



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL*
(*FTC*) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK*
BRAKING SYSTEM DENGAN MOTOR BLDC
UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK DENGAN
KESALAHAN PADA AKTUATOR**

ANANTA PARAMANANDA
NRP. 0231154000010

Dosen Pembimbing :
Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

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

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***FAULT TOLERANT CONTROL (FTC) DESIGN
ON REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING
SYSTEM WITH BLDC FOR ELECTRIC CAR
APPLICATION WITH FAULTS ON ACTUATOR***

**ANANTA PARAMANANDA
NRP. 0231154000010**

**Supervisors:
Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC**

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Ananta Paramananda
NRP : 0231154000010
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 *Fault Tolerant Control* (FTC) pada *Regenerative Anti-Lock Braking System* dengan Motor BLDC untuk Aplikasi Mobil Listrik dengan Kesalahan pada Aktuator” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 29 Juli 2019

Yang membuat pernyataan,



Ananta Paramananda
NRP. 0231154000010

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL (FTC)*
PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING*
SYSTEM DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI
MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA
AKTUATOR**

Oleh :

Ananta Paramananda
NRP. 0231154000010

Surabaya, 30 Juli 2019

Menyetujui,
Pembimbing I



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

Menyetujui,
Pembimbing II



Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

Mengetahui,

Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Muhammad Hafsa, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP. 19780907200312 1 002

DEPARTEMEN
TEKNIK FISIKA

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

ANANTA PARAMANANDA
NRP. 0231154000010

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIG. (Pembimbing II)
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Ketua Penguji)
4. Ir. Ya'umar, M.T. (Penguji I)
5. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc. (Penguji II)

SURABAYA
2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT CONTROL* (FTC)
PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*
DENGAN MOTOR BLDC UNTUK APLIKASI MOBIL
LISTRIK DENGAN KESALAHAN PADA AKTUATOR**

Nama : Ananta Paramananda
NRP : 0231154000010
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

ABSTRAK

Penelitian dan pengembangan mengenai kendaraan listrik kian berkembang pesat, tak terkecuali teknologi pengereman. Seiring penggunaannya, pengereman dapat mengalami kegagalan yang mana bukan merupakan hal yang diinginkan karena menyangkut keselamatan pengemudi dan orang lain. Salah satu kerusakan yang umum terjadi ialah kesalahan pada komponen aktuator yaitu *inverter* pada sistem *motor* BLDC. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini dirancang *Fault Tolerant Control* untuk mengkompensasi akibat dari kesalahan tersebut. *Fault Tolerant Control* diaplikasikan pada plant pengereman *regenerative* sebagai ABS yang telah dirancang. Dengan kesalahan yang diberikan berupa variasi *switch* yang mengalami kegagalan, FTC dapat mengurangi deviasi pada *slip ratio* akibat dari kesalahan dan meningkatkan performansi pengereman secara keseluruhan. Perubahan *slip ratio* tanpa FTC senilai maksimal 1 mampu dikurangi dengan FTC hingga bernilai 0,35, juga pengereman tetap dapat dilakukan hingga kendaraan berhenti sempurna.

Kata Kunci: *ABS, Fault Tolerant Control, inverter, motor BLDC*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**FAULT TOLERANT CONTROL (FTC) DESIGN ON
REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM WITH
BLDC FOR ELECTRIC CAR APPLICATION WITH FAULTS
ON ACTUATOR**

Name : Ananta Paramananda
NRP : 0231154000010
Departement : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.
Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC

ABSTRACT

Advances in research and development of electric vehicles are growing very fast, not exceptionally on braking technologies. On its usage, braking could experience failure which isn't the thing that everyone wants to happen because it involves the safety of the driver and any other people. One of the most common failure on electric vehicle braking is fault on power electronics inverter on BLDC motor system. Because of that reason, this final project has objective to design a fault tolerant control to compensate the consequence of the fault. Fault Tolerant Control is applicated on regenerative braking as anti-lock braking system that has been modelled. With faults given by variations of inverter switches faults, FTC is able to reduce the deviation of slip ratio as the consequence of the fault and improves the braking performance as a whole. Differences on slip ratio without FTC valued 1 are able to reduced with FTC to 0,35, also braking could be applied until the vehicle completely stops.

Keywords: *ABS, Fault Tolerant Control, inverter, motor BLDC*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang atas berkah serta rahmatNya penulis mampu menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan sebaik-baiknya.

Laporan ini disusun sebagai prasyarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi S1 Teknik Fisika, Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyelesaian laporan tugas akhir ini tidak terlepas dari partisipasi pihak-pihak diantaranya:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS yang telah berjasa bagi Departemen selama saya berkuliah.
2. Bapak Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T., dan Bapak Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc., selaku pembimbing tugas akhir ini yang telah memberikan ilmu dan pengalaman selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T., selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa, Departemen Teknik Fisika ITS yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc., selaku dosen wali yang telah memberikan pelajaran baik selama perkuliahan.
5. Kedua orang tua di rumah yang selalu memberikan dukungan moriil dan materiil selama perkuliahan dan selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. Zanuar Suryanullah, serta TA-wan Laboratorium Fisika Rekayasa sebagai kawan diskusi terutama selama pengerjaan tugas akhir ini.
7. Asisten Laboratorium Pengukuran Fisis 18/19 yang telah memberikan *support* selama perkuliahan.
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Fisika yang telah membantu selama perkuliahan.

9. Teknik Fisika ITS angkatan 2015 yang selalu memberikan dukungan.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 18 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	7
2.1 Anti-Lock Braking System	7
2.2 Brushless DC (BLDC) Motor	9
2.3 Regenerative Braking	12
2.4 Kontroler PID	13
2.5 Observer	14
2.6 Fault Tolerant Control	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Studi literatur	21
3.2 Pemodelan <i>Regenerative Braking</i>	21
3.3 Perancangan Kontroler	24
3.4 Perancangan Observer	26
3.5 Rekonfigurasi Kontrol	30
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Validasi Regenerative Braking	31
4.2 Uji Performa Kontrol.....	33
4.3 Validasi <i>Observer</i>	36
4.4 Pengujian <i>Fault Tolerant Control</i>	37
BAB V PENUTUP.....	51
5.1 Kesimpulan.....	51

