



TUGAS AKHIR TF 141581

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

Adhitia Dwi Arigi  
NRP. 0231134000055

Dosen Pembimbing :  
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.  
Ir. Ya'umar, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**FINAL PROJECT TF 141581**

**DESIGN OF ACTIVE FAULT TOLERANT  
CONTROL (AFTC) ON ANTI-LOCK BRAKING  
SYSTEM (ABS) IN ELECTRIC VEHICLE WITH  
ACTUATOR FAULT**

*Adhitia Dwi Arigi*  
NRP. 02311340000055

*Supervisors :*  
*Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.*  
*Ir. Ya'umar, M.T*

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT**  
*Faculty of Industrial Technology*  
*Sepuluh Nopember Institute of Technology*  
*Surabaya*  
**2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Adhitia Dwi Arigi  
NRP : 2413100055  
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Active Fault Tolerant Control (AFTC)* pada *Anti-Lock Braking System (ABS)* Mobil Listrik dengan Kesalahan pada Aktuator” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, 8 Januari 2018  
Yang membuat  
pernyataan,

Adhitia Dwi Arigi  
NRP. 2413100055

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Adhitia Dwi Arigi  
NRP. 0231134000055

Surabaya, 8 Januari 2018

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing I

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

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing II

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



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



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

**TUGAS AKHIR**





Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

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

Oleh:

**ADHITIA DWI ARIGI**  
**NRP. 0231134000055**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Ir. Ya'umar, MT  (Pembimbing II)
3. Hendra Cordova, ST, MT  (Ketua Penguji)
4. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M.T. Nasution Msc  (Penguji I)

**SURABAYA**  
**JANUARI, 2018**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

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

**Nama** : Adhitia Dwi Arigi  
**NRP** : 0231134000055  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.  
Ir. Ya'umar, M.T.

**Abstrak**

Salah satu sistem pengendalian yang dapat menoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen aktuator secara otomatis dikenal sebagai *Active Fault Tolerant Control (AFTC)*. Pada pengendalian *Anti-Lock Braking System (ABS)* digunakan pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) *Autotuning* untuk mengatasi sifat nonlinieritas sistem. Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah membuat *observer*. *Observer* berfungsi untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi. Setelah kesalahan terestimasi, selanjutnya, kesalahan akan dikompensasi oleh sistem AFTC melalui perbaikan sinyal kontrol menggunakan hasil kesalahan aktuator. Pada tugas akhir ini kesalahan yang diberikan berupa bias dengan kesalahan 5%, 15%, dan 20%. Untuk kesalahan bias 20% sistem tanpa AFTC menunjukkan parameter performansi *maximum overshoot* dan *error steady state* masing-masing sebesar 22,5% dan 2,5%. Ketika sistem diberi AFTC, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state* masing-masing menjadi 0,078%, 0,47s, dan 0,023%. Dengan demikian, AFTC terbukti telah mampu menolerir dan mengakomodasi kesalahan bias pada *solenoid valve*.

**Kata Kunci:** *Anti-Lock Braking Sytem, Active Fault Tolerant Control, Kesalahan Aktuator, PID Autotuning.*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

***DESIGN OF ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL  
(AFTC) ON ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM (ABS) IN  
ELECTRIC VEHICLE WITH ACTUATOR FAULTS***

***Name*** : Adhitha Dwi Arigi  
***NRP*** : 02311340000055  
***Department*** : Teknik Fisika FTI-ITS  
***Supervisors*** : Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.  
Ir. Ya'umar, M.T.

***Abstract***

*One of controlling system that can tolerate faults in the actuator automatically is known as Active Fault Tolerant Control (AFTC). For Anti-Lock Braking System (ABS) control, used Propotional Integral Derivative (PID) Autotuning controller to overcome the nonlinearity of the system. The next step is to create an observer. Observer is used to estimate fault that occur. After estimating the fault, furthermore, the fault will be compensated by the AFTC system through the improvement of the control signal using the actuator fault results. In this final project, fault is given in the bias form of 5%, 15%, and 20% respectively. For bias of 20%, system without AFTC showed maximum overshoot and steady state performance parameters of 22.5% and 2.5% respectively. When system AFTC is given, maximum overshoot, settling time, and steady state error are respectively become 0,078%, 0,47s, and 0,023%. Thus, AFTC has proven to be able to tolerate and accommodate bias errors in the solenoid valve.*

***Keywords: Anti-Lock Braking System, Fault Tolerant Control, Actuator Fault, Virtual Actuator.***

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL* (AFTC) PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* (ABS) MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR”**.

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

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku 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 Ir. Ya'umar, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Kedua orang tua penulis, Bapak Didik Rame D. Wibowo, S.H, M.si. dan Ibu Lida Masniara. Kakak dan adik penulis, Redila Permata Anindita, S.Kom dan Kania Zaskia P. Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
5. Seluruh teman-teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2013, teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa, terima kasih untuk dukungan dan bantuannya.
6. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.

7. 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, 8 Januari 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul .....	i
<i>Title Page</i> .....	ii
Lembar Pengesahan I .....	v
Lembar Pengesahan II .....	vii
Abstrak .....	ix
<i>Abstract</i> .....	xi
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Sistematika Laporan .....	3
BAB II DASAR TEORI .....	5
2.1 <i>Anti-Lock Braking System (ABS)</i> .....	5
2.2 <i>Solenoid Valve</i> .....	12
2.3 <i>Pengendali PID Autotuning</i> .....	14
2.4 <i>Fault Tolerant Control Sytem (FTCS)</i> .....	16
2.5 <i>Observer State</i> .....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1 <i>Pemodelan Quarter Car Model (QCM)</i> .....	25
3.2 <i>Perancangan Sistem Pengendali PID Autotuning</i> .....	28
3.3 <i>Perancangan Observer</i> .....	30
3.4 <i>Perancangan Sistem AFTC</i> .....	32
3.5 <i>Pengujian Sistem AFTC</i> .....	32
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN .....	33
4.1 <i>Uji Validasi Pemodelan QCM</i> .....	33
4.2 <i>Uji Loop Tertutup Pengendali PID Autotuning</i> .....	34
4.3 <i>Hasil Perancangan Observer</i> .....	36
4.3 <i>Uji Kesalahan Aktuator</i> .....	37

4.4	Respon Kecepatan Roda dan Jarak Penghentian.....	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....		47
LAMPIRAN .....		49
BIODATA PENULIS.....		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Grafik antara koefisien ( $\mu$ ) dan ( $\pi$ ) .....	5
Gambar 2.2	Penerapan <i>braking point</i> dengan menggunakan dan tanpa ABS.....	7
Gambar 2.3	Komponen-komponen yang ada pada ABS .....	9
Gambar 2.4	ABS Modulator Valve.....	10
Gambar 2.5	Struktur <i>pneumatic ABS solenoid valve</i> .....	13
Gambar 2.6	Pengaturan tekanan <i>pneumatic ABS solenoid valve</i> .....	13
Gambar 2.7	<i>Block Diagram PID Controller</i> .....	15
Gambar 2.8	Diagram blok dari PID <i>Autotuning</i> .....	15
Gambar 2.9	Struktur dari AFTCS .....	18
Gambar 2.10	<i>Observer state</i> .....	21
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	25
Gambar 3.2	Gaya-gaya pada kendaraan.....	26
Gambar 3.3	Dinamika pada Roda .....	27
Gambar 3.4	Diagram blok pengendalian.....	29
Gambar 3.5	<i>State Observer</i> .....	31
Gambar 4. 1	Hasil uji <i>loop</i> terbuka simulasi .....	33
Gambar 4. 2	Respon <i>slip ratio</i> tanpa ABS .....	34
Gambar 4. 3	Respon pengendalian <i>loop</i> tertutup .....	35
Gambar 4. 4	Hasil uji <i>Observer</i> dengan kesalahan 5%.....	36
Gambar 4. 5	Hasil uji <i>Observer</i> dengan kesalahan 15%.....	36
Gambar 4. 6	Hasil uji <i>Observer</i> dengan kesalahan 20%.....	37
Gambar 4. 7	Hasil uji kesalahan bias 5%.....	38
Gambar 4. 8	Hasil uji kesalahan bias 15%.....	39
Gambar 4. 9	Hasil uji kesalahan bias 20%.....	40
Gambar 4. 10	Perbandingan respon kecepatan roda .....	42
Gambar 4. 11	Perbandingan jarak penghentian kendaraan .....	42

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Parameter Gesek pada Permukaan Jalan.....	27
<b>Tabel 3. 2</b> Parameter Pemodelan Kendaraan .....	28
<b>Tabel 3. 3</b> Parameter $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ .....	29
<b>Tabel 3. 4</b> Koefisien <i>Gain</i> .....	30
<b>Tabel 4. 1</b> Parameter Performansi Uji <i>Loop</i> Tertutup.....	35
<b>Tabel 4. 2</b> Parameter Performansi Kesalahan Bias 5%.....	39
<b>Tabel 4. 3</b> Parameter Performansi Kesalahan Bias 15%.....	40
<b>Tabel 4. 4</b> Parameter Performansi Kesalahan Bias 20%.....	41

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan kendaraan dengan sistem kompresi internal sangatlah pesat, khususnya mobil. Mobil memiliki kontribusi yang besar bagi kehidupan sehari-hari di zaman modern ini. Mobil telah menjadikan kehidupan manusia lebih baik serta membuka peluang untuk berkembangnya teknologi. Perkembangan teknologi menjadikan industri otomotif menjadi salah satu industri yang pertumbuhannya terbesar di dunia. Namun, banyaknya jumlah mobil yang ada saat ini juga diikuti dengan masalah yang serius di belakangnya. Polusi udara, pemanasan global, berkurangnya cadangan minyak, merupakan sebagian di antara dampak buruk akibat pertumbuhan kendaraan. Untuk mengurangi dampak buruk dari mobil konvensional, maka dikembangkanlah teknologi berupa *Electric Vehicles* (EV) [1].

Salah satu komponen penting pada EV adalah sistem pengereman. Sistem pengereman yang umum dipakai oleh kendaraan berpenumpang saat ini adalah *Anti-Lock Braking System* (ABS). ABS merupakan sistem pengereman yang berfungsi untuk mencegah roda pada mobil untuk terkunci ketika adanya pengereman darurat atau pengereman secara mendadak [2]. Sebagai hasilnya, mobil yang memiliki sistem pengereman ini dapat mengurangi jarak penghentian mobil dan akan meningkatkan manuverabilitas dibandingkan dengan mobil yang tidak memiliki ABS [3].

