



TUGAS AKHIR - TF 181801

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

AHMAD HAFIDH HIDAYATULLAH
NRP. 02311440000107

Dosen Pembimbing :
Ir. Ya'umar, M.T.
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

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

AHMAD HAFIDH HIDAYATULLAH
NRP. 02311440000107

Supervisors :
Ir. Ya'umar, M.T.
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

Pernyataan Bebas Plagiarisme
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Ahmad Hafidh Hidayatullah
NRP : 02311440000107
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 Aktuator" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-
benarnya.

Surabaya, 25 Januari 2019
Yang membuat pernyataan,



Ahmad Hafidh Hidayatullah
NRP. 02311440000107

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Ahmad Hafidh Hidayatullah
NRP. 02311440000107

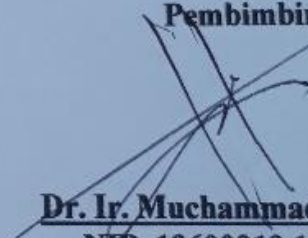
Surabaya, 25 Januari 2019

Menyetujui,
Pembimbing I



Ir. Ya'umar, M.T.
NIP. 19540406 198103 1 003

Menyetujui,
Pembimbing II



Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.
NIP. 19600919 198902 1 001

Mengetahui
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



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

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

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

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

AHMAD HAFIDH HIDAYATULLAH
NRP. 0231144000107

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Ya'umar, M.T. (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T. (Pembimbing II)
3. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. (Ketua Penguji)
4. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Penguji I)
5. Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, S.T., M.T. (Penguji II)

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 AKTUATOR

Nama : Ahmad Hafidh Hidayatullah
NRP : 02311440000107
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yau'mar, M.T.
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

Abstrak

Faktor keamanan (*safety*) merupakan peran yang sangat penting pada mobil listrik, dengan berkembangnya teknologi diciptakan *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS). Sistem kontrol yang bekerja pada aktuator *regenerative* ABS memiliki performansi dan kehandalan sehingga dapat mengurangi fenomena *chattering* dan menoleransi dari kesalahan yang dapat menyebabkan slip. Metode yang dapat menoleransi kegagalan pada aktuator hidrolis salah satunya adalah *Active Fault Tolerant Control* (AFTC). Perancangan sistem dengan AFTC pada *Fuzzy Sliding Mode Controller* (FSMC) dan *Sliding Mode Controller* (SMC) sebagai pengendali sistem pada *regenerative Anti-lock Braking System* mampu mengkompensasi kesalahan bias yang terjadi pada detik 0.2 dengan besaran 30%, 50%, dan 75%. Pada percobaan SMC dengan parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* berturut-turut sebesar 17%; 0.158 detik; dan 1%. Sedangkan pada percobaan dengan fuzzy mendapatkan parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* berturut-turut sebesar 18.8%; 0.212 detik; dan 0.4%. Pada pengujian kesalahan 50% dan 75% SMC ditemukan penurunan slip rasio yang merupakan efek dari roda tergelicir dan tidak langsung berhenti. dari kesalahan yang diberikan setangkan pada FSMC tidak ditemukan dampak

daridiberikan kesalahan, sehingga FSMC lebih baik dalam mengakomodasi kesalahan.

Kata Kunci: *Regenerative Anti-Lock Braking System, Active Fault Tolerant Control, Sliding Mode Controller, Fuzzy Sliding Mode Controller, Aktuator Hidraulik*

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

Name : *Ahmad Hafidh Hidayatullah*
NRP : *02311440000107*
Department : *Teknik Fisika FTI-ITS*
Supervisors : *Ir. Yau'mar, M.T.*
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

Abstract

Safety factor is a very important role in electric cars, with the development of technology Regenerative Anti-Lock Braking System (ABS) was created. The control system that works on regenerative ABS actuators has performance and reliability so that it can reduce chattering phenomena and tolerate errors that can cause slippage. One method that can tolerate failure in hydraulic actuators is Active Fault Tolerant Control (AFTC). Designing systems with AFTC on Fuzzy Sliding Mode Controller (FSMC) and Sliding Mode Controller (SMC) as system controllers on regenerative Anti-lock Braking System is able to compensate for bias errors that occur in 0.2 seconds with 30%, 50%, and 75%. In the SMC experiment with performance parameters from maximum overshoot, settling time, and steady state error, respectively 17%; 0.158seconds; and 1%. While in fuzzy experiments get performance parameters from maximum overshoot, settling time, and error steady state respectively at 18.8%; 0.212 seconds; and 0.4%. At the test of 50% error and 75% SMC there was a decrease in slip ratio which was the effect of the wheel slipping and did not immediately stop. from the error given to the FSMC there was no impact found in the error, so the FSMC was better at accommodating errors.

Keywords : *Regenerative Anti-Lock Braking System, Active Fault Tolerant Control, Sliding Mode Controller, Fuzzy Sliding Mode Controller, Hydraulic Actuator*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul

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

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Ir. Ya'umar, M.T. dan Bapak Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Bapak Detak Yan Pratama, S.T. M.Sc selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Harjito Hadi Wiyoso dan Ibu Sundusiyah). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materil yang telah diberikan.
6. Teman spesial saya Iha yang sudah selalu mendukung saya dan memberikan semangat.
7. Seluruh teman Tugas Akhir Kayi, Faris, Deden, Sovi terima kasih untuk semuanya.

8. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2014, terima kasih untuk semuanya.
9. Teman-teman saya yang sudah mau menjawab setiap pertanyaan saya : Senko, Rifqi
10. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
11. Teman – teman NBF : yusril, Senko, Mbah, Dio, Husain, Ferdi, Iqbul, Pandu, Faiz, Haryo, Kayi
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 26 Desember 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
<i>Title Page</i>	ii
Pernyataan Bebas Plagiarisme.....	v
Lembar Pengesahan I	vii
Lembar Pengesahan II.....	ix
Abstrak	xi
Abstract	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	5
2.1 <i>Anti-Lock Braking System (ABS)</i>	5
2.2 <i>Sliding Mode Control (SMC)</i>	14
2.3 <i>Fuzzy Sliding mode control (FSMC)</i>	17
2.4 <i>Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC)</i>	19
2.5 <i>Observer State</i>	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 <i>Pemodelan Regenerative antilock-braking system</i>	30
3.2 <i>Pembuatan Sistem Kontrol Fuzzy Sliding Mode Controller (FSMC)</i>	36
3.3 <i>Perancangan Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator</i>	41
3.4 <i>Pembuatan Observer</i>	42
3.5 <i>Pengujian Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator</i>	43
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	45
4.1 <i>Pengujian Menggunakan Sliding Mode Controller</i>	45

4.2 Pengujian Menggunakan Fuzzy Sliding Mode Controller	47
4.3 Uji kesalahan Aktuator	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan slip rasio roda.....	6
Gambar 2.2	Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS	8
Gambar 2.3	Komponen ABS dengan rem hidraulik.....	9
Gambar 2.4	Gambaran umum pengendalian pada ABS.....	10
Gambar 2.5	ABS <i>modulator valve</i>	11
Gambar 2.6	Sistem pengereman hidrolik	12
Gambar 2.7	Kurva torsi-kecepatan dan pemetaan efisiensi dari motor.....	13
Gambar 2.8	Diagram alir pada sistem pengereman <i>regenerative</i> di mobil listrik	14
Gambar 2.9	Interpretasi grafik SMC.....	15
Gambar 2.10	Diagram blok <i>fuzzy sliding mode control</i>	18
Gambar 2.11	Struktur umum AFTC	20
Gambar 2.12	Skema <i>reconfigurable controller</i>	26
Gambar 2.13	Diagram blok dari sistem dan <i>observer state</i>	24
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 3.2	Diagram blok <i>regenerative anti-lock braking system</i>	31
Gambar 3.3	<i>Quarter car model</i>	32
Gambar 3.4	Dinamika gaya yang bekerja pada kendaraan untuk <i>quarter car model</i>	32
Gambar 3.5	Skema ABS <i>hydraulic brake system</i>	34
Gambar 3.6	<i>Membership function</i> pada input S	39
Gambar 3.7	<i>Membership function</i> pada input \dot{S}	39
Gambar 3.8	<i>Membership function</i> pada output.....	39
Gambar 3.9	Respon nilai epsilon pada <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i>	40
Gambar 3.10	Diagram blok perancangan AFTC pada <i>regenerative anti-lock braking system</i>	41

Gambar 3.11	PI Observer untuk estimasi kesalahan aktuator hidrolis.....	42
Gambar 4.1	Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>closed loop</i> dengan pengendalian <i>sliding mode controller</i>	45
Gambar 4.2	fenomena chattering pada <i>Sliding Mode Controller</i> ..	46
Gambar 4.3	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Sliding Mode Controller</i>	47
Gambar 4.4	Respon Braking Force pada Sliding Mode Controller.....	47
Gambar 4.5	Respon <i>slip ratio</i> pada sistem <i>close loop</i> dengan pengendalian <i>fuzzy sliding mode controller</i>	48
Gambar 4.6	osilasi pada hasil grafik menggunakan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i>	48
Gambar 4.7	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i>	49
Gambar 4.8	Respon Braking Force pada Fuzzy Sliding Mode Controller.....	50
Gambar 4.9	Hasil uji kesalahan SMC dengan AFTC pada kesalahan 30%.....	51
Gambar 4.10	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Sliding Mode Controller</i> dengan AFTC pada kesalahan 30%.....	51
Gambar 4.11	Hasil uji kesalahan FSMC dengan AFTC pada kesalahan 30%.....	52
Gambar 4.12	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> dengan AFTC pada kesalahan 30%.....	52
Gambar 4.13	Hasil uji kesalahan SMC dengan AFTC pada kesalahan 50%.....	53
Gambar 4.14	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Sliding Mode Controller</i> dengan AFTC pada kesalahan 50%.....	54
Gambar 4.15	Hasil uji kesalahan FSMC dengan AFTC pada kesalahan 50%.....	54

Gambar 4.16	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> dengan AFTC pada kesalahan 50%.....	55
Gambar 4.17	Hasil uji kesalahan SMC dengan AFTC pada kesalahan 75%.....	55
Gambar 4.18	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Sliding Mode Controller</i> dengan AFTC pada kesalahan 75%.....	56
Gambar 4.19	Hasil uji kesalahan FSMC dengan AFTC pada kesalahan 75%.....	56
Gambar 4.20	Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> dengan AFTC pada kesalahan 75%.....	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter koefisien gesekan pada permukaan <i>dry asphalt</i> (aspal kering)	33
Tabel 3.2	Parameter pemodelan kendaraan pada gaya pengereman.....	34
Tabel 3.2	Parameter simulasi pada motor.....	36
Tabel 3.4	Rule fuzzy logic controller.....	40
Tabel 4.1	Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji <i>close loop Sliding Mode Controller</i>	46
Tabel 4.2	Parameter performansi sistem pengendalian dengan <i>Fuzzy Sliding Mode Controller</i> untuk uji <i>close loop</i>	48
Tabel 4.3	Parameter Berhenti Kendaraan.....	49
Tabel 4.4	Parameter performansi slip rasio pada kesalahan 30%.....	52
Tabel 4.5	Parameter performansi slip rasio pada kesalahan 50%.....	54
Tabel 4.6	Parameter performansi slip rasio pada kesalahan 75%.....	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan kemajuan teknologi pada bidang *safety* pada otomotif yang saat ini banyak digunakan salah satunya adalah pengereman *anti-lock braking system* (ABS). ABS merupakan sistem pengereman yang berfungsi untuk mencegah roda pada mobil untuk terkunci ketika adanya pengereman darurat atau pengereman secara mendadak (Chen & Wang, 1996). Hal ini menjadikan jarak pengereman (*Stopping distance*) lebih pendek dan kendaraan masih tetap stabil atau mudah dikendalikan meskipun direm pada kondisi lurus. Dengan demikian, mobil yang menggunakan pengereman ABS dapat mengurangi jarak penghentian mobil dan meningkatkan manuverabilitas dengan mobil yang tidak memiliki ABS (Lee & Zak, 2002). Sistem ABS tidak hanya terdiri dari sistem pengereman gesekan (*friction*) tetapi juga dilengkapi dengan komponen pengereman *regenerative* seperti yang dijelaskan pada (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007). Sistem pengereman tersebut merubah energi kinetik ketika terjadi perlambatan pada mobil menjadi energi listrik yang akan disimpan di penyimpanan energi berupa baterai dan dapat digunakan kembali.

ABS pada umumnya terdiri dari beberapa bagian seperti *electronic controller unit* (ECU), *wheel speed sensor*, *modulator unit*, dan beberapa komponen pengereman. *Modulator unit* memegang peranan penting sebagai aktuator pada pengereman *regenerative* ABS kendaraan listrik ini menggunakan jenis motor *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) dan juga *hydraulic valve* sebagai pengereman hidrauliknya. PMSM adalah jenis motor yang banyak digunakan dalam aplikasi di industri selain motor induksi. Beberapa keuntungan dari *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) yaitu memiliki efisiensi yang tinggi serta memiliki daya listrik yang tinggi (Lingzhi, Chengdong, & Genping, 2017). Agar sistem pengereman ABS dapat bekerja dengan baik sehingga dapat mempertahankan nilai slip rasio di angka 0.2 yang merupakan slip rasio optimal pada kondisi jalan

aspal kering maka diperlukan sistem pengendalian. Salah satu jenis control yang populer digunakan pada ABS adalah *sliding mode controller* (SMC). Seperti yang kita ketahui, SMC memiliki kinerja anti-jamming yang baik. Keuntungan dari SMC adalah kekuatan yang kuat, artinya, sangat tidak peka terhadap kesalahan model dan perubahan parameter objek yang dikontrol dan gangguan eksternal. Namun, kerugian dari SMC adalah masalah osilasi, yang disebabkan oleh karakteristik diskrit yang melekat dan fenomena *chattering*. (Guo, Jian, & Lin, 2014). *Chattering* merupakan osilasi tidak beraturan yang terjadi pada sliding mode controller yang disebabkan oleh sistem tidak mampu untuk selalu mengikuti *sliding surface* yang disebabkan oleh *nonlinearty* dan *time varying parameters* (El-kharashi & A, 1997).

Pada penelitian sebelumnya dilakukan perancangan AFTC pada ABS regenerative mobil listrik yang menjelaskan sistem pengereman ABS untuk mengestimasi kesalahan pada aktuator (diarnise, 2018). *Sliding mode controller* (SMC) yang digunakan pada penelitian sebelumnya masih belum menggunakan Fuzzy Logic untuk mengoptimalkan kinerja dari SMC tersebut sehingga masih bisa ditemukan fenomena *chattering* pada sistem SMC tersebut. Maka dari itu dibuatlah tugas akhir dengan mendesain *Sliding mode controller* (SMC) dengan menggunakan *Fuzzy Logic Control* untuk dapat mengoptimalkan kinerja dari *regenerative Anti-lock bracking system* pada EV agar dapat meningkatkan factor safety yang ada pada mobil listrik.

1.2 Rumusan Masalah

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

- Bagaimana merancang *Fuzzy Sliding Mode Control* untuk mengoptimalkan kinerja yang terjadi pada aktuator pada *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS)?
- Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk mengatasi kesalahan diaktuator pada *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) *Fuzzy Sliding Mode Control* ?

- Bagaimana menganalisa kerja sistem fluida pada actuator ?

1.3 Tujuan

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

- Merancang *Fuzzy Sliding Mode Control* untuk mengoptimalkan kinerja pengereman dengan mengurangi fenomena chatter yang terjadi pada aktuator pada *regenerative Anti-Lock Braking System (ABS)*.
- Merancang *Active Fault Tolerant Control (AFTC)* untuk mengatasi kesalahan diaktuator pada *regenerative Anti-Lock Braking System (ABS)* *Fuzzy Sliding Mode Control*

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah berupa *Quarter Car Model (QCM)* untuk jenis kendaraan berpenumpang.
- Kesalahan yang digunakan adalah kesalahan pada aktuator *Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)*.
- Sistem kontrol yang digunakan adalah *fuzzy sliding mode control*.
- Nilai *setpoint* 0,2 berdasarkan dari *slip ratio* yang optimal di berbagai kondisi jalan.
- Kendaraan diasumsikan berada pada lintasan lurus dikondisi jalan aspal kering, datar, dan tidak bergelombang.
- Kendaraan diasumsikan dengan kondisi pengereman sampai berhenti dan berada pada lintasan lurus dikondisi jalan aspal kering, datar, dan tidak bergelombang
- Jenis kesalahan yang terjadi adalah kesalahan minor pada aktuator *regenerative Anti-Lock Braking System*.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**

Bab I berisi mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan dari tugas akhir ini.