5.2	Saran.....	51
	DAFTAR PUSTAKA.....	53
	LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Quarter Car Model.....	7
Gambar 2.2	Kurva Hubungan Slip Ratio dengan Friction Coefficient.....	9
Gambar 2.3	Penampang Melintang BLDC.....	10
Gambar 2.4	Six Step Inverter dan BLDC.....	11
Gambar 2.5	Mode Operasi 4 Kuadran Motor.....	12
Gambar 2.6	Diagram Blok Kontrol PID.....	14
Gambar 2.7	Struktur Observer.....	16
Gambar 2.8	Skema Fault Tolerant Control.....	16
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi Tugas Akhir.....	20
Gambar 3.2	Gaya yang terlibat pada pengereman.....	21
Gambar 3.3	Skema Motor.....	24
Gambar 3.4	Skema Kontrol.....	26
Gambar 3.5	Rangkaian equivalen BLDC.....	26
Gambar 3.6	Skema Rekonfigurasi.....	27
Gambar 4.1	Respon Slip Ratio Saat Pengereman.....	31
Gambar 4.2	Respon Kecepatan Kendaraan dan Roda saat Pengereman.....	32
Gambar 4.3	State of Charge Baterai selama pengereman.....	32
Gambar 4.4	Respon uji closed loop speed.....	33
Gambar 4.5	Respon slip ratio abs.....	34
Gambar 4.6	Respon Kecepatan dengan ABS.....	35
Gambar 4.7	Perbandingan Kesalahan Estimasi dan Aktual.....	36
Gambar 4.8	Perbandingan Kesalahan Estimasi dan Aktual pada Kesalahan Open Circuit.....	37
Gambar 4.9	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 1.....	38
Gambar 4.10	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 1.....	39
Gambar 4.11	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 2.....	39
Gambar 4.12Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 2.....	40
Gambar 4.13	...Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 3.....	41

Gambar 4.14	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 3.....	41
Gambar 4.15	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 4.....	42
Gambar 4.16	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 4.....	43
Gambar 4.17	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 5.....	43
Gambar 4.18	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 5.....	44
Gambar 4.19	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 6.....	45
Gambar 4.20	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 6.....	45
Gambar 4.21	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 1 dan 2	46
Gambar 4.22	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 1 dan 2	47
Gambar 4.23	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 3 dan 4	47
Gambar 4.24	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 3 dan 4	48
Gambar 4.25	Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 5 dan 6	49
Gambar 4.26	Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 5 dan 6	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Urutan Komutasi Six-step Inverter	11
Tabel 3.1	Variabel pada persamaan gaya	22
Tabel 3.2	Variabel pada persamaan koefisien pengereman	23
Tabel 3.3	Parameter kontroler slip ratio	25
Tabel 3.4	Parameter kontroler kecepatan.....	25
Tabel 3.5	Parameter pada Motor	27
Tabel 4.1	Performansi kontrol speed	34
Tabel 4.2	Performansi Kontrol Slip Ratio	34
Tabel 4.3	Perbandingan Parameter Pengereman ABS dan Non-ABS	35

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam sebuah gaya hidup modern, mobilitas merupakan satu hal yang esensial. Oleh karenanya, kepemilikan sebuah kendaraan menjadi sebuah kebutuhan. Salah satu jenis kendaraan yang populer ialah mobil. Hal ini memicu penelitian dan perkembangan teknologi pada mobil secara cepat, baik pada pengembangan sistem propulsi, material, maupun bahan bakar alternatif.

Ditunjang dengan penelitian dan pengembangan pada baterai dan motor yang semakin maju mengarah pada meleatnya perkembangan teknologi pada kendaraan berbasis listrik, seperti kendaraan listrik baterai, hibrida, dan *fuel cell* [1]. Kendaraan listrik menjadi preferensi daripada kendaraan konvensional karena lebih ramah lingkungan dan dapat mengurangi emisi yang dihasilkan oleh transportasi [2], serta kedepannya akan memiliki biaya yang semakin menurun disertai dengan biaya bahan bakar yang jauh lebih rendah dibandingkan mobil konvensional karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi [3]. Selain karena faktor-faktor tersebut, kerja dari penggerak kendaraan listrik yaitu motor lebih mudah dilakukan kontrol secara elektrik sehingga dapat memiliki performa lebih baik dibandingkan kendaraan konvensional yang digerakkan dengan mesin pembakaran internal [4], salah satunya dalam performa pengereman.

Pengereman merupakan salah satu hal yang paling vital karena menyangkut keselamatan orang yang mengemudikan kendaraan [4]. Pengereman dapat dikatakan baik apabila dapat memberhentikan atau mengurangi kecepatan secara cepat dan menjaga arah gerak kendaraan secara stabil dan dapat dikendalikan oleh sang pengemudi. Pada pengereman konvensional, dapat terjadi fenomena yang disebut dengan roda yang terkunci yaitu ketika pengemudi memberikan torsi secara penuh sehingga mengakibatkan roda tergelincir pada permukaan jalan yang dilalui.

Pengereman yang baik dapat dilakukan dengan memberikan torsi secara cukup pada tiap ban untuk mencegah terjadinya fenomena ban terkunci, di mana dapat dilakukan dengan sebuah *anti-lock braking system* [5].

Laju pada kendaraan berbasis listrik digerakkan oleh sebuah motor yang ditenagai baterai. Salah satu jenis motor yang paling populer digunakan pada aplikasi kendaraan listrik yaitu *brushless dc motor* (BLDC). Motor berjenis ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya efisiensi dan keandalan yang lebih tinggi, bising lebih rendah [6], usia yang lebih panjang akibat absennya *brush* pada motor, daya lebih tinggi, tahan terhadap interferensi elektromagnet [7], serta memungkinkan untuk mengalir energi listrik secara 2 arah dengan *regenerative braking* sehingga dapat meningkatkan efisiensi secara umum. Pengereman secara konvensional mengubah energi menjadi panas akibat dari gesekan yang timbul dan didisipasikan ke atmosfer, *regenerative braking* digunakan untuk mengurangi hal tersebut dengan menerima traksi motor sehingga dapat memfungsikan motor menjadi sebuah generator untuk melakukan pengecasan kepada baterai sehingga dapat digunakan kembali sebagai propulsi [5].