Aktuator yang bekerja pada sistem pengereman ABS adalah *solenoid valve*. Kontroler akan mengeluarkan sinyal elektrik yang akan digunakan *solenoid valve* untuk mengatur tekanan pengereman atau *braking pressure* [4]. Ketika dalam keadaan tidak dibangkitkan, lilitan *solenoid valve* yang akan menggerakkan *inlet* dan *outlet* dalam keadaan mati. Sedangkan *inlet valve* dan *outlet valve* masing-masing dalam keadaan terbuka dan tertutup [5]. Dalam penggunaannya, *solenoid valve*

juga dapat terjadi kesalahan. Diantara kesalahan yang sering terjadi pada *solenoid valve* adalah: *valve* gagal untuk membuka, kesalahan akibat *valve* yang terbuka sebagian, maupun tidak berfungsinya lilitan akibat terbakar maupun meleleh [6]. Hal ini sangat berbahaya, mengingat sistem pengereman merupakan sistem yang vital pada suatu mobil. Untuk itu, diperlukan sistem pengendalian yang mampu mengurangi dampak kesalahan tersebut.

Salah satu sistem pengendalian yang dapat menoleransi gangguan berupa kesalahan pada komponen secara otomatis dikenal sebagai *Fault Tolerant Control System* (FTCS). FTCS dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe yaitu *Active Fault Tolerant Control System* (AFTCS) dan *Passive Fault Tolerant Control System* (PFTCS) [6].

Penelitian terkait pernah dilakukan dengan cara merancang Fault Detection and Isolation (FDI) pada sensor di ABS. Untuk mendeteksi, mengestimasi, dan mengisolasi kesalahan pada sensor, digunakan *Sliding Mode Observers* (SMO). Terdapat tiga kesalahan yang disimulasikan, diantaranya kesalahan bias, kesalahan yang terjadi pada saat tertentu, dan kesalahan yang kontinyu. Hasil penelitian menyatakan bahwa simulasi FDI mampu mendeteksi dan mengisolasi kesalahan pada sensor ABS. Selain itu FDI juga mampu mengestimasi kesalahan yang terjadi [7].

Maka dari itu, dari latar belakang yang ada, dibuatlah tugas akhir untuk dapat mengatasi kesalahan pada aktuator di *Anti-Lock Braking System* (ABS).

## 1.2 Rumusan Masalah

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

- Bagaimana merancang *observer* untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada aktuator pada *Anti-Lock Braking System* (ABS)?



- Bagaimana merancang *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk mengatasi kesalahan pada aktuator pada *Anti-Lock Braking System* (ABS)?

### 1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini adalah untuk mengatasi kesalahan pada *solenoid valve* dengan menggunakan metode *Active Fault Tolerant Control* (AFTC).

### 1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan-batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Pemodelan yang digunakan berupa *Quarter Car Model* (QCM) untuk jenis kendaraan berpenumpang.
- Kendaraan diasumsikan berjalan pada lintasan lurus dengan permukaan jalan aspal kering.
- Besar *setpoint* senilai 0,2 dengan berdasarkan pada *slip ratio* optimum untuk berbagai kondisi jalan.
- Variabel yang dikendalikan berupa *slip ratio*.
- Variabel yang dimanupulasi berupa torsi pengereman.
- Variabel yang diukur berupa kecepatan roda dan kecepatan mobil.
- Kesalahan berupa bias dengan nilai 5%, 15%, dan 20%.

### 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan yang digunakan pada penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN**  
Bab I berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan tugas akhir ini.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**  
Pada bab II dibahas tentang teori yang dapat menunjang pengerjaan tugas akhir ini, seperti pengertian dan prinsip

kerja *Anti-Lock Braking System* (ABS), pengertian AFTC dan perancangannya, prinsip kerja sistem pengendali PID, serta aktuator *solenoid valve*.

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab III berisi tentang prosedur pengerjaan tugas akhir, seperti pemodelan sistem, simulasi sistem, serta perancangan sistem pengendali AFTC.

- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV dibahas tentang perbandingan sistem ABS dengan sistem kendali konvensional dan ABS dengan menggunakan pengendali *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) untuk kesalahan pada aktuator.

- **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab V berisi tentang kesimpulan dari hasil analisa yang dilakukan serta saran untuk pengerjaan pengembangan penelitian di kemudian hari.

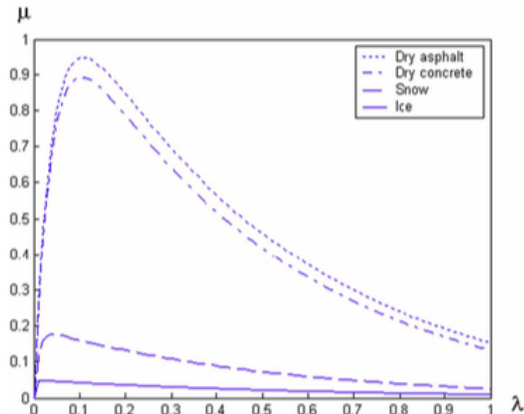
## BAB II

### DASAR TEORI

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

*Anti-Lock Braking System (ABS)* merupakan salah satu komponen terpenting pada kendaraan bermotor yang berfungsi sebagai sistem keamanan pada kendaraan tersebut. Tujuan utama dari ABS untuk membantu kendaraan mencapai tingkat akselerasi minimum dengan optimal tanpa mempengaruhi stabilitas dan kemampuan kendali kemudi kendaraan dengan tingkat keselamatan maksimum [8].

Saat proses pengereman, akan terjadi *tractive force* yang dihasilkan oleh ban, yang mana sebanding dengan gaya normal jalan yang berkerja pada ban. Perbandingan yang digunakan bergantung pada variasi dari permukaan jalanan seperti (kering, basah, bersalju, dan lain-lain) dan koefisien lekukan jalan. Pada suatu penelitian memperlihatkan sebuah grafik fungsi non-linear antara koefisien gesekan dengan jalan ( $\mu$ ) dan slip rasio roda ( $\lambda$ ) pada kondisi spesifik jalanan tertentu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Grafik antara koefisien ( $\mu$ ) dan ( $\pi$ ) [8]

Pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa pada kondisi jalanan yang bersalju atau licin, gesekan dengan jalan rendah sedangkan resiko slip ban semakin tinggi. Untuk kondisi jalanan yang kering atau normal, gesekan dengan jalan semakin tinggi sedangkan resiko slip ban semakin rendah.

Seperti diketahui bahwa ban akan slip dan terkunci pada saat pengereman yang keras atau pada saat pengereman di permukaan jalan yang licin. Oleh karena itu ABS akan memanipulasi slip ban sehingga dapat melakukan pergesekan maksimum dan menstabilkan kemudi. Apabila ban terjadi slip maka ada beberapa konsekuensi yang dapat terjadi seperti, jarak pengereman meningkat, kemudi hilang kendali, dan keausan ban akan menjadi tidak normal. 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 [9]. Oleh karena itu *ABS Controller* bertindak dalam menghadapi dinamika rem dan dinamika roda pada keseluruhan sistem.

Terdapat persamaan nilai slip ban,  $\lambda$ , yang diambil dari [9] dengan definisi seperti berikut:

$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (2.1)$$

dengan :

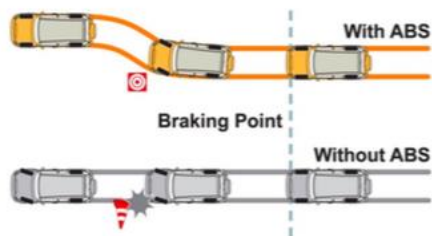
$\omega$  : Kecepatan sudut ban

$R$  : Radius perputaran ban

$V$  : Laju kecepatan kendaraan

Pada saat kondisi berkendara normal,  $V = \omega R$ , sedangkan  $\lambda = 0$ . Pada saat pengereman yang parah, secara umum dapat terjadi  $\omega = 0$  ketika  $\lambda = 1$ , yang biasa disebut dengan ban terkunci. Ban terkunci merupakan keadaan yang tidak diinginkan karena dapat memperpanjang jarak pemberhentian dan menyebabkan hilangnya kontrol terhadap arah.

Menurut [10] ada tiga hal penting dari ABS yaitu jarak pemberhentian, kestabilan, dan ketahanan kendaraan. Jarak pemberhentian merupakan salah satu faktor penting dari proses pengereman. Jarak pemberhentian adalah hasil fungsi dari massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan dan gaya pengereman. Jarak pemberhentian dapat diperkecil oleh peningkatan pada gaya pengereman, karena pada setiap jenis permukaan jalan pasti mempunyai koefisien puncak dari gaya pengereman tersebut. Sehingga dengan adanya sebuah *antilock system* dapat mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum. Namun tujuan dari *antilock system* ini dipengaruhi oleh kebutuhan akan stabilitas dan ketahanan kendaraan.



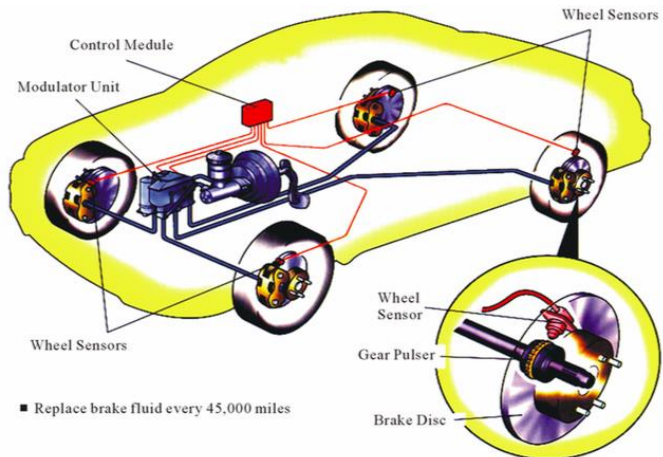
**Gambar 2. 2** Penerapan *braking point* dengan menggunakan dan tanpa ABS [10]

Kestabilan merupakan faktor penting untuk kondisi kendaraan saat proses pengereman terjadi. Seperti pada Gambar 2.2, saat kendaraan melaju pada permukaan jalan yang licin dibutuhkan gaya gesekan maksimum untuk memperlambat dan menghentikan kendaraan. Namun pada kondisi permukaan jalan yang seperti itu tidak akan didapatkan gaya maksimum karena gaya pengereman lebih signifikan dapat diperoleh di satu sisi kendaraan saja daripada di sisi lainnya. Sehingga saat menerapkan rem penuh pada kedua sisi akan menghasilkan momen mengayuh atau meluncur yang dapat menarik kendaraan ke

sisi yang memiliki gaya gesekan tinggi dan mengakibatkan ketidakstabilan kendaraan. Inilah konsep *antilock system* yang menjaga slip kedua roda belakang pada tingkat yang sama dan meminimalkan dua koefisien gesekan puncak [10].