- **BAB II DASAR TEORI**

Bab II penjelasan mengenai teori yang dapat menunjang dalam tugas akhir ini, seperti perkembangan mobil listrik, pengertian dari *anti-lock braking system* (ABS), algoritma *regenerative braking*, *fuzzy sliding mode control*, sistem *active fault tolerant control* (AFTC), dan *observer*.

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

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

- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang perbandingan sistem ABS dengan sistem kendali konvensional dan ABS dengan menggunakan pengendali *active fault tolerant control* untuk kesalahan pada aktuator hidraulik. Serta membandingkan ABS dengan menggunakan *fuzzy sliding mode control* dengan menggunakan *sliding mode control*.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

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

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1 *Anti-Lock Braking System (ABS)*

Anti-Lock Braking System (ABS) adalah teknologi yang telah digunakan dibidang automotive industri sejak tahun 1980 (YU, 1997) dan digunakan pada kendaraan modern masa kini. ABS digunakan di mobil modern masa kini memiliki 2 alasan yang pertama adalah untuk menghindari penguncian pada roda dan mempertahankan kemampuan ban atau menghasilkan gaya lateral, dan dengan demikian kemampuan manuver kendaraan. Selanjutnya *slip rasio* akan dijaga pada titik yang optimal kendaraan untuk meminimalkan jarak pengereman pada kendaraan dan meningkatkan stabilitas kendaraan (W.Li, 2010). Pada proses terjadinya pengereman, ban menghasilkan gaya *tractive force* dimana gaya tersebut sebanding dengan gaya normal jalan yang bekerja pada ban. Perbandingan digunakan tergaandung dengan variasi jalan tersebut atau koefisien jalan seperti kering, basah, bersalju, dan lainnya, serta karakteristik lekukan jalan tersebut seperti bergeelombang, berlubang, atau rata, dan lainnya. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Guo, Jian, & Lin, 2014) memiliki grafik fungsi non-linier antara *breaking effort coefficient* (μ) yaitu gesekan antara ban dan permukaan jalan dengan *slip rasio* roda (λ) pada kondisi jalanan tertentu.

Pada **Gambar 2.1** dapat dilihat bahwa saat kondisi jalan bersalju dan es, gesekan antara ban dan jalan mengecil sehingga memiliki μ (*breaking effort coefficient*) yang sangat rendah dan mengakibatkan resiko slip roda semakin tinggi. Berbeda dengan kondisi jalan aspal kering dan beton kering yang dapat dikatakan kondisi jalan normal, gesekan memiliki μ yang besar, sehingga resiko roda akan slip menjadi sangat rendah. Nilai μ berdasarkan pada penelitian (Guo, Jian, & Lin, 2014) diperoleh melalui persamaan:

$$\mu(\lambda, v) = \left[C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \right] e^{-C_4\lambda v} \quad (2.1)$$

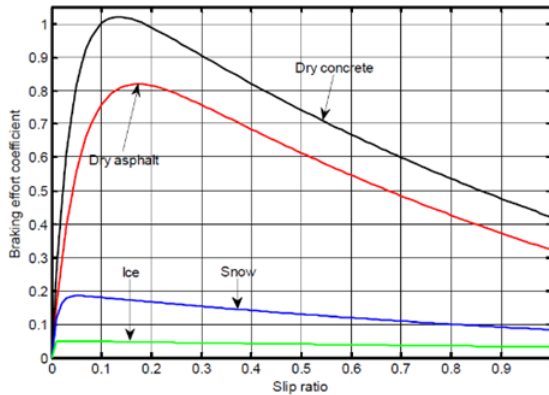
Dimana:

C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan

C_2 = Bentuk kurva gesekan

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

C_4 = Nilai karakteristik kebasahan jalan



Gambar 2.1 Perbandingan koefisien gesek pada permukaan jalan tertentu dengan slip rasio roda (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Pada penelitian (Aly, Zeidan, Hamed, & Salem, 2011) nilai slip rasio roda (λ) memiliki persamaan yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (2.2)$$

Dimana:

ω = Kecepatan sudut pada roda (rad/s)

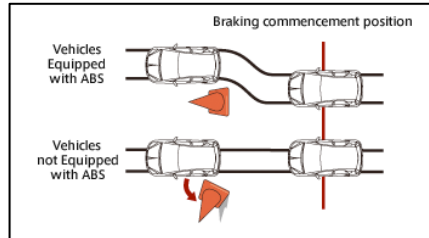
R = Jari – jari putaran roda (m)

V = Kecepatan kendaraan (m/s)

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

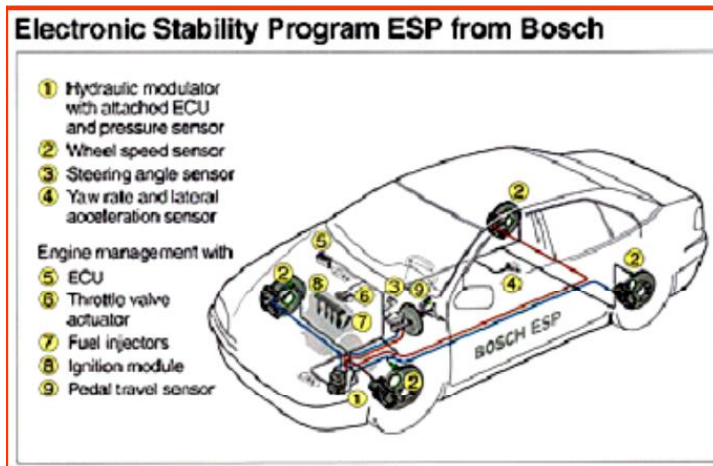
Berdasarkan tujuan utama adanya ABS didapatkan 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan dari kendaraan (Harifi, Aghagolzadeh, Alizadeh, & Sadeghi, 2005). Jarak henti dari kendaraan pada proses pengereman menjadi faktor penting. Parameter yang mempengaruhi jarak henti dari kendaraan adalah massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan, dan gaya pengereman. Jarak henti pengereman dari kendaraan dapat diperkecil dengan peningkatan gaya pengereman dikarenakan setiap jenis permukaan jalan memiliki koefisien puncak dari gaya pengereman tersebut, sehingga adanya ABS dapat mengontrol kendaraan untuk mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum.

Stabilitas dan ketahanan kendaraan pada saat pengereman menjadikan dibutuhkan ABS pada setiap kendaraan. ABS meningkatkan stabilitas dan ketahanan kendaraan lebih baik daripada kendaraan lain yang tidak menggunakan ABS. pada saat terjadi proses pengereman dan permukaan jalan licin dibutuhkan gaya gesekan yang lebih besar untuk memperlambat dan menghentikan kendaraan, sehingga dengan kondisi jalan seperti itu maka kendaraan yang tidak menggunakan ABS tidak akan mendapatkan gaya gesekan yang cukup karena gaya pengereman disatu sisi kendaraan akan lebih besar dari pada sisilainya (Harifi, Aghagolzadeh, Alizadeh, & Sadeghi, 2005).



Gambar 2.2 Perbedaan kendaraan mobil yang menggunakan ABS dan tanpa ABS (Motors, 2015)

Kendaraan yang dilengkapi ABS, kinerja ban sangat penting, karena semua gaya pengereman dan kemudi dihasilkan di dalam ban dari bagian kontak antara kendaraan dan jalan. *Tractive force* pada ban dan juga *lateral force* hanya dapat dihasilkan ketika ada perbedaan antara kecepatan lingkaran ban dan kecepatan relatif kendaraan terhadap permukaan jalan. Perbedaan tersebut dilambangkan sebagai *slip*. Hal ini biasa terjadi untuk menghubungkan gaya pengereman ban terhadap gaya *slip* ban. Setelah titik mencapai titik puncak, *slip* roda yang meningkat menyebabkan reduksi koefisien gesekan ban terhadap jalan. Sehingga, ABS harus membatasi *slip* ke nilai di bawah nilai titik puncak untuk mencegah terjadinya *lockup* pada roda. Roda dengan titik puncak gesekan yang tinggi mencapai gesekan maksimum pada 0,2 atau 20 % *slip* (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007). Pada pengereman ABS pun terdapat beberapa komponen penting yang sangat berpengaruh pada kinerja dari pengereman ABS tersebut seperti ECU (*Electronic Control Unit*), Sensor kecepatan, Unit modulator. Komponen-komponen tersebut saling bekerja beriringan sehingga dapat menjaga nilai *slip* rasio dengan baik.



Gambar 2.3 Komponen ABS dengan rem hidraulik
(Ashok.C.Meti)

2.1.1 Sensor Kecepatan Roda

Sensor kecepatan pada roda merupakan elemen *sensing* kecepatan rotasi ban dari sistem ABS yang tersegel rapat dan biasanya terletak di ujung roda. Kendaraan yang menggunakan ABS pada umumnya memiliki empat sensor dan terletak pada pinggiran roda di tiap sisi as. Mengenai peletakan sensor bergantung pada tipe suspensinya. Secara khusus, sensor pada kendaraan bersuspensi *spring* diletakkan pada as ganda bagian depan, sedangkan pada kendaraan bersuspensi udara (*air suspension*), sensor diletakkan pada bagian belakang. Keluaran dari sensor ini kemudian diteruskan ke *electronic control unit* (ECU) untuk menentukan kapan ABS akan diaktifkan. Adapun dua tipe sensor yang dapat digunakan, antara lain: sensor sudut kanan dan sensor lurus.

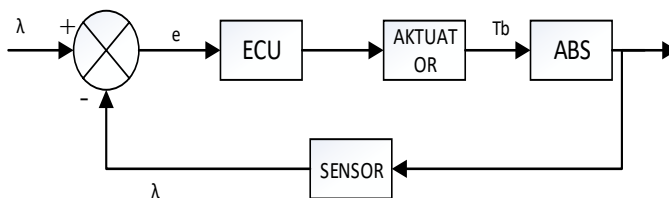
2.1.2 Electronic Control Unit (ECU)

ECU adalah bagian yang bertugas untuk memproses fungsi dari ABS. Secara umum ECU bertugas untuk menerima, menguatkan dan menyaring sinyal yang dikirim oleh sensor untuk menghitung kecepatan dan akselerasi roda, lalu secara *logic*

memutuskan roda ketika hendak mengunci dan mengaktifkan *valve* ABS pada kondisi dan waktu tertentu. Pada saat *valve* aktif, ECU dapat mengatur tekanan udara yang menuju ruangan rem. ECU dengan menggunakan kabel dapat menghubungkan antara komponen-komponen ABS lainnya seperti, *wheel sensor*, *modulator unit*, *power source*, *ground*, dan lain sebagainya.

2.1.3 Unit Modulator

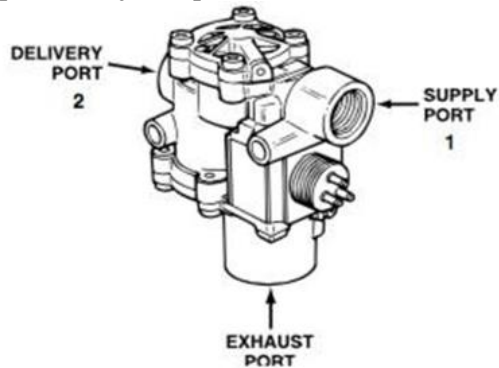
Unit modulator atau umumnya disebut dengan *hydraulic control unit* merupakan salah satu komponen *safety* pada mobil yang berfungsi untuk mengatur tekanan udara ke masing-masing rem yang dikendalikan oleh ABS. *Hydraulic control unit* tidak diaktifkan ketika pengereman normal dan udara mengalir melalui *valve* (katup) ABS ke bagian ruang rem. Pada saat ABS diaktifkan, *valve* (katup) ABS bekerja untuk mengatur tekanan udara di bagian ruang rem yang berfungsi agar dapat mengendalikan pengereman dan mencegah roda terkunci.



Gambar 2.4 Gambaran umum pengendalian pada ABS

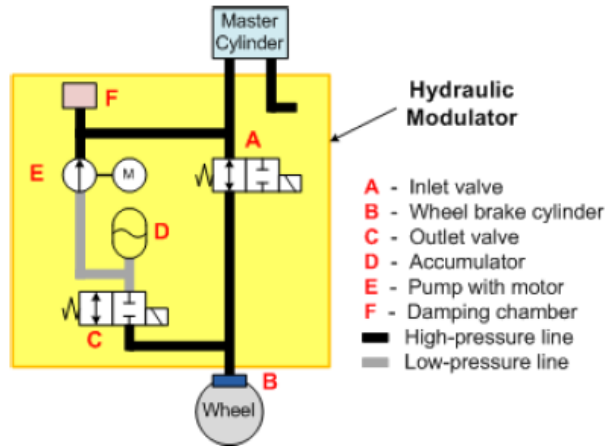
Katup ABS merupakan udara yang terdiri dari dua jenis solenoid yang masing-masing katup tersebut dioperasikan secara elektrik dan dua katup diafragma. Solenoid berfungsi untuk mengendalikan katup diafragma yang mengatur katup tersebut untuk membuka maupun menutup yang bertujuan untuk menambah dan mengurangi tekanan pada ruang rem. Katup ABS terdiri dari tiga *port* udara, yaitu *supply port* berfungsi untuk menerima tekanan udara dari katup *relay*, *delivery port* berfungsi untuk mengirim tekanan udara ke bagian ruang rem, *exhaust port*

berfungsi untuk mengeluarkan tekanan udara hanya dari sisi *delivery-port* pada saat pengendalian ABS; ketiga katup udara tersebut seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5**



Gambar 2.5 ABS modulator valve (Wabco, 1999)

Berdasarkan penelitian (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007) roda dengan titik puncak gesekan yang tinggi mencapai gesekan maksimum pada 0,2 atau 20% slip dan dengan penelitian (Guo, Jian, & Lin, 2014) titik puncak gesekan pada roda dapat ditoleransi sampai dengan batas slip 0,15 – 0,25 atau 15% - 25%. Sistem kerja dari modulator *valve* untuk menjaga slip rasio 0,15 – 0,25, sehingga ketika slip rasio diatas 25% langkah kerja dari *inlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*), sedangkan *outlet valve* pada modulator *valve* akan terbuka (*normally open*). Kemudian, ketika slip rasio dibawah 0,15% langkah kerja dari *inlet valve* pada modulator *valve* akan terbuka (*normally open*), sedangkan *outlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*). Slip rasio yang optimal adalah 20%, sehingga langkah kerja dari *inlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*) dan *outlet valve* pada modulator *valve* akan tertutup (*normally close*). Sistem ABS pada modulator *valve* bergantung pada 3 kondisi dari slip rasio yaitu slip rasio dibawah 15%, diatas 25%, maupun dengan kondisi optimal slip rasio sebesar 20% dengan batas frekuensi yang bekerja pada modulator *valve* adalah 3-9 Hz.

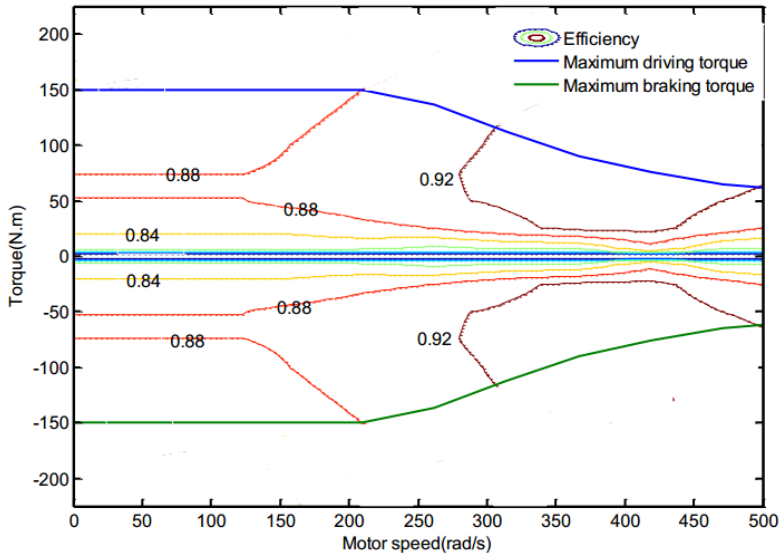


Gambar 2.6. Sistem pengereman hidrolis (W.Li, 2010)

2.1.4. Unit Generator untuk Regenerative Braking

Regenerative braking merupakan suatu metode pengereman yang digunakan pada kendaraan listrik dimana menggunakan energi mekanik yang dihasilkan dari motor dan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yang akan dikembalikan ke baterai untuk pengisian ulang pada baterai tersebut. Pada saat *regenerative braking*, motor akan menyebabkan kendaraan melambat dan motor akan beroperasi sebagai generator dan listrik yang dihasilkan akan masuk sebagai pengisi baterai (Gadewar & Jain, 2017).