Seiring dengan penggunaannya, sebuah kendaraan dapat mengalami kegagalan komponen ataupun hal yang tidak diinginkan lainnya sehingga dapat memengaruhi performa dari kendaraan tersebut, tidak terkecuali pada sistem kontrol ABS. ABS yang juga merupakan sebuah sistem kontrol terdiri dari komponen-komponen seperti kontroler, aktuator, dan sensor. Kesalahan dapat terjadi pada komponen aktuator sehingga dapat mengurangi performa dari pengereman, hal ini tidak boleh terjadi karena pengereman merupakan sistem *safety-critical* dari sebuah mobil.

Kesalahan pada komponen *inverter* memakan proporsi yang besar dari kesalahan pada sistem *permanent magnet synchronous machine* [8]. Kesalahan yang sering terjadi merupakan kesalahan berupa *short* atau *open circuit* pada *inverter*. Kesalahan pada komponen tersebut dapat berakibat langsung pada performa pengereman secara keseluruhan yang keagalannya dapat berakibat buruk pada kendaraan juga pengendara. *Fault tolerant*

control dapat diimplementasikan pada kontrol *anti-lock braking system* sehingga kesalahan yang terdapat pada komponen aktuator dapat deteksi dan mengaplikasikan aksi yang bersifat korektif [8]. Oleh karenanya, tugas akhir ini dilakukan untuk merancang FTC pada sistem pengereman regeneratif sebagai *anti-lock braking system* kendaraan listrik dengan kesalahan (*fault*) pada komponen aktuator yaitu *converter*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, dapat dirumuskan permasalahan yaitu:

- Bagaimana pemodelan terhadap pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system*?
- Bagaimana merancang *Fault Tolerant Control* (FTC) untuk mengkompensasi kesalahan pada aktuator terhadap pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, tujuan dari tugas akhir ini yaitu merancang sistem *Fault Tolerant Control* (FTC) yang mampu mengkompensasi kesalahan pada aktuator terhadap pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini diantaranya:

- Plant yang diaplikasikan adalah simulasi *quarter car model* pada saat pengereman dari kecepatan 100 km/h.
- Kesalahan yang diberikan adalah kesalahan pada *six-step three phase inverter* berupa *open circuit* pada lengan-lengannya.
- Mekanisme kontrol pada ABS dan kecepatan motor adalah kontrol PI.

- Jenis jalan yang diterapkan saat pengereman adalah jenis aspal kering dengan slip ratio diatur pada 0,2 sesuai dengan grafik *slip ratio-friction coefficient*.
- Pengereman dilakukan pada bidang datar.
- Motor yang digunakan berjenis BLDC (*Brushless DC Motor*).
- Komponen-komponen *inverter* dan *motor* yang digunakan diasumsikan ideal.
- Penyimpanan daya hasil pengereman regeneratif disimulsaikan pada baterai berjenis *lithium-ion* dengan kapasitas 37,5 Ah rating 200V.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan ini terdiri dari 5 bagian utama, diantaranya:

- **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan latar belakang dilakukannya penelitian pada tugas akhir ini, batasan masalah serta tujuan dari penelitian yang dilakukan, batasan masalah, serta sistematika laporan.

- **BAB II TEORI PENUNJANG**

Bab ini menjelaskan teori-teori yang berasal dari sumber kredibel yang kedepannya digunakan dalam penelitian pada tugas akhir ini. Teori yang dipaparkan yaitu mengenai anti-lock braking system secara umum, regenerative braking, BLDC, kontrol PID, observer, dan fault tolerant control.

- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan metodologi yang dilakukan selama dilakukannya penelitian. Tahapan penelitian ditunjukkan dalam bentuk diagram alir beserta penjabaran pengerjaan dari tiap langkahnya.

- **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Bab ini memaparkan hasil-hasil yang diperoleh dari penelitian pada tugas akhir ini beserta analisisnya. Ditunjukkan hasil berupa performa fault tolerant control yang telah dibuat dibandingkan dengan sistem tanpa fault tolerant control.

- **BAB V PENUTUP**

Bab ini memberikan kesimpulan-kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil penelitian tugas akhir serta saran-saran untuk pengembangan penelitian ke depannya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1 *Quarter Car Model*

Quarter car model merupakan salah satu metode pemodelan pada sebuah kendaraan yang mendeskripsikan perilaku dari kendaraan satu roda yang terhubung dengan seperempat massa kendaraan [10]. Model ini biasa digunakan untuk pemodelan analitis perancangan kendaraan, kontrol, ataupun vibrasi [10].

Saat melakukan simulasi pengereman, kendaraan mengalami beberapa gaya seperti gaya pengereman itu sendiri, gaya *drag* aerodinamis, dan gaya resistansi putar yang dirumuskan sebagai [4]:

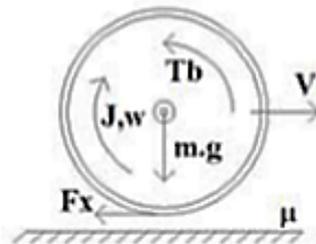
$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (2.1)$$

$$F_a = 0,5 \cdot c_r \cdot \delta \cdot A_f \cdot v^2 \quad (2.2)$$

$$F_w = c_t \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (2.3)$$

Gaya-gaya tersebut dipengaruhi oleh parameter-parameter yang terdapat pada *quarter car model* seperti massa kendaraan, gaya gravitasi, luar permukaan depan kendaraan, kecepatan laju kendaraan, dan sudut laju kendaraan.

Quarter car model dapat diilustrasikan sebagai:



Gambar 2.1 Quarter Car Model [4]

2.2 Anti-Lock Braking System

Anti-lock braking system merupakan mekanisme yang dilakukan untuk mencegah terkuncinya roda akibat pengereman sehingga dapat mempertahankan kestabilan dalam kemudi [5]. Pengereman dikatakan terkunci ketika pengemudi memberikan torsi maksimum pada roda, roda terkunci sehingga kendaraan meluncur pada permukaan jalan. *Anti-lock braking system* berguna untuk menunjang keselamatan pengemudi, terutama saat melakukan pengereman pada jalanan licin.

Sensor dipasang pada tiap roda untuk mendeteksi kecepatan rotasional roda tersebut. Ketika kecepatan tersebut secara signifikan berada di bawah kecepatan dari kendaraan yang melaju, dapat dikatakan bahwa roda tersebut terkunci. Pada kondisi tersebut, kontroler berperan untuk memberikan aksi berupa pengurangan gaya pengereman pada roda, sehingga roda dapat kembali berputar untuk memperoleh kestabilan dan jarak pengereman lebih dekat [5].

