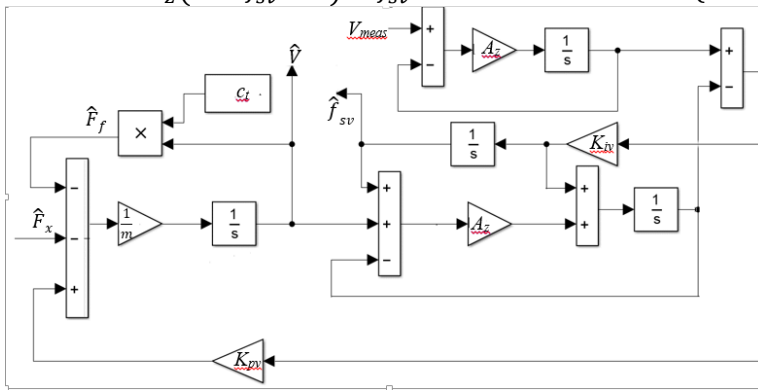
$$\dot{z} = A_z[V_{meas} - z] \tag{3.22}$$

Selanjutnya observer dibangun berbasis model augmented state space dengan struktur PI seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4** persamaan observer yang berlaku adalah:

$$\dot{\hat{V}} = \frac{1}{m}(-c_t \hat{V} - \hat{F}_x + K_{pv}(z - \hat{z})) \tag{3.23}$$

$$\dot{\hat{f}}_{sv} = K_{iv}(z - \hat{z}) \tag{3.24}$$

$$\dot{\hat{z}} = A_z(\hat{V} + \hat{f}_{sv} - z) + \hat{f}_{sv} \tag{3.25}$$



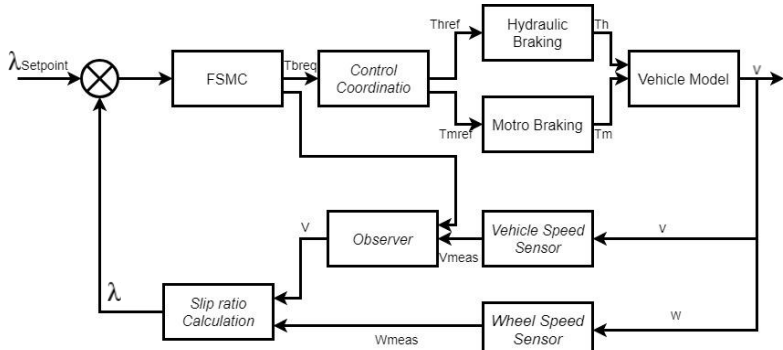
**Gambar 3. 6** Observer

### 3.5 Pengujian Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC) Untuk Kesalahan Sensor

Pengujian sistem AFTC bertujuan agar dapat mengetahui sistem yang telah dirancang mampu untuk mengatasi dan mengkompensasi kesalahan bias dan sensitivitas pada sensor. Kesalahan yang terjadi pada sensor berupa kesalahan bias dan sensitivitas dengan nilai 10%, 50%, dan 75%.



### 3.6 Sistem Keseluruhan Penelitian



Gambar 3. 7 Diagram Blok Penelitian

**Gambar 3.7** merupakan diagram blok yang digunakan pada penelitian Tugas akhir kali ini. Dimana pada diagram blok dijelaskan input dari sistem berupa *slip ratio setpoint* ( $\lambda$ ) yang kemudian akan berperan sebagai *input* dari *controller*. *Controller* yang digunakan adalah tipe *fuzzy sliding mode control* (FSMC) dimana penambahan *fuzzy* pada *sliding mode control* dimaksudkan untuk memaksimalkan kinerja dari *controller* itu sendiri. Setelah dari *controller* akan dihasilkan *Torsi* ( $T_{breq}$ ) untuk dijadikan *input* oleh *control coordination* dimana keluarannya berupa torsi motor referensi ( $T_{mref}$ ) dan torsi hidrolik referensi ( $T_{href}$ ) untuk kemudian menghasilkan torsi motor ( $T_m$ ) dan torsi hidrolik ( $T_h$ ) yang digunakan menggerakkan aktuator yang bekerja pada *plant*. Pada sistem ini juga terdapat *feedback* dimana terdapat sensor yang digunakan untuk melakukan pembacaan kecepatan berupa sensor kecepatan kendaraan ( $v$ ) dan sensor kecepatan roda ( $w$ ) yang digunakan sekaligus tempat diberikannya kesalahan. Kesalahan yang telah diberikan pada sensor kecepatan roda, untuk kemudian akan masuk ke *observer* sebagai ( $v_{meas}$ ) untuk kemudian dilakukan pengestimasi kesalahan dan perbaikan kesalahan untuk kemudian digabungkan kembali dengan hasil dari sensor kecepatan roda pada *slip ratio calculation*. Kemudian hasilnya akan digabungkan kembali dengan *slip ratio* ( $\lambda$ ) dari input. Penggabungan kembali ini dilakukan untuk membandingkan

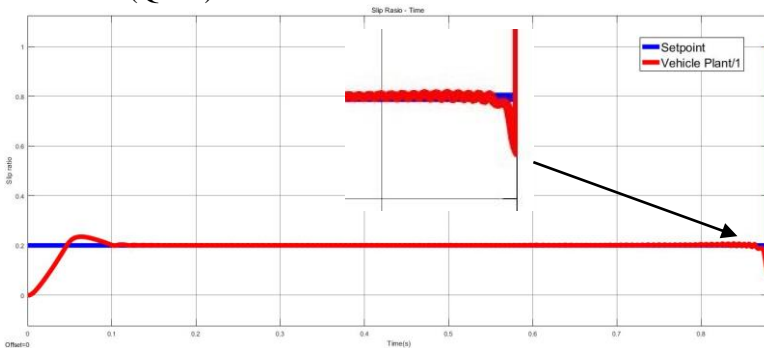
apakah *AFTC* dapat memperbaiki kesalahan yang diberikan pada sensor dari sistem ini.