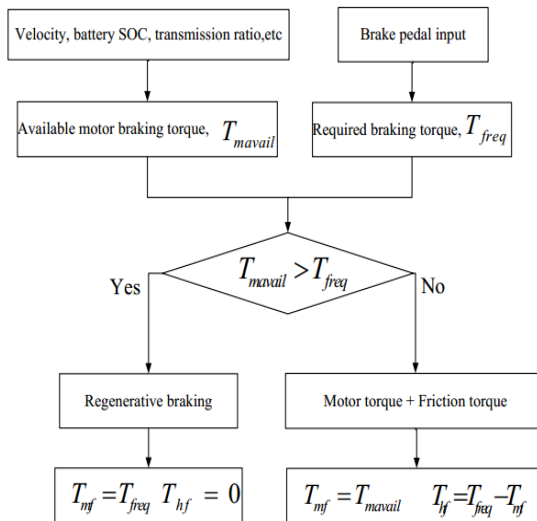
Saat mode berkendara torsi motor akan bernilai positif sehingga motor mengambil tenaga dari baterai dan saat mode *regenerative braking* bekerja maka torsi motor akan bernilai negatif dan motor akan bekerja layaknya seperti generator yang akan mengisi daya ke baterai. Pengisian pada baterai tersebut disebabkan karena adanya tegangan balik pada motor atau dikenal dengan *back EMF* (*electromagnetic force*).



Gambar 2.7 Kurva torsi-kecepatan dan pemetaan efisiensi dari motor (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Perlu diketahui, torsi generator pada *regenerative braking* dari motor memiliki pengaruh dari berbagai faktor. Karakteristik torsi yang cepat akan meningkatkan performa dari *antilock* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**. Pengereman regenerative memang memiliki kemampuan untuk memperlambat laju kendaraan akan tetapi tidak cukup kuat untuk menghentikan laju dari kendaraan tersebut. Umumnya pengereman regenerative digunakan secara paralel dengan sistem pengereman hidrolis yang biasa digunakan agar dapat menghentikan laju dari kendaraan tersebut. Sistem regenerative juga dibatasi oleh beberapa faktor antara lain adalah kecepatan motor, *state of charge (SOC)*, dan temperatur baterai (Peng, Zhang, Yin, & Zhang, 2008). Maka dari itu diperlukan juga pengereman hidrolis untuk mendampingi pengereman regenerative. Dengan menggunakan dua sistem pengereman tersebut maka diperlukan algoritma untuk menentukan bagaimana mendistribusikan sistem pengereman dari

motor yang akan menjadi generator dan sistem pengereman hidrolik. Distribusi ini juga diperlukan karena respon dari pengereman hidrolik tidak bereaksi terlalu cepat karena memiliki *delay time*. **Gambar 2.8** menunjukkan diagram alir dari pengereman *regenerative* untuk menentukan bagaimana mendistribusikan sistem pengereman pada mobil listrik. **Gambar 2.8** menunjukkan sekema koordinasi kerja dari motor dan sistem hidrolik agar menghasilkan kinerja kapan motor menjadi generator dan menjadi pengereman dari motor. Pada saat torsi motor yang dihasilkan lebih besar dari torsi hidrolik maka motor akan melakukan *regenerative braking* dimana motor tersebut akan menjadi generator untuk mengisi baterai kembali.

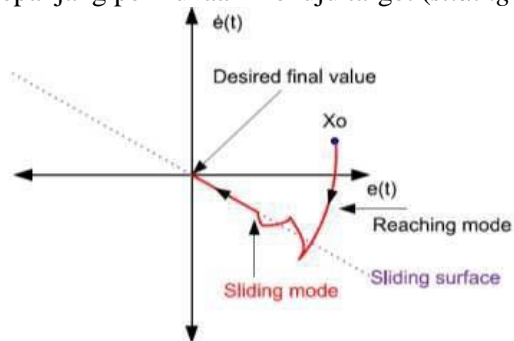


Gambar 2.8. Diagram alir pada sistem pengereman *regenerative* di mobil listrik (Guo, Jian, & Lin, 2014)

2.2 Sliding Mode Control (SMC)

SMC adalah suatu metode pada teori kontrol modern yang menggunakan *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 parameter, diagnosis kesalahan, dan kontrol. Metode SMC ini dikembangkan agar dapat membuat sistem kontrol pada model yang kompleks dengan dinamik non-linear derajat tinggi yang bekerja pada keadaan tidak tentu (Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh, 2016). SMC diterapkan pada ABS untuk melakukan *feedback* on-off berskala tinggi dalam penentuan aliran tekanan fluida pada distribusi tiap-tiap rem. SMC bekerja dengan cara mengendalikan *trajectory state* suatu sistem 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. Pada **Gambar 2.9** 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*).



Gambar 2.9 Interpretasi grafik SMC (Holkar & Waghmare, 2013)

Langkah pertama dalam merancang SMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*). Persamaan *sliding surface* akan mengikuti persamaan (2.3), dimana hanya dipengaruhi oleh satu parameter skalar yaitu λ yang ditentukan oleh perancang sistem dan bernilai positif konstan (Slotine & Li, 1991). n adalah besarnya order dari suatu sistem.

$$S(t) = (\lambda + d/dt)^{n-1} e(t) \quad (2.3)$$

Teori dari kestabilan Lyapunov digunakan untuk menstabilkan suatu sistem non-linier yang berubah terhadap waktu. Fungsi Lyapunov digunakan dan dapat dilihat pada persamaan (2.4), dimana persamaan tersebut dikatakan suatu fungsi definit positif apabila memenuhi syarat $V(0) = 0, V > 0$.

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.4)$$

Teori kestabilan Lyapunov berdasarkan penelitian dari (Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh, 2016), menganggap bahwa sistem didefinisikan sebagai $\dot{x} = f(x, t)$ dengan $f(0, t) = 0$ untuk semua t . Apabila fungsi skalar yang terdapat pada $V(x, t)$ bersifat kontinu, maka turunan parsial pertama fungsi tersebut memenuhi kondisi definit negatif. Pada keadaan ini, sistem mengalami *uniformly asymptotic stable*. Berdasarkan teori kestabilan Lyapunov dari penelitian (Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh, 2016) yang diterapkan di persamaan (2.4) untuk persamaan (2.5) dapat memenuhi syarat kestabilan sistem yang bersifat definit negatif. Nilai ε (epsilon) merupakan suatu konstanta positif.

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq -\varepsilon |s| < 0 \quad (2.5)$$

Fungsi signum (sgn) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x) &= \begin{cases} -1, & x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \\ \text{sgn}(x) &= \frac{|x|}{x} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Ditinjau dari definisi fungsi signum, persamaan (2.6) dapat dituliskan dengan bentuk persamaan lainnya seperti pada

persamaan (2.7) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s), \varepsilon > 0 \quad (2.7)$$

Persamaan *sliding surface* adalah fungsi *error*. Nilai orde yang diberikan adalah $n = 2$, persamaan (2.3) dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$S(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (2.8)$$

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

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (2.9)$$

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

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

A dan B merupakan matriks *state* dan matriks input, serta $u(t)$ merupakan sinyal input (kontrol). Kemudian, dengan memperoleh turunan pertama dari persamaan (2.8) dan substitusi persamaan (2.9) dan persamaan (2.10), didapatkan persamaan berikut.

$$\dot{s} = \ddot{r}(t) - Ax(t) - Bu(t) + \lambda[\dot{r}(t) - \dot{x}(t)] \quad (2.11)$$

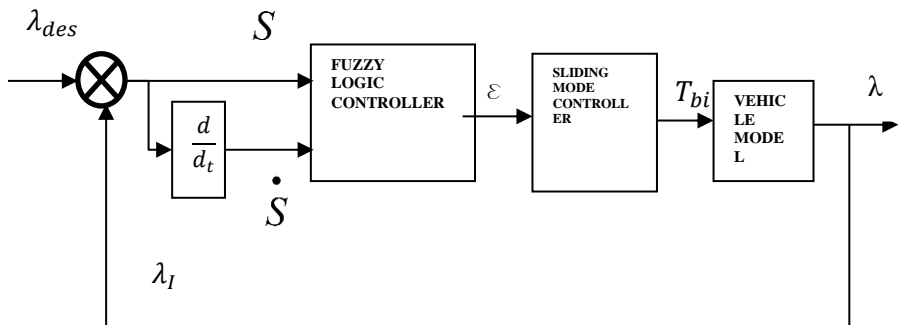
Adanya *constant rate reaching law*, maka persamaan (2.12) dapat disamakan dengan persamaan (2.11) yang kemudian diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$u(t) = \frac{1}{B} [\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + \ddot{r}(t) - Ax(t) + \lambda(\dot{r}(t) - \dot{x}(t))] \quad (2.12)$$

2.3 Fuzzy Sliding mode control (FSMC)

Sliding mode control (SMC) adalah sebuah teori kontrol yang menggunakan pendekatan *state space* untuk menganalisa

sebuah sistem (Nasir, Ismail, & Ahmad, 2010). 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, & Etefagh, 2016). Cara kerja SMC dalam mengendalikan sebuah sistem adalah dengan menjalankan sistem pada sebuah permukaan yang kemudian nilainya dijaga pada permukaan ini. SMC dengan hukum pendekatan eksponensial memiliki dua parameter yang dapat disesuaikan ε dan k . parameter ε adalah parameter yang mewakili kekuatan dari sistem. Semakin besar parameter ε maka sistem akan semakin kokoh tetapi bila parameter ε makin besar berakibat juga dengan timbulnya fenomena chattering yang parah. *Fuzzy Logic Control* (FLC) digunakan untuk menentukan nilai dari parameter ε 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 (\dot{S}) dari fungsi tersebut dengan output berupa parameter ε (Guo, Jian, & Lin, 2014).



Gambar 2.10 Diagram blok *fuzzy sliding mode control* (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Pada **Gambar 2.10** menjelaskan fungsi kinerja dari *fuzzy sliding mode controller*. Input dari sistem fuzzy tersebut berasal dari sliding surface (S) dan turunan pertama dari sliding surface

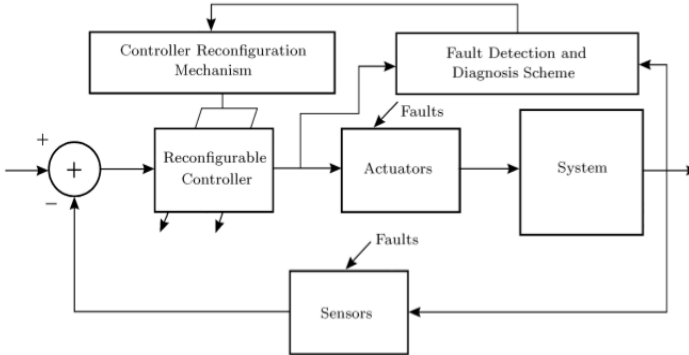
tersebut. Sliding surface merupakan eror dari sistem tersebut yang nilainya berasal dari slip rasio yang diinginkan dan slip rasio terukur yang berasal dari vehicle model. Output dari sistem fuzzy tersebut merupakan nilai epsilon (ε) yang merupakan kostanta robust dari sistem *sliding mode controller*. *Sliding mode controller* memberikan output berupa referensi torsi (T_{br}) pengereman yang nantinya akan masuk ke *vehicle model* dan akan dihitung slip rasio (λ) dari sistem tersebut. λ_{des} disebut juga sebagai set point dari slip rasio yang kita inginkan.

2.4 Sistem Active Fault Tolerant Control (AFTC)

Performa dan keamanan suatu sistem menjadi hal yang terpenting untuk selalu di tingkatkan dan dijaga performanya selalu pada suatu sistem kendali, Maka dari itu diperlukan suatu pengendalian yang dapat menoleransi kerusakan yang terjadi dengan tetap menjaga stabilitas sistem yang diinginkan salah satu pengendalian yang dapat melakukan hal tersebut adalah sistem *Fault Tolerant Control* (FTC). FTC memiliki kemampuan mengakomodasi komponen secara otomatis dengan tetap mempertahankan kestabilan sistem dan performansi yang ditetapkan. Tinjauan menyeluruh mengenai FTC secara ringkas dijelaskan pada (Jiang, 2005) dengan beberapa sudut pandang yaitu teori, praktek industri, dan tantangan potensial. Penjelasan rinci berupa tutorial tentang FTC dapat dibaca pada (Lunze & H, 2008), sedangkan tinjauan literatur secara komprehensif telah dilakukan oleh (Zhang & Jiang, 2008).

Tujuan dari FTC yaitu merancang pengendali dengan struktur yang cocok untuk mencapai kestabilan dan kinerja sistem tersebut yang diinginkan pada saat sistem berjalan normal dan saat ada kesalahan yang terjadi pada sistem tersebut (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016). Sistem FTC dibagi menjadi 2 yaitu *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) dan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC). PFTC dirancang untuk sistem *closed loop* agar tetap sensitif terhadap kesalahan sedangkan AFTC bereaksi terhadap kegagalan komponen yang terjadi dengan merekonfigurasi aksi dari control yang menyebabkan kesetabilan

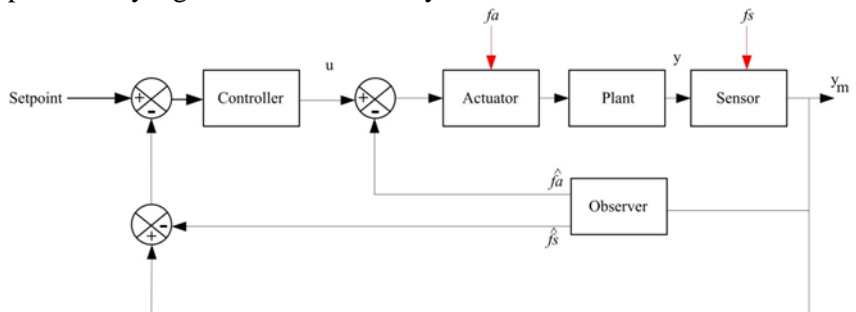
dan kinerja terjaga. Perbedaan lain adalah pada sistem AFTC diperlukan bagian untuk *Reconfigurable Control* (RC) dan *Fault Detection and Diagnosis Scheme* (FDD) yang dimana PFTC tidak memerlukan hal tersebut



Gambar 2.11 Struktur umum AFTC (Jiang, 2005)

Pada Penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh (Jiang, 2005) struktur umum dari AFTC ditunjukkan dengan **Gambar 2.11**. *Fault Detection and Diagnosis Scheme* (FDD) adalah tahapan untuk mendeteksi *fault* atau kesalahan yang terjadi pada aktuator, sensor, maupun komponen penyusun dalam sistem. FDD berfungsi untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur seperti kesalahan yang terjadi pada sistem. Ada 3 hal yang perlu dilakukan pada tahap FDD yaitu, mendeteksi kesalahan pada sistem serta waktu selang selama terjadinya kesalahan, mengisolasi lokasi kesalahan dan tipe kesalahan, dan terakhir mengidentifikasi kesalahan yang terjadi. Salah satu jenis FDD yang berfungsi untuk mengestimasi kesalahan dengan berdasarkan model matematik adalah *Observer* (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016). Pada *Reconfiguration mechanism* berfungsi memperbaiki ulang kesalahan awal pada performansi sistem dan menghindari akan adanya penurunan performansi setelah terjadinya kesalahan. Perancangan sistem kendali yang toleran terhadap kesalahan aktuator dan sensor diperlukan konfigurasi ulang sinyal pengendali atau *reconfigurable controller* secara otomatis berdasarkan jenis

kesalahan yang terjadi. *Reconfigurable controller* akan bekerja secara otomatis agar dapat memperbaiki kesalahan, sehingga sistem tetap bekerja sesuai keinginan. Berdasarkan hal tersebut adanya kesalahan yang terjadi, kemudian diestimasi dan hasil estimasi tersebut digunakan untuk mengatur ulang sinyal kendali (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2013). Sistem AFTC dapat dikelompokkan lagi menjadi 2 metode yaitu metode proyeksi dan metode *automatic redesign*. Pada metode proyeksi, kesalahan dikompensasi dengan memilih hukum kontrol yang dihitung terlebih dahulu pada saat desain (*pre-computed control law*). Sedangkan pada metode *automatic redesign*, kesalahan dikompensasi dengan menyintesa strategi kontrol baru secara *on-line*. Sintesa sinyal kontrol pada metode *automatic redesign* dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu: merancang ulang kontroler (*controller redesign*) dengan memodifikasi kontroler nominal, dan mengkompensasi kesalahan dengan tanpa mengubah kontroler nominal. Metode kompensasi kesalahan merupakan bidang penelitian yang relatif baru dan banyak diminati.