Pada sebuah peristiwa pengereman, gaya yang berlaku saat pengereman dilakukan adalah F_x dengan persamaan:

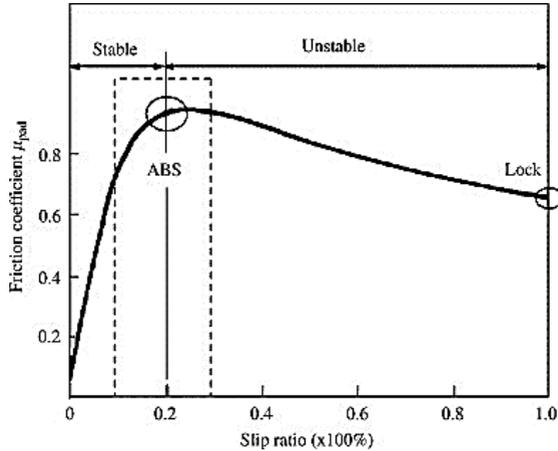
$$F_x = \mu \cdot m \cdot g \quad (2.1)$$

Dengan F_x merupakan gaya pengereman, μ koefisien gesek, m massa roda, dan g gaya gravitasi.

Nilai koefisien gesek ditentukan menurut grafik hubungan slip ratio-friction coefficient yang dijelaskan pada persamaan sebagai:

$$\mu = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.2)$$

Dengan μ adalah koefisien gesek, C_1 adalah nilai maksimum kurva gesekan, C_2 adalah bentuk kurva gesekan, C_3 adalah perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda=1$, dan C_4 adalah nilai karakteristik kebasahan jalan. Apabila persamaan tersebut digambarkan untuk nilai C_1 , C_2 , C_3 , dan C_4 untuk kondisi jalan aspal kering adalah sebagai berikut:



Gambar 2.2 Kurva Hubungan Slip Ratio dengan Friction Coefficient [11]

Gambar 2.2 menjelaskan hubungan antara slip ratio roda dengan koefisien gesek dari roda. Di mana untuk dilakukannya gaya pengereman secara maksimal diperlukan slip ratio kurang lebih sebesar 0,2. Slip ratio sendiri dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{\omega_v - \omega_w}{\max(\omega_v, \omega_w)} \quad (2.3)$$

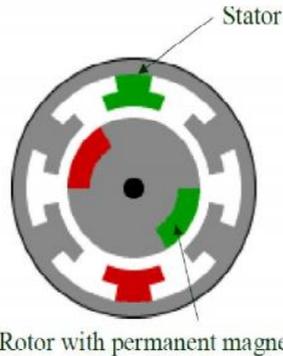
Di mana λ adalah slip ratio, ω_v adalah kecepatan angular kendaraan, ω_w adalah kecepatan rotasional roda, dan R adalah jari-jari roda.

2.3 Brushless DC (BLDC) Motor

Brushless DC motor memiliki berbagai aplikasi mulai dari kendaraan listrik, otomasi, komputer, militer, dan lainnya dikarenakan BLDC memiliki kelebihan dibandingkan jenis motor lain seperti ukuran yang ringkas, efisiensi yang tinggi, serta usia yang lebih panjang. BLDC terdiri dari magnet permanen dan stator

[6]. Perbedaan yang terletak pada BLDC dibandingkan motor DC *brushed* yaitu BLDC tidak memiliki komutator melainkan digantikan dengan rangkaian elektronik sehingga dapat menutupi kelemahan dari *brushed* DC motor yaitu bising dan kurangnya keandalan dari motor [9].

Ilustrasi dari BLDC secara melintang adalah sebagai berikut:



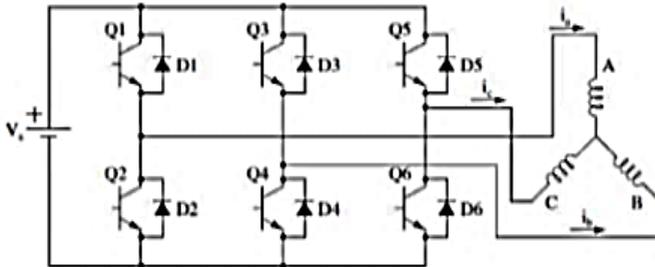
Gambar 2. 3 Penampang Melintang BLDC [11]

Gambar 2.3 mengilustrasikan bagian utama dari BLDC yaitu bagian stator yang diam dan rotor yang berputar. Stator terdiri dari kumparan 3 fasa sedangkan rotor merupakan magnet permanen. Saat kumparan dialirkan listrik, terjadi interaksi antara medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan tersebut dengan magnet permanen. sehingga terjadi gerakan oleh torsi yang dihasilkan. Untuk menjaga motor agar tetap berputar, medan magnet yang dihasilkan harus berganti posisi, untuk menyesuaikan dengan kutub dari magnet permanen. Hal ini disebut dengan komutasi.

Komutasi dari motor BLDC dikendalikan secara elektronik. Untuk menentukan kumparan mana yang dialirkan listrik, posisi dari rotor harus diketahui dengan cara membacanya dengan sensor *hall effect* yang diletakkan pada stator. Ketika kutub pada rotor melewati sensor *hall effect*, dihasilkan sinyal *high* atau *low* yang mengindikasikan kutub yang dimiliki oleh rotor tersebut

sehingga dapat menentukan aksi yaitu aliran pada kumparan yang sesuai untuk tetap memutar motor [10].

Pada tugas akhir ini BLDC motor digerakkan dengan six step inverter seperti pada gambar berikut:



Gambar 2. 4 Six Step Inverter dan BLDC [13]

Pada sebuah motor BLDC, posisi rotor diarahkan sesuai dengan switch untuk menjalankan komutasi sehingga menggerakkan motor [11]. Posisi dari rotor dideteksi menggunakan 3 *hall effect sensor* yang terpasang pada motor. Perputaran dideteksi tiap 60° sehingga menciptakan kombinasi untuk menentukan *switch* mana yang terbuka.