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab iv dijelaskan tentang hasil dari perancangan *Fuzzy Sliding Mode Fault Tolerant Control* pada sistem pengendalian torsi pengereman untuk *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan menggunakan *Matlab R2016a* yang selanjutnya dilakukan uji performansi sistem antara *Sliding mode controller* dan *Fuzzy sliding mode controller*. Selanjutnya pengujian AFTC yang telah dirancang pada sistem untuk mengetahui apakah AFTC dapat mengakomodasi kesalahan bias dan sensitivitas pada sensor.

### 4.1 Pengujian Menggunakan *Sliding Mode Controller*

Uji *close loop* pada simulasi dibuat dengan menyerupai gambar diagram blok melalui *simulink* perangkat lunak *Matlab 2016a*. Pada pengujian ini dilakukan sebagai peninjau untuk respon pengendalian dari *slip ratio* dapat stabil di *setpoint*. *controller* (SMC) dengan nilai  $\varepsilon = 100, k = 0.1$  ke model *quarter car model* (QCM).



**Gambar 4. 1** Respon *slip ratio* SMC tanpa kesalahan

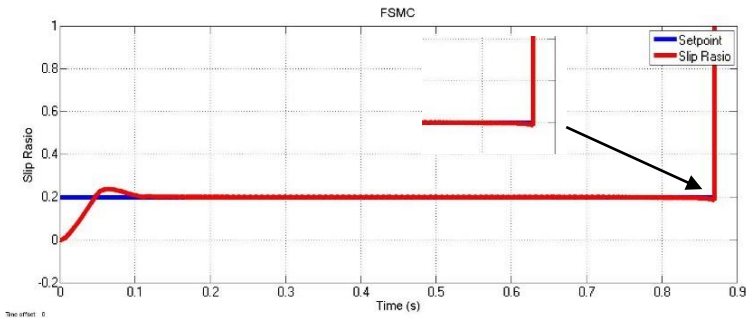
**Tabel 4. 1** Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji *close loop SMC*

Parameter Performansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	17.5%
<i>Settling Time</i>	0.15s
<i>Error Steady State</i>	1%

Hasil grafik dari **Gambar 4.1** menunjukkan bahwa hasil respon berada disekitar *setpoint* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada kisaran detik ke 0.8. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria performansi kontrol dari *setpoint* yaitu 0,2 dan respon variabel stabil disekitar *setpoint*. Pada **Tabel 4.1** menunjukkan performansi sistem dari sistem pengendalian.

#### 4.2 Pengujian Menggunakan *Fuzzy Sliding Mode Controller*

Pengujian ini sama dengan pengujian pada sebelumnya menggunakan *simulink* perangkat lunak *Matlab 2016a* dengan menggunakan fuzzy untuk mengurangi fenomena chattering tersebut.



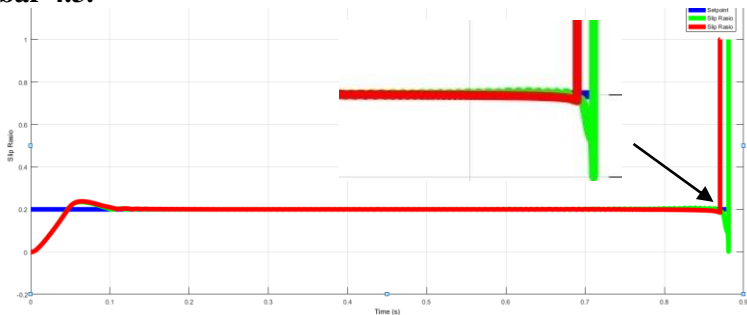
**Gambar 4. 2** Respon *slip ratio FSMC* tanpa kesalahan

Respon selanjutnya yang ditinjau adalah kecepatan kendaraan dan roda. Pada sistem *FSMC* faktor kecepatan kendaraan dan roda merupakan dua hal yang penting. Pada perbandingan dari kecepatan kendaraan dan roda, grafik yang dihasilkan mengalami sedikit osilasi pada angka 0,2. Hal ini menunjukkan sistem dengan ditambahkan *fuzzy* masih menyentuh *setpoint*.

**Tabel 4. 2** Parameter performansi sistem pengendalian untuk *FSMC*

Parameter Perfomansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	18.6%
<i>Settling Time</i>	0.18s
<i>Error Steady State</i>	0.4%

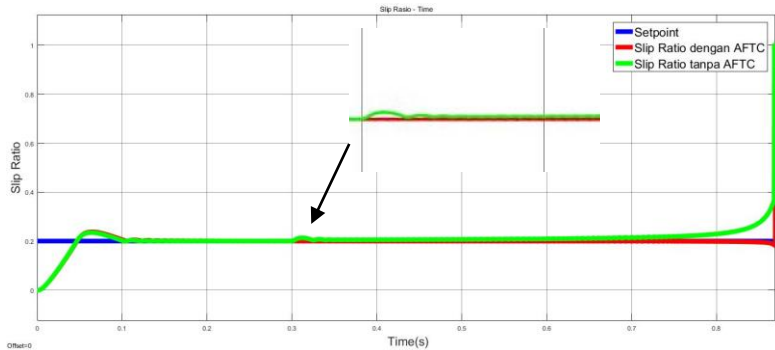
Penambahan *fuzzy* pada *sliding mode control* berhasil meningkatkan nilai *maximum overshoot* dari sistem sebesar 1,1% dan memberikan efek berupa berkurangnya *chattering* yang terjadi ketika sistem akan berhenti. Namun penambahan *fuzzy* berdampak pula pada bertambahnya nilai *settling time* dari sistem. Perbedaan laju pengereman pada sistem SMC dan FSMC dapat ditinjau pada **Gambar 4.3**.