Gambar 2.12 Skema *reconfigurable controller* (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016)

Pada sistem AFTC sinyal kontrol direkonfigurasi secara *realtime* sehingga sistem akan tetap berada pada nilai yang diharapkan meskipun sistem menerima gangguan. Kesalahan baik pada sensor maupun aktuator akan diakomodasi dengan mekanisme rekonfigurasi yang dirancang agar dapat memulihkan kestabilan

sistem setelah terjadi kesalahan. Pada saat sensor menerima kesalahan pada saat proses pengukuran maka kesalahan tersebut akan didiagnosa (*fault diagnosis*) sehingga akan terdefinisi sebagai sinyal kesalahan yang akan dikompensasi oleh *estimation compensation*. *Estimation compensation* akan mendapatkan input berupa sinyal kontrol dan sinyal hasil pengukuran. Hasil keluaran dari *estimation compensation* akan digunakan untuk merekonfigurasi sinyal dari sensor yang mengalami kesalahan. Blok rekonfigurasi memuihkan sinyal output sensor sebelum diolah oleh pengontrol sehingga membuat *plant* yang telah terjadi kesalahan untuk tetap beroperasi secara ideal. Dengan kata lain, *plant* rekombinasi Σ_{RP} , yang terlihat dari pasangan sinyal (U_c, Y_c) , harus memiliki input/output yang sama seperti pada Σ_P , yang terlihat dari sinyal (U_c, Y_f) . Rekonfigurasi kontrol dilakukan dengan penambahan design state observer.

2.5 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 (2.13) dan (2.14) berikut ini.

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

$$y = Cx(t) + Du(t) \quad (2.14)$$

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

$\dot{\tilde{x}}$ = 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

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x} + Bu + K_e(Y - C\tilde{x}) \quad (2.15)$$

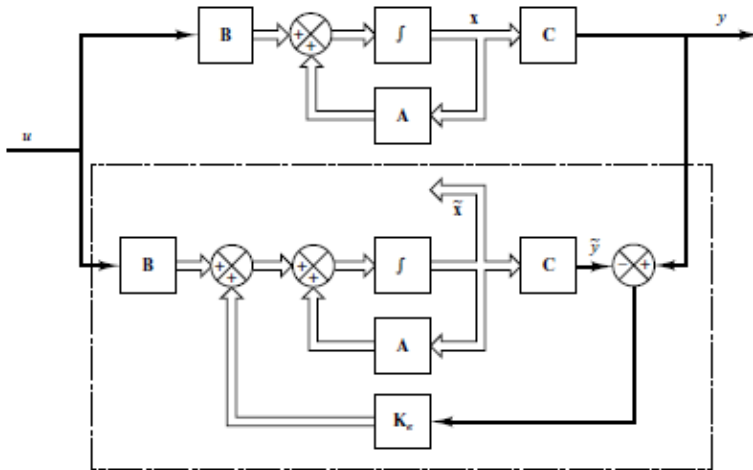
Dimana:

\tilde{x} = keadaan estimasi

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

K_e = Gain matriks *Observer*

Gambar 2.17 menunjukkan diagram blok dari sistem dan *observer state*. Berdasarkan gambar **Gambar 2.15**, *observer* sudah memiliki nilai *gain observer*. *Gain observer* merupakan matriks untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran y hasil *actual* dan y *estimated*, sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata, 2010). Parameter yang mempengaruhi untuk menentukan nilai *gain observer* adalah nilai *pole* untuk menyatakan sistem stabil berada pada nilai tidak lebih dari 1 atau -1 pada sumbu imajiner atau sumbu riil.



Gambar 2.13 Diagram blok dari sistem dan *observer state* (Ogata, 2010)

Efek dari kesalahan sensor dan aktuator direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut dan didefinisikan pada persamaan (2.20) maupun persamaan (2.21), dimana vektor tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (2.16) dan persamaan (2.17) (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2016).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.16)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.17)$$

Tipe kesalahan sensor dan aktuator dimodelkan sebagai berikut:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta(t) \quad (2.18)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.19)$$

$s_f(t)$ merupakan sinyal aktual, α dan β adalah konstanta. Penambahan kesalahan $f(t)$, termasuk $f_a(t)$ dan $f_s(t)$ ditunjukkan persamaan (2.19).

Melalui persamaan (2.19) tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = A_z[y(t) - z(t)] \quad (2.20)$$

$$\dot{z}(t) = A_z[Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.21)$$

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 (2.21) tersebut dapat mendefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah diekspansi, persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.22).

$$\dot{x}_a = A_a X_a(t) + B_a U(t) + E_a f(t) \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_n \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0_n \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0_n \\ 0_n & A_z \cdot F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0_n \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0_n \end{bmatrix}, C_a = [0_n \quad C], E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0_n \\ 0_n & A_z \cdot F_s \end{bmatrix}$$

Untuk mendapatkan nilai dari *gain observer* maka dipakai ekspansi melalui persamaan ruang keadaan baru yang ditunjukkan persamaan (2.24).

$$\hat{\dot{x}}(t) = A_a \hat{X} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + L_x(Y - \hat{Y}) \quad (2.24)$$

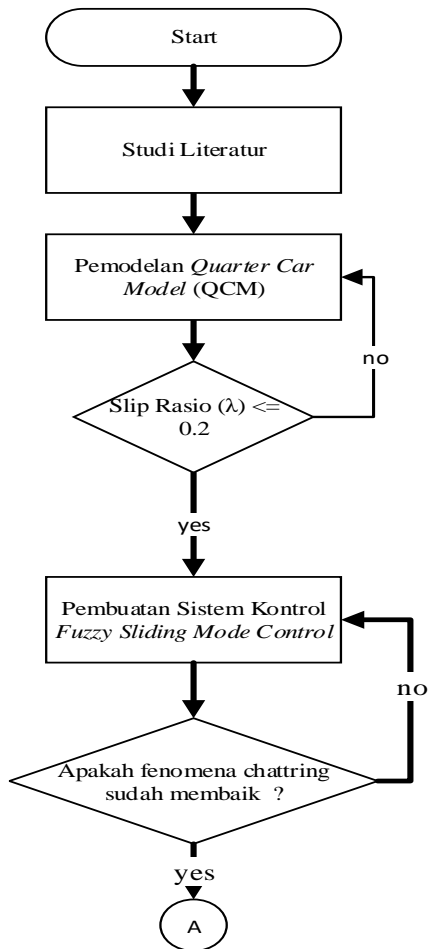
Sehingga matriks yang sudah di ekspansi ditunjukkan seperti pada persamaan berikut:

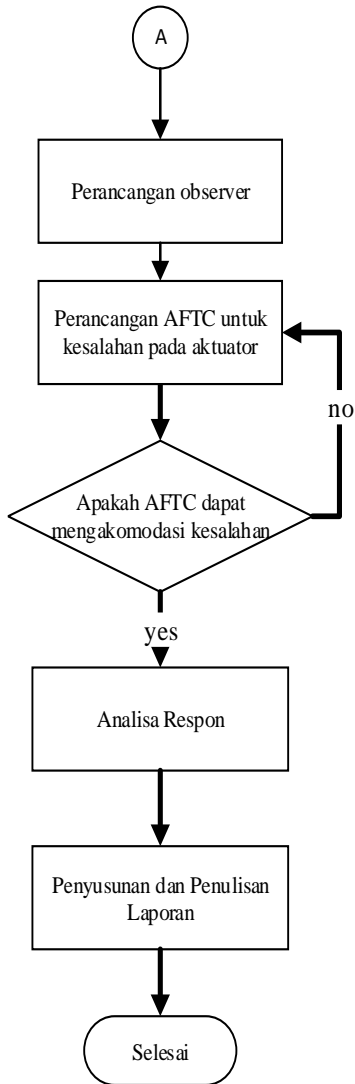
$$\widehat{A}_a = \begin{bmatrix} A_a & E_a \\ 0_n & 0_n \end{bmatrix}, \widehat{C}_a = [C_a \quad 0_n] \quad (2.25)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III berisi mengenai metodologi penelitian yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini yang dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1** sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

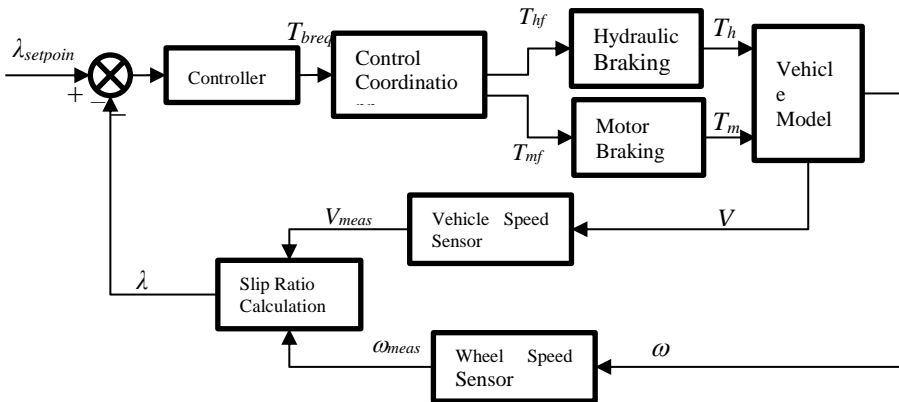
- **Studi Literatur**
Mengumpulkan literatur dan referensi yang relevan mengenai *regenerative anti-lock braking system* pada mobil listrik dan *Active Fault Tolerant Control* pada mobil listrik.
- **Pemodelan *Quarter Car Model***
Pemodelan terdiri dari model kendaraan, model roda, model motor, dan model *regenerative anti-lock brake system*. Pemodelan didapatkan berdasarkan literatur yang didapat. Pemodelan akan disimulasikan pada fitur Simulink pada perangkat lunak Matlab.
- **Validasi Pemodelan**
Memvalidasi kebenaran pemodelan yang telah dibuat dengan mengacu pada nilai slip rasio ≤ 0.2 jika nilai slip ratio melebihi 0.2 maka harus kembali lagi memodelkan ulang
- **Pembuatan Sistem Kontrol**
Sistem pengendalian dengan menggunakan *Fuzzy sliding mode control* akan ditambahkan pada *regenerative ABS* dan disimulasikan pada Simulink pada perangkat lunak Matlab.
- **Pengujian Sistem Kontrol**
Sistem control diuji dengan melihat grafik respon sudah lebih baik atau belum dan melihat fenomena chattering sudah lebih smooth. Dengan parameter periode osilasi sudah teratur. Jika osilasi masih tidak beraturan maka dilakukan pemodelan ulang pada *fuzzy interference system*
- **Perancangan *Observer***
Perancangan *observer* untuk mengestimasi kesalahan yang ada. Perancangan berdasarkan pada pemodelan matematis yang digunakan.
- **Perancangan *Active Fault Tolerant Control (AFTC)* untuk Kesalahan pada Aktuator**
AFTC dirancang dengan memberikan kesalahan pada aktuator dan mengkompensasi sinyal pada sistem sehingga AFTC dapat memperbaiki sinyal kesalahan yang diberikan secara otomatis.

- **Validasi *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk Kesalahan pada Aktuator**

Validasi dilakukan untuk mengetahui AFTC telah berhasil mengakomodasi kesalahan yang diberikan pada actuator atau belum. Dengan parameter jika telah berhasil mengakomodasi kesalahannya adalah hasil grafik slip rasio sebelum dan sesudah diberikan kesalahan memiliki grafik yang sama.

3.1 Pemodelan *Regenerative antilock-braking system*

Pada umumnya sistem dinamik dari kendaraan empat roda dapat dimodelkan menjadi 3 jenis yaitu *Quarter car*, *Half car*, dan *Full car*. Pada penelitian ABS ini dipilihlah pemodelan *Quarter car* untuk memodelkan sistem dinamik dari kendaraan tersebut. *Quarter car* adalah pemodelan yang hanya menggunakan 1 roda saja dan ketiga roda lainnya diasumsikan memiliki karakteristik dan sistem yang sama dengan satu roda. Pada **Gambar 3.2** menunjukkan diagram blok sistem ABS yang meliputi pemodelan dinamik longitudinal kendaraan yang menggunakan *Quarter car* dan pemodelan motor regenerative braking. Pada **Gambar 3.2** dapat dilihat bahwa input berupa setpoint masuk kedalam *controller* yang pada penelitian ini berupa sistem SMC dan FSMC lalu *output controller* tersebut adalah yang berupa torsi referensi yang dihasilkan lalu masuk kedalam *coordination* yang berguna menga sinyal dari *controller* untuk mengatur torsi yang akan digunakan oleh aktuator hidrolis dan motor. Aktuator hidrolis dan motor akan mengeluarkan output berupa torsi yang terukur dari aktuator hidrolis 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 terukur.



Gambar 3.2 Diagram blok *regenerative anti-lock braking system*

3.1.1 Pemodelan *Quarter Car* (QCM)

Pemodelan dinamik gerak longitudinal kendaraan untuk sistem pengereman pada *quarter car model* yang menggunakan pergerakan dari 1 roda saja dan 3 sisanya diasumsikan sama. Pemodelan ini di dasarkan dengan menggunakan Hukum Newton II yang terdapat pada persamaan (3.1). Persamaan tersebut menunjukan bahwa benda akan berbanding lurus dengan gaya yang bekerja pada gaya tersebut dan berbanding terbalik dengan massa benda. Gaya-gaya yang bekerja pada sistem pengereman untuk *quarter car model* antara lain, gaya *rolling resistance* (F_f), *braking force* (F_b), dan gaya pengereman pada roda (F_x). Persamaan gaya yang terjadi ditunjukkan dengan persamaan berikut ini.

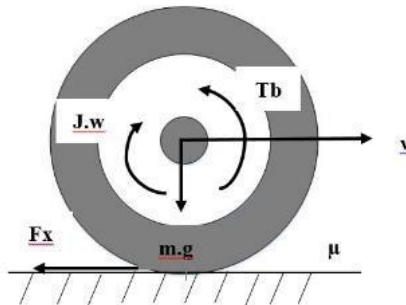


Gambar 3.3 Dinamika gaya yang bekerja pada kendaraan untuk *quarter car model* (Tur, Ustun, & Tuncay, 2007)

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

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -4(F_x + F_f) \quad (3.2)$$

Persamaan 3.2 menunjukkan gaya yang bekerja pada saat pengereman dengan kondisi 4 roda, sedangkan dengan menggunakan quarter kan maka hanya ditinjau dengan 1 roda saja. Gaya yang terjadi pada *quarter car model* antara lain adalah gaya pengereman pada roda (F_x), gaya pengereman aktuator terhadap roda (F_b) dan *rolling resistance* (F_f). F_x merupakan gaya yang terjadi pada saat pengereman yang terdiri dari massa kendaraan dan koefisien gesek sedangkan F_f yang merupakan gaya luncur roda terhadap sudut kemiringan dari jalan yang pada tugas akhir ini kondisi jalan yang digunakan adalah rata. Pada penelitian sebelumnya (diarnise, 2018) telah diketahui nilai dari *rolling resisten* adalah 50.3475.