Pada komutasi six step tiap langkahnya hanya terdapat 2 kumparan yang aktif, satu positif dan satu negatif. Satu langkah mencakup 60° hingga enam langkah menciptakan satu putaran penuh. Skema *switching* komutasi ditunjukkan pada tabel [11]:

Tabel 2.1 Urutan Komutasi Six-step Inverter

Rotor Pos. (deg)	H1	H2	H3	Switch tutup	Phase		
					A	B	C
0-60	1	0	0	Q1 Q4	+	-	Off
60-120	1	1	0	Q1 Q6	+	Off	-
120-180	0	1	0	Q3 Q6	Off	+	-
180-240	0	1	1	Q3 Q2	-	+	off
240-300	0	0	1	Q5 Q2	-	Off	+
300-360	1	0	1	Q5 Q4	off	-	+

Persamaan-persamaan yang berlaku pada inverter 3 fasa diantaranya [13]:

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (2.4)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c \quad (2.5)$$

$$V_{ca} = V_c - V_a \quad (2.6)$$

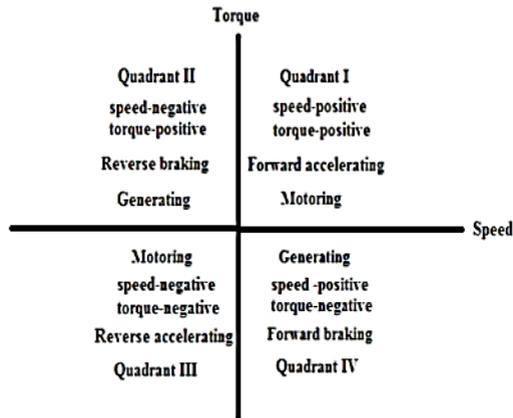
$$\hat{V}_{ab} = \sqrt{3}\hat{V}_{a0} = \frac{\sqrt{3}}{2}V_{in}m_a \quad (2.7)$$

$$I_i = \frac{3\tilde{V}_a\tilde{I}_a}{V_{in}} \quad (2.8)$$

Di mana V_{ab} merupakan *line voltage*, V_a merupakan phase voltage, m_a merupakan faktor modulasi, dan I merupakan *phase current*.

2.4 Regenerative Braking

Sebuah mesin elektrik, salah satunya BLDC dapat berlaku sebagai *motor* ataupun *generator*, pada arah maju maupun mundur yang dikenal juga dengan mode operasi 3 kuadran [6] yang menjelaskan 4 mode yang mungkin beroperasi pada sebuah mesin elektrik yaitu:



Gambar 2.5 Mode Operasi 4 Kuadran Motor [6]

Gambar 2.5 menunjukkan keempat mode dalam sebuah grafik kecepatan-torsi. Kuadran I bekerja sebagai motor yang menggerakkan ke arah maju sehingga nilai kecepatan dan torsi bernilai positif, kuadran III merupakan lawannya yaitu motor menggerakkan ke arah mundur sehingga nilai kecepatan dan torsi adalah negatif. Kuadran II di mana motor yang bergerak mundur namun diaplikasikan torsi yang arahnya berlawanan dengan arah maju kendaraan tersebut sehingga memiliki nilai kecepatan negatif dan torsi positif. Mode ini dikenal dengan nama *reverse braking*. Berlawanan dengan mode IV di mana motor yang bergerak maju diaplikasikan torsi pada arah berlawanan sehingga memiliki nilai kecepatan positif dan torsi negatif dan dikenal sebagai *forward braking*.

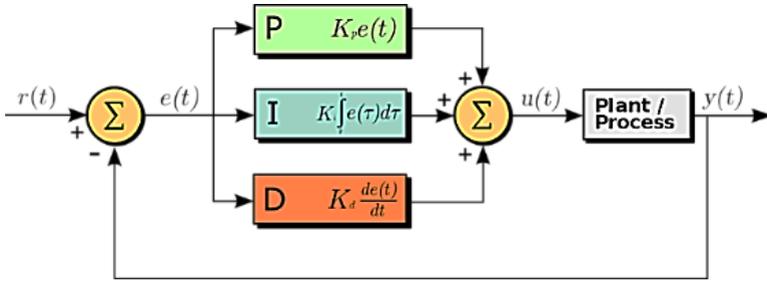
Pada kuadran I dan III BLDC berfungsi sebagai motor untuk menggerakkan kendaraan dan menerima tegangan masukan. Sementara pada kuadran II dan IV BLDC berfungsi sebagai generator dengan menyuplai tegangan kembali, yang diarahkan kepada baterai untuk melakukan pengecasan [6].

Regenerative braking yang terjadi pada mode kuadran II dan IV daya dapat digunakan kembali sebagai propulsi dari kendaraan, sehingga meningkatkan efisiensi dari kendaraan listrik secara umum. Daya diperoleh dari *line* inverter yang mengarah kepada baterai setelah sebelumnya dilalui *rectifier* terlebih dahulu.

2.5 Kontroler PID

Pada pengerjaan tugas akhir ini digunakan kontroler PID pada kontrol slip ratio dan kecepatan. Kontrol PID merupakan salah satu metode kontrol yang paling sering digunakan untuk melakukan kontrol secara *feedback*. Kontrol ini membaca nilai error yang merupakan selisih dari *setpoint* yang diinginkan dengan pengukuran dari variabel proses dari loop kontrol. Kontrol PID memanfaatkan 3 parameter kontrol yaitu *proportional*, *integral*, dan *derivative*. Parameter-parameter pada kontrol PID diperoleh dengan metode *tuning* [11].

Ilustrasi kontrol PID digambarkan pada Gambar 2.6 sebagai:



Gambar 2. 6 Diagram Blok Kontrol PID [16]

Kontrol PID disajikan sesuai dengan bentuk matematis berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t') dt' + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

2.6 Observer

Observer digunakan untuk mengestimasi state serta kesalahan [15]. dalam sebuah skema *fault tolerant control* untuk mendeteksi kesalahan sistem berdasarkan model dari sistem. *Observer* direpresentasikan dengan persamaan-persamaan berikut:

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

$$y(t) = Cx(t) + w(t) \quad (2.11)$$

Di mana :

A = matriks state

B = matriks kontrol *input*

C = matriks hasil pengukuran

x = *state*

u = kontrol *input*

w = *measurement output noise*

Observer mengestimasi keluaran dengan menerima sinyal kontrol yang diaplikasikan pada sistem, sedangkan kesalahan

dengan melihat perbedaan antara keluaran yang diukur pada sistem dengan keluaran hasil estimasi.