Kontrol terhadap titik puncak gaya gesek yang baik diperlukan untuk mencapai *lateral force* yang baik oleh karena itu dibutuhkan ketahanan kendaraan yang memuaskan. Ketahanan kendaraan saat pengereman penting tidak hanya untuk koreksi ringan saja, tetapi untuk kemungkinan saat mengemudi menghadapi adanya rintangan. Untuk kendaraan yang dilengkapi ABS, kinerja ban sangat penting, karena semua gaya pengereman dan kemudi dihasilkan di dalam ban dari bagian kontak antara kendaraan dan jalan. *Tractive force* pada ban dan juga *lateral force* hanya dapat dihasilkan ketika ada perbedaan antara kecepatan lingkaran ban dan kecepatan relatif kendaraan terhadap permukaan jalan. Perbedaan tersebut dilambangkan sebagai slip. Hal ini biasa terjadi untuk menghubungkan gaya pengereman ban terhadap gaya slip ban. Setelah titik mencapai titik puncak, slip roda yang meningkat menyebabkan reduksi koefisien gesekan ban terhadap jalan. Sehingga ABS harus membatasi slip ke nilai di bawah nilai titik puncak untuk mencegah terjadinya *lockup* pada roda. Roda dengan titik puncak gesekan yang tinggi mencapai gesekan maksimum pada 0,2 atau dengan kata lain 20 % slip. Nilai slip optimal menurun seiring dengan gesekan ban terhadap jalan juga menurun [10].

Di dalam ABS itu sendiri terdapat beberapa komponen seperti pada Gambar 2.3, menunjukkan komponen-komponen yang ada secara umum. Komponen-komponen ABS akan dijelaskan menurut buku [11] seperti di bawah ini yaitu:



**Gambar 2. 3** Komponen-komponen yang ada pada ABS [9]

### 2.1.1 Sensor Kecepatan Roda

Sensor kecepatan roda atau juga disebut *Wheel Speed Sensors* merupakan perangkat yang berfungsi untuk membaca kecepatan rotasi ban pada sebuah kendaraan. Sebuah kendaraan secara umum memiliki empat sensor yang masing-masing terletak di sisi *steering knuckle* pada setiap sisi as ban kemudi.

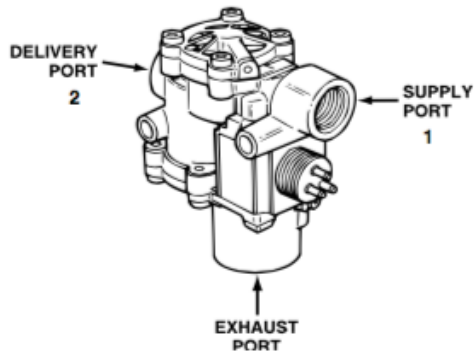
### 2.1.2 Modul Kontrol

Modul Kontrol atau juga disebut *Electronic Control Unit (ECU)* merupakan perangkat yang bertanggung jawab untuk menangani semua proses dari fungsi-fungsi yang ada pada ABS. ECU ini menerima dan menginterpretasikan sinyal kecepatan ban dari sensor-sensor yang ada dan menggunakan informasi tersebut untuk menentukan jika sebuah ban akan terkunci, dan kapan serta bagaimana untuk mengaktifkan katup-katup ABS. Dengan adanya pengaktifan katup-katup tersebut, ECU dapat mengatur tekanan udara ke ruang rem. Dengan menggunakan kabel

dapat menghubungkan ECU dengan komponen-komponen ABS lainnya seperti, *Wheel sensors, Modulator unit, Power Source, Ground*, dan lain-lain.

### 2.1.3 Unit Modulator

Unit Modulator *atau disebut juga dengan ABS Modulator Valve* berfungsi untuk mengatur tekanan udara ke masing-masing rem yang dikontrol oleh ABS. Pada saat pengereman normal, *ABS Modulator Valve* tidak diaktifkan sehingga udara mengalir melalui katup ABS ke ruang rem. Selama ABS beroperasi, katup ABS bertugas untuk memodulasi tekanan udara di ruang rem yang berfungsi untuk mengendalikan pengereman dan mencegah ban *lockup*. Katup ABS adalah katup udara yang dikontrol solenoida, terdiri dari dua jenis solenoida yang dioperasikan secara elektrik dan dua katup diafragma. ECU bertugas mengendalikan solenoida agar bertindak sangat cepat, karena solenoida berfungsi untuk mengendalikan diafragma, yang akan membuka atau menutup agar memberikan dan mengurangi tekanan pada ruang rem. Katup ABS terdiri dari tiga *port* udara seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** ABS Modulator Valve [11]



- *Supply Port* berfungsi untuk menerima tekanan udara dari katup *relay*
- *Delivery Port* berfungsi untuk mengirim tekanan udara ke ruang rem
- *Exhaust Port* berfungsi untuk mengeluarkan tekanan udara hanya dari sisi *delivery-port* pada saat *ABS Control*.

Skema pengereman ABS yang berbeda bergantung pada jenis penggunaan rem, yaitu berdasarkan pada saluran (katup) dan jumlah sensor kecepatan. Skema pertama adalah 4 kanal (*four channel*). Pada tipe ini sebuah kendaraan memiliki empat sensor ABS dan memiliki katup yang terpisah untuk keempat rodanya. Dengan menggunakan pengaturan ini, *controller* memonitor setiap roda secara terpisah untuk memastikan roda-roda tersebut mencapai gaya pengereman maksimum.

Tipe kedua adalah 3 kanal (*three channel*). Pada tipe ini biasa ditemukan pada kendaraan jenis truk maupun *pickup* dengan 4 roda dimana pada setiap sisi depan roda terdapat sebuah katup dan sebuah sensor, dan satu katup dan satu sensor untuk kedua roda belakang kendaraan. Sensor untuk roda belakang ditempatkan pada as belakang. Untuk mencapai gaya pengereman maksimum, maka pada sistem ini menyediakan kontrol individual pada roda depan sedangkan pada roda belakang akan dikontrol secara bersamaan. Dengan bantuan dari sistem ini kemungkinan bahwa apabila roda belakang melakukan penguncian selama berhenti, dapat mengurangi efektifitas rem.

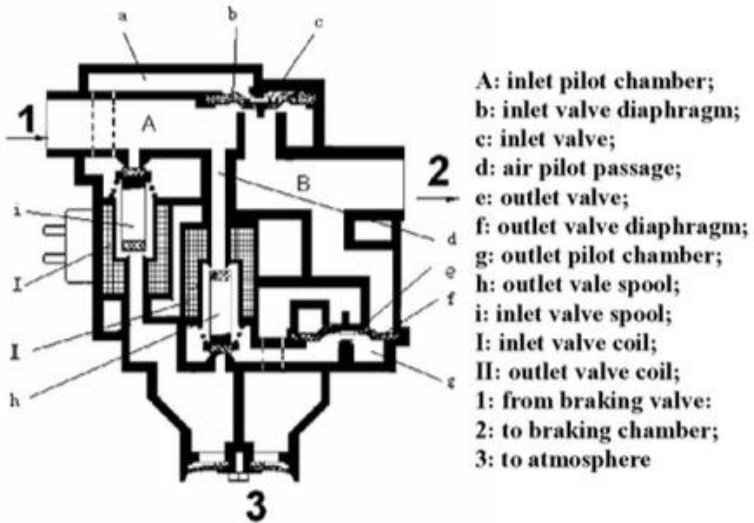
Ketiga, 1 kanal (*one channel*). Pada tipe ini biasa ditemukan pada truk *pickup* dan truk berat dengan ABS roda belakang. Pada tipe ini terdiri dari 1 katup yang beroperasi pada kedua roda belakang, dan 1 sensor yang berada pada as belakang. Tipe ini hampir sama dengan sistem tipe 3 kanal. Roda belakang dimonitor secara bersamaan dan kedua roda tersebut harus mengunci sebelum ABS memulai kinerjanya. Pada sistem ini juga ada kemungkinan bahwa satu dari roda belakang akan mengunci, sehingga akan mengurangi efektifitas rem. Sistem ini

dapat dengan mudah diidentifikasi, karena biasanya sistem ini akan menjadi satu jalur rem melalui sebuah *T-fitting* untuk kedua roda belakangnya [10].

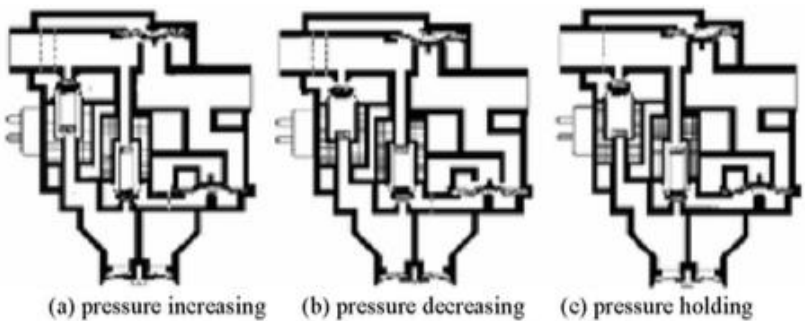
## **2.2 Solenoid Valve**

*Solenoid* mewakili *electro-mechanical interface*, dimana arus listrik diubah menjadi gaya *magneto-motive* yang bekerja pada sebuah kumparan. Pemodelan proses konversi *electro-magnetic* sering dianggap sebagai hambatan utama karena sangat nonlinier dan sangat bergantung pada bahan feromagnetik yang digunakan. Karena sifat feromagnetik dari *solenoid*, dapat menimbulkan efek histeresis dan harus diperhitungkan [11].

Salah satu teknologi penting untuk keamanan pengereman pada kendaraan bermotor yaitu *pneumatic ABS solenoid valve*. Sebagai salah satu bagian penting, karakteristik dinamis dari *solenoid valve* dapat mempengaruhi efek kontrol ABS secara langsung. *Pneumatic ABS solenoid valve* merupakan sebuah pengatur tekanan *pneumatic* yang dikendalikan langsung oleh sinyal listrik [12]. Struktur dari *solenoid valve* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Struktur *pneumatic ABS solenoid valve* [12]



Gambar 2. 6 Pengaturan tekanan *pneumatic ABS solenoid valve* [12]

Sebelum *pneumatic ABS solenoid valve* mengatur tekanan, *solenoid valve coil* yang menggerakkan *inlet valve* dan *outlet valve* dalam keadaan mati, maka *inlet valve* biasanya

dalam keadaan terbuka dan *outlet valve* dalam keadaan tertutup. Proses pengaturan tekanan dari *pneumatic ABS solenoid valve* ini ditunjukkan pada Gambar 2.6.