Gambar 3.4 *Quarter car model* (Tur, 2007)

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

$$F_f = c_t \cdot V \quad (3.4)$$

$$F_b = \frac{T_b}{R} \quad (3.5)$$

Dimana :

- m = Massa kendaraan *quarter car model* (kg)
 g = Gaya gravitasi (m/s^2)
 μ = Koefisien gesekan antara roda dengan jalan dari gaya pengereman
 c_t = *rolling resistance coefficient* roda
 V = Kecepatan kendaraan (m/s)
 T_b = Torsi Pengereman

Pada penelitian yang di lakukan (Guo, Jian, & Lin, 2014) teedapat perhitungan untuk menghitung koefisien gaya pengereman yang bekerja antara roda dan jalan yang direpresentasikan dengan μ dan ditunjukkan pada kersamaan (2.1).

Tabel 3.1 Parameter koefisien geseken pada permukaan *dry asphalt* (aspal kering) (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
C_1	Nilai maksimum kurva gesekan	1,029
C_2	Bentuk kurva gesekan	17,16
C_3	Perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$	0,523
C_4	Nilai karakteristik kebasahan jalan	0,03

Pemodelan roda secara rotasi untuk *quarter car model* yang ditunjukkan pada **Gambar 3.5** dengan persamaan seperti berikut ini.

$$F_x \cdot R - T_h = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.6)$$

Dimana :

- R = Jari-jari putaran roda (m)
 T_h = Torsi pengereman pada *hydraulic brake system* (N.m)

- J = Momen inersia roda ($kg \cdot m^2$)
 ω = Kecepatan sudut pada roda (rad/s)

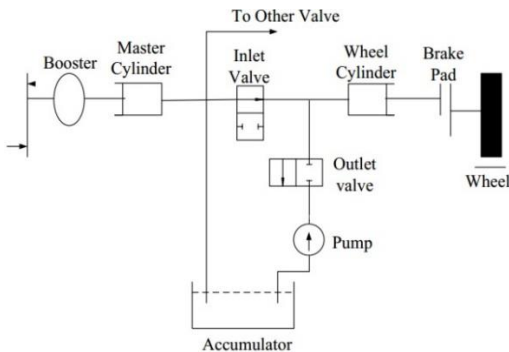
Tabel 3.2 Parameter pemodelan kendaraan pada gaya pengereman

Parameter	Deskripsi	Nilai
m	Massa <i>quarter car model</i>	342,5 kg
	Massa <i>full car model</i>	1370 kg
g	Gaya gravitasi	9,8 m/s^2
R	Jari-jari putaran roda	0,33 m
J	Momen inersia roda	3,5 $kg \cdot m^2$
F_f	Gaya <i>rolling resistance</i>	201,39 N

Pada tugas akhir ini untuk menyederhanakan system digunakan pemodelan aktuator dengan sunngsi orde satu.

$$\frac{T_m(s)}{T_{mf}(s)} = \frac{k}{\tau_m s + 1} \quad (3.7)$$

Dimana nilai k merupakan gain dari sistem *hydraulic* dan τ merupakan konstanta waktu torsi *hydraulic* dengan nilai masing-masing telah ditentukan sebesar 1 dan 0,01 (C., A., Chidiebere, & Hope, 2018).



Gambar 3.5 Skema ABS *hydraulic brake system* (Guo, Jian, & Lin, 2014)

3.1.2 Pemodelan dari Aktuator Motor Pada Quarter Car

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

$$T_{generator} = \frac{T_{mmax} \cdot I \cdot K_{\omega m} \cdot K_{soc}}{\eta_t} \quad (3.8)$$

Dimana:

T_{mmax} = Torsi motor maksimum ($N \cdot m$)

I = Rasio transmisi

η_t = Efisiensi transmisi

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

k_{soc} = nilai konstanta SOC baterai

Nilai torsi motor yang akan disalurkan pada masing-masing roda akan bergantung pada 2 parameter yaitu nilai $k_{\omega m}$ dan k_{soc} sehingga pada saat proses *regenerative braking* dilakukan tidak akan mengakibatkan *overcharging* pada baterai dan tidak menimbulkan beban berlebih pada kecepatan putar rotor. Tujuan dari adanya nilai konstan k_{soc} yaitu membatasi proses *charge* pada baterai berdasarkan pada nilai *state of charge* nya pada saat dilakukan pengereman agar tidak terjadi *overcharging* yang akan menurunkan kinerja baterai.

$$K_{soc} = \begin{cases} 1 & SOC \leq 0,8 \\ 10(0,9 - SOC) & 0,8 < SOC \leq 0,9 \\ 0 & 0,9 < SOC < 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Sedangkan nilai konstan $k_{\omega m}$ digunakan untuk membatasi *range* kerja motor dalam melakukan pengereman *regenerative* sesuai dengan keadaan kecepatan angular (ω_m) motor listrik. Hal ini dikarenakan pada saat pengereman dengan kecepatan angular motor yang rendah akan menghasilkan gaya elektrik yang terbatas

(rendah), sehingga pada proses pengereman tidak bisa dilakukan sepenuhnya oleh motor listrik melainkan bekerja bersama-sama dengan pengereman hydraulic.

$$K_{\omega_m} = \begin{cases} 0 & \omega_m \leq 50 \text{ rad/s} \\ (\omega_m - 50)/50 & 50 < \omega_m \leq 100 \text{ rad/s} \\ 1 & 0,9 < 100 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (3.10)$$

Tabel 3.3 Parameter simulasi pada motor (Guo, Jian, & Lin, 2014)

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

Selanjutnya dinamika sistem pengereman motor dapat dimodelkan sebagai sistem orde satu sebagai berikut :

$$\frac{T_m(s)}{T_{mf}(s)} = \frac{1}{\tau_m s + 1} \quad (3.11)$$

dengan τ_m adalah the motor torque time constant.

3.2 Pembuatan Sistem Kontrol *Fuzzy Sliding Mode Controller* (FSMC)

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 (3.1) dan (3.2) merepresentasikan model matematis dari gerak longitudinal kendaraan maupun gerak rotasi roda pada sistem ABS. Dengan adanya motor listrik maka persamaan (3.6) akan menjadi persamaan (3.12) dengan adanya torsi dari motor.

$$J \cdot \dot{\omega} = F_b \cdot R - T_b - T_f \quad (3.12)$$

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

$$\lambda_i = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (3.13)$$

Selanjutnya adalah persamaan (3.13) didiferensialkan menjadi persamaan (3.14). kemudian persamaan (3.2) dan (3.12) disubstitusi pada persamaan (3.14) dan akan menghasilkan persamaan (3.15).

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

$$\dot{\lambda}_i = \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_b - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_b - \frac{R\omega}{mv^2} F_f \quad (3.15)$$

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 (λ_{des}), maka *slip ratio* digunakan sebagai *sliding surface* yang didefinisikan sebagai berikut.

$$S = \lambda_{des} - \lambda_i \quad (3.16)$$

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

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

Adanya definisi dari fungsi signum, persamaan (3.17) dapat dituliskan ke bentuk lain seperti pada persamaan (3.18) yang dapat disebut juga sebagai *constant rate reaching law* (Liu & Wang, 2012).

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.18)$$

Dengan:

ε = konstanta robustness sistem

k = gain maksimum output kontroler

Dimana ε (epsilon) dan k adalah positif konstan. Kemudian, Fungsi error dan turunan dari *slip ratio* disubstitusikan dengan persamaan (3.16) dan (3.18), sehingga menghasilkan persamaan sebagai berikut.

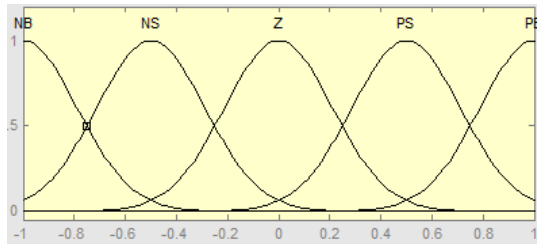
$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_{des} - \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_b + \frac{R}{J} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J} \frac{1}{V} F_b - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_b - \\ \frac{R\omega}{mv^2} F_f = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \end{aligned} \quad (3.19)$$

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

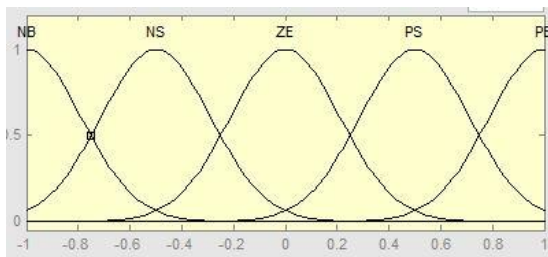
$$\begin{aligned} T_{ref} = -T_f + R \cdot F_b + \frac{J\omega}{mV} \sum F_b + \frac{J\omega}{mV} \cdot F_f + \\ \frac{J\omega}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{des} - \lambda_i) + k(\lambda_{des} - \lambda_i)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Fuzzy digunakan pada sliding mode ini untuk menentukan nilai ε (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 ε 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

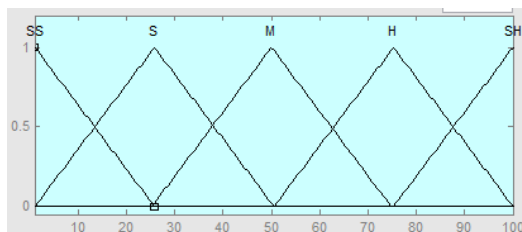
kedua input menggunakan *gaussian*. Penentuan bentuk ini ditentukan dengan proses *trial and error* untuk menemukan hasil yang terbaik.



Gambar 3.6. *Membership function* pada input S



Gambar 3.7. *Membership function* pada input \dot{S}



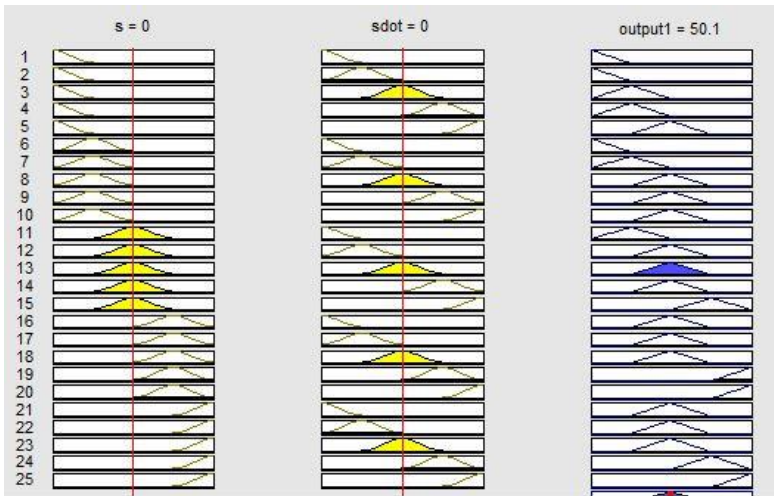
Gambar 3.8. *Membership function* pada output

Gambar 3.6 dan **Gambar 3.7** menunjukan *membership function* dari input fuzzy yang berupa error dan turunan pertama dari error tersebut, sumbu X menunjukan besar error yang telah di normalisasi dan sumbu Y menunjukan derajat keanggotaan pada fuzzy. **Gambar**

3.8 merupakan *membership function* dari output yang berupa nilai epsilon yang nantinya nilai tersebut digunakan untuk *sliding mode controller*. Dengan sumbu X menunjukkan nilai epsilon tersebut dan sumbu Y menunjukkan derajat keanggotaan. Fuzzy mamdani digunakan pada tugas akhir ini dengan menggunakan fungsi and pada rule base tersebut. Rule base pada fuzzy ini memiliki 25 rule base.

Tabel 3.4. Rule fuzzy logic controller

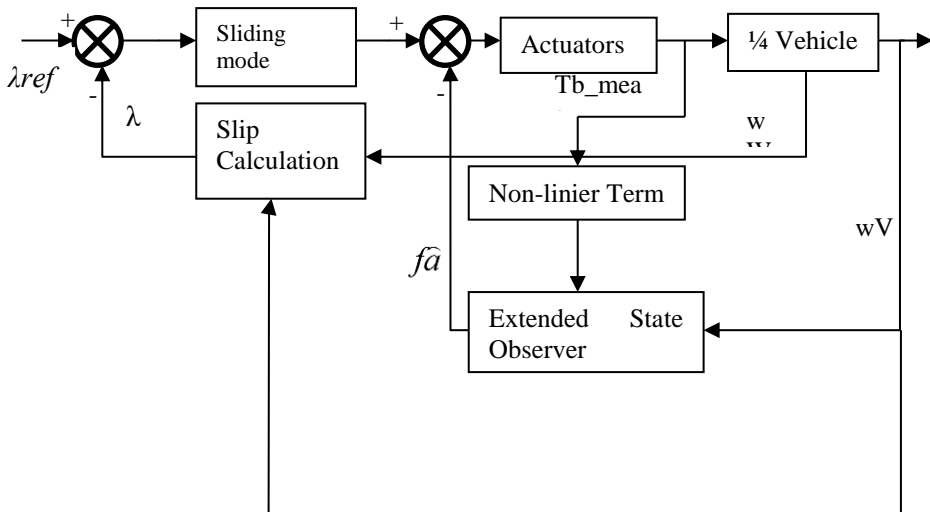
ε		S				
		NB	NS	ZE	PS	PB
\dot{S}	NB	SS	SS	S	M	M
	NS	SS	S	M	M	M
	ZE	S	M	M	M	M
	PS	S	M	M	S	S
	PB	M	M	H	SH	SH



Gambar 3.9. Respon nilai ε pada *Fuzzy Sliding Mode Controller*

3.3 Perancangan Sistem *Active Fault Tolerant Control (AFTC)* untuk Kesalahan Aktuator

Reference
Slip Ratio



Gambar 3.10 Diagram blok perancangan AFTC pada *regenerative anti-lock braking system* (diarnise, 2018)

Tujuan dari perancangan sistem AFTC adalah untuk mengkompensasi kesalahan yang telah diestimasi oleh *observer*. Pada kesalahan bias, sinyal pengukuran awal akan ditambahkan dengan estimasi kesalahan, f_a .

$$T_{b_fault} = T_{b_meas} + f_a \quad (3.21)$$

Untuk mencari kesalahan residual, \hat{f}_a , sinyal pengukuran awal dengan kesalahan bias dikurangi sinyal pengukuran hasil *observer*, seperti pada persamaan (3.22).

$$\hat{f}_a = T_{b_fault} - T_{b_obs} \quad (3.22)$$

3.4 Pembuatan *Observer*

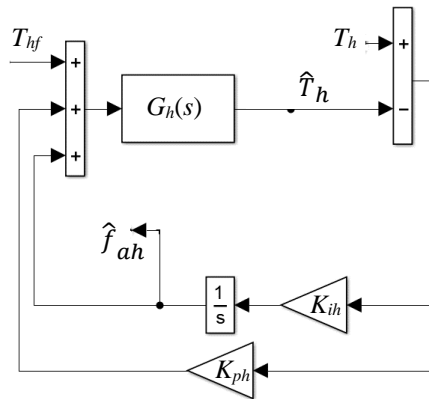
Sistem pengereman pada ABS ini memiliki 2 aktuator yaitu aktuator hidrolik dan aktuator pada motor. Aktuator dari motor memiliki torsi pengereman yang jauh lebih kecil dibandingkan dari aktuator hidrolik oleh karena itu bila terjadi kesalahan pada aktuator motor dampaknya tidak akan sebesar kesalahan dari aktuator hidrolik oleh karena itu kesalahan yang diberikan hanya kesalahan pada aktuator hidrolik karena bila terjadi kesalahan maka akan lebih berdampak dibandingkan dengan aktuator motor. Kesalahan aktuator dapat dianggap sebagai gangguan yang muncul di persamaan state. Dengan demikian, estimasi kesalahan aktuator hidrolik f_{ah} dilakukan dengan cara yang sama dengan estimasi gaya friksi F_x , namun menggunakan model dinamik sistem hidrolik atau persamaan (3.7). Pada **Gambar 3.11** akan menunjukkan pemodelan dari observer untuk mengakomodasi kesalahan yang ada pada aktuator hidrolik

$$\dot{\hat{T}}_h = T_{hf} + \hat{f}_{ah} + K_{ph}(T_h - \hat{T}_h) \quad (3.23)$$

$$\dot{\hat{f}}_{ah} = K_{ih}(T_h - \hat{T}_h) \quad (3.24)$$

Dimana:

- $\dot{\hat{T}}_h$ = torsi rekomendasi dari controller
- \hat{f}_{ah} = estimasi kesalahan aktuator hidrolik
- T_h = torsi hidrolik terukur
- $G_h(s)$ = fungsi transfer aktuator hidrolik



Gambar 3.11 PI Observer untuk estimasi kesalahan aktuator hidraulik f_a

3.5 Pengujian Sistem *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk Kesalahan Aktuator

Pengujian sistem AFTC bertujuan agar dapat mengetahui sistem yang telah dirancang mampu untuk mengatasi dan mengkompensasi kesalahan pada aktuator hidraulik. Kesalahan yang terjadi pada aktuator hidraulik berupa kesalahan bias yang diletakan pada detik 0.2 dengan kesalahan yang terjadi 30%, 50%, 75% pembagian itu dilakukan untuk menguji ketahanan dari aktuator tersebut terhadap kesalahan. Kesalahan tersebut berupa tidak sepenuhnya valve menutup dan keterlambatan dari kinerja valve itu sehingga menyebabkan sistem tidak dapat bekerja secara 100%.

