



TUGAS AKHIR - TF 141581

PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC)* PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* PADA MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR

MUHAMMAD RIFQI PINANDHITO
NRP 0231144000050

Dosen Pembimbing
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIP. 19760523 200012 2 001
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.
NIP. 19600919 198902 1 001

Program Studi S-1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

***ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC)
DESIGN IN REGENERATIVE ANTI-LOCK
BRAKING SYSTEM OF ELECTRIC VEHICLE
WITH SENSOR FAULT***

MUHAMMAD RIFQI PINANDHITO
NRP 0231144000050

Supervisor

Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

NIP. 19760523 200012 2 001

Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

NIP. 19600919 198902 1 001

Bachelor Degree

Department of Engineering Physics

Faculty of Industrial Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Rifqi Pinandhito
NRP : 0231144000050

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

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Surabaya, 21 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Muhammad Rifqi Pinandhito
NRP. 0231144000050

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL*
(AFTC) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING*
SYSTEM PADA MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN
PADA SENSOR**

Oleh:

Muhammad Rifqi Pinandhito

NRP. 02311440000050

Surabaya, 21 Juli 2018

Mengetahui/Menyetujui

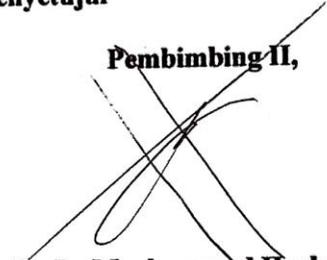
Pembimbing I,



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

NIP. 19760523 200012 2 001

Pembimbing II,



Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

NIP. 19600919 198902 1 001



Ketua Departemen
Teknik FISIKA FTI – ITS

Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN ACTIVE FAULT TOLERANT
CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE ANTI-LOCK
BRAKING SYSTEM PADA MOBIL LISTRIK DENGAN
KESALAHAN PADA SENSOR**

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:

MUHAMMAD RIFQI PINANDHITO
NRP. 0231144000050

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., 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. Ir. Ya'umar, M.T.  (Penguji I)
5. Dr.rer.nat. Ir. Aulia M.T. Nasution, M. Sc.  (Penguji II)

**SURABAYA
JULI, 2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL*
(AFTC) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING*
SYSTEM PADA MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN
PADA SENSOR**

Nama : Muhammad Rifqi Pinandhito
NRP : 0231144000050
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

Abstrak

Regenerative Anti-lock Braking System (ABS) merupakan sistem pengereman pada kendaraan listrik (*electric vehicle*) yang dapat mencegah *locking* pada roda kendaraan dan melakukan *recovery* energi kinetis pengereman roda menjadi sebuah arus *charge battery*. Pada tugas akhir, ini sistem pengereman *regenerative ABS* diterapkan pada kendaraan dengan menggunakan pendekatan *quarter car model*. *Regenerative ABS* memiliki banyak komponen didalamnya salah satunya adalah sensor. Kesalahan pada sensor dapat menurunkan tingkat *safety* dari sistem *regenerative ABS*. Pada tugas akhir, ini skema *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) diterapkan pada sistem *regenerative ABS* agar dapat mengakomodasi kesalahan pada *wheel speed sensor* sehingga dapat meningkatkan performansi sistem. Pengendali yang digunakan adalah *Sliding Mode Controller* dengan parameter *gain* k dan *epsilon* (ϵ) berturut-turut 10 dan 3 dengan *maksimum overshoot* sebesar 18,95%, *error steady state* sebesar 0% dan *settling time* sebesar 0,08 sekon. Selanjutnya, AFTC bekerja dengan menggunakan hasil perhitungan residual \hat{f}_s sebagai nilai kompensasi terhadap sinyal pengukuran. Dari hasil uji respon setelah diberi kesalahan berupa bias dan sensitivitas, sistem yang dilengkapi AFTC mampu mengatasi kesalahan sensor hingga 100%.

Kata Kunci: *Regenerative Anti-Lock Braking System* , *Sensor*, *Active Fault Tolerant Control* (AFTC)

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) DESIGN
IN REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
ELECTRIC VEHICLE WITH SENSOR FAULT**

Name : *Muhammad Rifqi Pinandhito*
NRP : *0231144000050*
Department : *Engineering Physics*
Supervisors : *Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.*
Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T.

Abstract

Regenerative Anti-lock Braking System (ABS) is a braking system in vehicle electric (electric vehicle) which can prevent locking on vehicle wheel and do recovery kinetic energy braking into a battery charge. In this paper, regenerative ABS applied in quarter car model approach. Regenerative ABS has many components in it one of them is a sensor. The sensor fault can reduce the safety level of the regenerative ABS. In this paper, Active Fault Tolerant Control (AFTC) scheme is applied to ABS regenerative ABS to accommodate the wheel speed sensor fault to improve system performance. Sliding Mode Controller is used in this regenerative ABS controller with k and epsilon (ϵ) gain parameters 10 and 3 with a maximum overshoot of 18.95%, error steady state 0% and settling time of 0.08 seconds. Then, the AFTC works by using the residual calculation result (\hat{f}_s) as the compensation value of the measurement signal. From the results of the response test after being applied the bias and sensitivity fault, the system that equipped with AFTC able to overcome the sensor fault up to 100%.

Keywords: *Regenerative Anti-Lock Braking System, Sensor, Active Fault Tolerant Control (AFTC)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC) PADA REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM PADA MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA SENSOR*”**. Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang turut membantu baik moril maupun materiil dan berperan penting dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. dan bapak Dr. Ir. Muchammad Harly, M.T selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Bapak Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T, M.T. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua (Bapak Suwidi dan Ibu Tri Wisnu Pangastuti). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
6. Seluruh teman-teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2014, teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa, terima kasih untuk dukungan dan bantuannya.
7. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. 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, 21 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN I	vii
LEMBAR PENGESAHAN II	viii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1 <i>Regenerative Anti-Lock Braking System (ABS)</i>	5
2.2 Cara Kerja <i>Regenerative Anti-Lock Braking System</i>	8
2.3 <i>Sliding Mode Controller</i>	15
2.4 <i>Active Fault Tolerant Control System</i>	18
2.5 <i>Observer State</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Pemodelan.....	27
3.1.1 Pemodelan <i>Quarter Car Model</i>	27
3.1.2 Pemodelan <i>Permanent Synchronous Motor</i>	31
3.1.3 Pemodelan <i>Wheel Speed Sensor</i>	33
3.2 Perancangan Kontrol <i>Sliding Mode Controller</i>	33
3.3 Perancangan <i>Active-Fault Tolerant Control (AFTC)</i> ..	35
3.4 Integrasi <i>Observer</i> dengan Kontroler.....	39
3.5 Uji Performansi Sistem AFTC.....	40

BAB IV ANALISA DATA	41
4.1 Uji Pemodelan <i>Anti-Lock Braking System</i>	41
4.2 Uji Sistem <i>Close Loop</i>	43
4.3 Hasil Estimasi <i>Observer</i>	44
4.4 Uji Kesalahan Bias	45
4.4.1 Uji Kesalahan Bias 10%	46
4.4.2 Uji Kesalahan Bias 25%	47
4.4.3 Uji Kesalahan Bias 50%	49
4.4.4 Uji Kesalahan Bias 75%	51
4.4.5 Uji Kesalahan Bias 100%	53
4.5 Uji Kesalahan Sensitivitas.....	55
4.5.1 Uji kesalahan Sensitivitas 10%	55
4.5.2 Uji kesalahan Sensitivitas 25%	57
4.5.3 Uji kesalahan Sensitivitas 100%	59
4.6 Respon SOC Baterai pada <i>Regenerative ABS</i>	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kurva perbandingan koefisien gesek permukaan jalan dengan <i>slip ratio</i> roda (Lubbers, 2014)	6
Gambar 2. 2 Komponen <i>Regenerative Anti-Lock Braking System</i> (Jingang dkk, 2014).....	8
Gambar 2. 3 Sensor Kecepatan Roda dan <i>Reluctor Ring</i>	9
Gambar 2. 4 Skema Sensor Kecepatan Roda (Gamazo dkk, 2010).....	10
Gambar 2. 5 <i>Electronic Control Unit</i>	10
Gambar 2. 6 Konfigurasi unit PMSM pada <i>Electric Vehicle</i> (Grunditz, 2014)	13
Gambar 2. 7 Interpretasi grafik SMC (Holkar, 2013).....	15
Gambar 2. 8 Gambaran umum <i>Active Fault Tolerant Control</i> (Jiang, 2005).....	18
Gambar 2. 9 Skema Rekonfigurasi Kontrol (Indriawati, 2015).....	20
Gambar 2. 10 <i>Observer State</i> (Ogata, 2010).....	22
Gambar 2. 11 <i>Extended State Observer</i> (Indriawati, 2015).....	24
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> tugas akhir	26
Gambar 3. 2 Diagram blok <i>regenerative ABS</i>	27
Gambar 3. 3 <i>Quarter car model</i> (Tur, 2007)	29
Gambar 3. 4 Nilai optimal kurva perbandingan koefisien gesek permukaan jalan dengan <i>slip ratio</i> roda	30
Gambar 3. 5 Skema diagram blok perancangan kontrol SMC ..	35
Gambar 3. 6 Perancangan <i>observer</i> pada <i>Regenerative Anti-Lock Braking System</i>	40
Gambar 4. 1 Grafik respon sistem pada <i>loop</i> terbuka.....	41
Gambar 4. 2 Grafik kecepatan angular roda berbanding kecepatan kendaraan tanpa dilengkapi ABS	42
Gambar 4. 3 Grafik kecepatan angular roda berbanding kecepatan kendaraan setelah dilengkapi ABS	42
Gambar 4. 4 Respon sistem <i>close loop</i> dengan SMC	43
Gambar 4. 5 Respon sistem <i>close loop</i> dengan PID <i>Auto-tuning</i> (Maya, 2018)	44

Gambar 4. 6	Hasil estimasi kesalahan sensor dengan pengukuran kecepatan menggunakan <i>wheel speed sensor</i>	45
Gambar 4. 7	Hasil uji respon <i>slip ratio</i> kesalahan bias 10% ...	46
Gambar 4. 8	Hasil pengukuran kecepatan roda bias 10%	47
Gambar 4. 9	Hasil uji respon <i>slip ratio</i> kesalahan bias 25% ...	48
Gambar 4. 10	Hasil pengukuran kecepatan roda bias 25%	49
Gambar 4. 11	Hasil uji respon <i>slip ratio</i> kesalahan bias 50% ...	50
Gambar 4. 12	Hasil pengukuran kecepatan roda bias 50%	51
Gambar 4. 13	Hasil uji respon <i>slip ratio</i> kesalahan bias 75% ...	51
Gambar 4. 14	Hasil pengukuran kecepatan roda bias 75%	52
Gambar 4. 15	Hasil uji respon <i>slip ratio</i> kesalahan bias 100% ..	53
Gambar 4. 16	Hasil pengukuran kecepatan roda bias 100%	54
Gambar 4. 17	Respon sistem kesalahan sensitivitas 10%	56
Gambar 4. 18	Hasil pengukuran kecepatan roda kesalahan sensitivitas 10%	57
Gambar 4. 19	Respon sistem kesalahan sensitivitas 25%	58
Gambar 4. 20	Hasil pengukuran kecepatan roda kesalahan sensitivitas 25%	58
Gambar 4. 21	Respon kesalahan sensitivitas 100%	59
Gambar 4. 22	Hasil pengukuran kecepatan roda kesalahan sensitivitas 100%	60
Gambar 4. 23	SOC baterai pengereman <i>regenerative ABS</i>	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Koefisien Gesek Roda-Jalan (Jingang dkk, 2014).....	7
Tabel 3. 1 Parameter gaya pada saat pengereman	29
Tabel 3. 2 Parameter koefisien gesekan.....	31

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan jumlah kendaraan bermotor yang digunakan masyarakat memberikan dampak negatif seperti polusi udara akibat gas buang kendaraan berbahan bakar minyak bumi (kendaraan konvensional) (Anair, 2012). Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak buruk dari mobil konvensional, saat ini telah dikembangkan teknologi kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV). Seperti halnya kendaraan konvensional, EV juga memerlukan beberapa fitur agar dapat bekerja dengan baik, salah satunya pada sistem pengereman yang memerlukan fungsi monitoring dan pengendalian.

Umum diketahui bahwa sistem pengereman berperan penting pada kendaraan dalam hal keamanan (*safety*). Kegagalan pada sistem pengereman dapat menyebabkan kecelakaan yang berakibat fatal. Teknologi sistem pengereman terkini yang umum dikenal saat ini dan telah menjadi perangkat standar kendaraan adalah sistem *anti-lock braking* (ABS). ABS merupakan sistem pengamanan pada sistem pengereman kendaraan agar roda pada mobil tidak terkunci ketika pengereman secara mendadak dilakukan. Hal ini menjadikan jarak pengereman (*braking distance*) lebih pendek dan kendaraan masih tetap stabil atau mudah dikendalikan saat dilakukan pengereman pada kondisi berbelok. Dengan demikian, mobil dengan ABS dapat mengurangi jarak penghentian mobil dan meningkatkan manuverabilitas dibandingkan dengan mobil yang tidak memiliki (Lee dkk, 2002).

Pada EV, sistem ABS selain terdiri atas sistem pengereman gesekan (*friction*), juga dilengkapi komponen pengereman *regenerative* seperti yang dijelaskan pada (Tur dkk, 2007). Sistem pengereman menggunakan *regenerative system* berfungsi merubah fungsi motor menjadi generator pada saat dilakukan pengereman pada mobil, sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dapat disimpan di dalam baterai atau digunakan dalam menjalankan kendaraan. Sistem pengereman

regenerative dapat mengubah energi kinetik menjadi energi listrik ketika terjadi perlambatan pada kendaraan. Energi listrik tersebut selanjutnya dapat disimpan dalam baterai untuk dapat digunakan kembali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyimpanan energi yang berhasil dicapai oleh sistem ini adalah berkisar 8% - 25% dari total energi yang digunakan kendaraan, bergantung pada siklus pengaturan dan strategi kontrolnya (Yao dkk, 2006). Dengan demikian, pengereman *regenerative* dapat meningkatkan efisiensi kendaraan. Oleh karena itu, teknologi ini telah diterapkan pada berbagai jenis EV. Namun karena sistem pengereman *regenerative* dibatasi oleh banyak faktor seperti kecepatan motor dan *state of charge* (SOC) (Peng dkk, 2008) maka sistem pengereman konvensional masih tetap digunakan bersama sistem pengereman *regenerative*. Hal ini mendorong penelitian tentang strategi pengereman dan metode pengereman *regenerative* yang tepat dan handal.

Pada *regenerative* ABS, terdapat sensor yang memegang peranan penting dalam sistem kontrol. Kerusakan maupun kegagalan pada sensor tentunya akan menyebabkan kesalahan pada sistem secara keseluruhan dan dapat membuat *plant* menjadi *malfunction*. Sehingga akan berbahaya bagi keselamatan pengendara EV. Banyak hal yang dapat menyebabkan kesalahan pada sistem kerja sensor seperti terjadi kerusakan eksternal hingga kesalahan pada proses kalibrasi. Kesalahan pada sensor dapat diakomodasi oleh suatu sistem kontrol yang mampu menoleransi kesalahan secara otomatis yang dikenal sebagai *fault tolerant control* (FTC).

Hasil penelitian FTC untuk sistem pengereman secara khusus sangat sedikit ditemui. Salah satu yang berhasil ditemukan dari studi literatur adalah (Swaroop dkk, 1997) yang mengemukakan bahwa dampak kegagalan sistem pengereman (sensor dan aktuator) pada kendaraan yang dikontrol secara elektrik adalah menghambat kemampuan kendaraan untuk melambat. Sistem kontrol yang digunakan adalah dua himpunan filter deteksi kegagalan (yang masing-masing untuk sensor dan aktuator) untuk mendeteksi adanya kegagalan, dan menggunakan

observer dalam melakukan rekonfigurasi sinyal kontrol. Kemudian, pada tahun 2014 terdapat studi mengenai ongaplikasian jenis pengendali SMC pada *regenerative* ABS untuk EV. Pada penelitian tersebut simulasi yang dilakukan membandingkan performansi *regenerative* ABS dari *bang-bang controller* dengan SMC (Jingang dkk, 2014). Namun, pada kedua penelitian tersebut belum menggunakan AFTC untuk mengakomodasi kesalahan pada saat terjadi kesalahan baik pada sensor maupun aktuator.

Berdasarkan uraian di atas, maka permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah merancang sebuah sistem pengereman ABS - kombinasi pengereman *regenerative* dan pengereman gesekan - yang dilengkapi sistem FTC agar menghasilkan respon pengereman yang tepat meskipun ada kesalahan pada komponen sensor dengan tetap mempertimbangkan kesalahan deteksi dan beban komputasi.

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan tugas akhir ini, yaitu:

- Bagaimana merancang *observer* yang dapat digunakan untuk mendapatkan prediksi kesalahan sensor pada *Regenerative* ABS?
- Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* yang dapat digunakan untuk mengakomodasi kesalahan sensor pada *Regenerative* ABS?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah merancang AFTC yang dapat digunakan untuk mengakomodasi kesalahan sensor pada *Regenerative* ABS sehingga menghasilkan respon pengereman yang tepat meskipun ada kesalahan pada komponen sensor.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini antara lain:

- Kendaraan yang ditinjau sebagai studi kasus adalah mobil listrik dengan menggunakan pendekatan *quarter car model*.