Pada Gambar 2.6 (a) *inlet valve coil* dan *outlet valve coil* dalam keadaan mati terlihat bahwa *inlet valve* dalam keadaan terbuka dan *outlet valve* dalam keadaan tertutup. Gambar 2.6 (b) menunjukkan keadaan tekanan menurun dimana terlihat bahwa *inlet valve coil* dan *outlet valve coil* dalam keadaan hidup dan *inlet valve* tertutup dan *outlet valve* terbuka. Pada gambar 2.6 (c) menunjukkan keadaan tekanan tertahan, *outlet valve coil* dalam keadaan mati dan *inlet valve coil* dalam keadaan hidup sehingga *inlet valve* dan *outlet valve* keduanya dalam keadaan dalam keadaan tertutup [12].

### 2.3 Pengendali PID Autotuning

Propotional Integral Derivative (PID) *controller* sudah banyak digunakan di kontrol sistem industrial karena PID dapat mengurangi jumlah dari parameter-parameter yang akan diterapkan. PID menghasilkan *control signals* yang proposional untuk sebuah kesalahan antara petunjuk sinyal dan aktual output (*propotional action*), untuk integral error (*integral action*), dan untuk derivatif error (*derivative action*). Dengan menerapkan tiga parameter tersebut pada algortima PID *controller*, maka kontroler dapat menyediakan *control action* yang dirancang untuk kebutuhan spesifik pada proses. Ketiga parameter tersebut diterapkan pada persamaan seperti pada Persamaan 2.2 dan digambarkan dengan *block diagram* pada Gambar 2.7.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (2.2)$$

dengan :

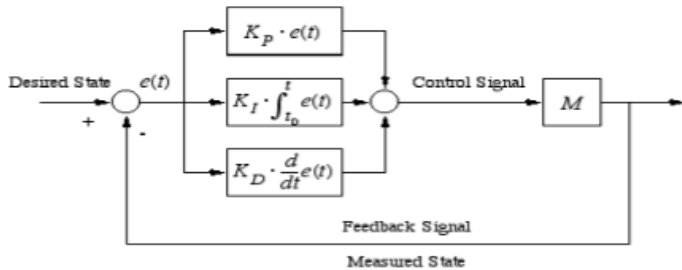
$u(t)$  = *control signal*

$e(t)$  = *error signal*

$K_p$  = parameter *propotional*

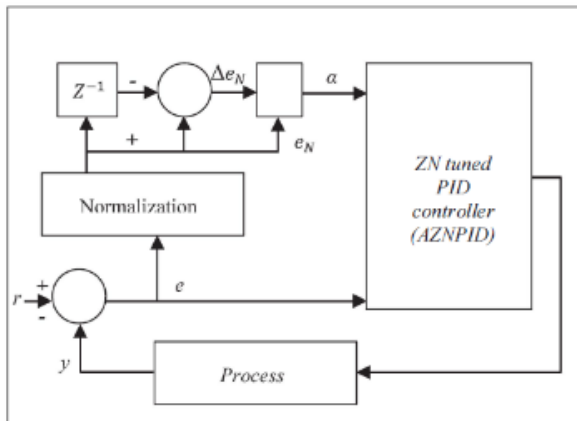
$T_i$  = parameter *integral*

$T_d$  = parameter *derivatif*



**Gambar 2.7** Block Diagram PID Controller [13]

Untuk mendapatkan performansi kontrol yang optimum, diperlukan *tuning* kontroler yang baik. Di antara beberapa metode *tuning*, salah satunya adalah *autotuning*. *Autotuning* digunakan untuk menentukan parameter pengendalian secara otomatis bergantung pada dinamika sistem yang ada.



**Gambar 2.8** Diagram blok dari PID Autotuning

Gambar 2.5 merupakan diagram blok dari *autotuning* PID controller yang digunakan.  $\alpha$  merupakan *factor gain* yaitu fungsi dari error proses ( $e$ ) dan perubahan eror ( $\Delta e$ ) yang menyesuaikan parameter dari ZNPID.

Masing-masing parameter ZN yang disetel AZNPID (yaitu keuntungan proporsional, integral dan derivative) diperbaharui secara real time oleh satu faktor modifikasi melalui beberapa hubungan yang sederhana. Untuk mendapatkan akurasi yang lebih baik maka gain updating factor ( $\alpha$ ) dibedakan sebagai:

$$\alpha(k) = e_n(k) * \Delta e_n(k) \quad (2.3)$$

Dimana  $e_n$  adalah eror normal yang diberikan oleh:

$$e_n(k) = \frac{e(k)}{|ref|} \quad (2.4)$$

$$\Delta e_n(k) = e_n(k) - e_n(k-1) \quad (2.5)$$

Sehubungan dengan nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  akan dimodifikasi terus menerus

$$K_p^M = K_p(1 + k_{11}|\alpha(k)|) \quad (2.6)$$

$$K_i^M = K_i(1 + k_{12}|\alpha(k)|) \quad (2.7)$$

$$K_d^M = K_d(1 + k_{13}|\alpha(k)|) \quad (2.8)$$

Dan AZNPID dapat didefinisikan sebagai:

$$u_{auto} = (K_p^M e(k) + K_i^M \sum_{j=0}^k e(j) + K_d^M \Delta e(k)) \quad (2.9)$$

## 2.4 Fault-Tolerant Control System (FTCS)

Sebuah sistem teknologi yang bersifat otomatis sangat rentan terjadi kesalahan yang dapat mempengaruhi bagian-bagian dari sistem tersebut seperti, sensor dan aktuator pada proses itu sendiri atau juga di dalam proses pengontrolan yang dapat mempengaruhi sistem kontrol *closed-loop* sehingga kesalahan-

kesalahan tersebut dapat berkembang menjadi malfungsi *loop*. Aktifitas *closed-loop* tersebut terkadang terdapat suatu kesalahan yang tersembunyi dari proses pengamatan. Situasi yang terjadi pada *closed-loop* seperti itu menyebabkan suatu kesalahan yang akan berkembang menjadi keadaan dimana *loop-failure* tidak dapat dicegah lagi. Sebuah kesalahan pada kontrol loop dengan mudah dapat menyebabkan terhentinya produksi ataupun malfungsi sistem pada sistem tersebut [14].

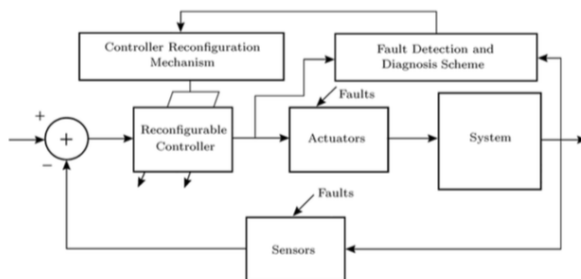
Dengan begitu sangat dibutuhkan suatu sistem kontrol yang dapat mengurangi risiko kerusakan sistem yang merupakan fokus utama pada bidang otomatis industri, karena kebutuhan yang tinggi terhadap *availability* dari sebuah sistem akan mempengaruhi dari sisi ekonomi. Sebuah sistem kontrol yang memiliki kemampuan seperti itu diketahui sebagai Fault-Tolerant Control System (FTCS). Gagasan utama dari FTCS ini adalah mencegah secara otomatis suatu kesalahan lokal agar tidak berkembang menjadi kegagalan yang dapat menghentikan produksi atau menyebabkan bahaya keselamatan. Dengan adanya FTCS pada sistem kontrol *closed-loop* dapat mentolerir kesalahan-kesalahan untuk menjaga kinerja dan stabilitas dari sistem tersebut [14].

Pada penerapan sistem otomatis *safety-critical*, dimana kegagalan tidak dapat ditolelir, membutuhkan redundansi perangkat keras untuk memudahkan *fault recovery*. Pada sistem *fail-operational* dibuat tidak peka terhadap kegagalan komponen tunggal, dan sistem *fail-safe* akan membuat *shutdown* terkontrol dan beralih ke keadaan aman saat sensor pengukuran menunjukkan adanya kesalahan kritis. Sebaliknya, pada sistem kontrol *fault-tolerant* menggunakan redundansi komponen dan sistem otomasinya untuk membuat perangkat lunak yang pintar dalam memonitor perilaku dan fungsi-fungsi dari komponen [14]. Tetapi penerapan redundansi sistem pada FTCS dapat berbeda-beda bergantung pada pemanfaatan dan pengelolaannya. Selain itu FTCS dalam menerapkan redundansi sistem kemungkinan dapat tidak sesuai dengan aplikasi apapun, karena

dalam melakukan redundansi akan dikenakan biaya tambahan untuk penambahan komponen dan biaya pemeliharaan komponen dan penambahan komponen tersebut akan menimbulkan ketidaknyamanan seperti peningkatan berat dan ukuran. Sehingga diperlukan analisis yang serius pada masalah yang ada untuk menerapkan FTCS [15].

Berdasarkan penggunaan redundansi, perancangan FTCS dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe yaitu *passive* dan *active*. Untuk pendekatan *passive*, kemungkinan kegagalan komponen sistem akan diketahui lebih dahulu, dan sistem kontrol memperhitungkan semua mode kegagalan-kegagalan ini pada tahap perancangan. Setelah sistem kontrol tersebut dirancang, maka sistem tetap berjalan selama keseluruhan operasi sistem. Bahkan ketika terjadi kegagalan komponen, sistem kontrol tetap dapat mempertahankan kinerja yang dirancang.

Sedangkan untuk FTCS *active* akan bereaksi secara aktif terhadap kegagalan komponen sistem dan mengkonfigurasi ulang tindakan kontrol dengan benar sehingga stabilitas atau kinerja keseluruhan sistem dapat diterima. Untuk mencapai konfigurasi ulang sistem kontrol dengan berhasil, maka pendekatan ini sangat bergantung pada skema deteksi atau diagnosis kegagalan secara *real-time* untuk mendapatkan



**Gambar 2. 9** Struktur dari AFTCS [15]

infor

masi terbaru tentang status sistem dan kondisi pengorpeasian pada komponen-komponennya. Isu penting yang harus dihadapi oleh



FTCS *active* dimana terbatasnya jumlah waktu reaksi yang tersedia untuk bekerja mendeteksi kegagalan dan mendiagnosa dan mengkonfigurasi ulang sistem kontrol. Kecepatan, akurasi, dan *robustness* adalah poin-poin keberhasilan dari FTCS *active* yang harus ada pada sebuah sistem. Apabila dirancang dengan benar, FTCS *active* akan dapat mengatasi kesalahan yang tidak terduga dan akan berpotensi mencapai kinerja yang optimal untuk berbagai skenario operasi sistem [15].