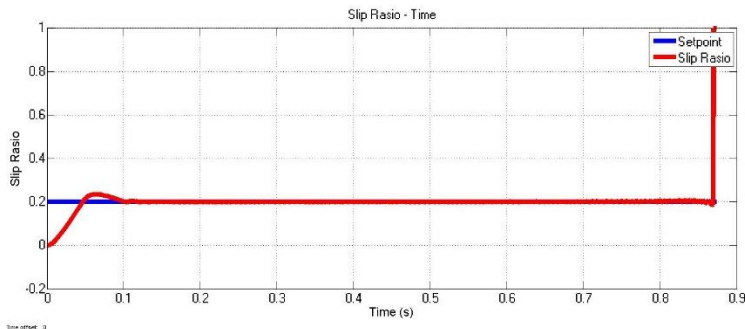
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Bab IV akan menjelaskan mengenai hasil perancangan dari *Fuzzy Sliding Mode Fault Tolerant Control* pada sistem pengendalian torsi pengereman untuk *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan perangkat lunak *Matlab R2014a* 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 AFTC bekerja dengan baik atau tidak untuk mengakomodasi kesalahan pada aktuator hidrolis.

4.1 Pengujian Menggunakan Sliding Mode Controller

Uji *closed loop* pada simulasi dibuat dengan menyerupai gambar diagram blok 3.5 melalui *simulink* perangkat lunak *Matlab 2014a*. Pada pengujian ini dilakukan sebagai peninjau untuk respon pengendalian dari *slip ratio* dapat stabil di *setpoint*. Pengujian *close loop* dilakukan menggunakan *sliding mode controller* (SMC) dengan nilai $\varepsilon = 100, k = 0.1$ ke model *quarter car model* (QCM).



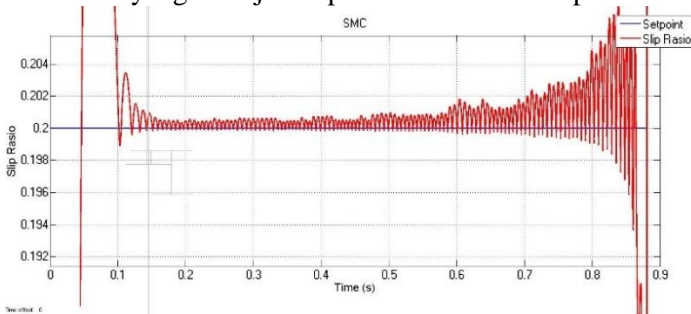
Gambar 4.1 Respon *slip ratio* pada sistem *closed loop* dengan pengendalian *sliding mode controller*

Tabel 4.1 Parameter performansi sistem pengendalian untuk uji *close loop Sliding Mode Controller*

Parameter Performansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	17%
<i>Settling Time</i>	0,159s
<i>Error Steady State</i>	1 %

Hasil grafik dari **Gambar 4.1** menunjukkan bahwa respon berada disekitar *setpoint* dan menuju nilai 1 saat kendaraan berhenti pada detik ke – 0,8786 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

Pada penelitian dengan hanya menggunakan SMC ini masih ditemukan fenomena chattring jika kita membesarkan hasil grafik sistem tersebut yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2** seperti berikut.



Gambar 4.2 fenomena chattring pada *Sliding Mode Controller*

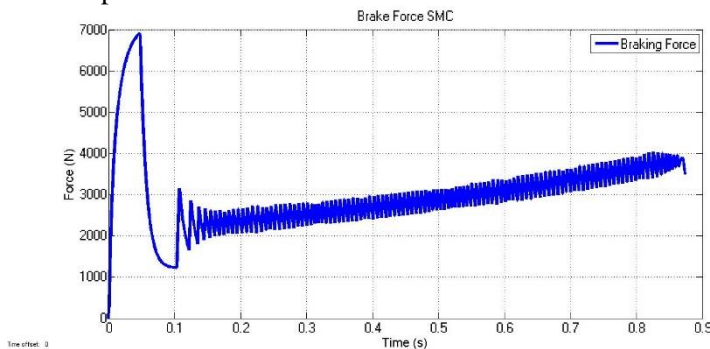
Pada gambar diatas dapat dilihat fenomena chattring dari SMC dapat dilihat bahwa terjadi osilasi yang tidak beraturan pada sistem tersebut. Pada detik antara 0.2 dan 0.3 saja sudah terjadi 17 osilasi yang tidak beraturan. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya ban terkunci secara tiba-tiba dan mengurangi stabilitas dari pengereman tersebut.

Hal yang dapat di analisa lagi dari SMC adalah respon dari kecepatan kendaraan dan kecepatan roda.



Gambar 4.3 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Sliding Mode Controller*

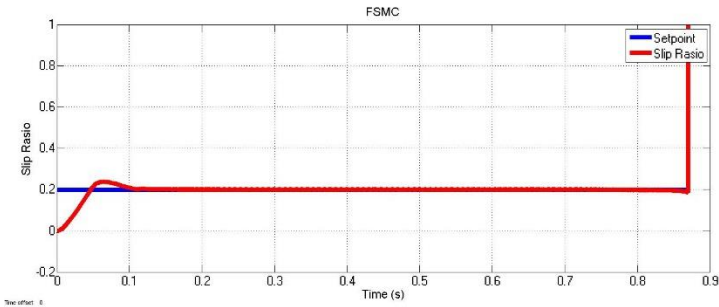
Pada **Gambar 4.3** menunjukkan bahwa SMC mengendalikan kecepatan dari kendaraan dan kecepatan roda agar berhenti secara bersamaan pada detik 0.8808, hal ini bertujuan agar kecepatan dari kendaraan atau kecepatan dari roda tidak turun secara drastis yang nantinya dapat menyebabkan ban terkunci dan kendaraan tidak dapat di kendalikan.



Gambar 4.4 Respon *Braking Force* pada *Sliding Mode Controller*

4.2 Pengujian Menggunakan Fuzzy Sliding Mode Controller

Pengujian ini sama dengan pengujian pada sebelumnya menggunakan *simulink* perangkat lunak *Matlab 2014a* dengan menggunakan fuzzy untuk mengurangi fenomena chattering tersebut.



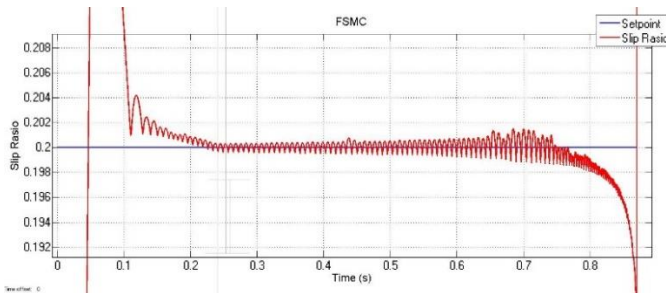
Gambar 4.5 Respon *slip ratio* pada sistem *close loop* dengan pengendalian *fuzzy sliding mode controller*

Tabel 4.2 Parameter performansi sistem pengendalian dengan *Fuzzy Sliding Mode Controller* untuk uji *close loop*

Parameter Perfomansi	Nilai
<i>Maximum Overshoot</i>	18.7%
<i>Settling Time</i>	0.212s
<i>Error Steady State</i>	0.4%

Pada pengujian menggunakan *fuzzy sliding mode controller* didapatkan nilai dari *overshoot* mencapai nilai 18.7% nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa menggunakan *fuzzy*. Dan *settling time* pada respon ini lebih lama dibandingkan tanpa menggunakan *fuzzy* yaitu mencapai 0.212s. tetapi nilai *error steady state* yang didapat jauh lebih kecil yaitu 0.4% hal itu disebabkan karena *fuzzy* mengontrol nilai dari epsilon atau konstanta robust berdasarkan nilai eror dari *slip rasio* itu sendiri.

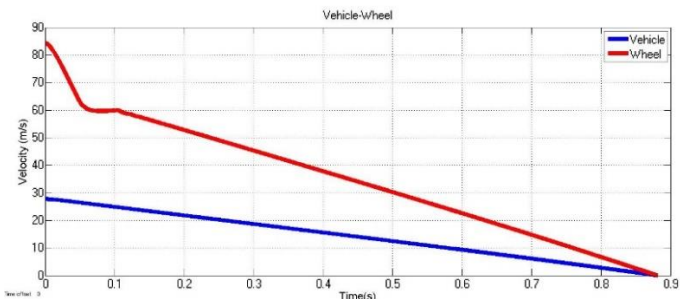
Hasil osilasi dari penggunaan *fuzzy* tersebut juga lebih terkontrol sehingga pengereman lebih aman karena tidak terjadi lock pada ban secara tiba-tiba dan stabilitas dari kendaraan lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan *fuzzy*.



Gambar 4.6 osilasi pada hasil grafik menggunakan *Fuzzy Sliding Mode Controller*

Dapat dilihat dari **Gambar 4.6** bahwa osilasi dari fuzzy sliding mode controller lebih kecil dan fenomena chattering pada hasil simulasi ini lebih baik. Osilasi yang dihasilkan pun lebih sedikit pada waktu ke 0.2 sampai 0.3 terjadi hanya 13 muka gelombang saja dan dengan perubahan nilai yang sedikit dibandingkan dengan tanpa menggunakan fuzzy yang dapat terjadi 17 muka gelombang dengan perubahan yang tidak beraturan.

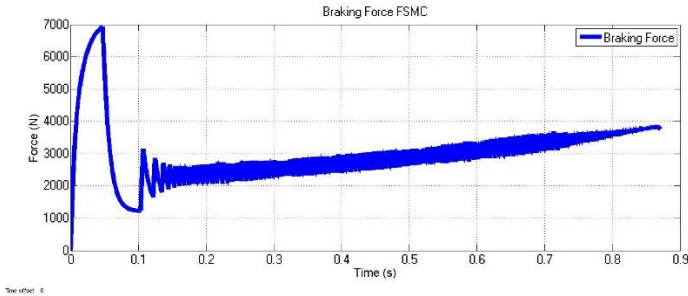
Respon dari perbandingan kecepatan roda dan kendaraan dengan menggunakan FSMC dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Fuzzy Sliding Mode Controller*

Pada gambar di atas menunjukkan bahwa kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dikendalikan agar berhenti secara bersamaan yaitu pada detik ke 0.8508 s. waktu berhenti ini didapati lebih cepat

dari SMC yang berhenti pada detik 0.8734 s. FSMC lebih cepat berhenti dikarenakan kekuatan dari pengereman aktuator tersebut dikendalikan tergantung dari nilai eror pengukuran yang didapat sehingga kendaraan lebih terkendali sehingga kendaraan lebih cepat berhenti.



Gambar 4.8 Respon *Braking Force* pada *Fuzzy Sliding Mode Controller*

Tabel 4.3 Parameter Berhenti Kendaraan

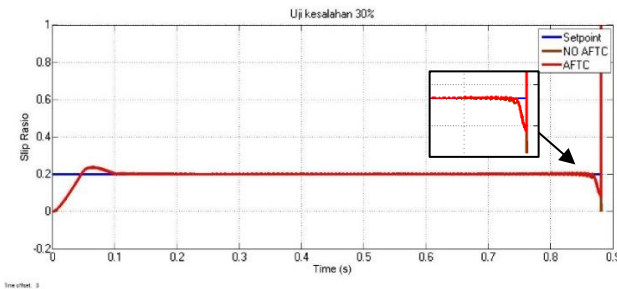
Parameter	SMC	FSMC
<i>Stopping distance</i>	12.5247 m	12.5114 m
<i>Time Stop</i>	0.8734 s	0.8508 s

4.3 Uji kesalahan Aktuator

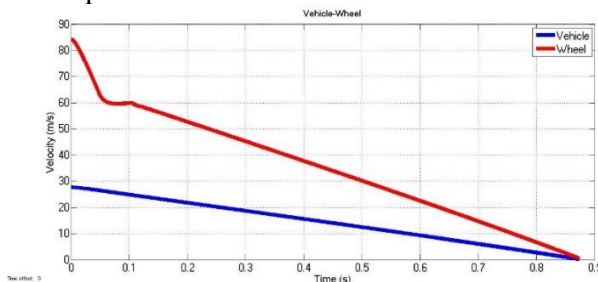
Tahap ini dilakukan uji kesalahan pada aktuator hidraulik dengan kesalahan yang terjadi berupa kebocoran yang mana kebocoran tersebut akan mengurangi laju aliran variabel manipulasi yang akan masuk ke sistem *quarter car model* (QCM). Kesalahan sistem yang diberikan ke aktuator hidraulik pada detik ke 0.2 dengan kesalahan sebesar 30%, 50%, dan 75% dengan total waktu sampling saat simulasi 1 detik. Kesalahan ini diberikan dengan memasukan sinyal step untuk mengganggu kendaraan pada saat pengereman terjadi yang besarnya kesalahan berdasarkan dari kecil, sedang, dan besar.

4.3.1 Uji Kesalahan 30%

Tahap ini dilakukan uji kesalahan pada aktuator hidraulik dengan memberikan sinyal step pada simulasi. Pengujian ini dilakukan dengan sistem yang menggunakan fuzzy dan tanpa menggunakan fuzzy hal ini dilakukan untuk mencoba kekuatan dari kedua sistem tersebut. Pada sistem yang tidak menggunakan fuzzy dan menggunakan fuzzy tetapi kedua sistem ini menggunakan AFTC untuk dapat mengakomodasi kesalahan. pada percobaan sistem yang tidak menggunakan fuzzy pada detik 0.2 dan sistem yang bekerja hanya 70% dikarenakan diberikan kesalahan sebesar 30% yang harusnya menyebabkan grafik dari slip rasio akan mengalami gangguan tetapi hasil yang didapat yang ditunjukkan pada **Gambar 4.9** menunjukkan bahwa AFTC dapat mengakomodasi kesalahan yang terdapat pada sistem SMC.

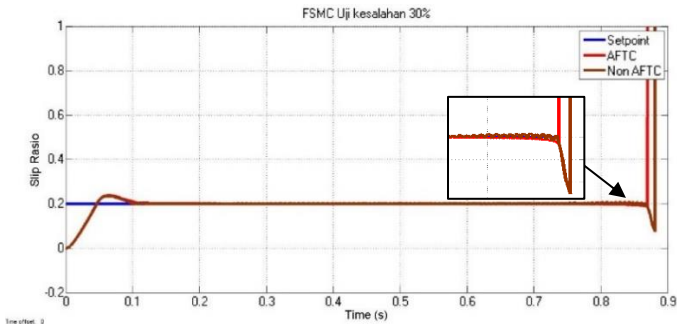


Gambar 4.9 Hasil uji slip ratio menggunakan SMC dengan AFTC pada kesalahan 30%



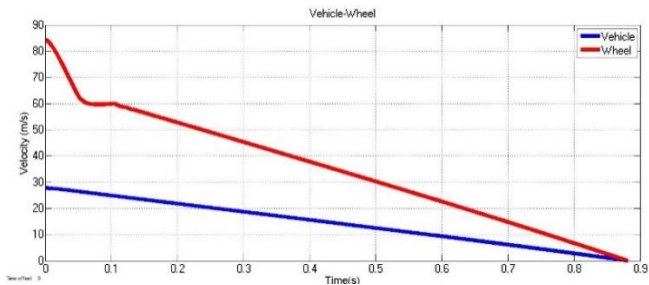
Gambar 4.10 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Sliding Mode Controller* dengan AFTC pada kesalahan 30%

Pada pengujian dengan menggunakan FSMC menunjukkan hal yang sama yaitu AFTC dapat mengakomodasi kesalahan dengan ditunjukkan pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4.11 Hasil uji slip rasio menggunakan FSMC dengan AFTC pada kesalahan 30%

Pada pengujian dengan menggunakan FSMC menunjukkan hal yang sama yaitu AFTC dapat mengakomodasi kesalahan dengan ditunjukkan pada **Gambar 4.11**.