**Gambar 4. 3** Respon *slip ratio* gabungan

### 4.3 Kesalahan Bias 10%

Tahap ini dilakukan simulasi agar dapat menganalisa respon yang telah diberi kesalahan berupa bias sebesar 10% yang menggunakan AFTC dan kemudian dibandingkan dengan yang tidak menggunakan AFTC, ditunjukkan pada **Gambar 4.4**.

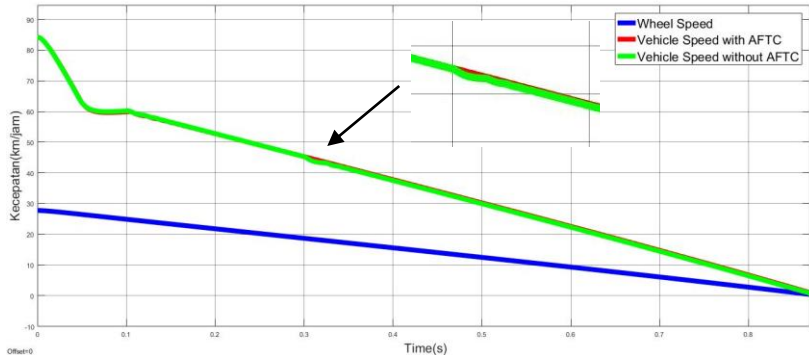


**Gambar 4. 4** Respon *Slip Ratio* Kesalahan Bias 10%

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa pada penggunaan FSMC dapat mengurangi *chattering* yang terjadi ketika sistem akan berhenti, sedangkan pada sistem SMC grafik mengalami *chattering* dahulu sebelum sistem mengalami berhenti.

**Tabel 4. 3** Parameter performansi sistem pengendalian *FSMC* bias 10%

Parameter Perfomansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	18.85%
<i>Settling Time</i>	0.215s
<i>Error Steady State</i>	0.5%

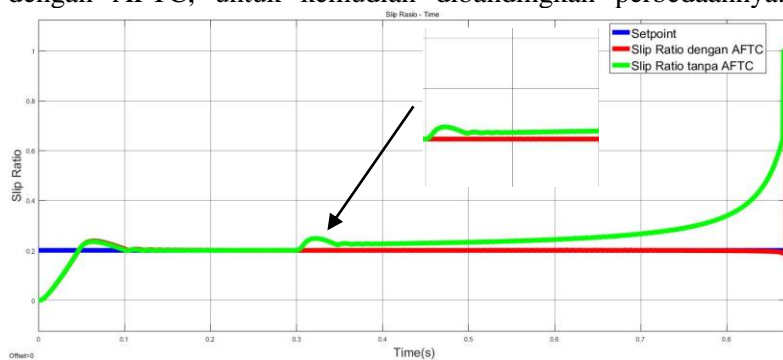


**Gambar 4. 5** Laju Pengereman Kesalahan Bias 10%

Laju pengereman antara dengan menggunakan AFTC dan tidak menggunakan AFTC terdapat sedikit perbedaan seperti pada detik ke 0.3 terjadi perbedaan kecepatan akibat dari penambahan kesalahan bias yang tidak diakomodir oleh AFTC. Namun kemudian kecepatannya kembali sama seperti sistem yang menggunakan AFTC.

#### 4.4 Kesalahan Bias 50%

Pada tahap ini dilakukan penganalisaan sistem yang diberikan kesalahan sebesar 50% dengan menggunakan AFTC dan tidak dengan AFTC, untuk kemudian dibandingkan perbedaannya.



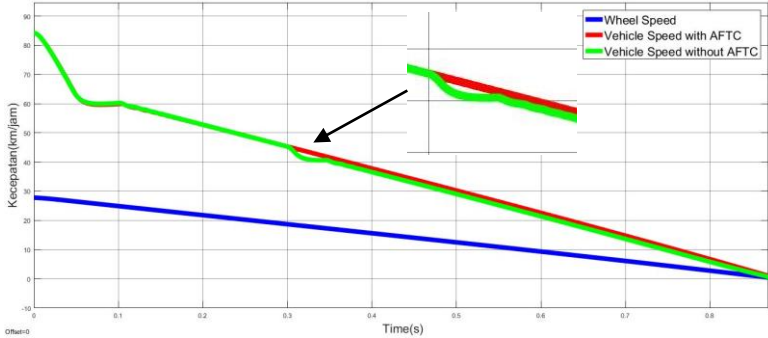
**Gambar 4. 6** Respon *Slip Ratio* Kesalahan Bias 50%

Penambahan kesalahan berupa bias sebesar 50% berakibat pada berubahnya respon dari *slip ratio* mulai dari detik ke 0.3 dan kemudian mengalami kenaikan sebelum sistem berhenti. Hal ini akibat kesalahan berupa bias sebesar 50% yang mengakibatkan sensor mengalami kesalahan pembacaan sehingga *slip ratio* dari sistem mengalami perubahan menjadi tidak pada *set point*.

**Tabel 4. 4** Parameter performansi sistem pengendalian *FSMC* bias 50%

Parameter Performansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	18.65%
<i>Settling Time</i>	0.22s
<i>Error Steady State</i>	0.5%

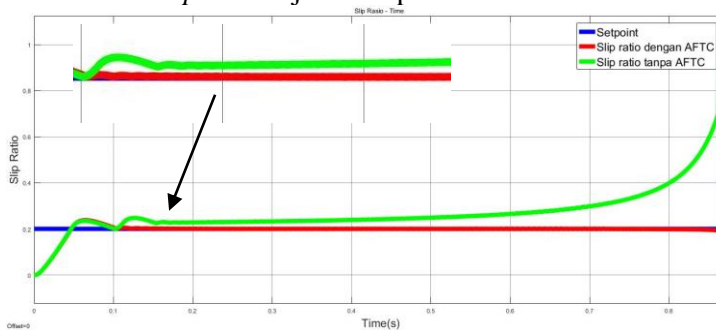
Sedangkan untuk kecepatan pengereman dari sistem yang menggunakan AFTC dan tidak terdapat perbedaan pada detik ke 0.3 dan kemudian kecepatannya mengalami perbedaan seterusnya hingga sistem berhenti.