FTCS *active* terdiri dari beberapa sub-sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 yaitu *fault detection and diagnosis scheme*, *controller reconfiguration mechanism*, *reconfigurable controller*. Dari semua tiga sub-sistem tersebut harus bekerja secara serentak dengan ketentuan *real-time* untuk mencapai efektifitas dari FTCS *active*. *Fault detection and diagnosis scheme* biasanya menggunakan model matematis untuk mengukur perilaku yang diharapkan dari sistem. Pengukuran yang sering digunakan adalah tahap-tahap sistem, parameter sistem, dan sistem input dan output yang konsisten. Dari ketiga pengukuran ini akan menghasilkan tiga teknik *fault detection and diagnosis scheme* yaitu, tahap estimasi, parameter estimasi, dan persamaan *parity*. Selanjutnya untuk tugas dari *controller reconfiguration* yaitu untuk menstabilkan sistem dari tahap *post-fault* dan untuk memulihkan kinerja sistem seperti semula berdasarkan model sistem *post-fault*. Kemudian prinsip kerja dari *reconfigurable controller* serupa dengan *gain-scheduling control* kecuali variabel penjadwalan bergantung pada keputusan dari *controller reconfiguration mechanism*.

## 2.5 Observer State

*Observer* merupakan suatu algoritma yang berfungsi untuk mengestimasi keadaan (*state*) berdasarkan keluaran pengukuran dan variabel kontrol. *Observer* juga dapat digunakan untuk

mengestimasi suatu kesalahan pada sistem dengan cara merepresentasikan model matematis ke bentuk ruang keadaan [13]. Persamaan di bawah merupakan representasi dari persamaan ruang keadaan.

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

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

dengan :

A = matriks keadaan yang mempresentasikan fungsi alih *plant*

B = matriks nilai masukan

C = matriks hasil pengukuran

D = matriks nilai keluaran

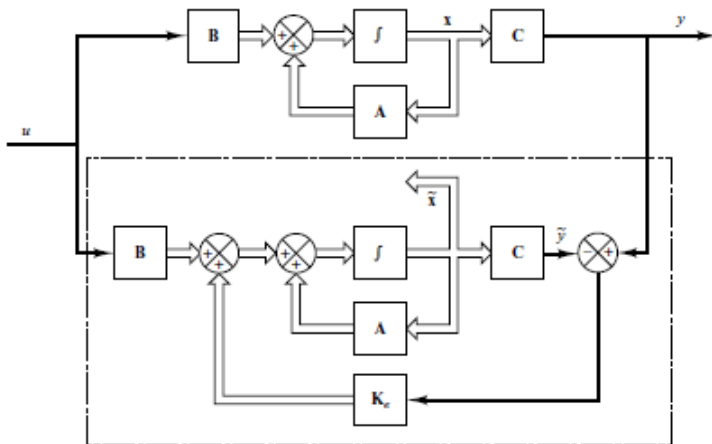
$x$  = vektor keadaan

$u$  = vektor nilai keluaran/nilai masukan

Sedangkan ketika terjadi kesalahan, *observer* akan mengestimasi perbedaan antara keluaran yang diukur dengan estimasi keluaran. Error inisial atau *initial error* adalah perbedaan antara inisial keadaan dengan inisial terestimasi [13]. Sehingga, model matematis dari *observer* menjadi.

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

Diagram blok sistem dan *observer state* digambarkan seperti pada Gambar 2.10 di bawah.

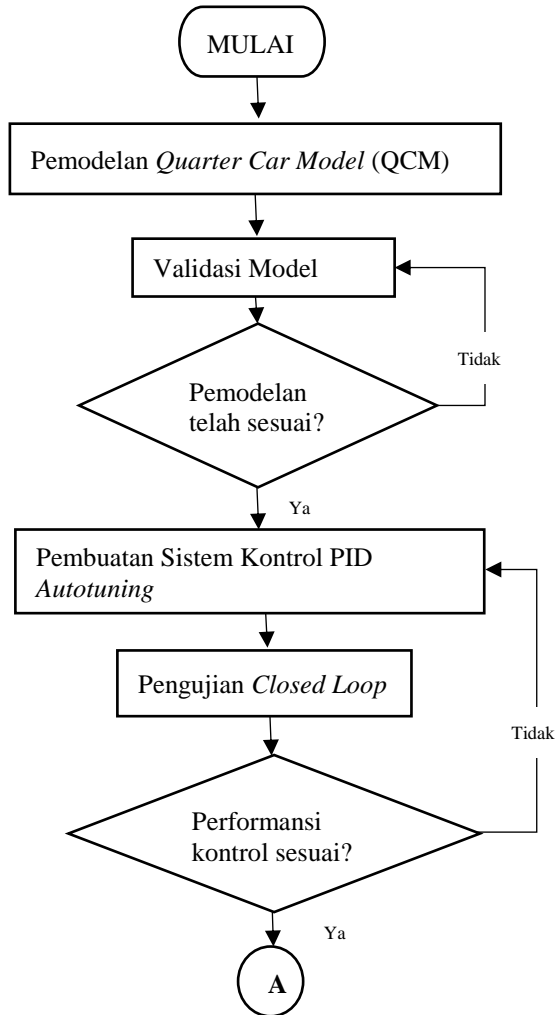


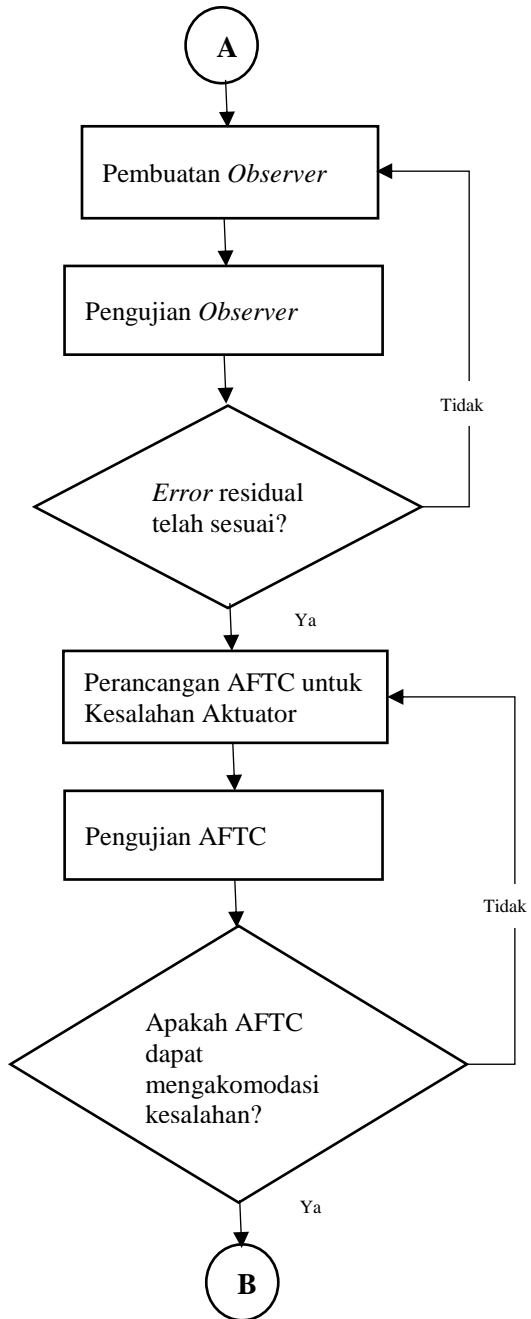
**Gambar 2.10** *Observer State* [13]

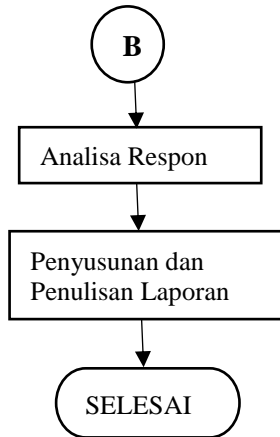
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini, akan dijelaskan tentang tahapan-tahapan penelitian tugas akhir seperti yang telah digambarkan oleh diagram alir Gambar 3.1.







**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.1 Pemodelan *Quarter Car Model* (QCM)

*Quarter Car Model* (QCM) merupakan representasi dari mobil dengan satu roda. Pemodelan ini digunakan dengan asumsi bahwa ketiga roda lainnya memiliki karakteristik dan sistem yang sama dengan satu roda yang dimodelkan. Pemodelan ini menggunakan prinsip dari Hukum Newton II. Gaya-gaya yang berkerja pada sistem ini seperti pada Gambar 3.2 antara lain, gaya *rolling resistance* ( $F_w$ ), gaya *drag* aerodinamik ( $F_a$ ) dan gaya karena inersia kendaraan ( $F_{acc}$ ) serta  $F_x$  yang menunjukkan gaya normal [16].

$$F_w = c_t \cdot m \cdot g \quad (3.1)$$

$$F_a = 0,5 \cdot c_r \cdot \rho_f \cdot V^2 \cdot \delta \quad (3.2)$$

$$F_{acc} = m \cdot dV/dt \quad (3.3)$$

dengan  $c_t$ ,  $m$ ,  $c_r$ ,  $\delta$ ,  $\rho_f$  dan  $V$  masing-masing adalah *rolling resistance coefficient* roda, massa kendaraan (kg), koefisien aerodinamik, kepadatan udara ( $\text{kg/m}^3$ ), luas kendaraan pada bagian depan ( $\text{m}^2$ ) dan kecepatan kendaraan (m/s).



**Gambar 3.2** Gaya-gaya pada kendaraan

Sehingga pemodelan dinamik kendaran secara translasi dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$-F_x - F_w - F_s - F_a = m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3.4)$$

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

$F_x$  merupakan gaya pengereman pada roda dan  $\mu$  adalah koefisien gesek antara roda dengan permukaan jalan. Perhitungan  $\mu$  didapatkan dari persamaan sebagai berikut.

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (3.6)$$

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. Nilai kurva gesek pada permukaan jalan berbeda-beda tergantung dari kondisi jalan seperti pada Tabel 3.1.



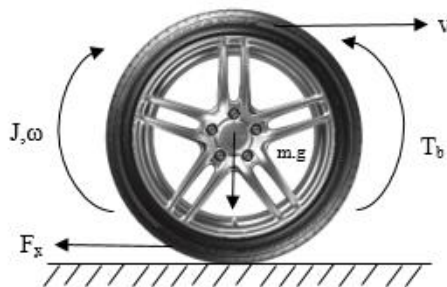
**Tabel 3.1** Parameter gesek pada permukaan jalan [17]

Keadaan Jalan	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
Aspal Kering	1,029	17,16	0,523	0,03
Beton	1,1973	25,168	0,5373	0,03
Bersalju	0,1946	94,129	0,0646	0,03

Pada pemodelan juga diperlukan informasi *slip ratio* dimana nantinya *slip ratio* yang akan dikendalikan hingga pada set point 0,2.

$$\lambda = \frac{v - \omega.R}{v} \quad (3.7)$$

Dimana  $v$  adalah kecepatan kendaraan,  $\omega$  adalah kecepatan angular roda, dan  $R$  adalah jari-jari roda.