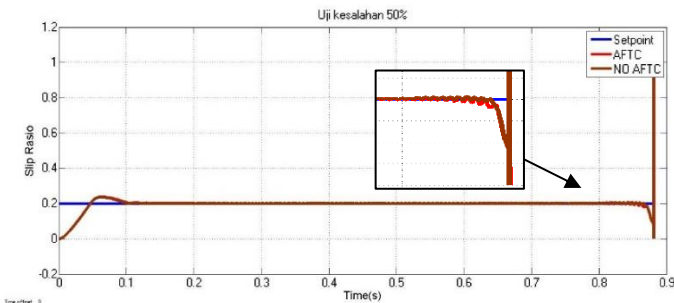
Gambar 4.12 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Fuzzy Sliding Mode Controller* dengan AFTC pada kesalahan 30%

Tabel 4.4 Parameter performansi slip rasio pada kesalahan 30%

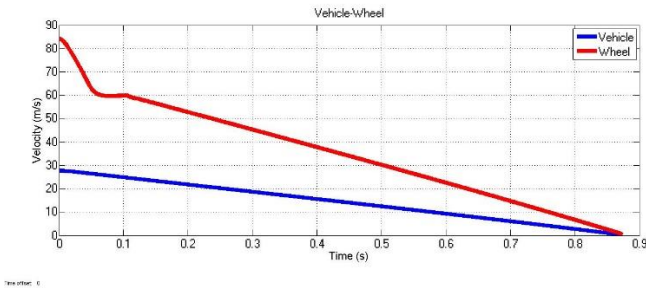
Parameter Performansi	SMC AFTC	FSMC AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	17%	18,8 %
<i>Settling Time</i>	0,158 s	0,212 s
<i>Error Steady State</i>	1 %	0,4%

4.3.2 Uji Kesalahan 50%

Tahap ini dilakukan uji kesalahan pada aktuator hidraulik dengan memberikan sinyal step pada simulasi. Pengujian ini dilakukan dengan sistem yang menggunakan fuzzy dan tanpa menggunakan fuzzy hal ini dilakukan untuk mencoba kekuatan dari kedua sistem tersebut. Pada sistem yang tidak menggunakan fuzzy dan menggunakan fuzzy tetapi kedua sistem ini menggunakan AFTC untuk dapat mengakomodasi kesalahan. pada percobaan sistem yang tidak menggunakan fuzzy pada detik 0.2 diberikan kesalahan sebesar 50% yang membuat sistem bekerja hanya sebagian saja, harusnya menyebabkan grafik dari slip rasio akan mengalami perubahan tetapi hasil yang didapat yang ditunjukkan pada **Gambar 4.13** menunjukkan bahwa AFTC dapat mengakomodasi kesalahan yang terdapat pada sistem SMC.

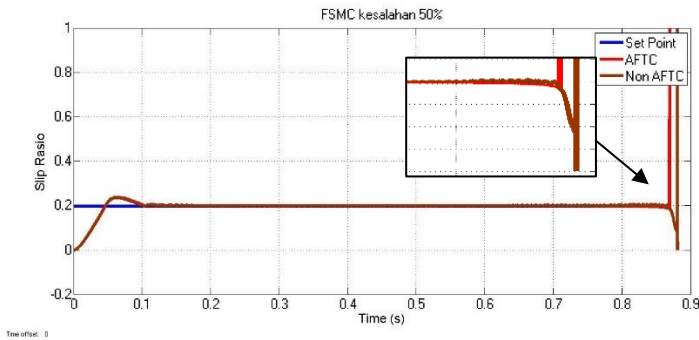


Gambar 4.13 Hasil uji slip ratio menggunakan SMC dengan AFTC pada kesalahan 50%

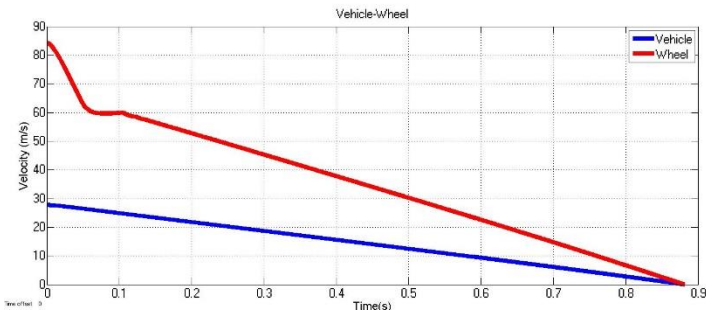


Gambar 4.14 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Sliding Mode Controller* dengan AFTC pada kesalahan 50%

Pada pengujian dengan menggunakan FSMC menunjukkan hal yang sama yaitu AFTC dapat mengakomodasi kesalahan dengan ditunjukkan pada **Gambar 4.15**.



Gambar 4.15 Hasil uji slip rasio menggunakan FSMC dengan AFTC pada kesalahan 50%



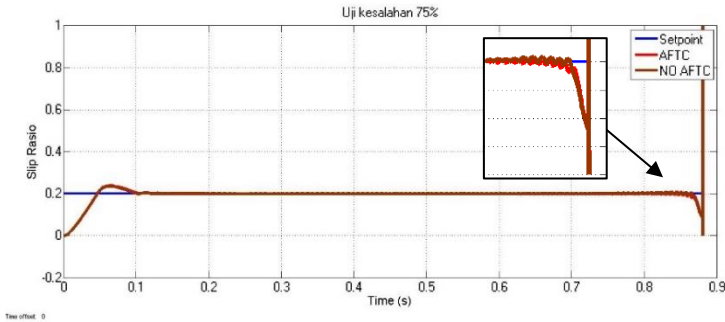
Gambar 4.16 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Fuzzy Sliding Mode Controller* dengan AFTC pada kesalahan 50%

Tabel 4.5 Parameter performansi slip rasio pada kesalahan 50%

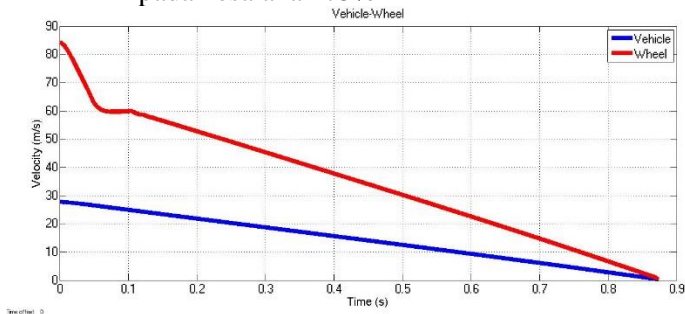
Parameter Performansi	SMC AFTC	FSMC AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	17%	18,8 %
<i>Settling Time</i>	0,158 s	0,212 s
<i>Error Steady State</i>	1 %	0,4%

4.3.3 Uji Kesalahan 75%

Tahap ini dilakukan uji kesalahan pada aktuator hidraulik dengan memberikan sinyal step pada simulasi. Pengujian ini dilakukan dengan sistem yang menggunakan fuzzy dan tanpa menggunakan fuzzy hal ini dilakukan untuk mencoba kekuatan dari kedua sistem tersebut. Pada sistem yang tidak menggunakan fuzzy dan menggunakan fuzzy tetapi kedua sistem ini menggunakan AFTC untuk dapat mengakomodasi kesalahan. pada percobaan sistem yang tidak menggunakan fuzzy pada detik 0.2 diberikan kesalahan sebesar 75% yang membuat sistem hanya bekerja 25% dan harusnya menyebabkan grafik dari slip rasio akan mengalami gangguan tetapi hasil yang didapat yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17** menunjukkan bahwa AFTC dapat mengakomodasi kesalahan yang terdapat pada sistem.

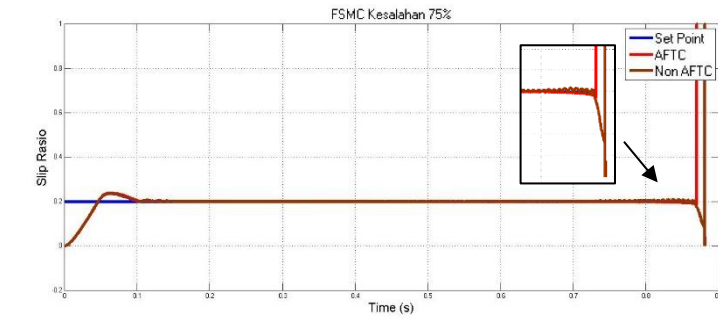


Gambar 4.17 Hasil uji slip rasio menggunakan SMC dengan AFTC pada kesalahan 75%

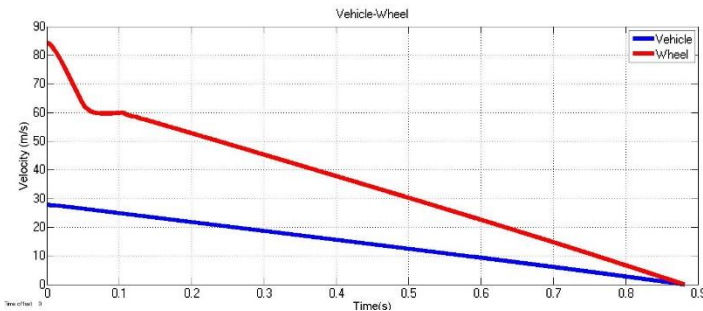


Gambar 4.18 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Sliding Mode Controller* dengan AFTC pada kesalahan 75%

Berbeda dengan pengujian menunukan FSMC, pada pengujian FSMC tidak terjadi kenaikan pada grafik slip rasio hal ini dikarenakan FSMC lebih peka terhadap eror sehingga dapat mengubah kondisi nilai pada epsilon.



Gambar 4.19 Hasil uji slip rasio menggunakan FSMC dengan AFTC pada kesalahan 75%



Gambar 4.20 Respon kecepatan kendaraan dan kecepatan roda dengan *Fuzzy Sliding Mode Controller* dengan AFTC pada kesalahan 75%

Tabel 4.6 Parameter performansi slip rasio pada kesalahan 75%

Parameter Perfomansi	SMC AFTC	FSMC AFTC
<i>Maximum Overshoot</i>	17%	18,8 %
<i>Settling Time</i>	0,158 s	0,212 s
<i>Error Steady State</i>	1 %	0,4%

FSMC memiliki kelebihan dibandingkan SMC untuk mengakomodasi kesalahan pada 75% . Kesalahan yang diberikan adalah berupa sinyal gangguan yang diberikan pada detik tertentu

sinyal itu mempengaruhi kinerja dari aktuator sehingga mempengaruhi torsi pengereman yang dihasilkan aktuator. Tentu saja hal itu akan mempengaruhi slip rasio yang terukur sehingga eror pada SMC tidak bisa dikendalikan karena sistem tidak bisa mengatur seberapa kekakuan dari SMC meskipun telah menggunakan AFTC sehingga menyebabkan kendaraan tergelincir sehingga slip rasio menyentuh angka 0 dan tidak langsung berhenti.. Hal itu tidak akan terjadi pada sistem FSMC yang didukung oleh logika fuzzy, kesalahan yang mempengaruhi slip rasio akan masuk ke sistem FSMC dan FSMC akan mengatur kekuatan sistem dengan bantuan logika fuzzy sehingga sinyal step yang berupa kesalahann tersebut akan dapat di diakomodasi dengan baik karena sistem FSMC memiliki tingkat ke sensitifitasan yang baik terhadap perubahan eror yang terjadi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan sistem *Active Fault Tolerant Control* pada pengendalian torsi pengereman untuk *regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) dengan kesalahan pada aktuator hidraulik adalah sebagai berikut:

- *Fuzzy sliding mode controller* yang dirancang sudah mampu mengurangi fenomena chatter yang terjadi pada detik 0.2 sampai 0.3 pada *sliding mode controller* menghasilkan 17 muka gelombang yang tidak beraturan dan *Fuzzy sliding mode controller* menghasilkan 13 muka gelombang yang teratur.
- Perancangan sistem AFTC dapat mengkompensasi kesalahan yang terjadi pada 30%,50%,75% dengan baik dibantu oleh FSMC yang peka terhadap kesalahan yang terjadi dengan parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* dengan menggunakan FSMC berturut-turut sebesar 18.8%, 0.212s, dan 0.4%. sedangkan dengan menggunakan SMC didapati parameter performansi dari *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* berturut-turut sebesar 17%, 0.158s, dan 1%.

5.2 Saran

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

- Pemodelan *regenerative ABS* dengan menggunakan pemodelan 4 roda dan menambahkan *fuzzy logic control* agar dapat merepresentasikan *real time plant*.
- Perancangan AFTC yang sudah ada agar dapat diimplementasikan ke *real plant* untuk membuktikan sistem AFTC pada *regenerative ABS* sudah dapat diaplikasikan.

- Gaya berat pada kendaraan agar ditinjau agar dapat memposisikan kendaraan saat adanya tanjakan atau turunan

DAFTAR PUSTAKA

- Aly, A. A., Zeidan, E.-S., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 186-195.
- Arigi, A. D. (2018). *Perancangan Active Fault Tolerant Control Pada Anti-Lock Braking System (ABS) Mobil Listrik dengan Kesalahan Pada Aktuator*. Surabaya, Jawa Timur: Repository ITS.
- Arzumanyan, N. K., Smirnova, M. A., & Smirnov, M. N. (2015). Synthesis and Modelling of Anti-Lock Braking System. *IEEE*, 1-3.
- Ashok.C.Meti. (t.thn.). Antilock braking system. M.S Ramaiah School of Advanced Studies.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., & Staroswiecki, M. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control* (2nd ed.). New York, USA: Springer Verlag.
- C., E. P., A., A. F., Chidiebere, M., & Hope, E. I. (2018). Linear Slip Control for Improved Antilock Braking System. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 198-206.
- Chen, C. K., & Wang, Y. C. (1996). Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System. *Fuzzy Systems Symposium* (hal. 67-72). Kenting, Taiwan: IEEE.
- diarnise, s. (2018). Perancangan sistem fault tolerant control (AFTC) pada regenerative antilock braking system mobil listrik dengan kesalahan pada aktuator.
- El-kharashi, M. w., & A, M. S. (1997). *Trancking Fuzzy Sliding Mode Control*, 729-735.
- G, M., P, W., & V, E. (2010). Vehicle System Dynamics. *Improvements to a five-phase abs algorithm for experimental validation*, 00, 1-22.
- Gadewar, S. V., & Jain, A. M. (2017). Modelling and Simulation of Three Phase BLDC Motor for Electric Braking Using

- MATLAB/SIMULINK. *WRFER-IEEEFORUM International Conference* (hal. 14-19). Pune, India: IEEE.
- 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 Antilock Brake System. *EUROCON* (hal. 258-261). Belgrade, Serbia & Montenegro: IEEE.
- Holkar, K. S., & Waghmare, L. M. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. *International Journal of Computer Application*, 1-5.
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2013). Reconfigurable Fault-Tolerant Control of Linear System with Actuator and Sensor Faults. *International Conference on Control System, Computing and Engineering* (hal. 22-27). Penang, Malaysia: IEEE.
- 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. (2005). Fault-tolerant Control Systems - An Introductory Overview. *Acta Automatica Sinica*, 31(1), 161-174.
- Johansen, T. A., Petersen, I., Kalkkuhl, J., & Ludemann, J. (2003). Gain-Scheduled Wheel Slip Control in Automotive Brake Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 799-811.
- Lee, Y., & Zak, S. H. (2002). Designing a Genetic Neural Fuzzy Antilock-Brake-System Controller. *Transaction on Evolutionary Computation* (hal. 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*, 5, 359-386.
- Mahmoud, M. M., Jiang, J., & Zhang, Y. (2003). *Active Fault Tolerant Control Systems: Stochastic Analysis and Synthesis*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Motors, M. (2015). *Anti-Lock Brake System*. Diambil kembali dari ROBUSTETE SI SIGURANTA: <https://www.mitsubishi-motors.ro/tehnologie/abs/#!>
- 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.
- Noura, H., Theiliol, D., Ponsart, J. C., & Chamseddine, A. (2009). *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*. London: Springer-Verlag.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Enginnering: Fifth Edition*. New Jersey: Prentice Hall.
- Patton, R. J. (1997). Fault tolerant control: the 1997 situation. *IFAC Safeprocess '97*. Hull, United Kingdom: IFAC.
- Peng, D., Zhang, Y., Yin, C. L., & Zhang, J. W. (2008). Combined Control of a Regenerative Braking and Antilock Braking System for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal Automotive Technology*, 749-757.
- Petersen, I., Johansen, T. A., Kalkkuhl, J., & Ludemann, J. (2003). Wheel Slip Control Using Gain-Scheduled LQ-LPV/LMI Analysis and Experimental Results. *European Control Conference* (hal. 880-885). Cambridge, UK: European Control Community.
- Rahmani, M., Ghanbari, A., & Ettefagh, M. M. (2016).