**Gambar 4.7** Laju pengereman kesalahan bias 50%

#### 4.5 Kesalahan Bias 75%

Selanjutnya dilakukan penganalisaan berupa pemberian kesalahan bias sebesar 75% pada sistem yang menggunakan AFTC dan tidak menggunakan AFTC untuk kemudian dibandingkan besaran dari *slip ratio* dijelaskan pada **Gambar 4.8**



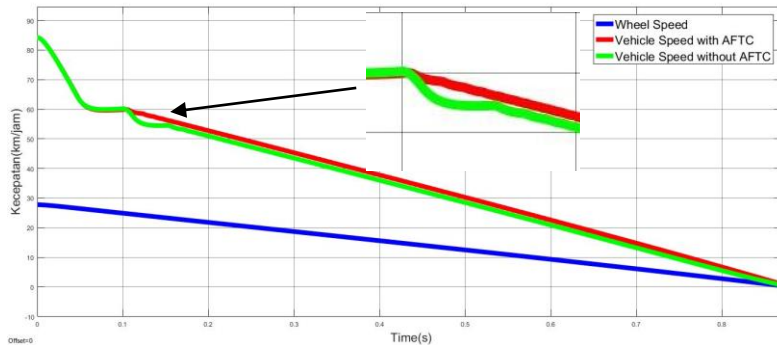
**Gambar 4.8** Respon *slip ratio* kesalahan bias 75%



**Tabel 4. 5** Parameter performansi sistem pengendalian *FSMC* bias 75%

Parameter Performansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	18.5%
<i>Settling Time</i>	0.224s
<i>Error Steady State</i>	0.5%

Pada kesalahan bias sebesar 75% *slip ratio* dari respon sistem yang menggunakan AFTC dan tidak, dapat dilihat perbedaannya. Pada sistem yang tidak menggunakan AFTC respon akan mengalami kenaikan pada detik ke 0.1 kemudian respon *slip ratio* dari sistem akan mengalami perubahan hingga sistem berhenti, hal ini dikarenakan bias yang diberikan pada sistem tidak terakomodir. Sehingga kesalahan bias yang diberikan memberikan efek berupa berubahnya nilai *slip ratio* dari sistem. Lebih lanjutnya perbedaan pada sistem akan dijelaskan berdasarkan kecepatan dari roda.

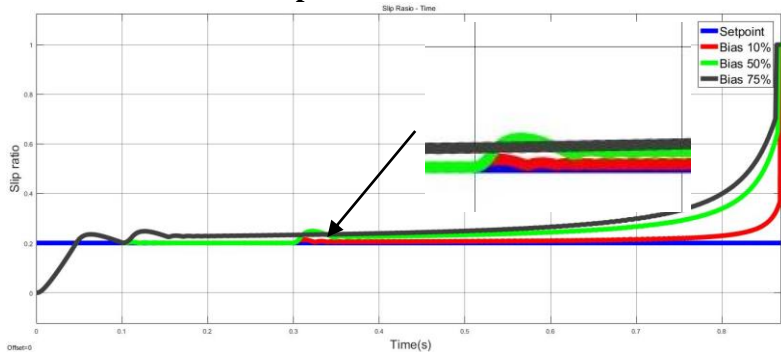


**Gambar 4. 9** Laju pengereman kesalahan bias 75%

Pada laju pengereman dengan pemberian kesalahan berupa bias sebesar 75% didapat bahwa ketika detik ke 0.1 pembacaan kecepatan pada sensor mengalami perubahan yang berupa perbedaan pembacaan kecepatan dari sistem yang

menghasilkan nilai lebih rendah dari seharusnya. Kesalahan pembacaan ini bertahan hingga sistem mengalami pemberhentian. Sedangkan pada sistem yang menggunakan AFTC, pembacaan kecepatan dari *plant* berhasil dipertahankan seperti pada kondisi aslinya.

#### 4.6 Kesalahan Bias tanpa AFTC

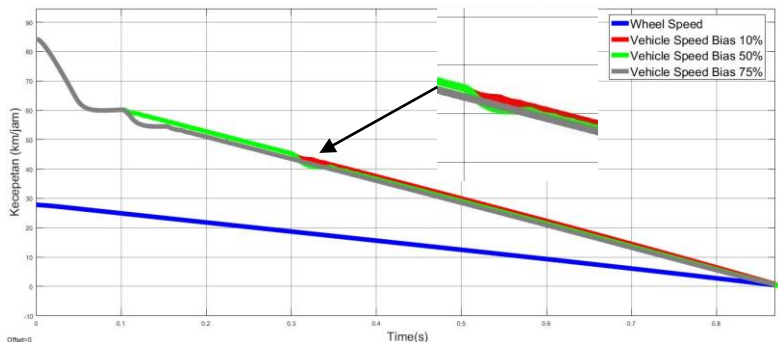


**Gambar 4. 10** Respon *slip ratio* kesalahan bias gabungan

**Gambar 4.10** menjelaskan perubahan hasil pembacaan dari *slip ratio* pada peningkatan kesalahan bias. Didapat bahwa semakin besar penambahan kesalahan berupa bias pada sensor kecepatan, maka hasil respon dari *slip ratio* mengalami perubahan yang semakin terlihat terutama pada nilai *error steady state*. Hal ini terjadi karena besarnya nilai *error steady state* berbanding lurus dengan besarnya kesalahan dari bias yang diberikan pada sensor. Semakin besar nilai bias yang diberikan, semakin besar pula nilai *error steady state* pada sistem. Perubahan pada grafik respon *slip ratio* merupakan imbas dari berubahnya pembacaan kecepatan roda oleh sensor. Perubahan pembacaan kecepatan kendaraan dijelaskan lebih lanjut pada **Gambar 4.11**.