**Gambar 3.3** Dinamika pada roda

Sedangkan untuk pemodelan roda secara rotasi seperti pada Gambar 3.3, didapatkan persamaan seperti di bawah.

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

dimana  $r$  adalah jari-jari roda,  $T_b$  adalah torsi pengereman,  $J$  adalah momen inersia roda, dan  $\omega$  adalah kecepatan angular roda.

Setelah dilakukan pemodelan kendaraan, langkah selanjutnya adalah memodelkan aktuator. Aktuator yang digunakan pada sistem ini adalah tipe *solenoid valve*. Pemodelan aktuator menggunakan fungsi transfer orde satu.

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (3.9)$$

Pada tugas akhir ini, nilai  $k$  dan  $\tau$  masing-masing telah ditentukan sebesar 100 dan 0,01 [17].

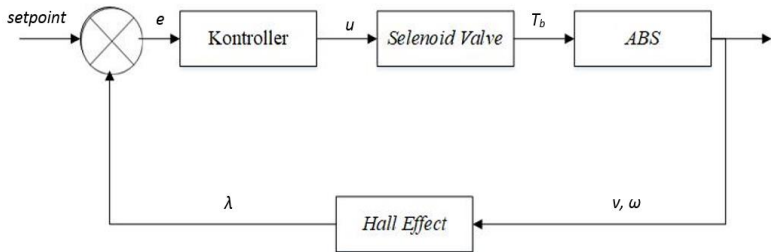
Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu ditentukan parameter berdasarkan [18] seperti pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Parameter pemodelan kendaraan [16]

Parameter	Besaran	Nilai
$m$	Massa mobil	425 kg
$J$	Momen inersia roda	0.5 kg.m <sup>2</sup>
$R$	Jari-jari roda	0.325 m
$A_f$	Luas depan kendaraan	3.1 m <sup>2</sup>
$C_t$	Koefisien aerodinamik	0,01
$C_r$	Koefisien <i>rolling resistance</i>	0,3
$v$	Kecepatan awal	100 km/h

### 3.2 Perancangan Sistem Pengendali PID *Autotuning*

Perancangan sistem pengendali PID bertujuan untuk mendapatkan respon dari sistem serta mengetahui kesesuaian kerja sistem. Diagram blok pengukuran ditunjukkan seperti pada gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Diagram blok pengendalian

Perancangan dan simulasi PID dilakukan dengan menggunakan *simulink* pada perangkat lunak Matlab R2013a. Karakteristik pengendali PID dipengaruhi oleh tiga parameter yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Penentuan parameter kendali dilakukan dengan metode *trial and error* hingga mencapai respon mendekati *set point*. Parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dijelaskan pada tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$

Parameter	Nilai
$K_p$	330
$K_i$	275
$K_d$	14

Setelah menentukan parameter pengendalian, nilai parameter dimasukkan ke persamaan.

$$K_p^M = K_p (1 + k_{11} |\alpha(k)|) \quad (3.10)$$

$$K_i^M = K_i (1 + k_{12} |\alpha(k)|) \quad (3.11)$$

$$K_d^M = K_d (1 + k_{13} |\alpha(k)|) \quad (3.12)$$

Penentuan *gain coefficient*  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ , dan  $k_{13}$  didapatkan dengan metode *trial and error*. Nilai *gain coefficient* ditampilkan pada Tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Koefisien *gain*

<b>Gain Coefficient</b>	<b>Nilai</b>
K <sub>11</sub>	0.6
K <sub>12</sub>	0.5
K <sub>13</sub>	0.125

### 3.3 Perancangan Observer

Perancangan *observer* dilakukan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada aktuator. Perancangan dimulai dengan mengubah fungsi transfer aktuator pada persamaan 3.16 ke dalam bentuk *state space*.

$$G(s) = \frac{100}{0,01s+1}$$

(3.13)

$$\frac{x_b(s)}{u(s)} = \frac{100}{0,01s+1} \quad (3.14)$$

Sehingga bentuk perkalian silang didapatkan seperti persamaan di bawah.

$$\dot{x}_b = -100x + 10^4u \quad (3.15)$$

Keluaran aktuator merupakan torsi pengereman  $T_b$  dengan persamaan sebagai berikut.

$$T_b = \int x dt \quad (3.16)$$

$$\dot{T}_b = x \quad (3.17)$$

Setelah persamaan  $\dot{x}$  dan  $\dot{T}_b$  didapatkan, persamaan selanjutnya diubah ke bentuk matriks ruang keadaan.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.18)$$



### 3.4 Perancangan Sistem AFTC

Perancangan sistem AFTC bertujuan untuk mengkompensasi kesalahan yang telah diestimasi oleh *observer*. Untuk kesalahan bias, sinyal kontrol awal akan ditambahkan dengan estimasi kesalahan,  $\hat{f}_a$ , seperti pada persamaan 3.28.

$$u(t) = u_0(t) + \hat{f}_a(t) \quad (3.23)$$

Sehingga untuk mencari kesalahan residual,  $\hat{f}_a$ , sinyal kontrol dengan kesalahan bias dikurangi sinyal kontrol awal, seperti pada persamaan 3.29. Kesalahan dapat dinotasikan dengan simbol  $\beta$ .

$$\hat{f}_a(t) = u(t) - u_0(t) = \beta(t) \quad (3.24)$$

### 3.5 Pengujian Sistem AFTC

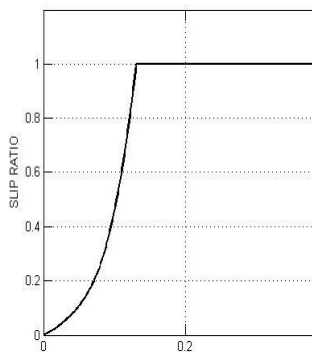
Pengujian sistem AFTC bertujuan untuk mengetahui apakah sistem yang telah dibuat mampu untuk mengatasi dan mengakomodasi kesalahan. Kesalahan yang terjadi pada *solenoid valve* berupa kesalahan bias dengan nilai 5%, 15%, dan 20%.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

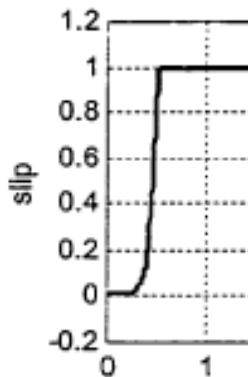
Pada bab ini akan dijabarkan hasil perancangan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC) pada sistem pengendalian level yang telah dilakukan dan disimulasikan dengan perangkat lunak Matlab R2013a untuk selanjutnya dilakukan uji performansi sistem. Uji performansi dilakukan guna mengetahui AFTC yang telah dibuat dapat bekerja dengan baik atau tidak untuk mengakomodasi kesalahan pada aktuator.

### 4.1 Uji Validasi Pemodelan QCM

Hasil pemodelan QCM dari persamaan 3.5 dan persamaan 3.9 diuji untuk memvalidasi pemodelan simulasi dengan pemodelan yang ada pada jurnal acuan [19]. Pengujian dilakukan dengan uji *loop* terbuka, dimana sistem belum terdapat sistem ABS.



**Gambar 4.1** Hasil uji *loop* terbuka simulasi



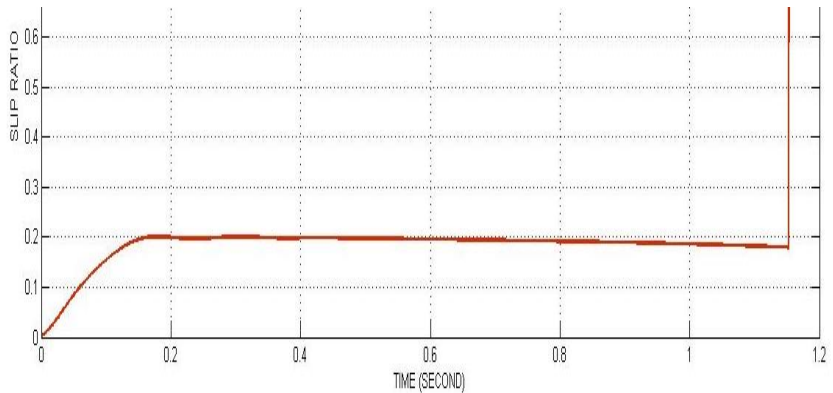
**Gambar 4.2** Respon *slip ratio* tanpa ABS [19]

Hasil respon simulasi *loop* terbuka ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dapat dilihat pada grafik, bahwa *slip ratio* simulasi tanpa ABS menunjukkan angka 1 pada detik 0,1. Hal ini menunjukkan bahwa roda telah terkunci dan berhenti berputar seketika pada saat terjadi pengereman yang keras. Grafik juga menunjukkan simulasi *tracking* dengan pemodelan acuan seperti pada Gambar 4.2, sehingga pemodelan dapat dikatakan telah valid.

#### **4.2 Uji *Loop* Tertutup Pengendali PID *Autotuning***

Uji *loop* tertutup pada simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Matlab R2013a dibuat menyerupai diagram blok pada Gambar 3.5. Uji ini dilakukan untuk meninjau apakah respon pengendalian *slip ratio* sudah mampu stabil di *setpoint*. Pengujian *loop* tertutup dilakukan dengan menambahkan kontroler PID *Autotuning* ke model *Quarter Car Model* (QCM).





**Gambar 4.3** Respon sistem pengendalian loop tertutup

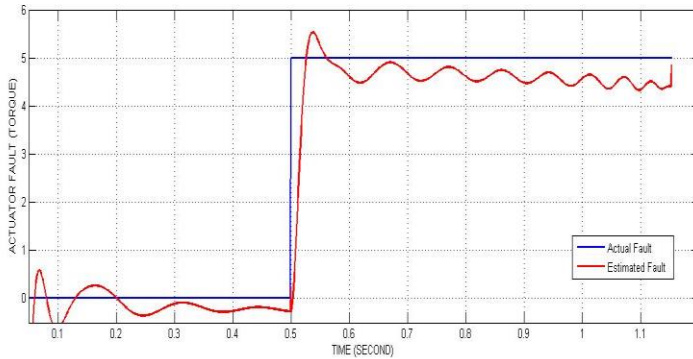
Hasil grafik berdasarkan Gambar 4.3 menunjukkan bahwa respon berada di wilayah *setpoint* dan menuju nilai 1 ketika kendaraan berhenti di detik ke-1,18. Parameter performansi sistem pengendali ditunjukkan pada Tabel 4.1. Dapat dilihat bahwa sistem pengendali telah memenuhi kriteria performansi kontrol yang diinginkan dan respon variabel sudah stabil di *setpoint* yaitu 0,2.