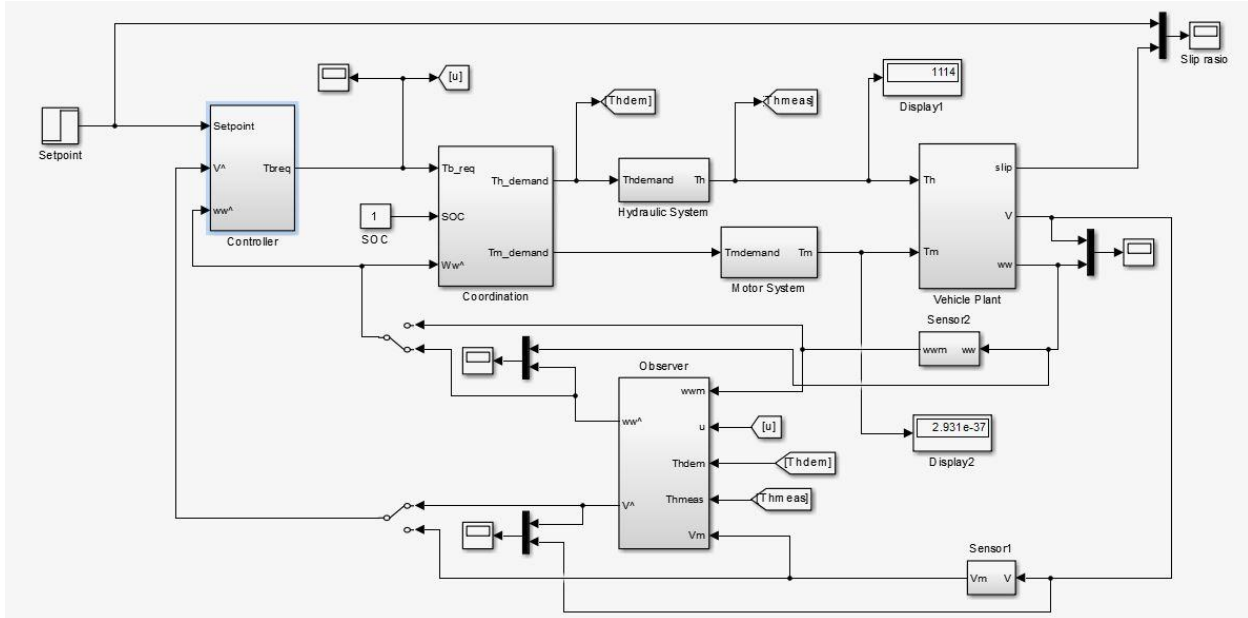
- Robust Adaptive Control of a Bioinspired Robot Manipulator Using Bat Algorithm. *Expert Systems with Applications* 56, 164-176.
- Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Smart, J. (2016, March 3). *Idaho National Laboratory*. Dipetik January 15, 2018, dari Idaho National Laboratory Web Site: <https://at.inl.gov>
- Solyom, S., & Rantzer, A. (2002). *Synthesis of a Model-Based Tire Slip Controller*. Lund, Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.
- Stanislaw, H. Z., & Yonggon, L. (2002). Designing a Genetic Neural Fuzzy Antilock-Brake-System Controller. *Transaction on Evolutionary Computation* (hal. 198-211). IEEE.
- Staroswiecki, M., & Gehin, A. (2001). From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25(1), 1-11.
- Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-lock Braking System. *Intelligent Vehicles Symposium* (hal. 944–948). Istanbul, Turkey: IEEE.
- Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-lock Braking System. *Intelligent Vehicles Symposium* (hal. 944–948). Istanbul, Turkey: IEEE.
- W.Li. (2010). ABS Control on Modern Vehicle Equipped with Regenerative Braking.
- Wabco, M. (1999). *Anti-Lock Braking System Training Program: Student Manual*. Troy, MI USA: Meritor WABCO Vehicle Control System.
- Yanan, G. (2016). Research on Electric Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery. *International*

- Journal of Hybrid Information Technology*, 81-90.
- Yi, L., Zhang, C., & Wang, G. (2017). Research of Self-Tuning PID for PMSM Vector Control based on Improved KMTOA. *International Journal of Intelligent Systems and Applications(IJISA)*, 60-67.
- YU, J. (1997). "A robust adaptive wheel-slip controller for antilock brake system," in *Decision and Control*. 2545-2546.
- Zhang, Y., & Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 32, 229–252.

Halaman ini sengaja dikosongkan

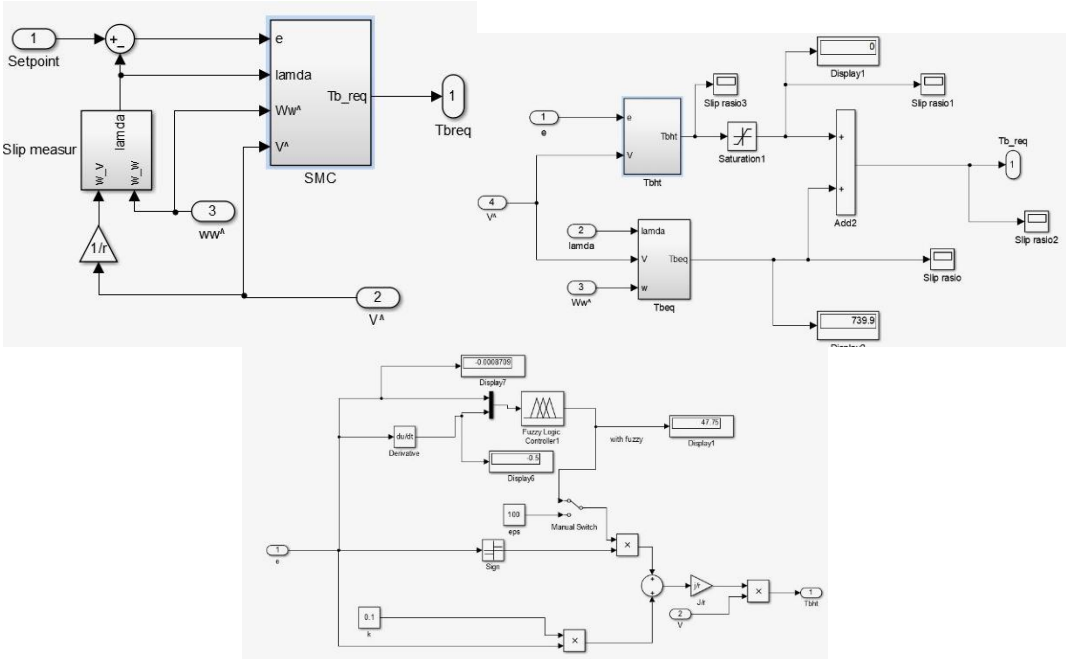
LAMPIRAN

SIMULINK MATLAB R2013a GENERAL REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM



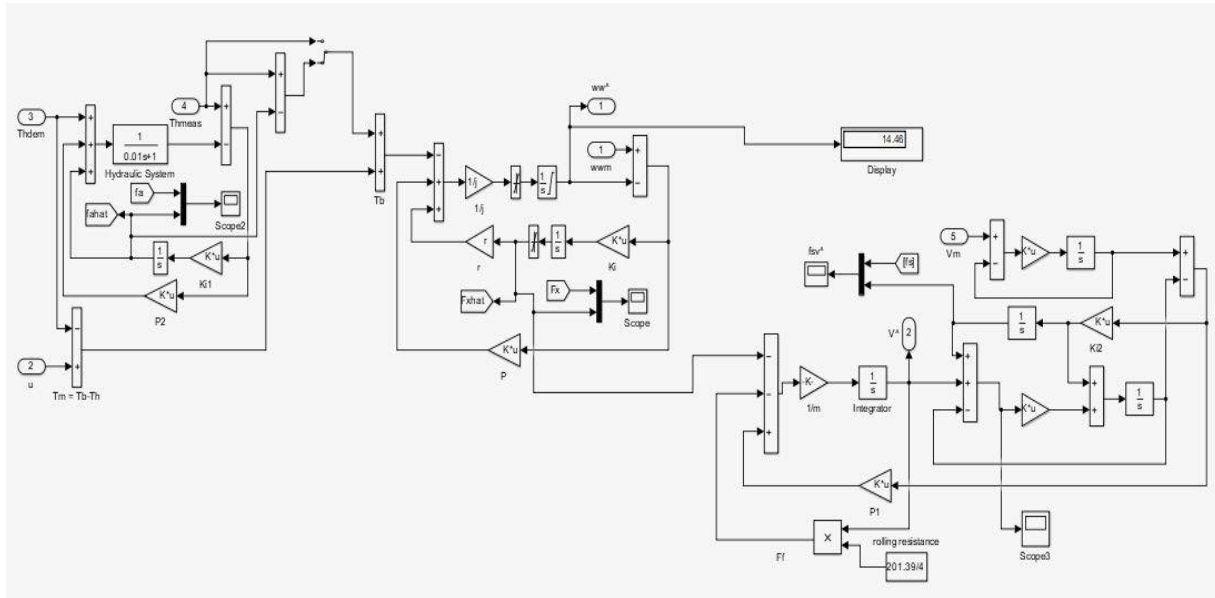
Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULINK MATLAB R2014a FUZZY SLIDING MODE CONTROLLER (FSMC)



Halaman ini sengaja dikosongkan

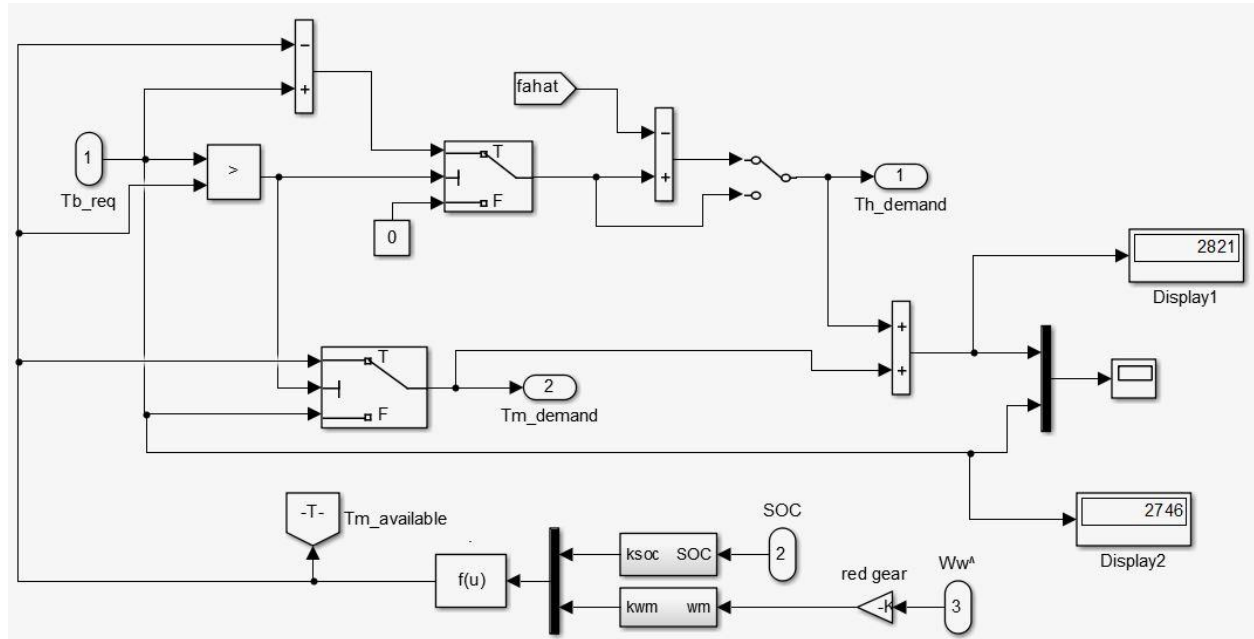
SIMULINK MATLAB R2014a *OBSERVER REGENERATIVE ABS*



Halaman ini sengaja dikosongkan

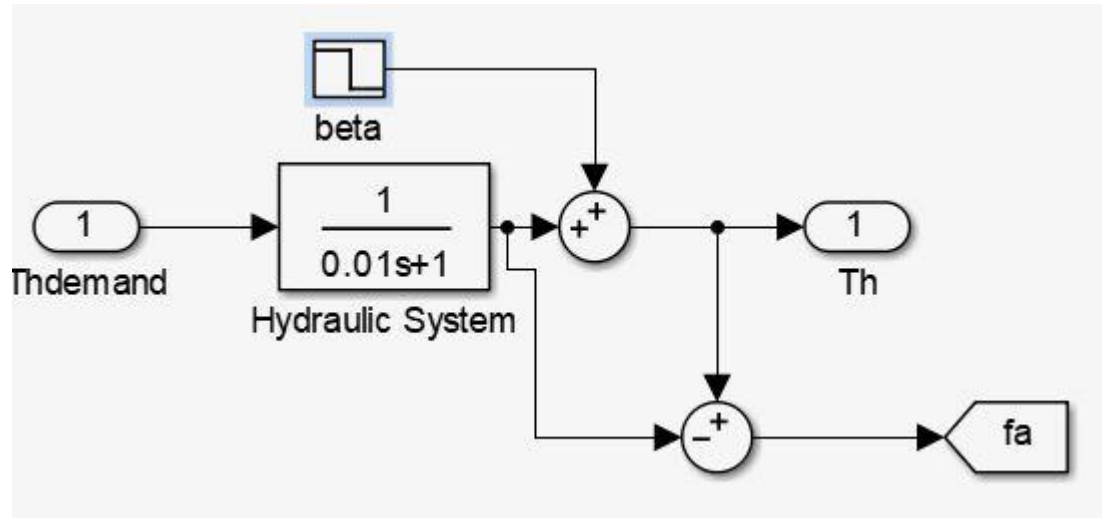
Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULINK MATLAB R2014a *COORDINATION REGENERATIVE ABS*



Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULINK MATLAB R2014a *FAULT* AKTUATOR *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)

BIODATA PENULIS



Nama penulis Ahmad Hafidh Hidayatullah dilahirkan di Sidoarjo, tanggal 28 Februari 1996. Saat ini penulis tinggal di Sidoarjo. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SD Khadijah Surabaya pada tahun 2008, pendidikan di SMPN 22 Surabaya pada tahun 2011, pendidikan di SMAN 15 Surabaya pada tahun 2014. Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun 2014. Semasa perkuliahan, Penulis aktif organisasi lembaga minat bakat di UKM Basket ITS) dan juga ikut berpartisipasi di Tim ITS ZELENA Electric Car ITS pada tahun 2016 dan 2017. 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 Akuator**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui *email: Hafidhidayatullah07@gmail.com*