- Variabel yang dikontrol adalah nilai *slip ratio* pada saat pengereman sebesar 0.2. Variabel yang diukur adalah kecepatan roda dan kecepatan kendaraan.
- Permukaan jalan diasumsikan beraspal dan pada kondisi jalan datar, beraspal dan tidak bergelombang, sehingga α (derajat kemiringan) sama dengan 0 derajat.
- Jenis kesalahan yang terjadi adalah kesalahan pembacaan sensor berupa pelemahan nilai sensitivitas dan perilaku ketidaksesuaian pembacaan (*bias*) pada *wheel speed sensor*.
- Sistem pengendalian yang digunakan adalah *Sliding Mode Controller*.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.

BAB II TEORI PENUNJANG

Pada bab II dibahas mengenai pengertian dan teori-teori mengenai *Regenerative Anti-lock Braking System*, sistem kendali *Sliding Mode Controller*, *System Active Fault Tolerant Control* berikut perancangannya.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab III dibahas mengenai perancangan dari pengendali SMC dan AFTC berikut metode dan langkah-langkah dalam simulasi pada perangkat lunak *MATLAB R2014b*.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV akan dibahas mengenai analisis hasil perancangan sistem *Active Fault Tolerant Control* dibandingkan dengan hasil perancangan sistem pengendalian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V ini berisi tentang kesimpulan dari hasil perancangan AFTC berdasarkan data-data, serta saran.

BAB II TEORI PENUNJANG

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

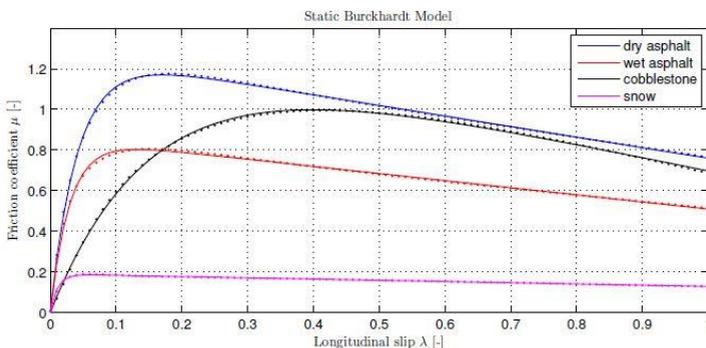
Regenerative Anti-Lock Braking System digunakan pada mobil untuk mencegah terjadinya slip dan penguncian pada roda saat pengereman. Unit ini adalah salah satu sistem keamanan (*safety*) pada mobil. Pada saat terjadi pengereman yang parah, terdapat sebuah titik dimana kecepatan tangensial permukaan ban tidak sama dengan kecepatan pada permukaan jalan sehingga dapat diperoleh slip optimal yang sesuai dengan gesekan maksimum (Aly dkk, 2011). ABS pertama kali diterapkan untuk kendaraan otomotif mobil pada tahun 1971 dengan tujuan utama mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas dan meningkatkan *steerability* kendaraan selama pengereman (Solyon, 2002). ABS mengalami kemajuan teknologi dalam kemampuannya mengkonversi energi kalor yang dihasilkan pada saat proses pengereman menjadi energi listrik dan dapat disimpan didalam baterai. Sistem pengereman inilah yang dinamakan dengan *regenerative ABS*. Sebuah teknologi pengereman kendaraan untuk mencapai tingkat akselerasi minimum dengan optimal dan efisien tanpa mempengaruhi stabilitas dan kemampuan kendali kemudi kendaraan dengan tingkat keselamatan maksimum dan mampu menyimpan energi terbuang pada saat pengereman menjadi energi listrik (Jingang dkk, 2014). Ketika roda terkunci maka biasanya pengemudi kehilangan kendali dan arah laju roda kendaraan pada permukaan geseknya menjadi tidak normal sehingga kecelakaan tidak dapat dihindari. Agar dapat menganalisis sistem *regenerative ABS* maka pemodelan dinamik sistem kendaraan listrik dilakukan menggunakan pendekatan dengan metode *quarter car models*. Saat dilakukan pengereman pada EV terdapat 2 persamaan dinamis sistem yang bekerja dan mempengaruhi sistem kerja *regenerative ABS*.

$$m\dot{v} = -(F_b + F_a + F_f) \quad (2.1)$$

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

Gerak dinamis kendaraan dapat dimodelkan dengan persamaan hukum II Newton dan dipengaruhi oleh massa mobil (m); Gaya pengereman pada roda (F_b); gaya gesek aerodinamik (F_a); serta gaya *rolling resistance* (F_f). Adapun pada saat pengereman terdapat torsi pengereman yang bekerja pada roda. Torsi pengereman yang bekerja pada saat proses pengereman dilakukan adalah *braking torque* ($F_b \cdot R$); torsi pengereman hydraulic (T_h); torsi pengereman motor (T_m); serta torsi yang dihasilkan dari gaya *rolling resistance* roda (T_f) yang bekerja pada roda untuk menghasilkan gaya pengereman.

Pengereman yang dilakukan pada kendaraan akan menimbulkan gaya *tractive force* yang dihasilkan oleh ban. *Tractive force* sebanding dengan gaya normal jalan yang bekerja pada ban. Perbandingan variasi atau koefisien permukaan jalan diperlihatkan oleh grafik fungsi non- linear antara koefisien gesekan dengan jalan (μ) dan *slip ratio* roda (λ) untuk kondisi spesifik jalanan tertentu. Pada gambar 2.1 ditunjukkan bahwa untuk berbagai kondisi jalan, koefisien gesek maksimum adalah pada saat nilai *slip ratio* roda bernilai 0,2 dan sangat buruk pada saat bernilai 1 yaitu saat roda dalam keadaan terkunci sempurna. Maka dari itu, pada sistem pengereman *anti-lock* nilai *slip ratio* roda dijaga agar dalam keadaan optimal yaitu bernilai 0,2 untuk memaksimalkan koefisien gesek pada semua kondisi jalan.



Gambar 2. 1 Kurva perbandingan koefisien gesek permukaan jalan dengan *slip ratio* roda (Lubbers, 2014)

Slip ratio (λ) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matematis yang merupakan fungsi dari kecepatan kendaraan dan putaran roda yang dapat dinyatakan pada persamaan 2.3

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

Dengan v adalah kecepatan kendaraan (m/s), ω adalah kecepatan angular roda (rad/s) dan R adalah jari-jari putaran roda (m). Nilai *slip ratio* pada kendaraan akan bernilai maksimal pada saat bernilai 1 (roda terkunci sempurna) dan bernilai minimum 0 pada saat roda berputar tanpa adanya gaya pengereman yang dilakukan. Hubungan antara nilai koefisien gesekan roda dengan *slip ratio* yang dihasilkan pada saat pengereman dapat dinyatakan pada persamaan:

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

Dengan:

C_1 = nilai maksimum kurva gesek

C_2 = bentuk kurva gesek

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

C_4 = nilai karakteristik kebasahan jalan.

Tabel 2. 1 Koefisien Gesek Roda - Jalan (Jingang dkk, 2014)

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

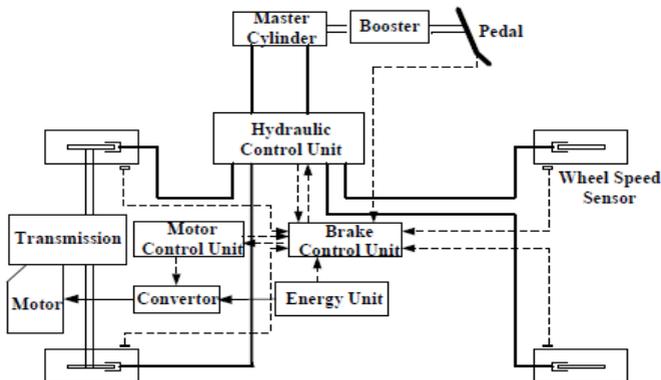
Nilai koefisien gesek yang dihasilkan mempengaruhi nilai *tractive force* pada roda kendaraan. Namun dengan adanya kendali *slip ratio* yang dijaga agar tetap berada pada kisaran 0,2 maka kerja roda dapat lebih optimal dan meminimalisir tingkat keausan ban.

Untuk beberapa koefisien berdasar parameter profil jalan dijelaskan pada tabel 2.1

Pada EV modern sistem pengereman ABS sudah dilengkapi oleh sistem *regenerative*. Sistem *regenerative* pada EV yaitu merubah fungsi motor dalam sebuah EV untuk bekerja berkebalikan pada saat dilakukan pengereman yaitu dari motor menjadi generator. Sistem pengereman ini menggunakan motor listrik, menghasilkan torsi negatif ke roda kendaraan dan mengubah energi kinetik ke energi listrik dalam rangka mengisi ulang baterai atau pemasok tegangan. Disipasi energi kinetik selama pengereman dapat dimanfaatkan kembali melalui pengaturan energi total kendaraan menggunakan komponen elektronika daya.

2.2 Cara Kerja *Regenerative Anti-Lock Braking System*

Pada sistem pengereman *regenerative* ABS memiliki beberapa komponen penting didalamnya yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pada gambar tersebut menunjukan komponen – komponen dari *regenerative* ABS baik sistem pengereman hydraulic yang dilakukan oleh komponen modul *solenoid valve* maupun sistem pengereman motor yang dilakukan oleh torsi generator pada saat motor berubah menjadi generator.



Gambar 2. 2 Komponen *Regenerative Anti-Lock Braking System*
(Jingang dkk, 2014)

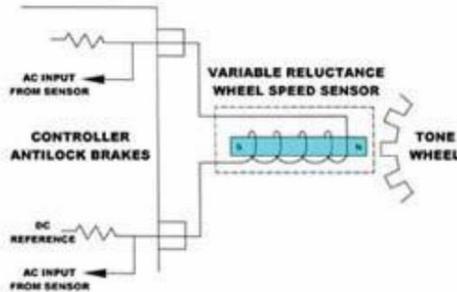
2.2.1 Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan merupakan komponen yang terletak pada *drive train* roda. Pada sensor kecepatan terdapat beberapa komponen diantaranya sistem sensor dan *reluctor ring*. Komponen sensor ini diletakan pada sebuah *sensor holder* yang dilas pada kerangka as kendaraan dan diapit oleh *spring clip* pada *holder*. Sensor kecepatan roda yang digunakan dalam sistem ABS adalah AD22157. Perangkat ini adalah transduser yang dibuat dari sensor AD Hall Effect. Sensor tersebut menggunakan magnet dan kumparan dari kabel untuk menghasilkan sinyal. Rotasi dari roda atau perbedaan induksi magnetik disekitar sensor akan menyebabkan fluktuasi sinyal magnetik. Fluktuasi sinyal magnetik ini akan menghasilkan arus pembacaan yang dihasilkan sensor.



Gambar 2. 3 Sensor Kecepatan Roda dan *Reluctor Ring*

Cara kerja dari sensor ini yaitu roda gigi pada *reluctor ring* yang terhubung pada *shaft* roda akan berputar sesuai dengan kecepatan angular roda. Didalam *reluctor ring* terdapat roda gigi yang didesain memiliki 100 ruang secara merata yang akan melewati sistem sensor yang menghasilkan magnet dan garis gaya magnet. Perpotongan antara garis gaya magnet dan gigi-gigi *reluctor ring* yang berputar akan menghasilkan gaya induksi elektromotif sesuai dengan kecepatan kendaraan. Kecepatan kendaraan yang telah disensing akan diteruskan oleh transmitter menuju sistem ECU (Gamazo dkk, 2010).



Gambar 2. 4 Skema Sensor Kecepatan Roda (Gamazo dkk, 2010)

2.2.2 *Electronic Controller Unit (ECU)*

ECU merupakan bagian terpenting dari sistem pengereman *regenerative ABS*. Fungsi dari ECU yaitu menerima sinyal masukan dari sensor untuk kemudian diproses dalam fungsi kecepatan roda untuk digunakan menghitung estimasi kecepatan kendaraan. ABS juga memiliki fungsi untuk mengatur logika perhitungan *tractive force* maupun kecepatan roda dan kendaraan untuk melakukan kontrol nilai *slip ratio* agar tetap pada nilai yang optimum dengan membandingkan kecepatan dari masing-masing roda. Sinyal kontrol nilai *slip ratio* optimum akan dikodekan ECU pada setiap aliran tekanan *solenoid valve* agar diatur melalui modulator tekanan pada setiap *master silinder* rem yang terhubung pada *disk brake* masing-masing roda.



Gambar 2. 5 *Electronic Control Unit*

Penerapan algoritma AFTC didalam EV harus mampu mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sensor dengan cepat. Hal ini mengacu pada penerapan algoritma AFTC didalam ABS yang membutuhkan komunikasi data serial yang cepat saat dilakukan pengereman mendadak. Pada perkembangannya, sistem komunikasi data secara serial dilakukan dengan metode mengirimkan data dari sebuah pengirim secara bit per bit yang biasa disebut *baud rate* dengan kecepatan tertentu (bit per detik/bps), dan pengiriman dilakukan melalui jalur satu kawat (T_x) dan diterima oleh sebuah penerima (R_x) dalam waktu tertentu. *Baud rate* merupakan jumlah kali per detik sinyal dalam perubahan data komunikasi dalam hal ini merupakan sinyal perubahan yang terjadi pada nilai pengukuran sensor. *Baud rate* juga mengacu pada status koneksi seperti tegangan serta frekuensi. *Baud rate* yang lebih tinggi lebih cocok digunakan dalam ECU sistem pengereman dikarenakan responnya yang cepat terhadap perubahan per detik hasil pengukuran sensor. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Faisal, 2008) *baud rate* yang mampu ditransmisikan oleh sebuah semikonduktor CMOS dapat mencapai 2 GHz.

Oleh karena ECU dapat berfungsi sebagai pengirim dan juga dapat berfungsi sebagai penerima, maka komunikasi dapat dilakukan dalam dua arah. Seperti diketahui bahwa dalam sebuah ECU data dialirkan melalui jalur (bus) data secara paralel dan data yang dikirimkan atau yang diterima melalui port serial, oleh karena itu dibutuhkan suatu *interface* yang dapat mengubah dari jalur paralel menjadi jalur data serial. Sebuah rangkaian RS232 diperlukan untuk mengubah jalur paralel menjadi jalur serial ditunjuk oleh sebuah IC tipe 6850, yaitu sebuah rangkaian yang dikenal dengan istilah *Asynchronous Communications Interface Adapter* (UART).

2.2.3 Hydraulic Control Unit (HCU)

Sebuah HCU memiliki dua komponen penting yaitu katup hidrolis rem ABS dan modulator tekanan pengereman. Modulator tekanan pengereman merupakan komponen berbentuk

valve yang bergerak membuka dan menutup sirkuit hydraulic yang menghubungkan antara *master silinder* dan rem. Sementara katup hydraulic rem ABS berfungsi mendistribusikan tekanan fluida atau minyak rem ke setiap bagian roda. Pada saat pengereman dilakukan *valve* masukan pada *master silinder* akan terbuka dan tekanan outlet rem dan pompa akan tertutup sehingga akan memberikan kerja pada masing-masing rem. Kemudian, ECU akan mengendalikan bukaan outlet *valve* antara rem dan tekanan pompa agar tidak adanya tekanan berlebih pada rem tiap-tiap roda sehingga nilai *slip ratio* dapat terkontrol. Dalam pengoperasiannya sistem ABS memiliki beberapa katup dengan fungsi yang berbeda:

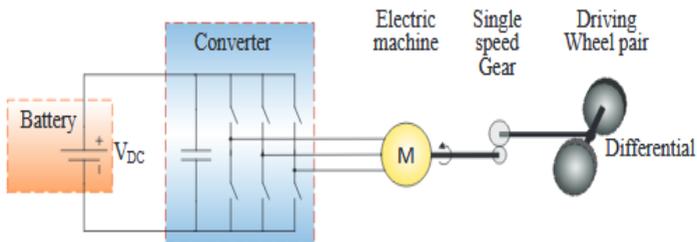
- *Supply Port*
Bagian atau sisi yang menerima tekanan udara dari *relay valve*.
- *Delivery Port*
Bagian atau sisi yang memberi tekanan udara menuju ruangan rem.
- *Exhaust Port*
Bagian atau sisi yang membuang tekanan udara dari sisi *delivery port* saat ABS kontrol saja (Wabco, 2013).

Valve pada ABS memiliki 3 fungsi utama dalam menunjang performa sistem pengereman. Fungsi pertama yaitu membuka dan memberi jalan fluida hidrolis dari pedal rem atau pompa untuk mencapai sistem pengereman. Fungsi kedua ialah untuk mengatur tekanan sebelumnya untuk diberikan ke sistem pengereman. Hal ini dapat dicapai dengan menutup katup untuk menahan tekanan lebih lanjut dari pedal rem. Fungsi ketiga dari *valve* yaitu untuk mengurangi jumlah tekanan hidrolis pada sistem pengereman. Hal ini dapat dicapai dengan membuka katup untuk mengarahkan fluida hidrolis untuk dilepas dari sistem pengereman.

2.2.4 Permanent Magnet Synchronous Motor

Mesin yang umum digunakan pada mobil listrik adalah berjenis *permanent magnet synchronous machine* (PMSM). Pada

saat berkendara, motor akan digunakan sebagai penggerak kendaraan. Saat dilakukan pengereman *regenerative*, motor akan digunakan sebagai generator yang akan menghasilkan listrik. Pada sistem PMSM terdapat *konverter* yang memiliki fungsi merubah arus AC dari putaran generator mesin menjadi DC sebelum masuk ke dalam baterai. Pada umumnya EV dilengkapi *reduction gear* agar putaran rotor PMSM sesuai dengan rasio putaran roda agar tidak terjadi *skidding* pada saat mobil sedang berjalan.