**Tabel 4. 6** Performansi Respon sistem Kesalahan gabungan

Jenis	Bias 10%	Bias 50%	Bias 75%
<i>Maximum Overshoot</i>	17,4419	17,442	17,443
Kenaikan pada detik Ke-	0.3s	0.3s	0.1s

**Gambar 4. 11** Laju pengereman kesalahan bias gabungan

Pada **Gambar 4.11** terlihat bahwa ketika diberikan kesalahan bias, pembacaan kecepatan yang dilakukan oleh sensor kecepatan kendaraan cenderung mengalami perubahan yang nilainya berbanding lurus dengan besarnya bias yang diberikan. Pada pemberian bias sebesar 10% grafik laju pengereman pada kendaraan cenderung mengalami perubahan yang cukup sedikit dan tidak terlalu terlihat. Namun, seiring dengan bertambahnya nilai pemberian kesalahan bias, perbedaan pembacaan dari kecepatan kendaraan mengalami peningkatan sehingga kecepatan kendaraan yang terbaca memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan kendaraan pada kondisi nyata.



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan analisa data yang telah dikerjakan maka dapat ditarik kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Perancangan *fuzzy sliding mode controller* berhasil mengurangi fenomena *chattering* yang terjadi pada penggunaan *sliding mode controller*.
2. Selain mengurangi *chattering* penggunaan *fuzzy sliding mode controller* juga memberikan perubahan parameter respon dari *slip ratio* seperti *maximum overshoot* yang bertambah 1%, *settling time* bertambah 0.06s dan juga nilai dari *error steady state* yang berkurang dari 1% menjadi sekitar 0.5%
3. AFTC dapat memperbaiki kesalahan yang terjadi pada sensor berupa bias sebesar 10%, 50%, dan 75%.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan untuk pengembangan selanjutnya pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan dainjurkan menggunakan pemodelan *full car model* agar kondisi yang dimodelkan lebih *real*.
2. Simulasi dijalankan menggunakan laptop atau computer dengan spesifikasi yang tinggi untuk meminimalisir waktu pengerjaan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Chen, C. K., & Wang, Y. C. (1996). Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System. *Fuzzy Systems Symposium* (pp. 67-72). Kenting, Taiwan: IEEE.
- Freescale. (n.d.). *freescale.com*. Retrieved from Permanent Magnet Synchronous Motor Control: [freescale.com](http://freescale.com)
- 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.
- 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.
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2016). 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. *Praise Worthy Prize*, 375-385.
- Jiang, J., & Yu, X. (2012). Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and. 60–72.
- Jitesh, S. (2014). ANTILOCK BRAKING SYSTEM (ABS).
- Lee, Y., & Zak, S. H. (2002). Designing a Genetic Neural Fuzzy Antilock-Brake-System Controller. *Transaction on Evolutionary Computation* (pp. 198-211). IEEE.
- Lingzhi, Y., Chengdong, Z., & Genping, W. (2017). Research of Self-Tuning PID for PMSM Vector Control based on Improved KMTOA. *International Journal of Intelligent Systems and Applications(IJISA)*, 60-67.

- Liu, J., & Wang, X. (2012). *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Lunze, J., & H, R. J. (2008). Reconfigurable Fault-Tolerant Control: A Tutorial Introduction. *European Journal of Control*, 359-386.
- Maliye, S. (2014). REGENERATIVE AND ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM IN ELECTRIC VEHICLES.
- Matsushita, T., & dkk. (1994). ABS Control Unit.
- Nasir, A. N., Ismail, R. M., & Ahmad, M. A. (2010). Performance Comparison between Sliding Mode Control (SMC) and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System. *International Journal of Computer, Electricalm Automation, Control and Information Engineering*, 1-6.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering: Fifth Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Peng, D., Zhang, Y., Yin, C. L., & Zhang, J. W. (2008). Combined Control of Regenerative Braking and Antilock Braking System for Hybrid Electric vehicles.
- Pinandhito, M. R. (2018). PERANCANGAN ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM PADA MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR.
- Rahmani, M., Ghanbari, A., & Ettefagh, M. M. (2016). Robust Adaptive Control of a Bioinspired Robot Manipulator Using Bat Algorithm. *Expert Systems with Applications* 56, 164-176.
- Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-



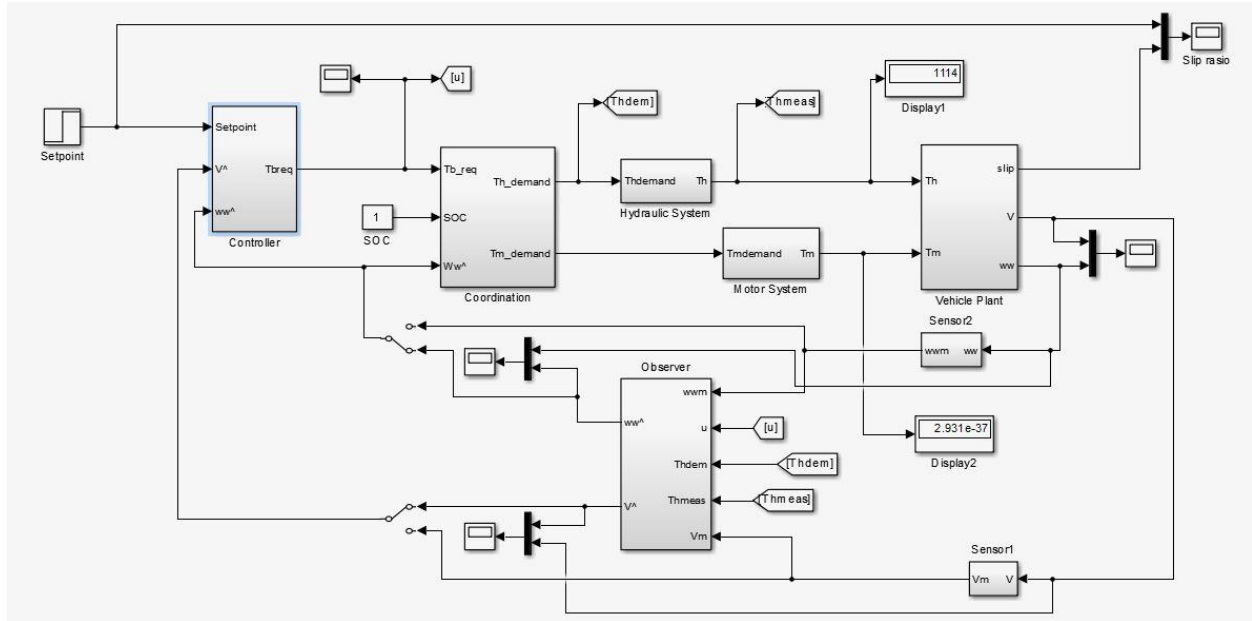
lock Braking System. *Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 944–948). Istanbul, Turkey: IEEE.