Kesalahan direpresentasikan sebagai masukan pada sistem sehingga persamaan observer yang mengandung kesalahan adalah sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_a f_a(t) \quad (2.12)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_s f_s(t) \quad (2.13)$$

Di mana:

F_a = Matriks kesalahan aktuator

F_s = Matriks kesalahan sensor

f_a = Kesalahan aktuator

f_s = Kesalahan sensor

Untuk memuat kesalahan ke dalam matriks keadaan, digunakan variabel baru yaitu:

$$\dot{z}(t) = A_z [y(t) - z(t)] \quad (2.14)$$

$$\dot{z}(t) = A_z [Cx(t) + F_s f_s(t) - z(t)] \quad (2.15)$$

Ekspansi dilakukan untuk memperoleh gain observer sehingga diperoleh persamaan baru yaitu:

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + E_a f(t) \quad (2.16)$$

$$y_a(t) = C_a x_a(t) \quad (2.17)$$

Ruang keadaan dibuat sebagai:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z \cdot C & -A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z \cdot F_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_s \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$y(t) = [0 \quad C] \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Sehingga didapat

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

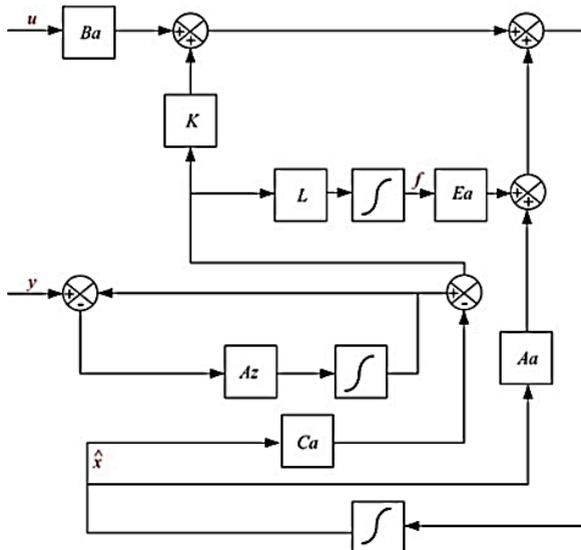
$$C_a = [0 \quad C], E_a = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & A_z \cdot F_s \end{bmatrix}$$

Persamaan ruang keadaan yang telah mengandung kesalahan digunakan sebagai persamaan observer yaitu:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A_a \tilde{x} + B_a u + E_a \begin{bmatrix} \hat{f}_a \\ \hat{f}_s \end{bmatrix} + K_e (Y - \hat{Y}) \quad (2.20)$$

$$\hat{y}(t) = C_a \tilde{x}(t) \quad (2.21)$$

Sehingga struktur dari observer ialah sebagai berikut:

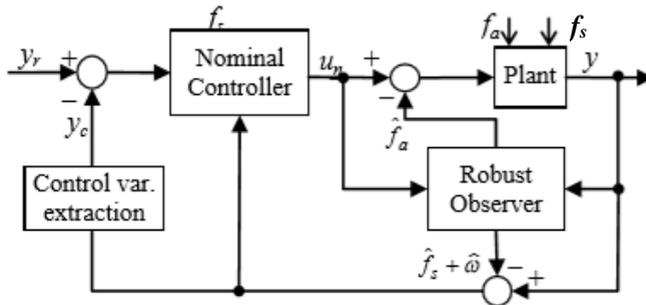


Gambar 2. 7 Struktur Observer [17]

2.7 Fault Tolerant Control

Fault tolerant control digunakan untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi risiko dari kecelakaan yang diakibatkan oleh kegagalan pada komponen atau hal lain yang tidak diinginkan dari sebuah sistem kontrol. Diperoleh estimasi kesalahan pada proses awal deteksi kesalahan. Perolehan tersebut dilakukan remedi untuk menentukan aksi yang tepat untuk menanggulangi akibat dari kesalahan yang telah terjadi tersebut [8].

Rekonfigurasi sinyal kontrol dilakukan berdasarkan [15] di mana hasil estimasi kesalahan diberikan langsung sebagai skema kontrol rekonfigurasi. Hal ini memberikan keuntungan berupa respon kompensasi kesalahan yang baik. Dengan kesalahan aktuator, kompensasi dilakukan dengan mengurangi sinyal kontrol asli dengan hasil estimasi kesalahan. Struktur kontrol yang digunakan adalah sebagai berikut:

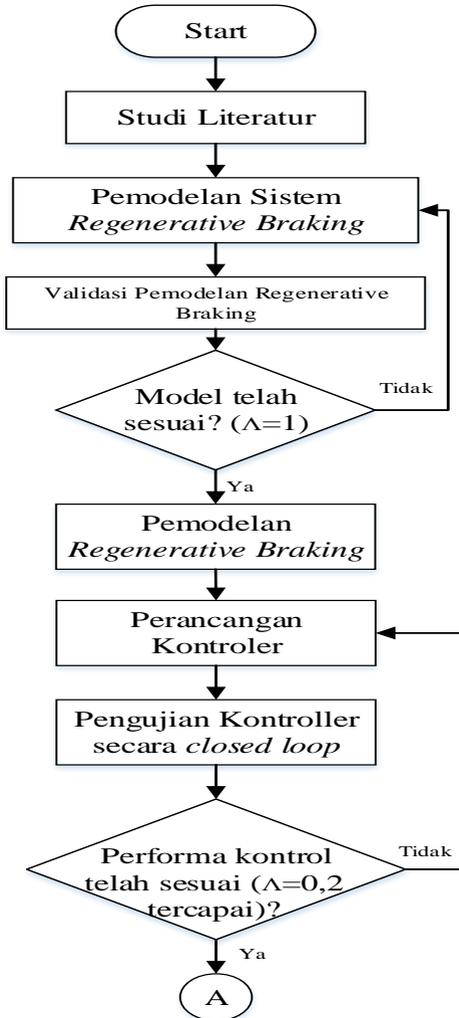


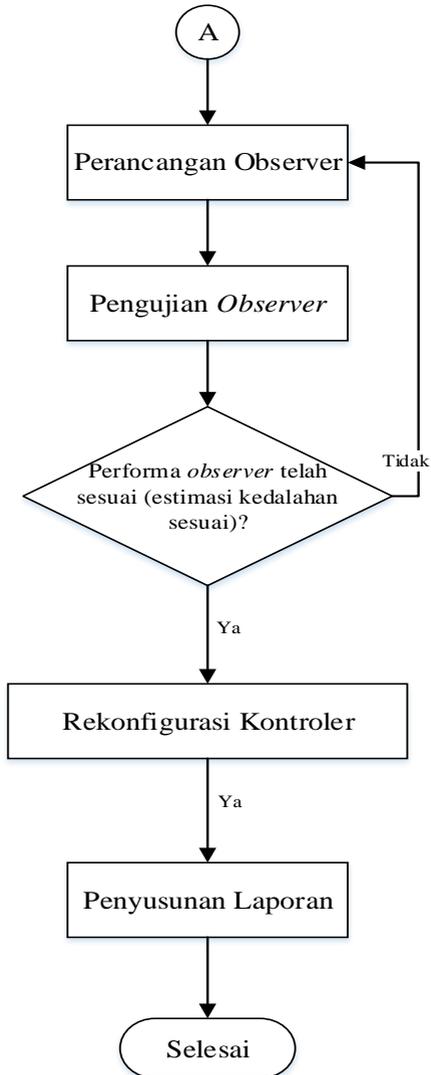
Gambar 2. 8 Skema Fault Tolerant Control [17]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pengerjaan tugas akhir ini dilakukan sebagaimana diagram alir sebagai berikut:





Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi Tugas Akhir

3.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan sembari melakukan pengerjaan sebagai pedoman dari tugas akhir yang dikerjakan. Studi literatur dapat dilakukan pada jurnal, buku, ataupun sumber valid lainnya yang memiliki relasi dengan topik tugas akhir yang dikerjakan. Nantinya, literatur yang diperoleh juga menjadi referensi untuk laporan tugas akhir yang dibuat.

3.2 Pemodelan Sistem *Regenerative Braking*

Dilakukan pemodelan terhadap pengereman *regenerative* yang digunakan pada tugas akhir ini. Pemodelan dilakukan 2 tahap yaitu pemodelan *quarter car model* dan pemodelan motor.

3.2.1 Pemodelan Quarter Car Model

Pemodelan terhadap *quarter car model* saat pengereman dilakukan dengan mengkaji persamaan-persamaan yang terlibat dalam peristiwa pengereman pada *quarter car model* sesuai dengan hukum kedua Newton. Hukum kedua Newton berbunyi “jumlah vektor dari gaya-gaya yang berlaku pada sebuah objek adalah sama dengan massa dari objek tersebut dikalikan dengan akselerasi dari objek itu”, sehingga:

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

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

Dihasilkan persamaan (3.2) sesuai dengan gaya-gaya yang berlaku pada quarter car model saat pengereman pada bidang datar sesuai dengan:



Gambar 3. 2 Gaya yang terlibat pada pengereman [4]

Di mana v merupakan arah kecepatan kendaraan, F_x merupakan gaya pengereman, F_a merupakan gaya *drag* aerodinamik kendaraan, dan F_w merupakan gaya resistansi putaran

roda yang masing-masing memiliki persamaan sesuai dengan persamaan (2.1), (2.2), dan (2.3) dengan variabel yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut [4]:

Tabel 3.1 Variabel pada persamaan gaya

No.	Simbol	Variabel (satuan)	Nilai
1.	m	Massa QCM (kg)	425
2.	g	Percepatan gravitasi (m/s ²)	9,8
3.	c_r	Koefisien aerodinamik	0,3
4.	δ	Densitas udara (kg/m ³)	1,225
5.	A_f	Luas permukaan frontal (m ²)	3,1
7.	c_t	Koefisien resistansi putaran roda	0,01
8.	α	Sudut jalan qcm (rad)	0

Sementara μ merupakan koefisien pengereman kendaraan yang diperoleh dari [13] sebagai:

$$\mu(\lambda, v) = (c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda) \cdot e^{-c_4\lambda v} \quad (3.6)$$

Pada persamaan 3.6 terdapat beberapa variabel berupa v (kecepatan), μ (koefisien pengereman), λ (slip ratio), beserta parameter jalan berupa c_1 , c_2 , c_3 , dan c_4 dengan c_1 merupakan nilai maksimum kurva gesekan, c_2 merupakan bentuk kurva gesekan, c_3 merupakan perbedaan antara kurva gesekan pada nilai maksimum dan pada saat $\lambda = 1$, dan c_4 nilai karakteristik kebasahan jalan. Nilai-nilai yang digunakan untuk kondisi aspal kering ditunjukkan pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

Tabel 3.2 Variabel pada persamaan koefisien pengereman

Variabel	Nilai
c1	1,2801
c2	23,99
c3	0,52
c4	0,3

Nilai-nilai tersebut ditentukan sesuai dengan [13] untuk kondisi jalan aspal kering.

Selanjutnya, persamaan gaya yang berlaku tersebut dikonversi dalam bentuk blok simulink dan disimulasikan agar dapat melakukan pengereman.

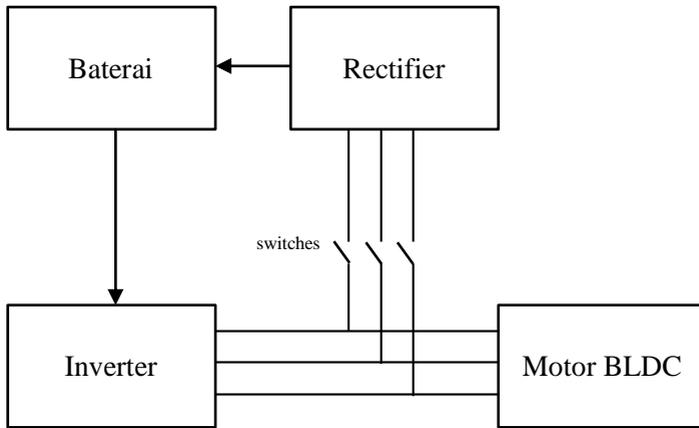
Pada persamaan 3.6 terdapat juga variabel λ (*slip ratio*) di mana nilai ini akan diatur pada nilai 0,2 untuk melakukan kontrol *anti-lock braking system*. *Slip ratio* juga diperoleh dari persamaan berikut [4]:

$$\lambda = \frac{w_v - w_w}{\max(w_v, w_w)} \quad (3.7)$$

Dengan v_v merupakan kecepatan linear dari kendaraan dan v_w merupakan kecepatan linear dari roda. Nilai-nilai tersebut diperoleh setelah mengintegrasikan *quarter car model* dengan model motor sebagai penggerak dari kendaraan.