Gambar 2. 6 Konfigurasi unit PMSM pada *Electric Vehicle* (Grunditz, 2014)

Persamaan torsi motor saat pengereman *regenerative* dilakukan dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$T_{mavail} = \frac{T_{mmax} \cdot i \cdot k_{\omega m} \cdot k_{soc}}{\eta_t} \quad (2.5)$$

Dengan :

T_{mmax} = nilai maksimum mampu torsi motor

i = nilai transmisi ratio pada EV

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

k_{soc} = nilai konstanta SOC baterai

η_t = efisiensi transmisi

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi torsi pada sistem pengereman *regenerative* yang dihasilkan oleh motor diantaranya adalah SOC (*Satate of Charge*) dari baterai, kecepatan sudut motor, dan temperatur motor. Tujuan dari SOC

adalah untuk menjaga agar baterai dapat terhindar dari *overcharging* yang dapat mempengaruhi umur baterai (Peng dkk, 2008).

Nilai torsi motor yang akan disalurkan pada masing-masing roda akan bergantung pada parameter nilai k_{ω_m} dan nilai k_{soc} yang membatasi lamanya waktu *charging* pada baterai EV. 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 pada saat dilakukan pengereman agar tidak terjadi *overcharging* yang akan menurunkan kinerja baterai.

$$k_{soc} = \begin{cases} 1, & SOC \leq 0.8 \\ \{10(0.9 - SOC)\}, & 0.8 < SOC \leq 0.9 \\ 0, & 0.9 < SOC \leq 1 \end{cases} \quad (2.6)$$

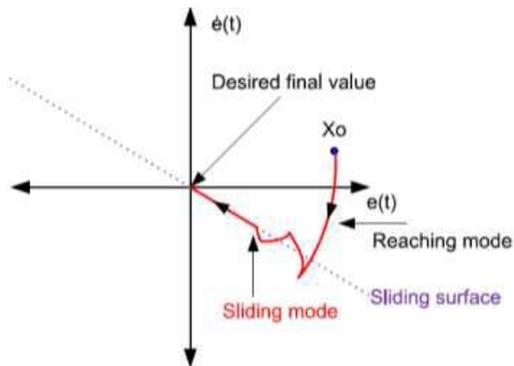
Kecepatan angular motor yang rendah pada saat pengereman menghasilkan gaya elektrik yang juga terbatas (rendah), karena kecepatan putar motor yang rendah tersebut, maka pada proses pengereman EV tidak bisa dilakukan sepenuhnya oleh motor listrik melainkan bekerja bersama-sama dengan pengereman hydraulic.

$$k_{\omega_m} = \begin{cases} 0, & \omega_m \leq 50 \text{ rad/s} \\ (\omega_m - 50)/50, & 50 < \omega_m \leq 100 \text{ rad/s} \\ 1, & \omega_m > 100 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (2.7)$$

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

2.3. Sliding Mode Controller

Pengendali jenis *sliding mode* adalah suatu jenis kendali dengan pendekatan *state space* dalam menganalisa sebuah sistem yang kompleks (Nasir, 2010). Penerapannya pada kontrol *regenerative ABS* dapat digunakan dalam melakukan *feedback* on-off berskala tinggi dalam penentuan aliran tekanan fluida pada distribusi tiap-tiap rem. Prinsip kerja SMC yaitu mengendalikan *trajectory state* suatu sistem untuk menuju suatu permukaan luncur (*reaching mode*) dan mempertahankan pada nilai tertentu. Penentuan nilai permukaan luncur mempertimbangkan *state* dari suatu sistem dengan menggunakan fase bidang yang terdiri dari *error* dan turunan pertama *error* tersebut. Dapat dilihat bahwa pada saat dimulai dari berbagai kondisi, keadaan trayektori akan menuju permukaan luncur dan kemudian akan meluncur sepanjang permukaan menuju *set point*.



Gambar 2.7 Interpretasi grafik SMC (Holkar, 2013)

Pada SMC permukaan luncur (*sliding surface*) sistem pengendali harus ditentukan dengan memperhatikan parameter *set point* yang digunakan. Untuk sistem *regenerative ABS* parameter yang digunakan dalam penentuan *set point* merupakan nilai *slip ratio* ideal kendaraan saat melakukan pengereman. Penentuan permukaan luncur ini dilakukan agar dapat menjaga sistem tetap berada pada nilai *set point*nya.

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (2.8)$$

Membangun pengendali dengan metode *sliding mode control* juga melibatkan model sistem yang akan dikontrol. Representasi dari model sistem adalah sebagai berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.9)$$

Sistem ABS merupakan sistem *non-linear* yang berubah terhadap satuan waktu. Sehingga untuk menstabilkan sistem *regenerative ABS* dapat digunakan teorema kestabilan Lyapunov. Fungsi Lyapunov yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\lambda = 1 - \frac{\omega R}{V}, \lambda_o = 0, \lambda > 0 \quad (2.10)$$

Berdasarkan Teorema Lyapunov yang diterapkan pada persamaan 2.10, maka didapatkan turunan parsial pertama memenuhi $\dot{\lambda}(\lambda, t)$ merupakan definit negatif dan memenuhi persamaan 2.11 dengan nilai ε merupakan suatu konstanta positif

$$\dot{\lambda} = s\dot{s} \leq -\varepsilon|s| < 0 \quad (2.11)$$

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

$$\text{sgn}(x) \begin{cases} -1, & x < 1 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases}$$

$$(x) = |x|x \quad (2.12)$$

Berdasarkan dari fungsi signum persamaan 2.12 *Constant Rate Reaching Law* dapat dituliskan seperti pada persamaan 2.13 (Liu, 2012).

$$\dot{s} = -\varepsilon(s), \varepsilon > 0 \quad (2.13)$$

Persamaan *sliding surface* merupakan fungsi dari *error*. Fungsi *error* dan turunannya adalah sebagai berikut

$$\dot{\lambda} = -\frac{R\dot{\omega}}{V} + \frac{R\omega \cdot \dot{V}}{V^2} \quad (2.14)$$

Dengan mendapati turunan pertama dari persamaan 2.14 dan memasukan persamaan 2.1 dan 2.2 maka didapatkan persamaan berikut:

$$\dot{\lambda} = \frac{R}{J_{\omega i}} \frac{1}{V} T_{b_total} + \frac{R}{J_{\omega}} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J_{\omega}} \frac{1}{V} F_{bi} - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_{bi} - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{m} F_f = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad (2.15)$$

Pada sistem kendali *sliding mode controller* ada beberapa parameter yang harus diperhatikan didalam perancangan sistem *close loop*. Parameter-parameter tersebut diantaranya *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*.

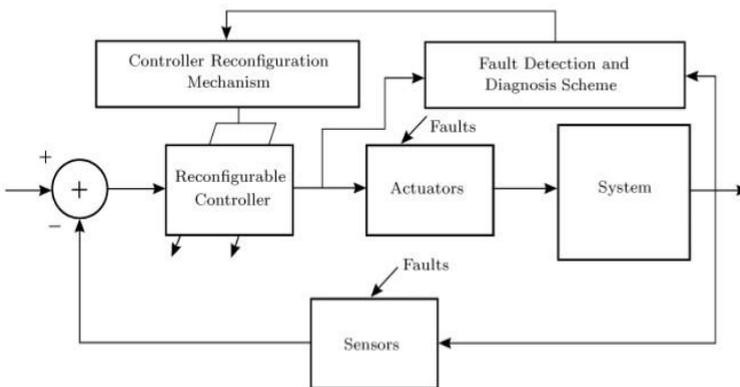
- a. *Maximum overshoot (percent) (M_p)*, merupakan nilai dari suatu respon sistem berupa nilai puncak tertinggi yang diukur dari nilai akhir keadaan yang diinginkan. Nilai *maximum overshoot* dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\text{Maximum percent overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.16)$$

- b. *Settling time (t_s)*, merupakan waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai nilai akhir yang diinginkan (*set point*) dan tetap berada pada nilai tersebut dalam *range* presentase tertentu dari nilai akhir.
- c. *Error steady state (ess)* merupakan nilai kesalahan yang terjadi pada saat keluaran sistem mencapai nilai akhirnya dan tunak. Dimana kesalahan ini dibandingkan dengan masukan sistem (*set point*). Bila keadaan akhir keluaran tidak sama dengan masukan, maka terdapat *error steady state* pada respon sistem (Ogata, 2004).

2.4 Active Fault Tolerant Control System

Sistem *fault tolerant control* (FTC) memiliki kemampuan mengakomodasi kesalahan komponen secara otomatis dengan tetap mempertahankan kestabilan sistem dan performansi yang ditetapkan. Sistem FTC dapat dibangun dengan dua pendekatan: pasif dan aktif. FTC pasif bekerja dengan pengendali yang ditetapkan dan dirancang menggunakan teknik kontrol *robust* untuk menjamin bahwa sistem lup tertutup tetap tidak sensitif terhadap kesalahan tertentu. Pendekatan ini tidak membutuhkan informasi kesalahan secara *on-line* maupun rekonfigurasi pengendali, namun memiliki kekurangan dalam hal kemampuan menoleransi kesalahan yang terbatas jumlahnya. Di sisi lain, pada FTC aktif, sebuah sistem kontrol baru dirancang ulang dengan menggunakan informasi kesalahan secara *on-line* dalam rangka mempertahankan kestabilan dan performansi yang ditetapkan, atau pada kondisi terparah, mencapai performansi terdegradasi yang diijinkan (Lunze, 2008). Oleh karena itu, perancangan sistem FTC aktif memerlukan teknik FDI yang cepat dan efektif sebagai pengambil keputusan akan terjadinya kesalahan.



Gambar 2. 8 Gambaran umum *Active Fault Tolerant Control* (Jiang, 2005)

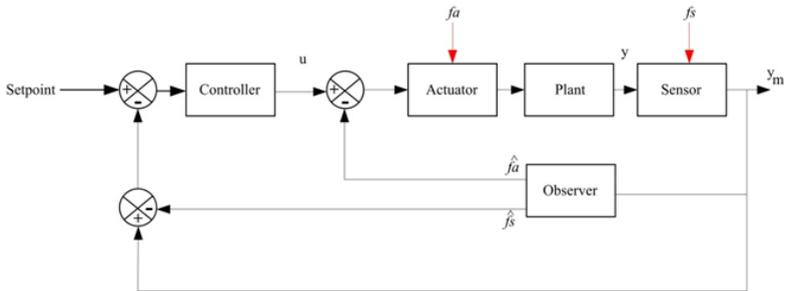
Pada sistem perancangannya perbedaan sistem FTC aktif dan FTC pasif terletak pada komponen *Reconfigurable Control*

(RC) dan *Fault Detection and Diagnosis* (FDD). Hal ini dikarenakan pada sistem FTC aktif dirancang untuk dapat bereaksi terhadap kegagalan komponen dengan merekonfigurasi aksi kontrol sehingga kestabilan dan performansi sistem dapat tetap terjaga. Secara umum, sebuah sistem FTC aktif terdiri atas beberapa bagian sub-sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, yaitu: teknik deteksi/diagnosis kesalahan; mekanisme rekonfigurasi kontroler; dan kontroler (*reconfigurable controller*). Ketiga bagian tersebut harus bekerja secara berkesinambungan. Ketika sebuah kesalahan terdeteksi, unit FDI menentukan dimana letak kesalahan tersebut, yaitu isolasi kesalahan, kemudian algoritma estimasi kesalahan yang bekerja secara *on-line* diaktifkan. Perancangan skema FDD yang digunakan untuk mengetahui besarnya kesalahan yang terjadi pada sistem harus didesain dengan sensitivitas yang tinggi terhadap kegagalan sistem dan *robust* terhadap ketidakpastian model, kondisi operasi yang berbeda serta gangguan eksternal sistem. Untuk perancangan mekanisme RC sebisa mungkin mampu memulihkan perormansi sistem setelah terjadi kesalahan meskipun terdapat ketidakpastian dan *delay time* pada *fault detection*.

Berdasarkan pada estimasi ini, pengendali dirancang ulang untuk mengkompensasi pengaruh kesalahan. Kontroler ini disebut sebagai *reconfigurable controller* yang biasanya berupa kontroler digital dengan parameter dan/atau struktur dapat diubah secara mudah seperti yang diperintahkan oleh mekanisme rekonfigurasi kontroler. Klasifikasi metode penalaan kontrol (*control adjustment*) pada sistem FTC aktif masih belum dibakukan. Semua metode yang digunakan dalam desain control nominal dapat menjadi alternatif pendekatan desain *reconfigurable control*.

Sistem FTC aktif dapat dikelompokkan menjadi dua 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. Hal ini dikarenakan metode ini tidak memerlukan beban komputasi yang besar sebagai akibat skema FDI dan *reconfigurable control* didesain secara terintegrasi.



Gambar 2. 9 Skema Rekonfigurasi Kontrol (Indriawati, 2015)

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 memulihkan 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. Hal ini ditunjukkan dengan persamaan dibawah ini:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu_c + L(y_f - C_f\hat{x}) \quad (2.17)$$

2.5 Observer State

Observer adalah algoritma yang digunakan untuk mengestimasi keadaan atau *state system* berdasarkan model matematis sistem. Selain itu *observer* juga digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada sistem *observer* merepresentasikan model matematis sistem dalam persamaan ruang keadaan sistem yaitu pada persamaan (2.18) dan (2.19) (Ogata, 2006).

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

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

Dengan:

A = matriks keadaan yang mempresentasikan fungsi alih *plant*

B = matriks nilai masukan

C = matriks hasil pengukuran

D = matriks nilai keluaran

$\dot{y}(t)$ = masukan kendali

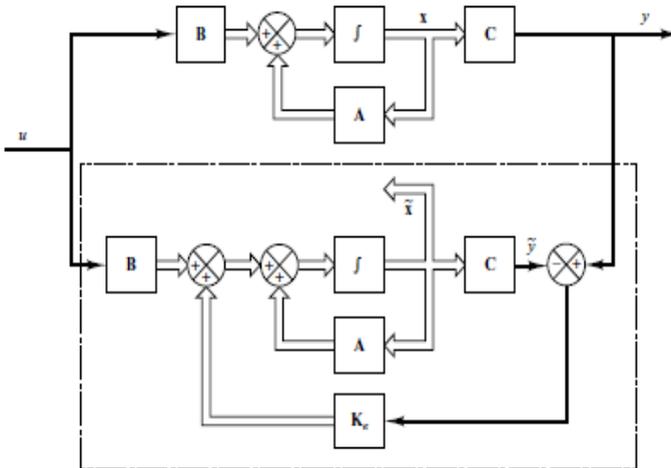
$\dot{x}(t)$ = vektor keadaan

$u(t)$ = vektor nilai keluaran/nilai masukan

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 (2.20).

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

Diagram blok sistem dan *observer state* digambarkan seperti pada Gambar 2.10 di bawah. Dalam gambar ini, *observer* mengandung nilai *gain observer*. *Gain observer* adalah matriks untuk mengoreksi perbedaan antara keluaran y aktual dan y estimasi sehingga dapat digunakan untuk mengestimasi *state* yang tidak terukur (Ogata 1970). Dalam menentukan nilai *gain observer* dipengaruhi oleh nilai *pole*. Model matematis *observer* sama seperti model matematis pada sistem sehingga *observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Untuk mengkompensasi kesalahan sensor pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru, algoritma tersebut dibentuk oleh (Indriawati dkk, 2015).