yao, j., zhong, z., & sun, z. (2006). A Fuzzy Logic Based Regenerative Braking Regulation for a fuel cell bus.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

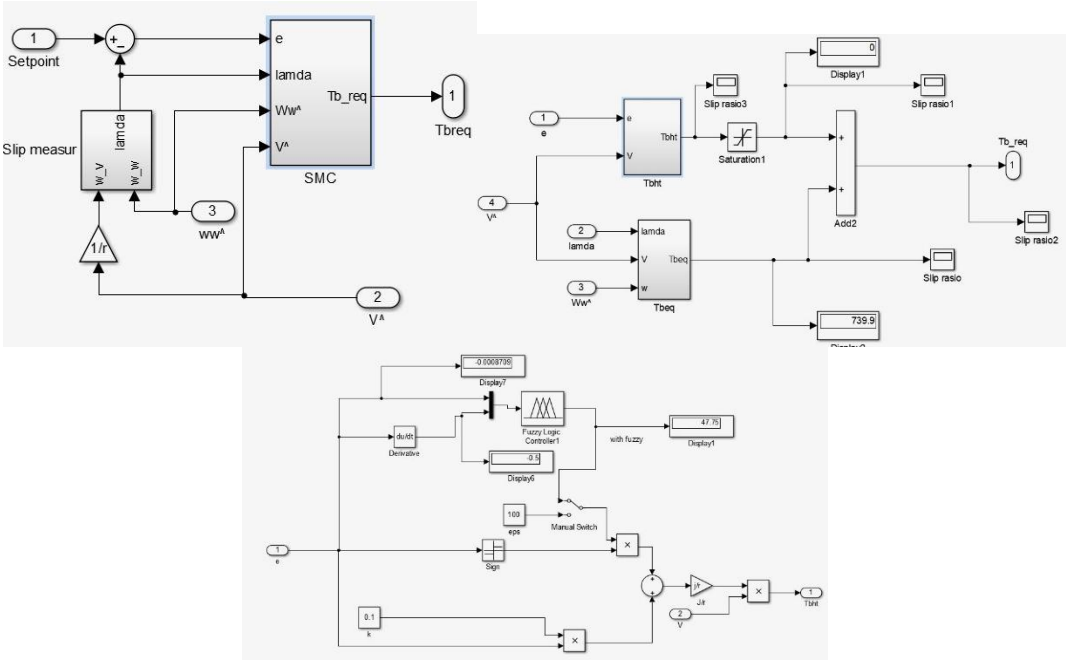
## LAMPIRAN

### SIMULINK MATLAB R2016a GENERAL *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*



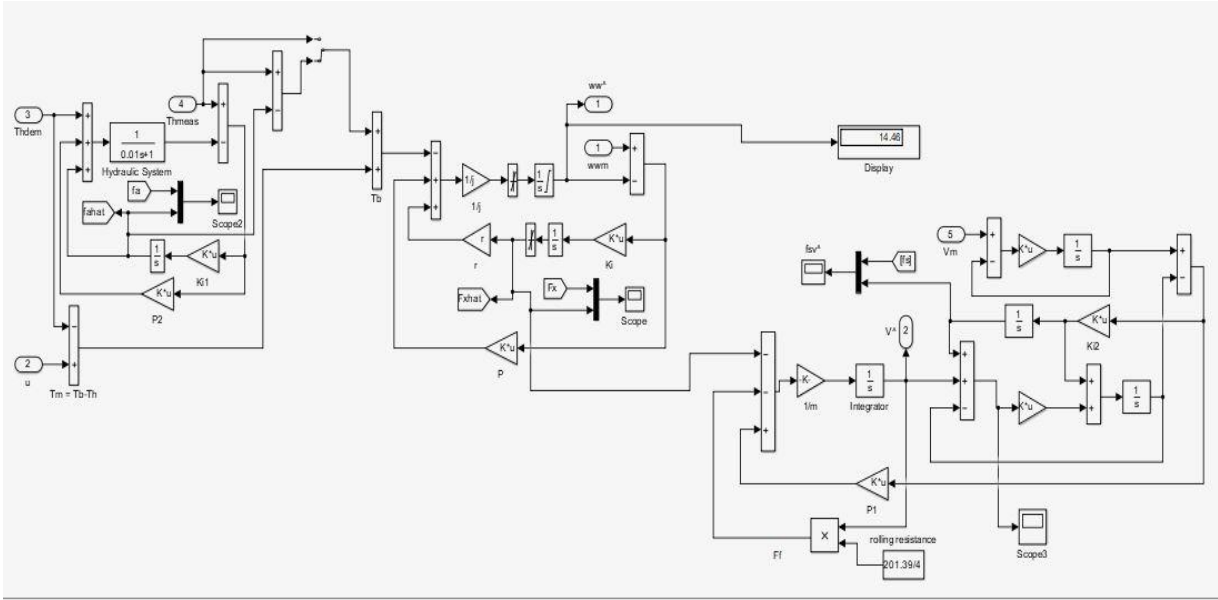
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# SIMULINK MATLAB R2016a FUZZY SLIDING MODE CONTROLLER (FSMC)