**Tabel 4.1** Parameter performansi uji *loop* tertutup

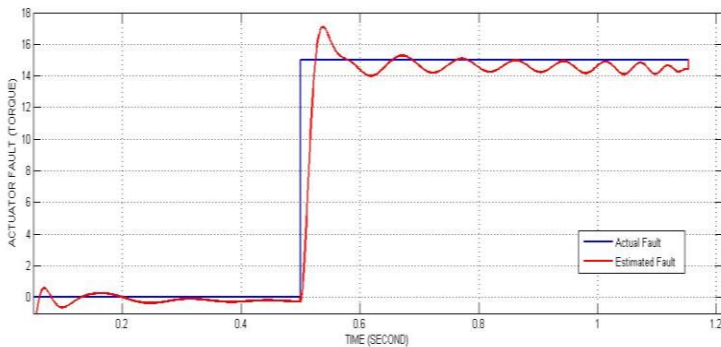
Parameter Performansi	Nilai
<i>Settling Time</i>	0,3s
<i>Error Steady State</i>	0.017%

### 4.3 Hasil Perancangan *Observer*

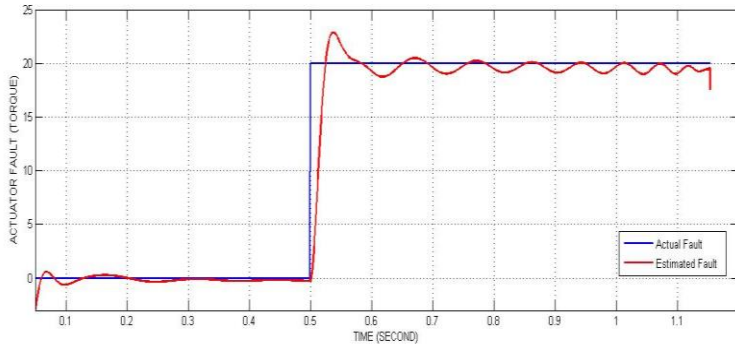
*Observer* yang telah dibuat akan dilihat dan diuji performansinya dalam mengestimasi suatu kesalahan. Uji ini perlu dilakukan untuk melihat apakah *observer* yang telah dirancang dapat berjalan.



**Gambar 4.4** Hasil uji observer dengan kesalahan bias 5%



**Gambar 4.5** Hasil uji *observer* dengan kesalahan bias 15%



**Gambar 4.6** Hasil uji *observer* dengan kesalahan 20%

Kesalahan yang diberikan pada aktuator berupa sinyal *step* 5,15, dan 20 dengan waktu terjadinya kesalahan pada detik ke- 0,5 detik. Gambar 4.4 menunjukkan hasil uji *observer* telah merepresentasikan kesalahan pada detik ke 0,5 terjadi kesalahan bias sebesar 5%. Pada Gambar 4.5, untuk kesalahan bias 15%, hasil menunjukkan kesalahan simulasi berada pada sekitar nilai kesalahan aktual. Untuk kesalahan bias 20%, Gambar 46, menunjukkan bahwa kesalahan estimasi masih *tracking* pada sekitar kesalahan actual. Dari hasil antara respon kesalahan actual dengan kesalahan estimasi, menunjukkan bahwa *observer* telah mampu mengestimasi di berbagai kesalahan

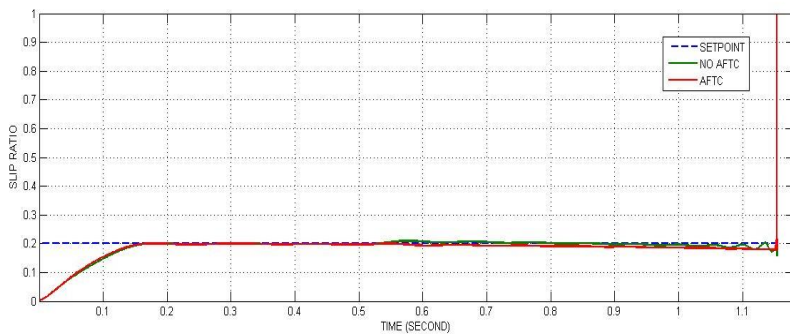
#### 4.3 Uji Kesalahan Aktuator

Pada uji kesalahan aktuator, kesalahan yang terjadi pada aktuator berupa kebocoran, kebocoran akan mengurangi laju aliran variabel manipulasi yang akan masuk ke sistem QCM. Sistem diberikan kesalahan aktuator pada detik ke 0,5 pada total waktu *sampling* simulasi 1,2 detik. Kesalahan pada aktuator berupa bias yang timbul dari aktuator akibat dari penurunan

performansi sistem. Sistem menjadi tidak stabil dan tidak terkendali.

#### 4.3.1 Uji Kesalahan Bias 5%

Respon terhadap kesalahan bias 5% ditunjukkan pada hasil seperti pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7** Respon slip ratio dengan kesalahan bias 5%

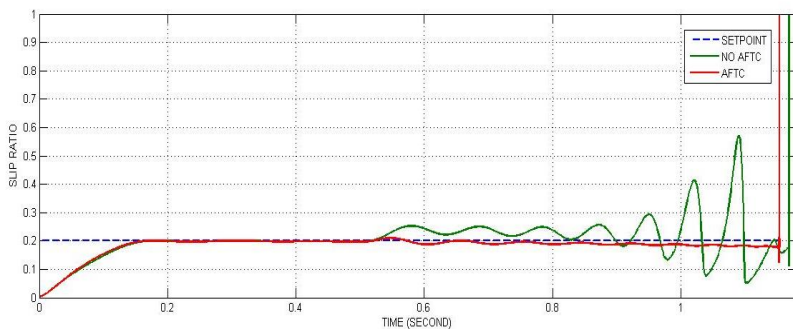
Pada Gambar 4.7 terlihat ketika respon kesalahan diberikan pada detik ke 0,5, diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan bias 5%. Kesalahan bias tersebut berarti aktuator mengalami kehilangan 5% dari sinyal outputnya. Pada respon *slip ratio* yang belum diberi AFTC dapat dilihat *slip ratio* berada pada kisaran 0,17. Ketika terjadi kesalahan pada detik ke 0,5, respon turun menjadi 0,15. Untuk hasil respon sistem pengendali PID *Autotuning* yang telah diberi AFTC, menunjukkan sistem terkompensasi dengan baik dan menuju ke *setpoint*. Hasil perbandingan AFTC dan non-AFTC dijabarkan pada Tabel 4.1

**Tabel 4.2** Parameter performansi kesalahan bias 5%

No	Parameter	PID tanpa AFTC	PID dengan AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	4,3%	0,04%
2	<i>Settling Time</i>	0.75s	0.3s
3	<i>Error Steady State</i>	0,02%	0,017%

### 4.3.2 Uji Kesalahan Bias 15%

Respon terhadap kesalahan bias 15% ditunjukkan pada hasil seperti pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Respon slip ratio dengan kesalahan bias 15%

Pada Gambar 4.8 terlihat ketika respon kesalahan diberikan pada detik ke 0,5, diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan bias 15%. Kesalahan bias tersebut berarti aktuator mengalami kehilangan 15% dari sinyal outputnya. Pada respon yang belum diberi AFTC dapat dilihat *slip ratio* berada pada kisaran 0,17. Ketika terjadi kesalahan pada detik ke 0,5, respon *slip ratio* berada pada nilai 0,25. Pada grafik dapat dilihat juga bahwa setelah terjadinya kesalahan, sistem menjadi tidak stabil dan berosilasi. Sedangkan untuk hasil respon sistem pengendali PID *Autotuning* yang telah diberi AFTC, menunjukkan sistem

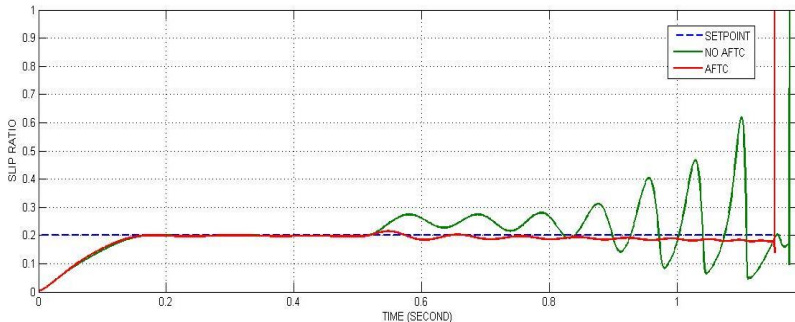
terkompensasi dengan baik dan menuju ke *setpoint*. Hasil perbandingan AFTC dan non-AFTC dijabarkan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Parameter performansi kesalahan bias 15%

No	Parameter	PID tanpa AFTC	PID dengan AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	30%	0,07%
2	<i>Settling Time</i>	-	0.42s
3	<i>Error Steady State</i>	1%	0,02%

#### 4.3.3 Uji Kesalahan Bias 20%

Respon terhadap kesalahan bias 20% ditunjukkan pada hasil seperti pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Respon slip ratio dengan kesalahan 20%

Pada Gambar 4.9 terlihat ketika respon kesalahan diberikan pada detik ke 0,5, diketahui respon sistem ketika diberi kesalahan bias 20%. Kesalahan bias tersebut berarti aktuator mengalami kehilangan 20% dari sinyal outputnya. Pada respon yang belum diberi AFTC dapat dilihat slip ratio berada pada kisaran 0,18. Ketika terjadi kesalahan pada detik ke 0,5, respon naik di sekitar nilai 0,25 dan terus naik dan menjadi tidak stabil. Untuk hasil

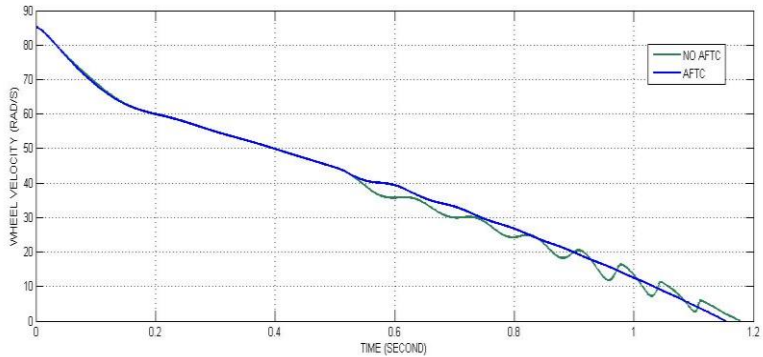
respon sistem pengendali PID yang telah diberi AFTC, menunjukkan sistem terkompensasi dengan baik dan menuju ke *setpoint*. Hasil perbandingan AFTC dan non-AFTC dijabarkan pada Tabel 4.3

**Tabel 4.4** Parameter performansi kesalahan bias 20%

No	Parameter	PID tanpa AFTC	PID dengan AFTC
1	<i>Maximum overshoot</i>	22,5%	0,078%
2	<i>Settling Time</i>	-	0.47s
2	<i>Error Steady State</i>	2,5%	0,023%