Gambar 2. 10 *Observer State* (Ogata, 2010)

Efek dari kesalahan sensor diekspresikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui. Bentuk vektor tersebut didefinisikan pada persamaan (2.24) dan (2.25), dimana matriks tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (2.21) (Indriawati dkk, 2015).

$$y(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_s f_s \quad (2.21)$$

Tipe kesalahan sensor dimodelkan sebagai:

$$s_f(t) = \alpha s(t) + \beta \quad (2.22)$$

$$f(t) = s_f(t) - s(t) \quad (2.23)$$

Dengan $s_f(t)$ adalah sinyal aktual, α dan β adalah konstanta. Penambahan kesalahan $f(t)$ - termasuk $f_s(t)$ ditunjukkan pada persamaan (2.25)

Dari kedua persamaan tersebut dapat didefinisikan persamaan baru sebagai berikut:

$$\dot{z}(t) = A_z (y(t)-z(t)) \quad (2.24)$$

$$\dot{z}(t) = A_z (Cx(t) + F_s f_s (t)-z(t)) \quad (2.25)$$

Untuk A_z merupakan matriks identitas (I) untuk $A_z \in I^q$ sedangkan matriks dari kesalahan sensor dan aktuator didefinisikan sebagai $f = \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix}$

Dari persamaan (2.26) dapat didefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah diekspansi, persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.27)

$$\dot{x}_a = A_a X_a + B_a U + E_a f \quad (2.26)$$

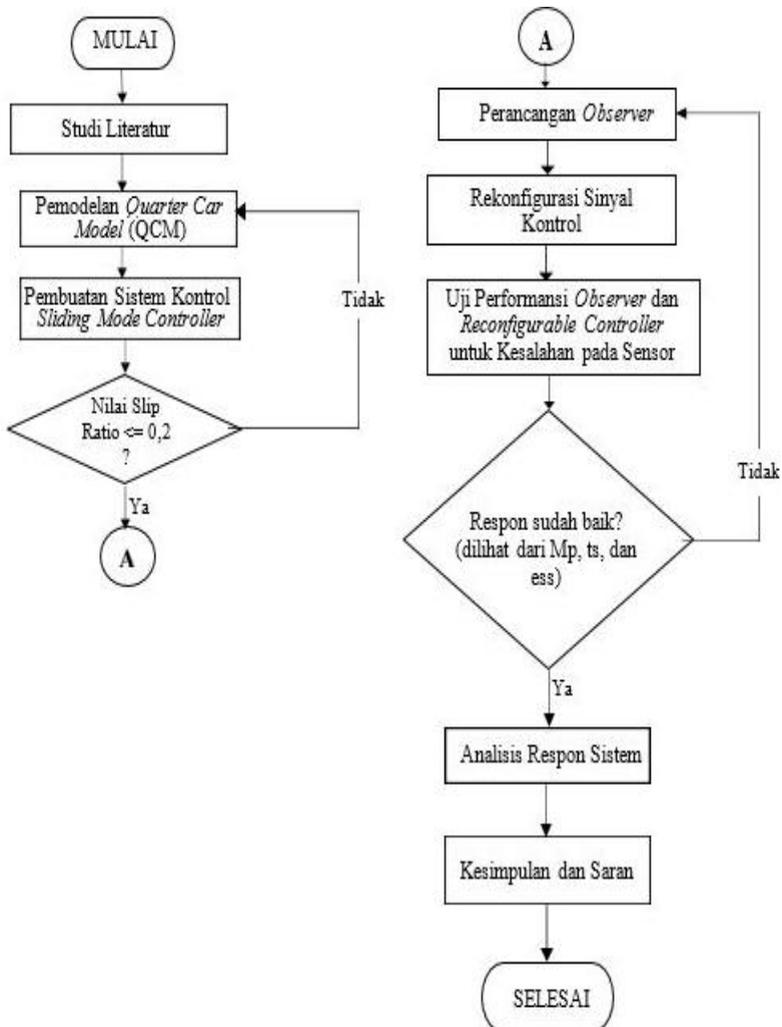
$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z * C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z * F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

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

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian. Tahap awal dalam tugas akhir ini yaitu melakukan studi literatur mengenai sistem pengereman pada kendaraan listrik melalui buku, jurnal, dan penelitian terdahulu mengenai pengereman khususnya sistem pengereman *regenerative ABS* dan *Active Fault Tolerant Control*. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan pemodelan *Electric Vehicle* dengan pendekatan *Quarter Car Model* serta sistem sensor dan aktuator pada pengereman *regenerative ABS* di simulasikan pada simulink Matlab R2014b. Untuk memastikan model yang dibuat merepresentasikan *plant* yang sesungguhnya, jika validasi data pengereman mencapai *slip ratio* optimal yaitu 0.2 maka dapat diasumsikan bahwa pemodelan sudah merepresentasikan sistem pengereman *regenerative ABS* yang sesungguhnya.

Simulasi sistem pengendalian *loop* tertutup kemudian dilakukan dengan menggunakan pengendali jenis *Sliding Mode Controller*. Pada pengendali diberikan parameter *epsilon* (ϵ) sebagai parameter untuk mendapatkan fungsi *signum* pengendali. Adapun nilai ϵ didapatkan melalui metode *trial and error*. Setelah didapatkan parameter fungsi *signum* pengendali yang sesuai, perancangan *observer* dilakukan untuk membandingkan respon pada *plant* yang diberi kesalahan dan *plant* yang tidak memiliki kesalahan. Kesalahan yang diberikan adalah kesalahan bias dan sensitivitas pada komponen *wheel speed sensor* dengan nilai kesalahan sebesar 10%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Perancangan *observer* dilakukan untuk mempresentasikan *plant* yang sesungguhnya sebagai kompensasi ketika terjadi kesalahan pada sensor. Perbaikan *observer* dilakukan apabila respon tidak sesuai yang ditinjau dari ketidakstabilan respon sistem dengan *maksimum overshoot* sebesar 18.95%, *error steady state* sebesar 0% dan *settling time* sebesar 0.08 sekon.

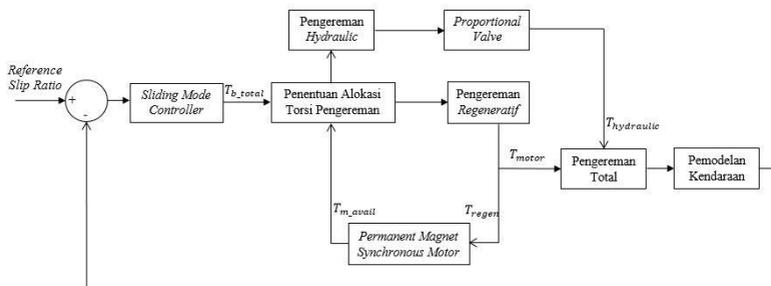


Gambar 3.1 Flowchart tugas akhir

Analisa respon berdasarkan uji performansi sistem dengan kontroller yang sudah diberikan algoritma AFTC dan tanpa menggunakan algoritma AFTC dengan memberikan simulasi kesalahan bias dan sensitivitas pada *wheel speed sensor*.

3.1 Pemodelan

Umumnya pemodelan sistem dinamik kendaraan roda empat memiliki tiga jenis pemodelan yaitu *quarter car*, *half car* dan *full car model*. Pada penelitian *Regenerative ABS* ini pemodelan yang digunakan yaitu dengan menggunakan jenis pendekatan *quarter car model* seperti pada Gambar 3.3. *Quarter car model* adalah pemodelan yang dilakukan disalah satu roda pada mobil. Selain memodelkan kendaraan dengan pendekatan *quarter car model*, pemodelan juga meliputi pemodelan *permanent magnet synchronous motor* dan pemodelan sensor.



Gambar 3. 2 Diagram Blok *Regenerative ABS*

3.1.1 Pemodelan *Quarter Car Model*

Pemodelan ini digunakan karena diasumsikan bahwa ketiga roda lainnya memiliki karakteristik sistem dan dimensi yang sama dengan satu roda yang dimodelkan. Hal ini dikarenakan pada sistem kontrol *regenerative ABS*, sistem dinamik roda yaitu karakteristik gaya yang mempengaruhinya yaitu seperti pada Gambar 3.2 antara lain, gaya *rolling resistance* (F_f), gaya *drag* aerodinamik (F_a), gaya berat (F_s) dan gaya karena inersia kendaraan (F_{acc}) serta F_x merupakan gaya pengereman pada roda dan μ adalah koefisien gesek antara roda dengan permukaan jalan.

$$F_f = c_t \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (3.1)$$

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (3.2)$$

$$F_a = 0.5 \cdot C_r \cdot A_f \cdot V^2 \cdot \delta \quad (3.3)$$

$$F_{acc} = m \cdot dV/dt \quad (3.4)$$

$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (3.5)$$

Dengan c_t , m , α , c_r , δ , A_f dan V masing-masing adalah *rolling resistance coefficient* roda, massa kendaraan (kg), sudut kemiringan jalan (rad), koefisien *aerodinamik*, kepadatan udara (kg/m^3), luas seperempat bagian depan kendaraan (m^2) dan kecepatan kendaraan (m/s).

Sehingga pemodelan dinamik kendaran secara translasi dapat dimodelkan persamaan 3.6 sebagai hukum Newton II yang menyatakan bahwa percepatan (perubahan kecepatan) gerak benda berbanding lurus dengan total gaya yang bekerja pada suatu benda dan berbanding terbalik dengan massa benda.

$$-F_x - F_w - F_s - F_a = m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3.6)$$

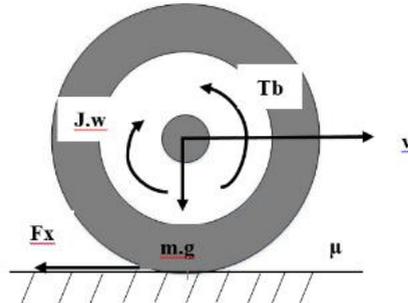
Perhitungan μ pada persamaan F_x didapatkan dari persamaan non-linear sebagai berikut.

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (3.7)$$

Dimana C_1 merupakan nilai kurva gesek, C_2 merupakan bentuk kurva gesek, C_3 merupakan perbedaan kurva gesek antara nilai maksimum dengan ketika $\lambda=1$, dan C_4 merupakan nilai karakteristik kebasahan jalan (Pacejka, 1991). Nilai kurva gesek pada permukaan jalan berbeda-beda tergantung dari kondisi jalan seperti pada Tabel 3.2.

Untuk selanjutnya, dilakukan pemodelan sistem gerak roda pada sistem *regenerative* ABS. Dimana pada EV roda berfungsi menghubungkan torsi internal sistem dengan gerakan longitudinal kendaraan. Dalam memodelkan sistem roda pada *regenerative* ABS digunakan model gerak rotasi roda pada persamaan 3.8 menyatakan bahwa percepatan (perubahan kecepatan) angular roda berbanding lurus dengan total torsi yang

bekerja pada suatu roda dan berbanding terbalik dengan momen inersia roda.



Gambar 3. 3 Quarter car model (Tur, 2007)

$$F_x \cdot r - T_b = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.8)$$

Dengan:

r = jari-jari roda

T_b = torsi pengereman

J = momen inersia

ω = kecepatan angular roda

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

Tabel 3. 1 Parameter gaya pada saat pengereman (Jingang, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
M	Massa mobil	342,5 kg
A	Luas area	$3,1 \text{ m}^2$
r	Jari-jari roda	0,33 m
c_r	Koefisien resistansi aerodinamik	0,3
c_t	Koefisien resistansi putaran	0,01
J	Momen inersia roda	$3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
g	Gaya gravitasi	$9,8 \text{ m/s}^2$

Parameter pada tabel 3.1 disubstitusikan kedalam persamaan 3.1 hingga 3.5 menghasilkan persamaan berikut :

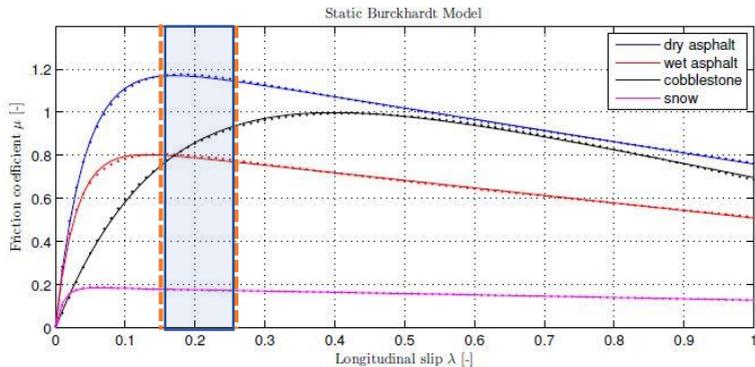
$$F_s = 342,5 \cdot 9,8 \cdot \sin 0^\circ \quad (3.9)$$

$$F_a = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 3,1 \cdot 1,2 \cdot V^2 \quad (3.10)$$

$$F_x = \mu \cdot 342,5 \cdot 9,8 \quad (3.11)$$

$$F_f = 0,01 \cdot 342,5 \cdot 9,8 \cdot \cos 0^\circ \quad (3.12)$$

Seperti dijelaskan pada Tabel 2.1 terdapat nilai parameter friksi antara roda dan jalan pada berbagai kondisi jalan. Namun pada tugas akhir ini digunakan nilai parameter friksi untuk kondisi jalan beraspal dan kering dengan parameter C_1 hingga C_4 yang ditunjukkan pada Tabel 3.2, kemudian disubstitusikan ke persamaan 3.7 untuk menghasilkan nilai gaya gesek pada setiap titik pengereman.



Gambar 3.4 Letak nilai optimal pada kurva perbandingan koefisien gesek permukaan jalan dengan *slip ratio* roda

Pada gambar 3.4 menunjukkan bahwa koefisien gesek roda pada berbagai kondisi jalan akan mencapai titik maksimum pada saat nilai *slip ratio* bernilai 0.2. Maka untuk memaksimalkan performansi pengereman *regenerative ABS* pada semua kondisi jalan nilai *slip ratio* yang digunakan sebagai *set point* pada tugas akhir ini bernilai 0.2.

Tabel 3. 2 Parameter koefisien gesekan (Jingang, 2014)

Parameter	Deskripsi	Nilai
C_1	Nilai maksimal kurva gesekan	1.2801
C_2	Bentuk kurva gesekan	23.99
C_3	Perbedaan kurva gesekan pada $\lambda=1$	0.52
C_4	Nilai karakteristik kebasahan	0.3

Permukaan jalan yang dilalui roda dianggap lurus dan tidak bergelombang sehingga θ dapat dianggap 0° dan gaya pada F_s bernilai nol. Sehingga, gaya-gaya yang akan bekerja pada gerak kendaraan adalah gaya *rolling resistance* (F_f), gaya pengereman pada roda (F_x), serta gaya *aerodinamis* pada persamaan (F_a).

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -4(F_f + F_a + F_x) \quad (3.13)$$

3.1.2 Pemodelan *Permanent Synchronous Motor*

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:

$$T_{mavail} = \frac{T_{mmax} \cdot i \cdot k_{\omega m} \cdot k_{soc}}{\eta t} \quad (3.14)$$

Dengan :

T_{mmax} = nilai maksimum mampu torsi motor

i = nilai transmisi ratio pada EV

$k_{\omega m}$ = nilai konstanta kecepatan rotor
 k_{soc} = nilai konstanta SOC baterai
 η_t = efisiensi transmisi

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.

$$k_{soc} = \begin{cases} 1, & SOC \leq 0.8 \\ \{10(0.9 - SOC)\}, & 0.8 < SOC \leq 0.9 \\ 0, & 0.9 < SOC \leq 1 \end{cases} \quad (3.15)$$

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.

$$k_{\omega m} = \begin{cases} 0, & \omega_m \leq 50 \text{ rad/s} \\ (\omega_m - 50)/50, & 50 < \omega_m \leq 100 \text{ rad/s} \\ 1, & \omega_m > 100 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (3.16)$$

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

pengereman motor maka pengereman akan sepenuhnya dilakukan oleh sistem *regenerative braking*.

3.1.3 Pemodelan *Wheel Speed Sensor*

Pemodelan pada sensor menggunakan nilai penyebut dan pembilang sebesar 1 agar nilai keluaran dari sensor menuju unit pengendalli merepresentasikan nilai *slip ratio* yang terukur.

3.2 Perancangan Kontrol *Sliding Mode Controller*

Langkah pertama dalam membangun SMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan (*sliding surface*). Untuk kemudian dapat merekonstruksi *gain switched feedback* agar mengedalikan *trajectory state plant* menuju *sliding surface*. Persamaan (3.17) hingga (3.19) merepresentasikan model matematis dari gerak longitudinal kendaraan maupun gerak rotasi roda pada sistem ABS.

$$m \cdot a = \Sigma F \quad (3.17)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -4(F_w + F_s + F_a + F_x) \quad (3.18)$$

$$F_x \cdot r - T_b = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

Adapun persamaan *slip ratio* dapat didefinisikan sebagai persamaan :

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} = 1 - \frac{\omega R}{V} \quad (3.20)$$

Persamaan (3.20) kemudian didiferensialkan menjadi persamaan:

$$\dot{\lambda} = -\frac{R\dot{\omega}}{V} + \frac{R\omega \cdot \dot{V}}{V^2} \quad (3.21)$$

Persamaan (3.17) hingga (3.19) kemudian disubstitusikan kedalam persamaan (3.21) sehingga mendapatkan persamaan:

$$\dot{\lambda} = \frac{R}{J\omega_i} \frac{1}{V} T_{b_total} + \frac{R}{J\omega} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J\omega} \frac{1}{V} F_{bi} - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_{bi} - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{m} F_f \quad (3.22)$$

Dengan fungsi *signum* (sgn) dapat dirumuskan pada persamaan (3.23) atau dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\text{sgn}(x) \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \\ (x) = |x|x \quad (3.23)$$

Pada tugas akhir ini nilai *slip ratio* dikendalikan agar tetap berada pada kondisi idealnya sehingga nilai *slip ratio* digunakan sebagai *sliding surface* dari sistem kendali SMC ini.

$$S = \lambda_{des} - \lambda_i \quad (3.24)$$

Dengan definisi dari fungsi *signum*, persamaan (3.24) dapat dituliskan dalam bentuk lain seperti pada persamaan (3.25) yang dapat disebut juga sebagai *Constant Rate Reaching Law* (Liu, 2012).

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - kS, \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (3.25)$$

Dengan:

ε = konstanta *robustness* sistem

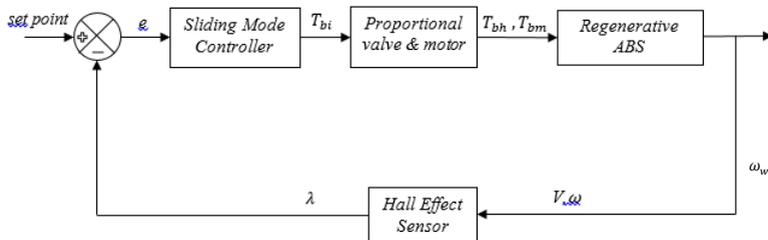
k = *gain* maksimum *output* kontroler

Fungsi *error* dan turunan dari *slip ratio* disubstitusikan dengan persamaan (3.23) dan (3.25) sehingga menghasilkan persamaan:

$$\dot{\lambda} = \frac{R}{J\omega_i} \frac{1}{V} T_{b_total} + \frac{R}{J\omega} \frac{1}{V} T_f - \frac{R^2}{J\omega} \frac{1}{V} F_{bi} - \frac{R\omega}{V} \frac{1}{m} \sum F_{bi} - \frac{R\omega}{m} \cdot C_a - \frac{R\omega}{m} F_f = -\varepsilon \text{sgn}(S) - kS \quad (3.26)$$

Karena sinyal kontrol yang digunakan pada sistem merupakan sinyal kontrol yang digunakan untuk mengatur torsi dari sebuah sistem pengereman maka torsi pengereman (T_b) input digunakan sebagai masukan sinyal kontrol aktuator:

$$T_{b_total} = -T_f + R.F_b + \frac{J\omega \cdot \omega}{mV} \sum F_{bi} + \frac{J\omega \cdot \omega \cdot V}{m} \cdot C_a + \frac{J\omega \cdot \omega}{mV} \cdot F_f + \frac{J\omega \cdot V}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{des} - \lambda) + k(\lambda_{des} - \lambda)] \quad (3.27)$$



Gambar 3. 5 Skema diagram blok perancangan kontrol *SMC*

3.3 Perancangan *Active-Fault Tolerant Control (AFTC)*

Perancangan sistem *AFTC* dilakukan dengan mendesain *Observer* menggunakan parameter variable pengukuran berupa kecepatan dari putaran roda yang diukur menggunakan sensor *wheel speed*. Tujuan dari perancangan tersebut untuk membandingkan performansi kontrol yang telah diberikan kesalahan dan bagaimana rekonfigurasi yang dapat dilakukan oleh suatu sistem apabila diberikan kesalahan sensor.