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

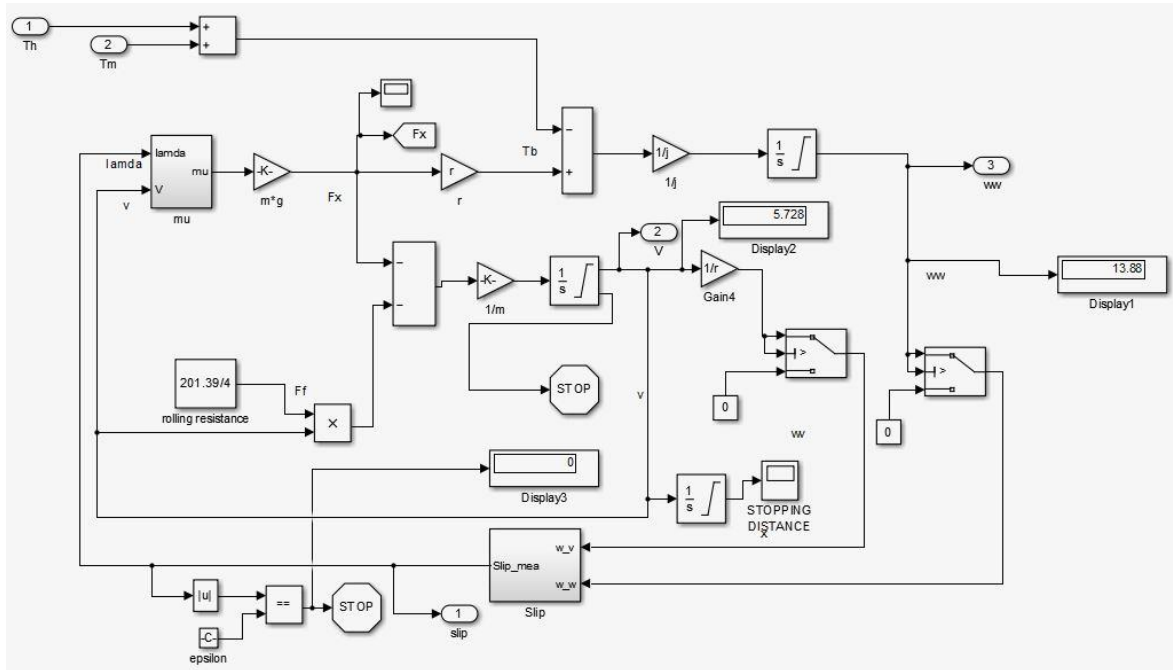
SIMULINK MATLAB R2016a *OBSERVER REGENERATIVE ABS*