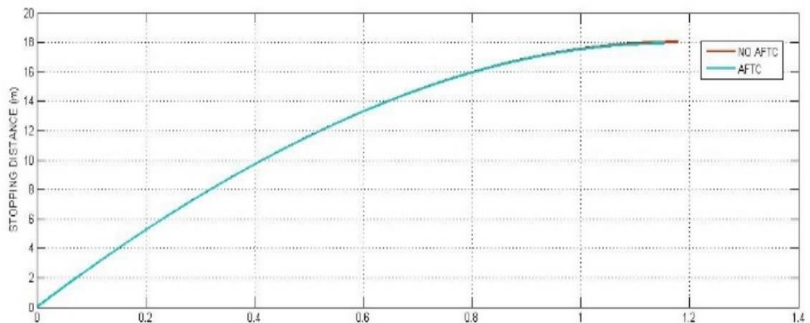
#### **4.4 Respon Kecepatan Kendaraan dan Jarak Penghentian**

Respon selanjutnya yang ditinjau adalah kecepatan roda dan jarak penghentian. Kecepatan roda dan jarak penghentian merupakan dua hal yang penting dalam sistem ABS. ABS berfungsi untuk menjaga kesepatan roda agar tidak berhenti berputar ketika terjadinya pengereman secara keras. Selain itu ABS juga diharapkan dapat memperpendek jara penghentian kendaraan. Pada Gambar 4.10, dapat dilihat hasil respon kecepatan roda sebelum dan sesudah diberi AFTC dengan kesalahan bias 20%.



**Gambar 4.10** Perbandingan respon kecepatan roda

Hasil pada Gambar 4.10 menunjukkan, ketika terjadi kesalahan, sistem ABS tanpa AFTC, kecepatan roda menurun dan naik kembali secara tiba-tiba dan terus beresilasi. Hal ini dapat mempengaruhi manuverabilitas pengendara sehingga dapat membahayakan. Sedangkan untuk sistem ABS dengan AFTC, dapat dilihat kecepatan roda menurun secara linier dan memiliki waktu henti yang lebih cepat.



**Gambar 4.11** Perbandingan jarak penghentian kendaraan



Pada Gambar 4.11 dapat dilihat, merupakan hasil perbandingan respon jarak penghentian kendaraan sebelum dan sesudah diberikan sistem AFTC. Kesalahan yang diberikan adalah kesalahan bias 20%. Dari grafik di atas dapat dilihat, sebelum ABS diberi sistem AFTC, jarak penghentian kendaraan sebesar 18,04 m. Sedangkan jarak penghentian kendaraan untuk ABS dengan sistem AFTC sebesar 17,92 m. Maka dapat disimpulkan bahwa AFTC dapat memperpendek jarak penghentian kendaraan saat terjadinya kesalahan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari tugas akhir mengenai perancangan *Active Fault Toleran Control* (AFTC) pada *Anti-Lock Braking System* (ABS) pada mobil listrik.

- Pengendali PID *Autotuning* menunjukkan performansi yang baik untuk parameter  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ , dan  $k_{13}$  masing-masing sebesar 0,6; 0,5; dan 0,125. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya *maximum overshoot*, *settling time* sebesar 0,3 detik, dan *error steady state* sebesar 0,017%.
- *Observer* dapat mengestimasi kesalahan bias yang terjadi pada *solenoid valve*. Hal ini ditunjukkan dengan hasil respon kesalahan estimasi yang mendekati nilai kesalahan aktual dalam waktu 0,53 detik.
- Perancangan AFTC mampu mengakomodasi kesalahan bias yang terjadi pada *solenoid valve* dengan kesalahan bias 5%, 15%, dan 20%. Untuk kesalahan bias 20%, sistem tanpa AFTC menunjukkan *maximum overshoot* dan *error steady state* sebesar 22,5% dan 2,5%. Dan ketika sistem AFTC ditambahkan, *maximum overshoot*, *settling time* dan *error steady state* masing-masing menjadi 0,78%, 0,47 detik dan 0,023%. Maka dapat disimpulkan AFTC telah mampu menolerir dan mengakomodasi kesalahan bias pada *solenoid valve*.

## 5.2 Saran

Dalam proses pengerjaan tugas akhir terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

- Disarankan untuk penelitian selanjutnya, pemodelan menggunakan pemodelan dengan empat roda agar dapat merepresentasikan *real time plant*.
- Disarankan untuk mencoba AFTC pada sistem *real plant* untuk melihat apakah sistem AFTC sudah dapat diaplikasikan pada ABS.

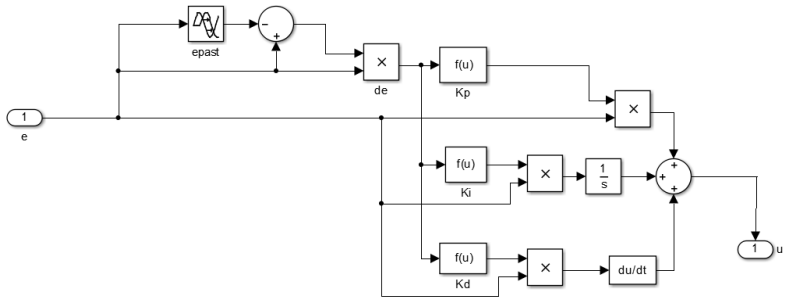
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mehrdad E., Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles". CRC Press. 2004.
- [2] Chih-Keng Chen and Yu-Chi Wang, "Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System," 1996.
- [3] Yonggon Lee and Stanislaw E. Z., "Designing a Genetic Neural Antilock-Brake-System Controller " *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 6, NO. 2.* 2002
- [4] Gou Yanan, "Research on Electrical Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery," *International Journal of Hybrid Information Technology* Vol.9, No.1. 2016.
- [5] Lingzhi Yi and Chendong Zhang. "Research of Self-Tuning PID for PSMS Vector Control Based on Improved KMTOA" *I.J. Intelligent Systems and Applications.* 2017.
- [6] Hassan Noura, Didier T., Jean Christophe P., Abbas Chamseddine. "Fault-Tolerant Control System" Springer. 2009.
- [7] E. Zahedi and A.A. Gharaveisi. "Fault Detection and Isolation of Anti-lock Braking System" *International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA).* 2011.
- [8] A. Harifi, A. Aghagolzadeh, and M. Sadeghi. "Designing a Sliding Mode Controller for Antilock Brake System". *IEEE EUROCON.* 2005
- [9] Ayman A. Aly, El-Shafei Zeidan, Ahmed Hamed, and Farhan Salem. "An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review". *Intelligent Control and Automation,* 2011, 2, 186-195. 2011.

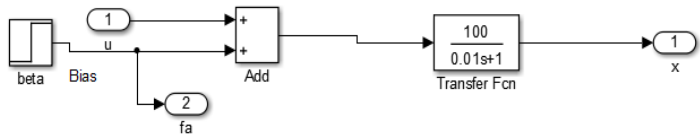
- [10] J.O. Pedro, O.T. Nyandoro, and C.G. Bigg. “Design of An Antilock Braking System Controller”. University Of Witwatersrand Johannesburg. 2001.
- [11] Meritor Wabco. “Anti-Lock Braking System Training Program: Student Manual”. Meritor WABCO Vehicle Control System. 1999.
- [12] Liang Chu, Yanli Hou, Minghui Liu, et al. “Study on The Dynamic Characteristic of Pneumatic ABS Solenoid Valve for Commercial Vehicle”. IEEE. 2007
- [13] Katsuhiko Ogata. “Modern Control Engineering: Fifth Edition”. Prentice Hall. 2010.
- [14] Midori Maki, Jin Jiang, and Kojiro Hagino. “A Stability Guaranteed Active Fault-Tolerant Control System Against Actuator Failures”. IEEE Conference on Decision and Control. 2001.
- [15] Y.M. Zhang and J. Jiang. “Active Fault-Tolerant Control System Against Partial Actuator Failures. IEEE Process Control Theory Appl., Vol 149. 2002.
- [16] Okan Tur, Ozgur Ustun, and R. Nejat Tuncay. “An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-Lock Braking System”. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2007
- [17] Jingang Guo, Xiaoping Jiang, and Guangyu Lin. “Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller”. MDPI Journal Energies. 2014.



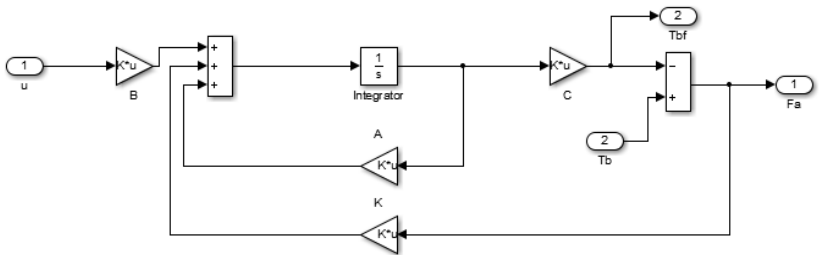
- *PID Autotuning*



- *Simulink Aktuator*



- *Perancangan Observer*





- M-file program

```
%definisi parameter sistem
```

```
m=425;
```

```
r=0.325;
```

```
Af=3.1;
```

```
cr=0.3;
```

```
ct=0.01;
```

```
j=0.5;
```

```
g=9.8;
```

```
del=1.2;
```

```
c1=1.029;
```

```
c2=17.16;
```

```
c3=0.523;
```

```
c4=0.03;
```

```
% parameter kendali
```

```
k11=6;
```

```
k12=5;
```

```
k13=0.01;
```

```
% %Observer Aktuator
```

```
A=[-100 0;1 0];
```

```
B=[10^4;0];
```

```
C=[0 1];
```

```
p1=-2-4i;
```

```
p2=-2+4i;
```

```
K= place(A,B,[p1 p2]);
```

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis, Adhitha Dwi Arigi dilahirkan di Pasuruan, tanggal 7 Desember 1994, merupakan putera dari bapak Didik Rame Dwi Wibowo, SH., Msi., dan ibu Lida Masniara. Saat ini penulis tinggal di Perumahan Riverside blok F2 no. 9 – Kota Malang. Penulis menyelesaikan pendidikannya di SD Al-Kautsar - Pasuruan pada tahun 2007, pendidikan di SMPN 1 Pasuruan pada tahun 2010, pendidikan di SMAN 1 Malang pada tahun 2013 dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Januari 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“PERANCANGAN *ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL (AFTC)* PADA *ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM (ABS)* MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR”**. Untuk korespondensi, penulis dapat dihubungi melalui *email* : [adityadwiarigi@gmail.com](mailto:adityadwiarigi@gmail.com).