3.3.1 Perancangan *Observer*

Perancangan *observer* ini digunakan untuk mengestimasi kesalahan sensor yang terjadi pada saat dilakukan pengereman. Perancangan dimulai dengan membuat bentuk *state space* dengan mengubah fungsi alih aktuator pengereman total yang berupa penjumlahan torsi pengereman hydraulic dan motor.

$$\dot{T}_b = \dot{T}_h + \dot{T}_m \quad (3.28)$$

Dalam perancangan *observer* ini model *state space* diturunkan dari fungsi torsi pengereman dan pemodelan dinamik gerak longitudinal kendaraan untuk sistem pengereman.

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (3.29)$$

$$G(s) = \frac{1}{0,01s + 1} \quad (3.30)$$

$$\frac{T_h(s)}{u(s)} = \frac{1}{0,01s + 1} \quad (3.31)$$

$$\dot{T}_h = -100T_h + 100u \quad (3.32)$$

$$\dot{T}_b = \dot{T}_h + \dot{T}_m \quad (3.33)$$

$$\dot{T}_b = -100T_b + 100u + 100T_m \quad (3.34)$$

Pemodelan *state space* menggunakan gerak dinamis kendaraan diperoleh melalui persamaan berikut:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = -4(F_f + F_s + F_a + F_x) \quad (3.35)$$

Dengan memasukkan nilai F_f , F_s , F_a , F_x dan m menurut pada persamaan (3.19) hingga (3.12) maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{V} = -(0,098V + 0,0116F_x + 0,0116F_a) \quad (3.36)$$

Untuk mendapatkan nilai percepatan angular roda setelah dilakukan pengereman dapat dirumuskan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$F_x \cdot r - T_b = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.37)$$

Persamaan (3.34) dan (3.36) kemudian dibuat kedalam matriks ruang keadaan seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_b \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -100 & 0 \\ 0 & -0.098 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_b \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 & 100 \\ -0.0116 & 0 & -0.0116 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fx \\ u \\ Fa \\ Tm \end{bmatrix}$$

Dari persamaan matriks ruang keadaan diatas dapat diketahui nilai-nilai dari matriks A, B, C dan D. Dimana matriks A merupakan matriks yang menyatakan *state* sistem yang bernilai:

$$A = \begin{bmatrix} -100 & 0 \\ 0 & -0.098 \end{bmatrix}$$

Matriks B merupakan matriks yang menyatakan *input* kontrol sistem yang bernilai:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 & 100 \\ -0.0116 & 0 & -0.0116 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriks C merupakan representasi dari matriks *output* sistem dengan nilai:

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

Matriks D merupakan matriks input yang menyatakan *disturbance* pada sistem yang umumnya berupa *noise*, apabila pada sistem diasumsikan tidak terjadi *noise* maka nilai matriks D bernilai:

$$D = 0$$

Matriks kesalahan yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan matriks kesalahan sensor (F_s) dengan nilai:

$$F_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.24 untuk dapat mendefinisikan matriks kesalahan pada sensor, pmaka bentuk dari matriks ruang keadaan dapat diekspansi menjadi

$$A_a = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.098 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} 0 & 100 & 0 & 10 \\ -0.0116 & 0 & -0.0116 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

Agar dapat memperoleh nilai *gain observer*, maka matriks ruang keadaan di eskpansi lagi menjadi

$$\widetilde{A}_a = \begin{bmatrix} -100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.098 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

Menyelesaikan *observer* maka diperlukan pemilihan nilai *pole placement*, nilai *pole placement* yang digunakan adalah

$$\text{Pole ke-1} = -100$$

$$\text{Pole ke-2} = -200$$

$$\text{Pole ke-3} = -500$$

$$\text{Pole ke-4} = -700$$

$$\text{Pole ke-5} = -900$$

$$\text{Pole ke-6} = -0.0000+0.0000i$$

Dari nilai *pole* diatas sehingga didapatkan nilai gain *observer* bernilai sebagai berikut

$$K_e = \begin{bmatrix} -0.2415 & -1.4036 & 0.0124 & -0.0023 & 0 & -1.621 \\ 0.1330 & 2.4061 & -0.0024 & 0.0106 & 0 & 2.6807 \end{bmatrix}$$

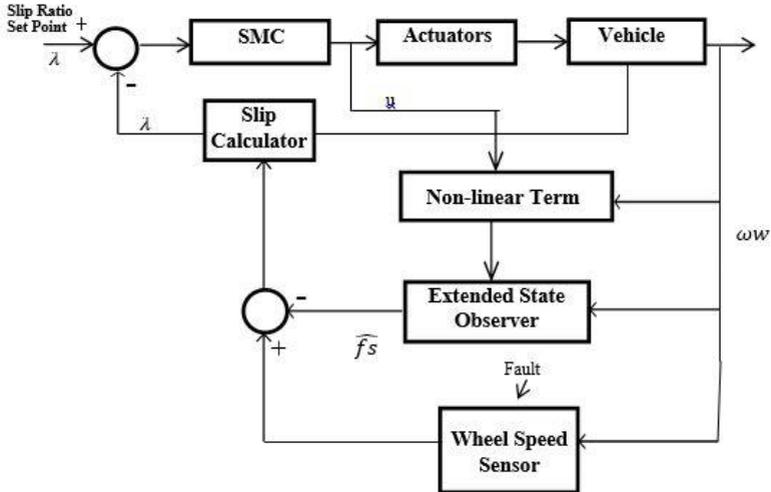
3.4 Integrasi *Observer* Dengan *Kontroller*

Tahap akhir dalam perancangan sistem AFTC adalah rekonfigurasi kontrol. Perancangan ini bertujuan untuk mengkompensasi kesalahan pada sensor yang telah diestimasi oleh *observer* sehingga kestabilan sistem dapat dijaga ketika terjadi kesalahan. Untuk kesalahan bias maupun sensitivitas, sinyal awal akan ditambahkan dengan estimasi kesalahan (f_s), seperti pada persamaan (3.34).

$$w = w_0 + f_s \quad (3.38)$$

Sehingga untuk mencari kesalahan residual, f_s , sinyal awal dengan kesalahan *bias* dikurangi sinyal hasil *observer*, seperti pada persamaan 3.35. Kesalahan dapat dinotasikan dengan simbol β .

$$\hat{f}_s = w - w_0 = \beta \quad (3.39)$$



Gambar 3. 6 Perancangan *observer* pada *Regenerative Anti-Lock Braking System*

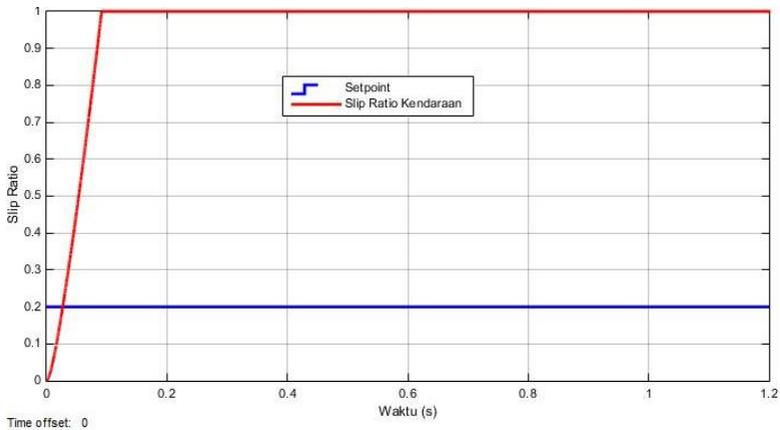
3.5 Uji Performansi Sistem AFTC

Algoritma AFTC yang sudah dirancang kemudian diuji performansinya untuk mengetahui apakah algoritma AFTC yang sudah dirancang dapat berjalan dengan baik dan dapat melakukan kompensasi kesalahan dengan baik. Pengujian algoritma AFTC dilakukan dengan memberikan sinyal kesalahan pada sensor berupa kesalahan bias dan sensitivitas. Kesalahan bias dapat berupa penambahan sinyal awal (*initial signal*) yang tidak diharapkan sehingga pembacaan sensor tidak sesuai. Sementara kesalahan sensitivitas dapat berupa kesalahan pembacaan yang diakibatkan menurunnya kemampuan pembacaan dari sensor sehingga tidak dapat membaca secara penuh sinyal inputan yang diberikan.

BAB IV ANALISA DATA

4.1 Uji Pemodelan *Anti-Lock Braking System*

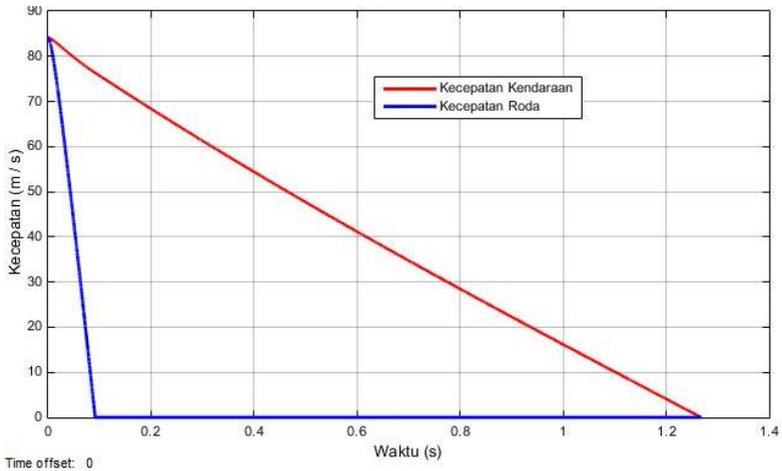
Uji *loop* terbuka pada simulasi dengan menggunakan *Matlab 2014b* pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa ketika dilakukan pengereman tanpa dilengkapi *regenerative ABS*, *slip ratio* terus naik hingga maksimal pada nilai 1 sehingga hal ini dapat menyebabkan kendaraan kehilangan kemampuan *steerability*-nya karena roda terkunci. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada saat kecepatan kendaraan masih cukup tinggi roda sudah dalam keadaan berhenti.



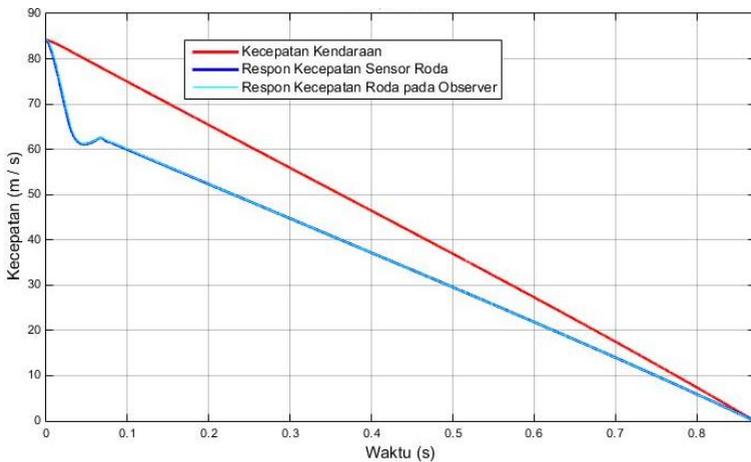
Gambar 4. 1 Grafik respon sistem pada *Loop* terbuka

Hasil uji validasi *loop* terbuka ini digunakan untuk menguji pemodelan *quarter car model* dengan jurnal yang telah melakukan penelitian tentang ABS sebelumnya. Hasil menunjukkan bahwa respon *slip ratio* pada pemodelan telah sesuai karena telah mengalami lock atau terkunci pada 0.1 detik. Pada uji kecepatan roda dan kecepatan kendaraan, kendaraan yang tanpa dilengkapi dengan *Anti-Lock Braking System* (ABS) menunjukkan hasil pengereman yang kurang baik. Dimana pada saat kendaraan masih

berada pada kecepatan 77 km/jam roda mobil sudah mengalami *locking*.



Gambar 4. 2 Grafik kecepatan angular roda berbanding kecepatan kendaraan tanpa dilengkapi ABS

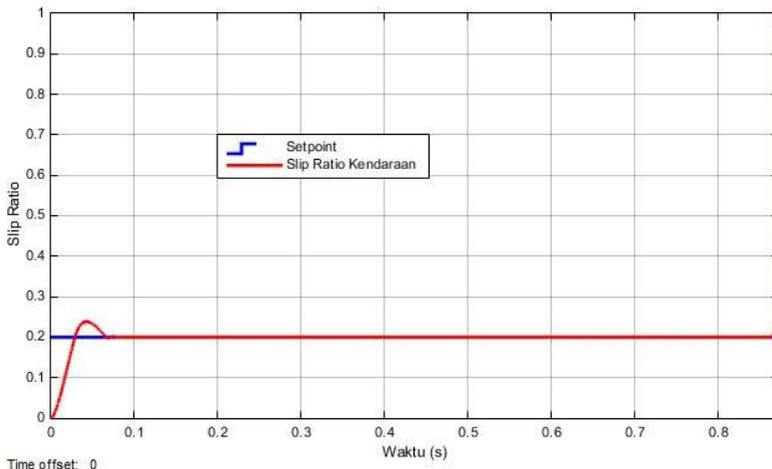


Gambar 4. 3 Grafik kecepatan angular roda berbanding kecepatan kendaraan setelah dilengkapi ABS

Gambar 4.3 menunjukkan kecepatan angular roda ketika diberi ABS. Dari grafik tersebut diketahui bahwa pada saat telah dilengkapi ABS mendapatkan respon kecepatan angular roda yang lebih baik dimana pada saat bersamaan baik kecepatan angular roda maupun kecepatan kendaraan mencapai titik henti diwaktu yang sama yaitu pada 0.87 detik sehingga roda tidak mengalami *locking*. Jarak pemberhentian kendaraan pun menjadi lebih singkat dikarenakan tidak adanya *lock* pada roda.

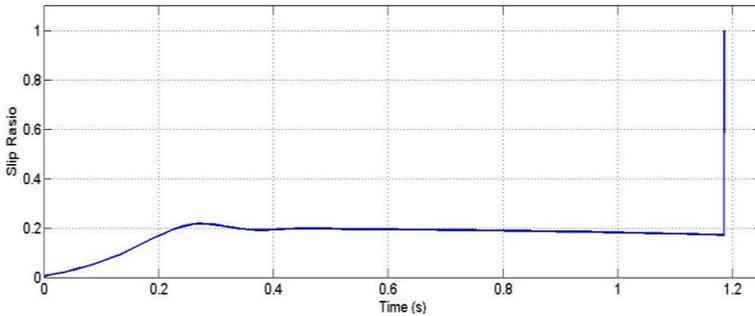
4.2 Uji Sistem Close Loop

Uji *loop* tertutup dilakukan untuk meninjau apakah respon pengendalian *slip ratio* sudah mampu stabil di *setpoint*. Gambar 4.4 adalah hasil respon sistem dengan menggunakan kontroler *Sliding Mode Controller* dengan nilai ε , F_{bi} dan k berturut-turut adalah 3, 10 dan 3960. Respon yang dihasilkan sistem pada saat diberikan kontroler dengan parameter tersebut memiliki nilai *maximum overshoot* 19%, *settling time* 0.08s dan *error steady state* 0%. Dimana jarak waktu henti kendaraan berada pada interval waktu 0.87 detik.



Gambar 4.4 Respon sistem *close loop* dengan SMC

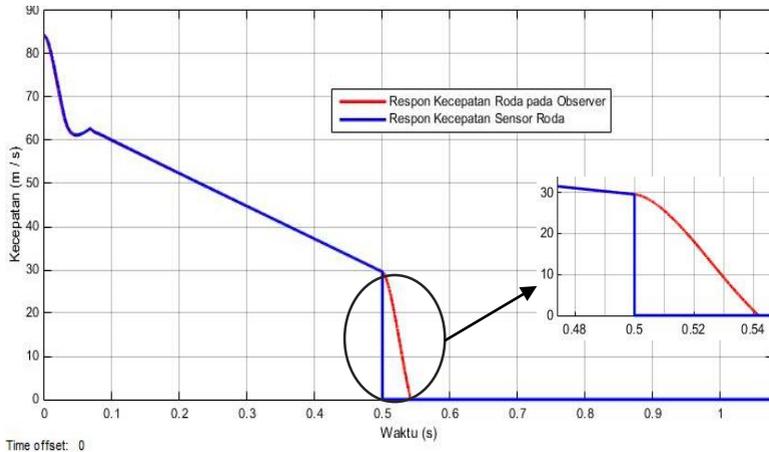
Sebagai perbandingan dengan penelitian sebelumnya yaitu mengenai pengendali PID pada sistem ABS. Pada Gambar 4.5 adalah hasil respon sistem dengan menggunakan kontroler PID dengan nilai K_p , τ_i dan τ_d berturut-turut adalah 250, 138 dan 8.8. Respon yang dihasilkan sistem pada saat diberikan kontroler dengan parameter tersebut memiliki nilai *maximum overshoot* 9.8%, *settling time* 0.4s dan *error steady state* 0%. Dimana jarak henti kendaraan berada pada interval waktu 1.19 detik.