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

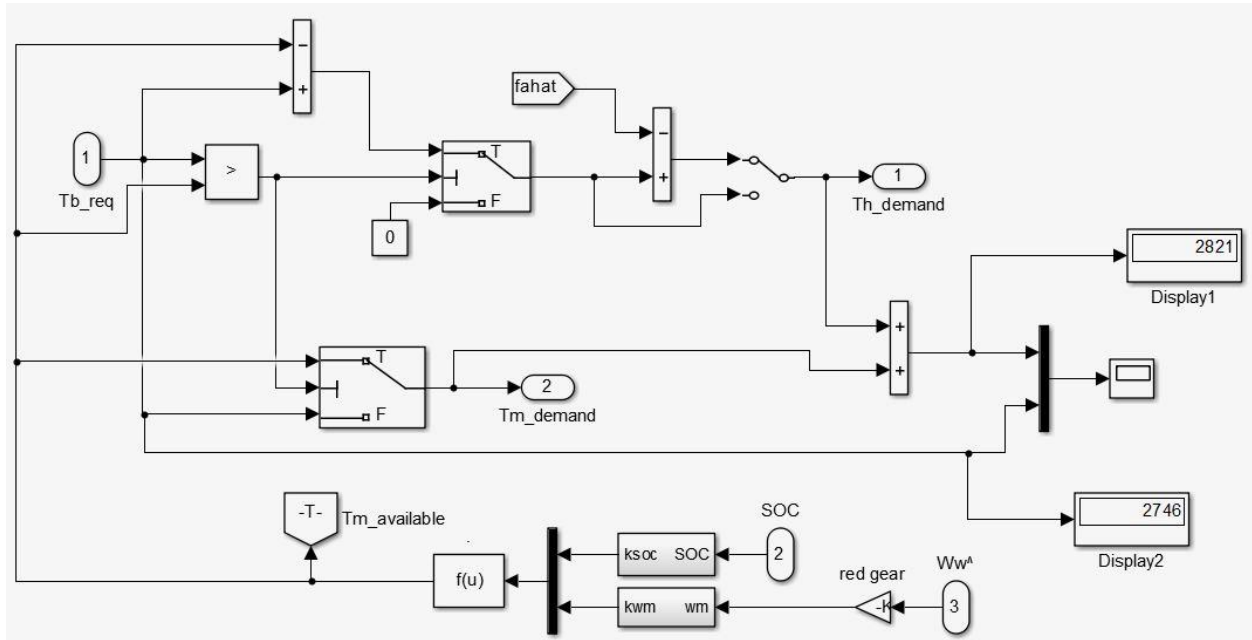


# SIMULINK MATLAB R2016a *VEHICLE PLAN REGENERATIVE ABS*



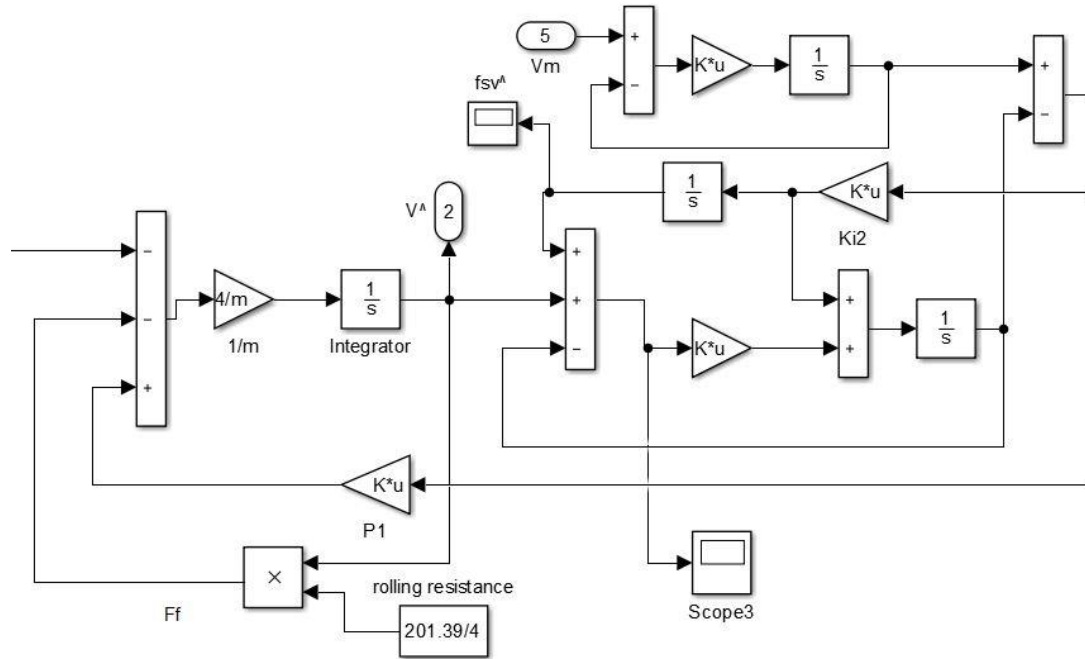
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# SIMULINK MATLAB R2016a COORDINATION REGENERATIVE ABS



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# SIMULINK MATLAB R2016a FAULT VEHICLE SPEED REGENERATIVE ABS



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

LISTING PROGRAM MATLAB R2014a m.file  
*REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*

```
clc;  
clear;  
  
m = 342.5;  
r = 0.33;  
Af = 3.1;  
cr = 0.3;  
ct = 0.01;  
j = 3.5;  
g = 9.8;  
Rr = 201.39/4;  
c1 = 1.029;  
c2 = 17.16;  
c3 = 0.523;  
c4 = 0.03;  
ctrl = 1;
```

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Tabel Fungsi Rule Base Fuzzy**

NO	RULE
1	If (S is NB) and ( $\dot{S}$ is NB) then (e is SS)
2	If (S is NB) and ( $\dot{S}$ is NS) then (e is SS)
3	If (S is NB) and ( $\dot{S}$ is ZE) then (e is S)
4	If (S is NB) and ( $\dot{S}$ is PS) then (e is S)
5	If (S is NB) and ( $\dot{S}$ is PB) then (e is M)
6	If (S is NS) and ( $\dot{S}$ is NB) then (e is SS)
7	If (S is NS) and ( $\dot{S}$ is NS) then (e is S)
8	If (S is NS) and ( $\dot{S}$ is ZE) then (e is M)
9	If (S is NS) and ( $\dot{S}$ is PS) then (e is M)
10	If (S is NS) and ( $\dot{S}$ is PB) then (e is M)
11	If (S is ZE) and ( $\dot{S}$ is NB) then (e is S)
12	If (S is ZE) and ( $\dot{S}$ is NS) then (e is M)
13	If (S is ZE) and ( $\dot{S}$ is ZE) then (e is M)
14	If (S is ZE) and ( $\dot{S}$ is PS) then (e is M)
15	If (S is ZE) and ( $\dot{S}$ is PB) then (e is H)

16	If (S is PS) and ( $\dot{S}$ is NB) then (e is M)
17	If (S is PS) and ( $\dot{S}$ is NS) then (e is M)
18	If (S is PS) and ( $\dot{S}$ is ZE) then (e is M)
19	If (S is PS) and ( $\dot{S}$ is PS) then (e is SH)
20	If (S is PS) and ( $\dot{S}$ is PB) then (e is SH)
21	If (S is PB) and ( $\dot{S}$ is NB) then (e is M)
22	If (S is PB) and ( $\dot{S}$ is NS) then (e is M)
23	If (S is PB) and ( $\dot{S}$ is ZE) then (e is M)
24	If (S is PB) and ( $\dot{S}$ is PS) then (e is H)
25	If (S is PB) and ( $\dot{S}$ is PB) then (e is SH)

## 5 BIODATA PENULIS



Nama penulis Kayi Mahdy Yattaqi dilahirkan di Bangkalan, tanggal 14 Juli 1996. Saat ini penulis tinggal di Bekasi. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDIT Al Marjan Bekasi pada tahun 2008, pendidikan di SMPN 81 Jakarta pada tahun 2011, pendidikan di SMAN 67 Jakarta pada tahun 2014. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2014. Semasa perkuliahan, Penulis aktif di organisasi SPE ITS SC dan juga sebagai asisten laboratorium Rekayasa Fotonika. Pada bulan Januari 2019 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan *Fuzzy Sliding Mode Fault Tolerant Control* pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* Mobil Listrik Dengan Kesalahan Pada Sensor.** Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui email: [\*kayimahdi@gmail.com\*](mailto:kayimahdi@gmail.com)