Gambar 4. 5 Respon sistem *close loop* dengan PID *Auto-tuning* (Maya, 2018)

4.3 Hasil Estimasi *Observer*

Hasil estimasi *observer* perlu ditinjau untuk menganalisa *observer* yang sudah dirancang mampu mengompensasi kesalahan yang diuji seperti yang sudah dijelaskan pada sub-bab 3.8. Hasil estimasi dari *observer* ditunjukkan pada gambar 4.6 dengan kesalahan pada sensor kecepatan roda. Pada grafik respon tersebut dapat dilihat bahwa dari respon aktual dan hasil estimasi (\widehat{w}_ω) sudah memiliki hasil yang sama hal tersebut menunjukkan bahwa *observer* yang telah dirancang mampu merepresentasikan sistem aktual yang dimodelkan. Pada gambar 4.6 dengan memberikan kesalahan sensor pada detik ke 0.5 maka respon kecepatan terukur sensor yang ditunjukkan pada garis biru menunjukkan kesalahan aktual dan garis merah menunjukkan estimasi kesalahan *observer*.



Gambar 4. 6 Hasil estimasi kesalahan sensor dengan pengukuran kecepatan menggunakan *wheel speed sensor*

Respon yang dihasilkan perhitungan *observer* juga menunjukkan pembacaan yang cepat terhadap kesalahan sensor yang terjadi. Dimana pada gambar menunjukkan waktu komputasi yang dibutuhkan algoritma AFTC untuk menuju ke nilai aktual pembacaan sensor sebesar 0.04 s. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa sistem tanpa kesalahan maupun dengan kesalahan sebesar 100% hasil estimasi kesalahan sensor mengikuti kesalahan aktual.

4.4 Uji Kesalahan Bias

Kesalahan sensor diuji pada hasil simulasi dengan diberikan berupa kesalahan bias pada detik ke 0.5. Parameter yang digunakan untuk menilai performansi sistem pengendalian diantaranya adalah *maximum overshoot*, *settling time* dan *error steady state*. Kesalahan bias adalah penyimpangan nilai pembacaan sensor dari nilai yang sebenarnya. Besar nilai kesalahan bias yang diberikan pada pengujian yaitu 10%, 25%, 50%, 75% dan 100%.

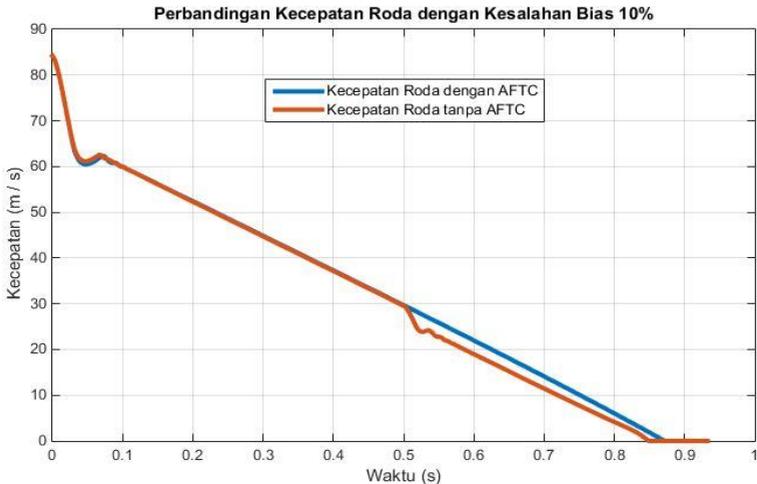
4.4.1 Uji Kesalahan Bias 10%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.5 dengan kesalahan bias sebesar 10%.



Gambar 4. 7 Hasil uji respon *slip ratio* kesalahan bias 10%

Pada pengujian kesalahan bias 10% yang diberikan pada sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan berupa bertambahnya nilai pada keluaran pembacaan sensor sebesar 10%. Pada gambar 4.7 terlihat bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error steady state* sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0.87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan nilai *slip ratio* dan merubah respon sistem berada jauh dari nilai set pointnya.



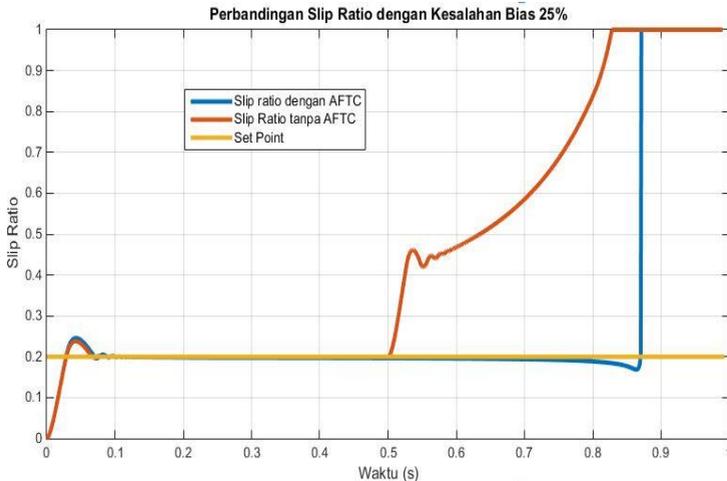
Gambar 4. 8 Hasil pengukuran kecepatan roda bias 10%

Gambar 4.8 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk yang mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Bahkan pada detik ke 0.85 kendaraan roda sudah mengalami *locking* dan jarak tempuh pengereman pun menjadi lebih lama yaitu 0,95 detik. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.

4.4.2 Uji Kesalahan Bias 25%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.5 dengan kesalahan bias sebesar 25%. Pada pengujian kesalahan bias 25% yang diberikan pada sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan berupa bertambahnya nilai pada keluaran

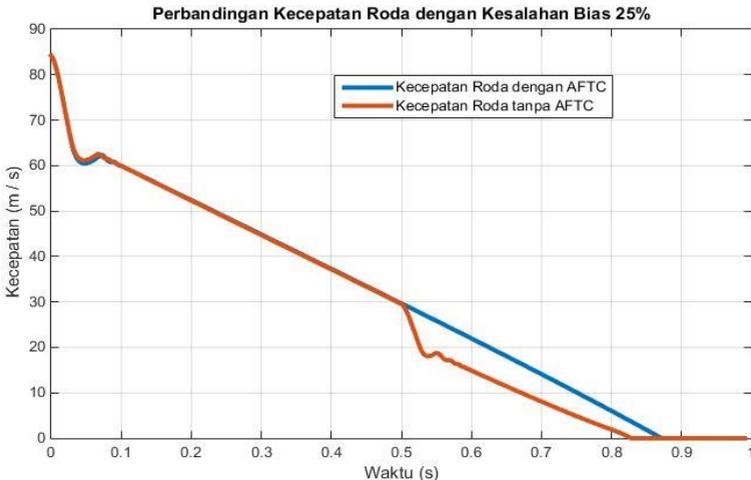
pembacaan sensor sebesar 25%. Pada gambar 4.9 terlihat bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error steady state* sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0.87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan nilai *slip ratio* dan merubah respon sistem berada jauh dari nilai set pointnya.



Gambar 4. 9 Hasil uji respon *slip ratio* kesalahan bias 25%

Gambar 4.10 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk yang mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Bahkan pada detik ke 0.82 kendaraan roda sudah mengalami *locking* dan jarak tempuh pengereman pun menjadi lebih lama yaitu 0,99 detik. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil

pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.

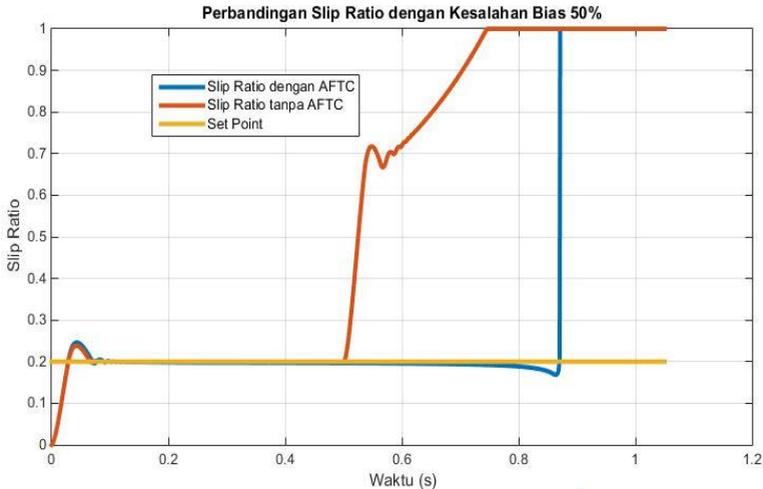


Gambar 4. 10 Hasil pengukuran kecepatan roda bias 25%

4.4.3 Uji Kesalahan Bias 50%

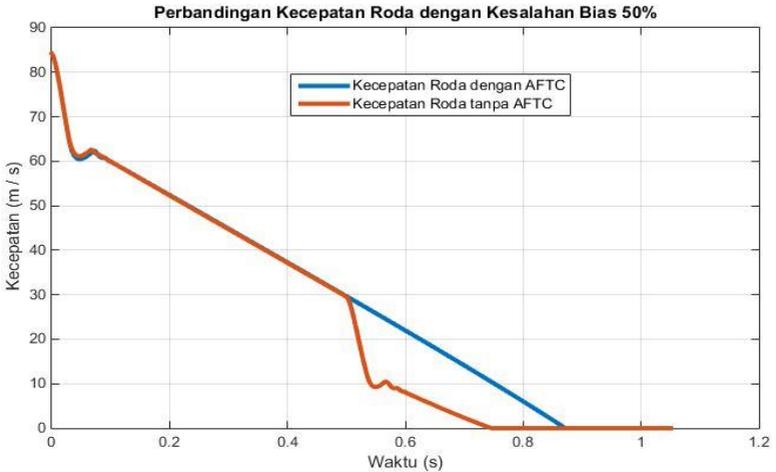
Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.5 dengan kesalahan bias sebesar 50%. Pada pengujian kesalahan bias 50% yang diberikan pada sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan berupa bertambahnya nilai pada keluaran pembacaan sensor sebesar 50%. Pada gambar 4.11 terlihat bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error steady state* sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0,87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada

saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan nilai *slip ratio* dan merubah respon sistem berada jauh dari nilai set pointnya. Bahkan pada detik ke 0.72 kendaraan roda sudah mengalami *locking* dan jarak tempuh pengereman pun menjadi lebih lama yaitu 1,05 detik.



Gambar 4. 11 Hasil uji respon *slip ratio* kesalahan bias 50%

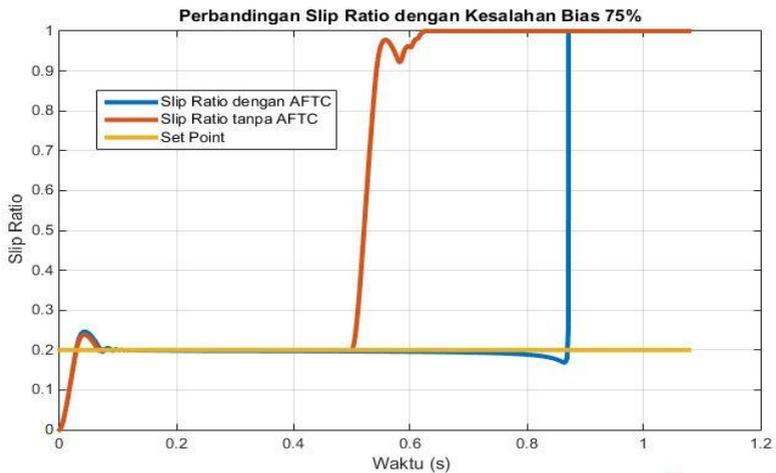
Gambar 4.12 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk yang mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Bahkan pada detik ke 0.72 kendaraan roda sudah mengalami *locking* dan jarak tempuh pengereman pun menjadi lebih lama yaitu 1,05 detik. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.



Gambar 4.12 Hasil pengukuran kecepatan roda bias 50%

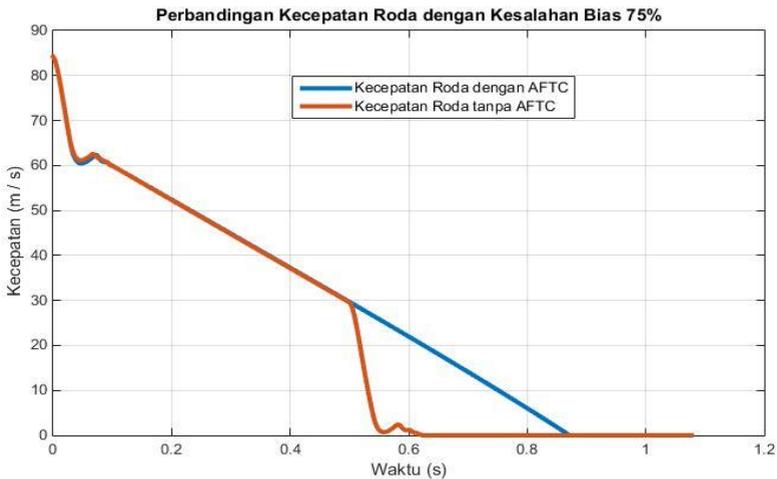
4.4.4 Uji Kesalahan Bias 75%

Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.5 dengan kesalahan bias sebesar 75%.



Gambar 4.13 Hasil uji respon *slip ratio* kesalahan bias 75%

Pada pengujian kesalahan bias 75% yang diberikan pada sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan berupa bertambahnya nilai pada keluaran pembacaan sensor sebesar 75%. Pada gambar 4.13 terlihat bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error steady state* sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0.87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan nilai *slip ratio* dan merubah respon sistem berada jauh dari nilai set pointnya.



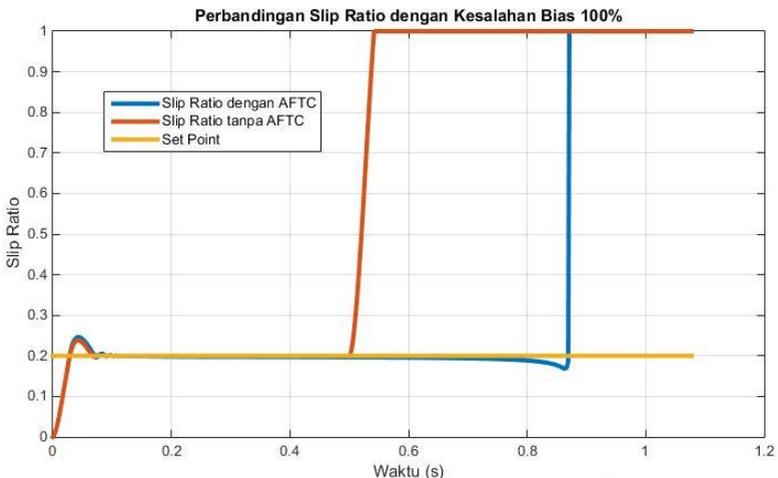
Gambar 4. 14 Hasil pengukuran kecepatan roda bias 75%

Gambar 4.14 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk yang mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Bahkan pada detik ke 0,62 kendaraan roda sudah mengalami *locking* dan jarak tempuh pengereman pun

menjadi lebih lama yaitu 1,1 detik. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.

4.4.5 Uji Kesalahan Bias 100%

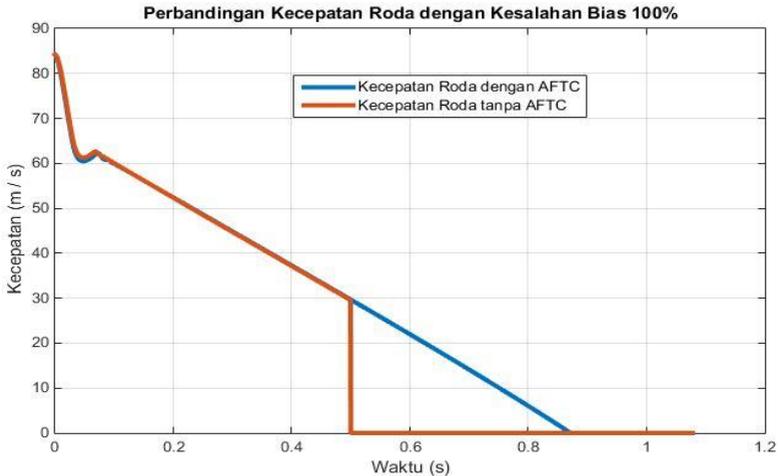
Hasil uji respon sistem terhadap kesalahan ditinjau pada kondisi saat terjadi kesalahan pada detik ke 0.5 dengan kesalahan bias sebesar 100%.



Gambar 4. 15 Hasil uji respon kesalahan bias 100%

Pada pengujian kesalahan bias 100% yang diberikan pada sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan bahwa sensor meneruskan dua kali sinyal masukan pada sinyal *output*nya. Pada gambar 4.15 terlihat bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error*

steady state sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0.87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan nilai *slip ratio* dan merubah respon sistem berada jauh dari nilai set pointnya secara signifikan.



Gambar 4. 16 Hasil pengukuran kecepatan roda bias 100%

Gambar 4.16 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk yang mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Bahkan pada detik ke 0.55 kendaraan roda sudah mengalami *locking* dan jarak tempuh pengereman pun menjadi lebih lama yaitu 1,15 detik. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.

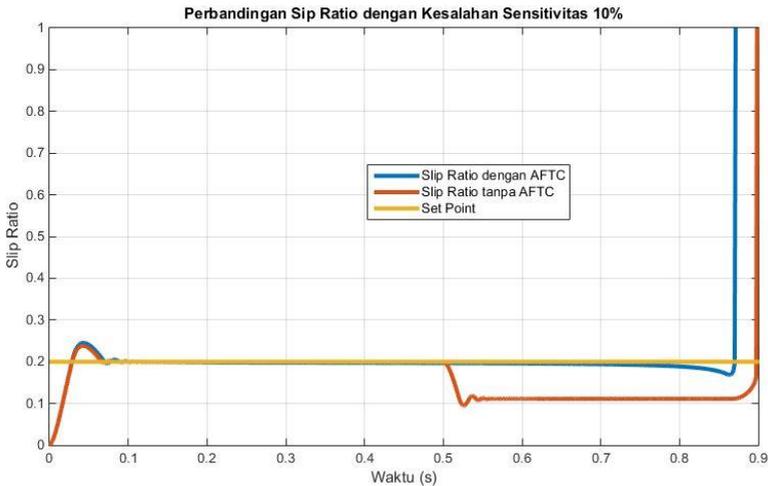
4.5 Uji Kesalahan Sensitivitas

Untuk menguji performansi dari *regenerative Anti-Lock Braking System* yang sudah diberikan algoritma AFTC maka selain memberikan kesalahan bias sensor juga diberikan kesalahan berupa kesalahan sensitivitas. Kesalahan sensitivitas merupakan kesalahan pada sensor berupa kesalahan pembacaan, dimana keluaran yang diberikan tidak sesuai dengan nilai seharusnya. Hal ini dikarenakan kurang sensitifnya sensor sehingga tidak mampu sepenuhnya menanggapi perubahan besaran fisis yang terjadi. Kesalahan sensor diuji pada hasil simulasi dengan diberikan berupa kesalahan sensitivitas pada detik ke 0.5. Parameter yang digunakan untuk menilai performansi sistem pengendalian diantaranya adalah *maximum overshoot*, *settling time* dan *error steady state*. Kemudian hasil kerja sistem *slip ratio regenerative*. Besar nilai kesalahan sensitivitas yang diberikan pada pengujian yaitu 10%, 25%, 50%, 75% dan 100%.

4.5.1 Uji kesalahan Sensitivitas 10%

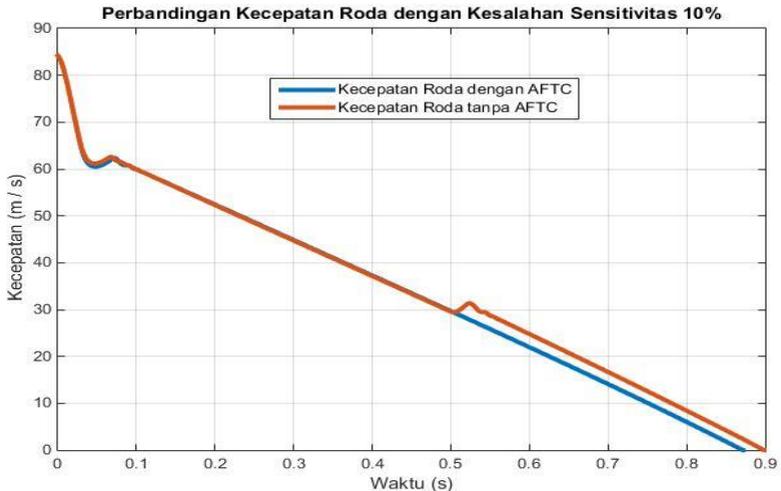
Kesalahan sensor diuji pada hasil simulasi dengan pengujian kesalahan yang merepresentasikan sistem *regenerative ABS* pada detik ke 0.5 dengan kesalahan sensitivitas sebesar 10%. Pada uji kesalahan sensitivitas sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan kurangnya kemampuan sensor dalam melakukan pembacaan besaran fisis berupa kecepatan putaran roda kendaraan. Pada pengujian kesalahan sensitivitas 10% yang diberikan pada sensor, terlihat pada gambar 4.17 bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error steady state* sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0.87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Bahkan pada hasil pembacaan sensor menunjukkan *maximum undershoot* mencapai 50% dan

menjadikan waktu pengereman yang terjadi lebih lama berada pada detik 0.9.



Gambar 4. 17 Respon sistem kesalahan sensitivitas 10%

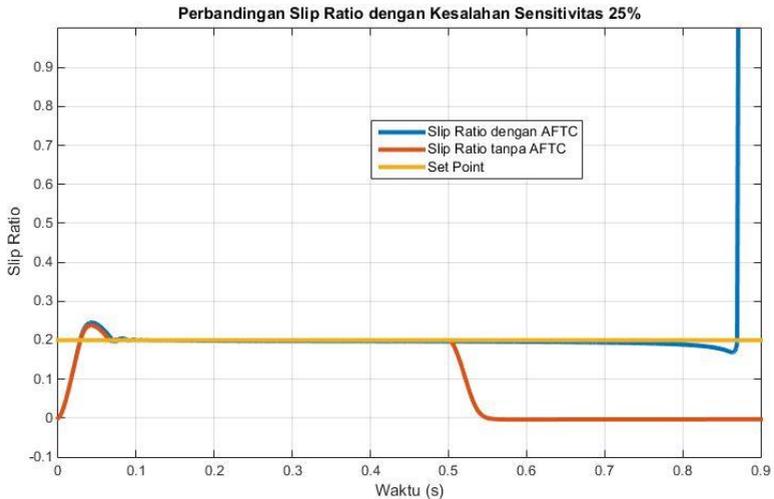
Gambar 4.18 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk sehingga mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Hal ini dapat mengurangi kemampuan pengukuran pada sensor sehingga tidak mampu melakukan pengukuran sesuai dengan besaran fisis yang diukur. Kesalahan yang diberikan pada detik ke 0.5 membuat pembacaan sensor yang tidak dilengkapi algoritma AFTC mulai mengalami kesalahan dan sistem tidak mampu mengembalikan ke hasil pengukuran aktualnya. Hal ini mengakibatkan jarak henti kendaraan semakin jauh. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.



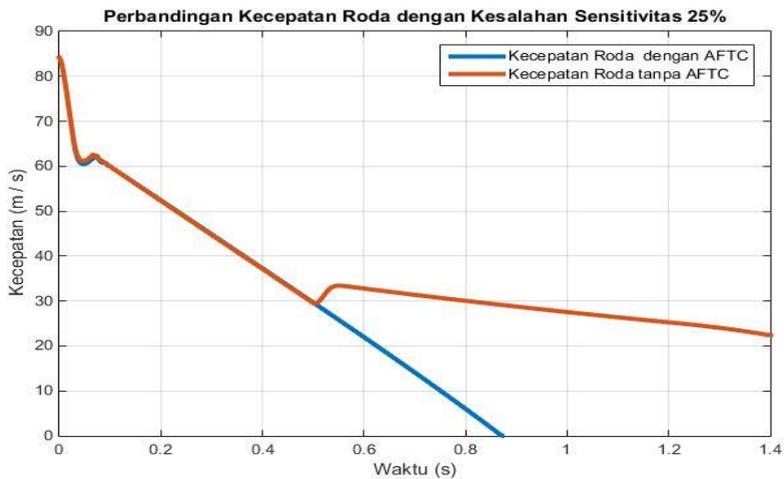
Gambar 4. 18 Hasil pengukuran kecepatan roda sensitivitas 10%

4.5.2 Uji kesalahan Sensitivitas 25%

Kesalahan sensor diuji pada hasil simulasi dengan pengujian kesalahan yang merepresentasikan sistem *regenerative* ABS pada detik ke 0.5 dengan kesalahan sensitivitas sebesar 25%. Pada uji kesalahan sensitivitas sensor, kesalahan yang diberikan merepresentasikan kurangnya kemampuan sensor dalam melakukan pembacaan besaran fisis berupa kecepatan putaran roda kendaraan. Pada pengujian kesalahan sensitivitas 25% yang diberikan pada sensor, terlihat pada gambar 4.19 bahwa algoritma AFTC mampu mengompensasi kesalahan sensor dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan respon *slip ratio* sistem ABS yang stabil berada pada nilai set pointnya dengan parameter *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* sebesar 0.1 detik dan *error steady state* sebesar 0% dan waktu berhenti kendaraan dapat dilakukan selama 0.87 detik. Hal yang berbeda ditunjukkan pada sistem yang tidak diberikan algoritma AFTC. Dimana pada saat sensor diberikan kesalahan akan mengganggu kestabilan sistem. Hal ini menyebabkan respon yang tidak stabil.



Gambar 4. 19 Respon sistem kesalahan sensitivitas 25%



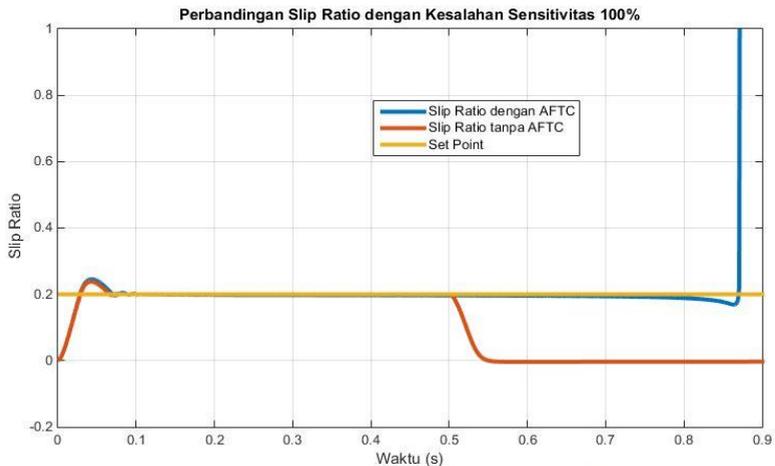
Gambar 4. 20 Hasil pengukuran kecepatan roda sensitivitas 25%

Gambar 4.20 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda. Pada gambar tersebut sensor yang

mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan menunjukkan respon yang buruk sehingga mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Hal ini dapat mengurangi kemampuan pengukuran pada sensor sehingga tidak mampu melakukan pengukuran sesuai dengan besaran fisis yang diukur. Kesalahan yang diberikan pada detik ke 0.5 membuat pembacaan sensor yang tidak dilengkapi algoritma AFTC mulai mengalami kesalahan dan sistem tidak mampu mengembalikan ke hasil pengukuran aktualnya. Hal ini mengakibatkan jarak henti kendaraan semakin jauh. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.

4.5.3 Uji kesalahan Sensitivitas 100%

Kesalahan sensor diuji pada hasil simulasi dengan pengujian kesalahan yang merepresentasikan sistem *regenerative* ABS pada detik ke 0.5 dengan kesalahan sensitivitas sebesar 100%.



Gambar 4. 21 Respon kesalahan sensitivitas 100%

Pada Gambar 4.21 didapatkan respon sistem tanpa algoritma AFTC setelah sensor diberikan kesalahan sensitivitas sebesar 100%. Hal ini menyebabkan respon yang tidak stabil. Pada saat sistem diberi algoritma AFTC mendapatkan hasil respon yang baik yaitu dengan nilai *maximum overshoot* 19%, *settling time* 0.1 detik dan *error steady state* 0%. Sehingga menunjukkan sistem mampu mengestimasi kesalahan sensor dengan baik.



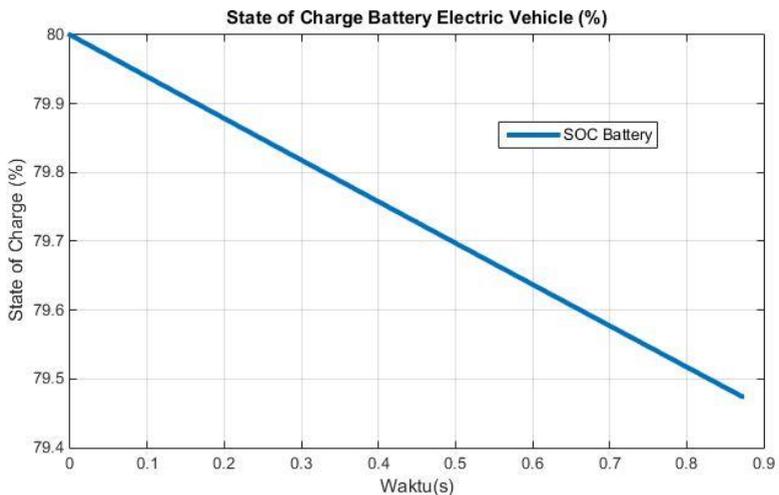
Gambar 4. 22 Hasil pengukuran kecepatan roda sensitivitas 100%

Sama halnya dengan uji kesalahan sensitivitas sebesar 25 % Gambar 4.22 merupakan hasil pengukuran yang dilakukan oleh sensor kecepatan roda dengan kesalahan sensitivitas 100%. Pada gambar tersebut sensor yang mengalami kesalahan namun tidak dilengkapi algoritma AFTC akan mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Dikarenakan sinyal kesalahan yang terjadi melebihi nilai *slip ratio* yang dikendalikan yaitu sebesar 0.2 membuat pembacaan sensor yang diteruskan ke unit pengendali bernilai sama dengan nilai kecepatan kendaraan. Sehingga mengakibatkan kegagalan pengereman pada sistem EV. Kesalahan yang diberikan pada detik ke 0.5 membuat pembacaan

sensor yang tidak dilengkapi algoritma AFTC mulai mengalami kesalahan dan sistem tidak mampu mengembalikan ke hasil pengukuran aktualnya. Berbeda dengan hasil pengukuran sensor yang sudah dilengkapi algoritma AFTC. Hasil pengukuran menunjukkan respon yang baik dimana roda berhenti tepat berada pada saat akhir proses pengereman. Hal ini dikarenakan algoritma AFTC yang diterapkan pada *regenerative* ABS dapat bekerja dengan baik dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi.

4.6 Respon State of Charge Battery Sistem Regenerative ABS

Pada gambar 4.23 merupakan hasil kondisi dari *State of Charge Battery* pada saat dilakukan simulasi pengereman sistem *regenerative* ABS. Pengereman *regenerative* ABS yang dilakukan secara langsung akan menyebabkan penambahan jumlah daya tersimpan didalam baterai. Dapat ditunjukkan melalui gambar 4.23 yang merupakan grafik hubungan SOC terhadap waktu dimana pada saat dilakukan pengereman, sistem *regenerative* ABS akan mengakibatkan pengurangan nilai SOC sebesar 0.53%.



Gambar 4. 23 SOC baterai pengereman *regenerative* ABS

Hal ini dikarenakan pada saat pengereman menggunakan sistem *regenerative*, motor pada mobil listrik akan menghasilkan torsi balik dan akan memberikan beban terhadap kerja roda. Torsi balik pada motor listrik ini digunakan sistem *regenerative* untuk melakukan pengisian (*charging*) pada baterai sehingga daya tersimpan pada baterai akan bertambah dan nilai SOC pada baterai mengalami pengurangan sebanyak 0.53%. Sehingga menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan *regenerative* pada saat proses pengereman dilakukan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data yang telah dilakukan, didapat kesimpulan dari tugas akhir ini mengenai perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada *Anti-Lock Braking System* pada mobil listrik

- Sistem kontrol menggunakan *Sliding Mode Controller* lebih baik daripada menggunakan PID konvensional. Dengan parameter SMC ε , Fb_i dan k berturut-turut adalah 3, 10 dan 3900 menunjukkan respon *slip ratio* yang baik, dengan nilai *maximum overshoot* sebesar 19%, *settling time* 0.1 detik, tanpa *error steady state* dan waktu pengereman 0,87 detik. Sedangkan dengan controller PID dengan nilai K_p , τ_i dan τ_d berturut-turut adalah 250, 138 dan 8.8. Respon yang dihasilkan sistem pada saat diberikan controller dengan parameter tersebut memiliki nilai *maximum overshoot* 9.8%, *settling time* 0.4s, tanpa *error steady state*, dan waktu pengereman 1.19 detik.
- Estimator berbasis *Extended State Observer* mampu mengestimasi kesalahan sensor yang terjadi. Nilai kesalahan yang terjadi pada sensor aktual dapat digantikan oleh algoritma *observer* sehingga respon sistem dapat lebih kuat terhadap gangguan eksternal seperti bias dan sensitivitas.
- Performansi sistem pengendali yang dilengkapi dengan algoritma AFTC lebih baik dibanding sistem tanpa algoritma AFTC. Hal ini ditunjukkan dari hasil uji kesalahan sensitivitas maupun bias algoritma AFTC mampu menjaga kestabilan sistem. Hal ini dapat dilihat dari respon *slip ratio* sistem yang menunjukkan nilai *maximum overshoot* 19%, *settling time* 0.1 dan tanpa *error steady state*. Sedangkan sistem tanpa algoritma AFTC akan membuat respon sistem tidak stabil ketika terjadi kesalahan pada sensor.

5.2 Saran

Dalam proses tugas akhir ini terdapat beberapa saran yang digunakan untuk penelitian selanjutnya adalah:

- Dalam dunia otomotif, algoritma AFTC dapat digunakan untuk menambah tingkat keamanan kendaraan listrik terutama dalam hal pengereman. Sehingga performansi dan keandalan sistem pengereman menggunakan *regenerative* ABS dapat ditingkatkan.
- Apabila sistem AFTC yang telah dibuat diimplementasikan pada *real plant* mobil listrik ada baiknya tetap ditambahkan indikator ABS pada *dashboard* mobil agar dapat memberikan peringatan apabila terjadi kesalahan pada kerja sensor.

DAFTAR PUSTAKA

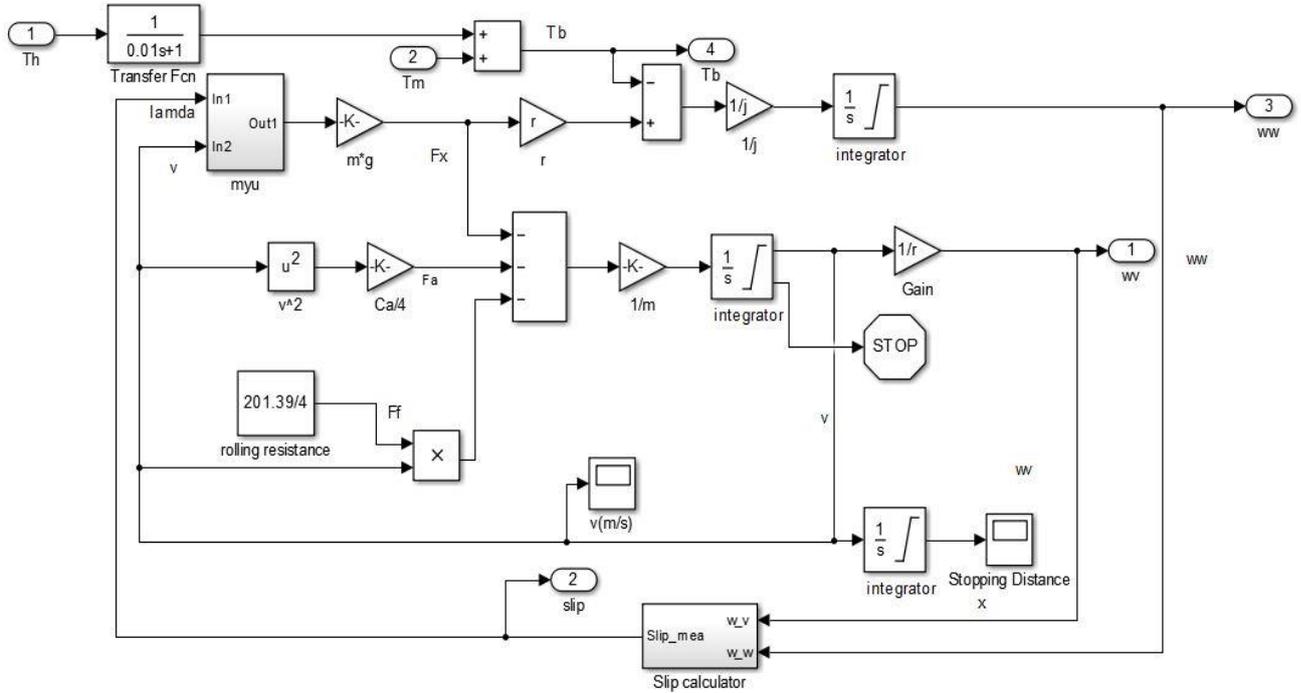
- Aly, A. A., Zeidan, E. S., Hamed, A., and Salem, F. (2011). *An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review*. Intelligent Control and Automation, pp. 186-195
- Anair, Don., and Amine, M. (2012). *State of Charge Electric Vehicle's Global Warming Emissions and Fuel-Cost Savings across the United States*. Cambridge: Union of Concerned Scientists
- Faisal, A. M. (2008). *High-Speed Baud-Rate Clock Recovery*. Electrical and Computer Engineering University of Toronto
- Gamazo, J. C., Vazquez-Sanchez, E., and Gommez-Gil, J. (2010). *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*. Departement of Signal Theory, Communications and Telematics Engineering, University of Valladolid. pp. 6901-6947
- Grunditz, E. A. (2014). *BEV Powertrain Component Sizing with Respect to Performance, Energy Consumption and Driving Patterns*. Departement of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Jiang, J. (2005). *Fault-tolerant Control Systems - An Introductory Overview*. Acta Automatica Sinica, vol. 31, no. 1, pp. 161-174
- Jingang, G., Jian, X., and Lin, G. (2014). *Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicle with a Fuzzy Sliding Mode Controller*. IEEE, pp. 6459-6476
- Holkar, K. S. (2013). *Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance*. International Journal of Computer Application. pp. 1- 5
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2015). *Robust Observer-based Fault Tolerant Tracking Control for Linear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor*

- Faults: Application to a DC Motor System*. Praise Worthy Prize, VIII(6). Pp. 375-385.
- Lee, Y. Zak, S.H. (2002). *Designing a Genetic Neural Fuzzy Anti-lock Brake System Controller*. Transaction on Evolutionary Computation.
- Liu, J., and Wang, X. *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*. (2012). Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Lubbers, K. H. B. (2014). *Design and Analysis of a Model based Low Level Slip Controller based on a Hybrid Braking System*. Delf Center for System and Control Delf University of Technology. pp. 10
- Lunze, J. (2008). *Bibliographical review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems*. Annual Reviews in Control, pp. 229-252
- Maya, A. S. (2018). *Design Active Fault Tolerant Control on ABS in Electric Vehicle in Sensor Fault*. Surabaya, Jawa Timur: Repository ITS.
- Nasir, A. N. K., Ismail, R. M. T. R., and Ahmad, M. A., (2010). *Performance Comparision between Sliding Mode Controller (SMC) and PD-PID Controllers for a Nonlinear Inverted Pendulum System*. *International Journal of Computer, Electricalm Automation, Control and Information Engineering*. pp 1-6.
- Ogata,K. (2004). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Peng, D., Zhang, Y., Yin, C. L., and Zhang, J. W. (2008). *Combined Control of a Regenerative Braking and Anti-lock Braking System for Hybrid Electric Vehicles*. *International Journal Automotive Technology*, pp. 749-757
- Solyon, S. (2002). *Synthesis of a Model-Based Tire Slip Controller*. Departement of Automotive Control, Lund, Sweden.
- Student Manual. (2013). *Anti-Lock Braking System Training Program*. Meritor Wabco.

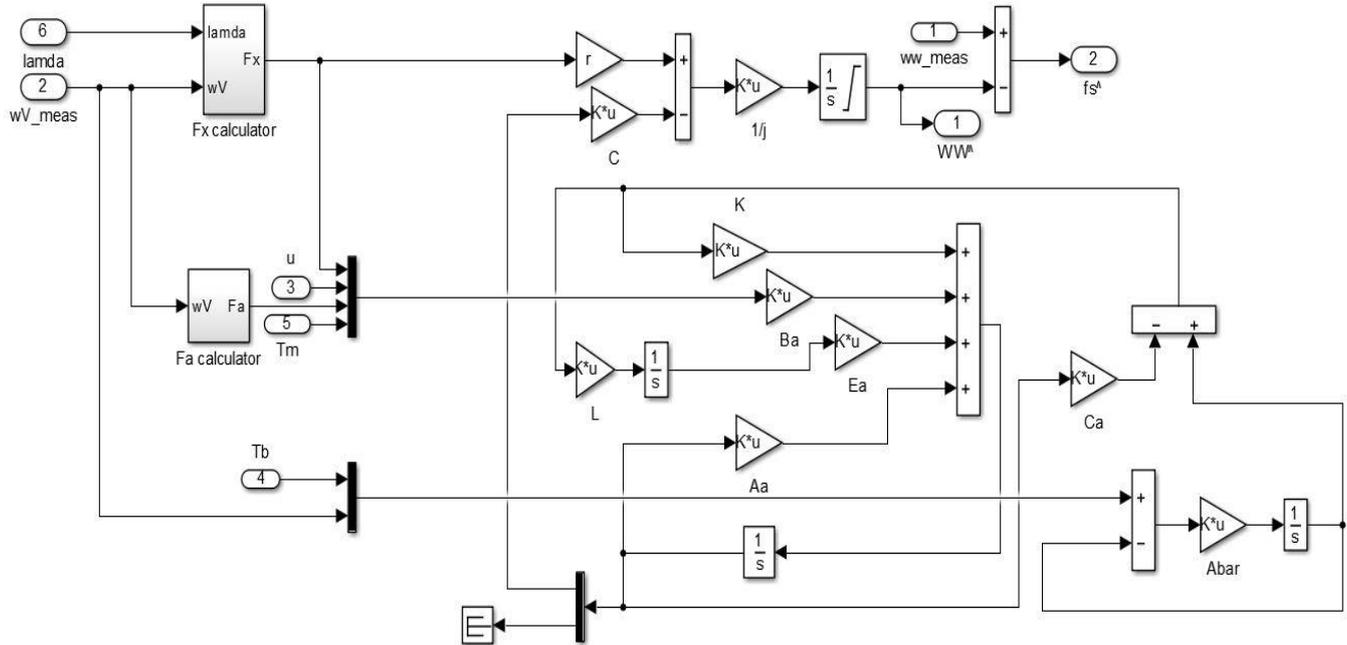
- Swaroop, D., Gerdes, J.C., Hedrick, J.K. (1997). *Fault Tolerant Control of Automatically Controlled Vehicles in Response to Brake System Failures*. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications. Hartford, USA.
- Tur, O., Ustun, O., and Tuncay, R. N. (2007). *An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicle as Anti-Lock Braking System*. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Istanbul, Turkey.
- Yao, J., Zhong, Z. M., Sun, C. Z. (2006). *A Fuzzy Logic based Regenerative Braking Regulation for a Fuel Cell Bus*. Proceedings of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Beijing, China

Halaman ini sengaja dikosongkan

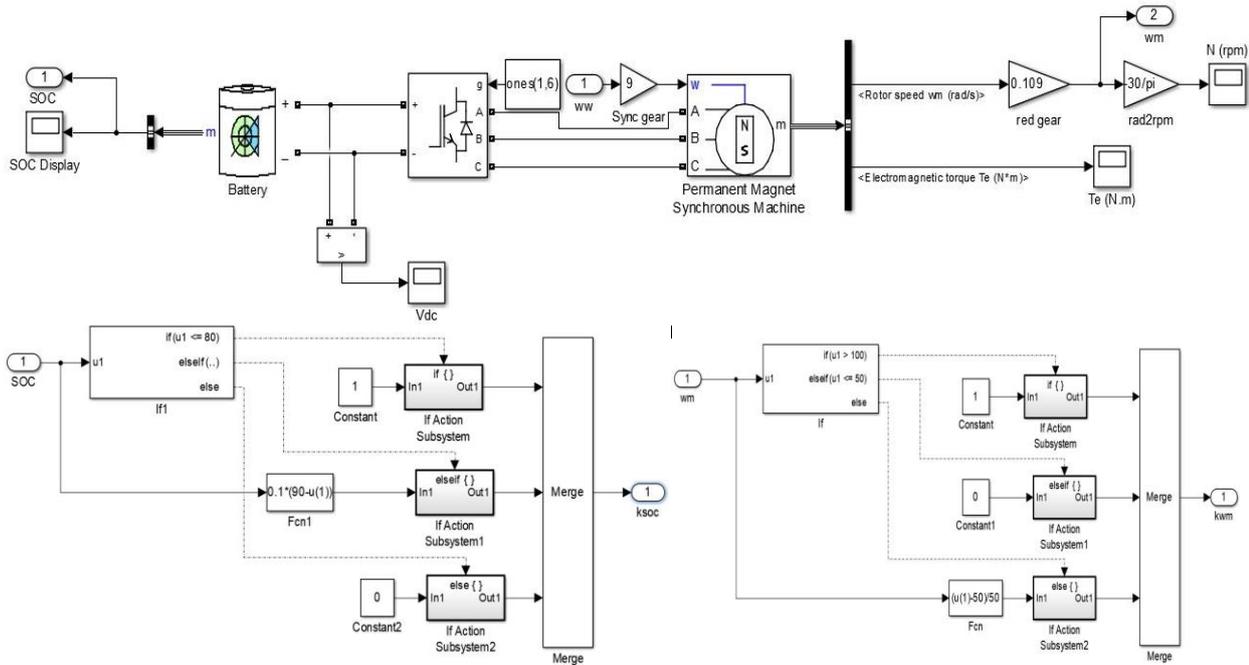
SIMULINK MATLAB R2014b *QUARTER CAR MODEL ELECTRIC VEHICLE*



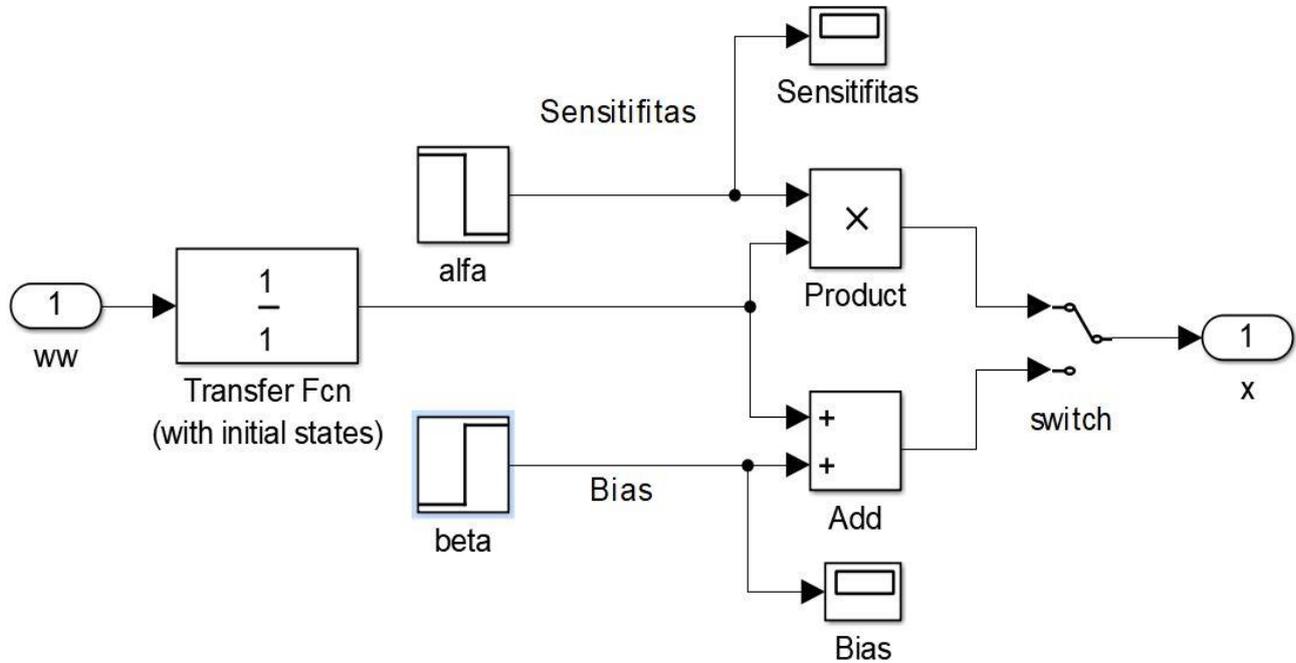
SIMULINK MATLAB R2014b *OBSERVER REGENERATIVE ABS*



SIMULINK MATLAB R2014b MODEL MOTOR *REGENERATIVE* ABS



SIMULINK MATLAB R2014b *FAULT SENSOR REGENERATIVE ABS*



LAMPIRAN B

SCRIPT mfile MATLAB R2014b REGENERATIVE ABS

```
clc;
clear;

% Definisi parameter regenerative ABS pada EV
m = 342.5;
r = 0.33;
Af = 3.1;
cr = 0.3;
ct = 0.01;
j = 3.5;
g = 9.8;
c1 = 1.029;
c2 = 17.16;
c3 = 0.523;
c4 = 0.03;
ctrl = 1;

%Parameter Observer
A = [-100 0; 0 -0.098] %Matriks A
B = [0 100 0 100; -0.0116 0 -0.0116 0] %Matriks B
C = [1 0; 0 1] %Matriks C
n = length(A)
p = size(C,1)
mu = size(B,2)
Fa = [0;0];
Fs = [1;0];
fs = size(Fs,n);
fa = size(Fa,p);
Abar = 1*eye(p);
Aa = [A zeros(n,p); Abar*C -Abar]
Ba = [B;zeros(p,mu)]
Ca = [zeros(p,n) eye(p)]
Ea = [Fa zeros(n,fs); zeros(p,fa) Abar*Fs]
Atild = [Aa Ea; zeros(fa+fs,n+p) zeros(fa+fs)];
Ctild = [Ca zeros(p,fa+fs)];
rank(Atild)
rank(observ(Atild,Ctild))
```

```
p1 = -900
p2 = -700
p3 = -500
p4 = -200
p5 = -100
p6 = -0.00000 + 0.000001i
```

```
Ktild = place(Atild', Ctild', [p1 p2 p3 p4 p5
p6])% Gain Observer system
K = Ktild(:, 1:n+p)
L = Ktild(:, n)
```

BIODATA PENULIS



Nama penulis Muhammad Rifqi Pinandhito. Penulis dilahirkan di Yogyakarta pada tanggal 4 September 1996 sebagai anak pertama dari dua bersaudara dari ayahanda Ir. Suwidi dan Ibunda Ir. Tri Wisnu Pangastuti. Saat ini penulis tinggal di Surabaya. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Keputran VIII Yogyakarta hingga tahun 2008, pendidikan menengah pertama di SMPN 34 Surabaya hingga tahun 2011, pendidikan menengah atas di

SMAN 15 Surabaya hingga tahun 2014, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2018, penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan Active Fault Tolerant Control (AFTC) Pada Regenerative Anti-lock Braking System Pada Mobil Listrik Dengan Kesalahan Pada Sensor**. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: rifqipinandhito@gmail.com.