3.2.2 Pemodelan Motor

Motor BLDC digunakan sebagai penggerak dari kendaraan yang disimulasikan pada tugas akhir ini. Pemodelan dilakukan terhadap motor yaitu *permanent magnet synchronous machine*, driver motor berupa *inverter*, *rectifier* dan *power supply* motor berupa baterai. Skema motor yang digunakan sesuai dengan [6] yakni diilustrasikan sesuai dengan Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Skema Motor [6]

Sumber daya utama pada motor ini yaitu baterai. Baterai digunakan untuk melakukan suplai daya kepada *inverter*. *Inverter* menerima masukan *gate* PWM dan akan mengalirkan sumber 3 fasa kepada motor pada saat mode *motoring* atau motor akan mengalirkan sumber kepada *rectifier* pada mode *generator* sehingga dapat melakukan pengecasan pada baterai saat pengereman.

Model dari QCM dan motor digabungkan dengan memfungsikan torsi pada QCM setelah diberikan *reduction gear* sebagai *load torque* pada motor dan output kecepatan pada motor dihubungkan dengan *reduction gear* kembali dan masuk ke kendaraan sebagai kecepatan angular roda. Model dikatakan valid apabila dapat mensimulasikan pengereman pada kendaraan hingga kendaraan tersebut berhenti dan memiliki nilai $\lambda = 1$ atau roda telah terkunci, serta dapat menunjukkan pengereman secara *regenerative* dibuktikan dengan *state of charge* yang mengalami pengurangan lebih sedikit dibandingkan pengereman *non-regenerative*.

3.3 Perancangan Kontroler

Pada sistem pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* ini, diterapkan kontrol secara *cascade*. Pada *loop*

terluar, terdapat kontrol *anti-lock braking system* yakni dengan memasang kontroler PI secara feedback untuk mengatur nilai slip ratio pada nilai 0,2 sehingga menghasilkan nilai koefisien pengereman maksimal (1) sesuai dengan fungsi pada Gambar 2.1. PV berupa slip ratio diperoleh sesuai persamaan (3.7). Tuning dilakukan untuk menentukan parameter kontroler secara *trial and error* untuk memperoleh hasil yang sesuai. Parameter yang digunakan untuk kontroler PI slip ratio adalah sebagai berikut:

Tabel 3.3 Parameter kontroler slip ratio

Parameter	Nilai
P	1,03
I	0,05

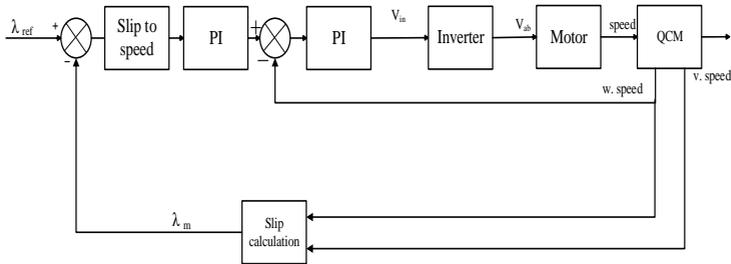
Selain itu, terdapat kontrol kecepatan untuk motor secara feedback sesuai dengan [14]. Sinyal kontrol dari loop terluar dikonversi menjadi referensi untuk loop di dalamnya. Kontrol kecepatan menggunakan kontroler PI yang menerima PV dari kecepatan motor. Parameter pada kontroler juga diperoleh secara *trial and error* sehingga diperoleh hasil yang sesuai. Parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.4 Parameter kontroler kecepatan

Parameter	Nilai
P	3
I	0,2

Sinyal kontrol dari pengendalian kecepatan ini akan menentukan referensi tegangan yang digunakan sebagai suplai *inverter*.

Skema kontrol pada tugas akhir ini dirancang sebagai berikut:



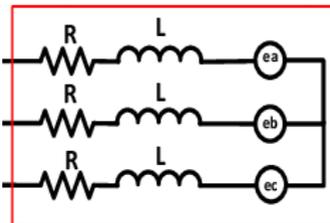
Gambar 3. 4 Skema Kontrol

Perancangan kontroler dikatakan telah valid apabila kontroler mampu mengatur nilai kecepatan dan *slip ratio* agar sesuai dengan set point yang diberikan dengan performa yang baik.

3.4 Perancangan Observer

Observer dirancang untuk memberikan estimasi kesalahan (*fault*) pada sistem. Pada tugas akhir ini, kesalahan diberikan pada inverter sebagai aktuator. Kesalahan yang diberikan berupa *open circuit* pada lengan-lengan *inverter*. Kali ini dirancang *extended state observer* untuk menentukan gain observer yang sesuai, dan menentukan apakah observer ini mampu melakukan estimasi.

Terlebih dahulu disusun matriks *state space* daripada motor BLDC. Bentuk ini diperoleh dengan menurunkan persamaan yang berlaku sesuai dengan [13] sebagai berikut:



Gambar 3.5 Rangkaian equivalen BLDC [13]

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (3.8)$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (3.9)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3.10)$$

Dapat disederhanakan menjadi:

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + e_{ab} \quad (3.11)$$

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + e_{bc} \quad (3.12)$$

Dengan $i_a + i_b + i_c = 0$, Persamaan dapat dimodifikasi menjadi:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L}i_a + \frac{2}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.13)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L}i_b + \frac{1}{3L}(V_{ab} - e_{ab}) + \frac{1}{3L}(V_{bc} - e_{bc}) \quad (3.14)$$

Sehingga dari persamaan tersebut dapat dibentuk matriks state space:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2/3L & 1/3L \\ -1/3L & 1/3L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - e_{ab} \\ V_{bc} - e_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Keluaran dari matriks ruang keadaan tersebut berupa arus yang merupakan variabel terukur, sementara sinyal kontrol yang digunakan adalah berupa *line voltage* dari *inverter* yang dikendalikan oleh tegangan suplai oleh regulator tegangan.

Parameter elektrik yang ada pada motor seperti resistansi dan induktansi dimasukkan ke dalam matriks sebagai berikut:

Tabel 3.5 Parameter pada Motor

Parameter	Nilai
R	0,099
L	0,01

Sehingga matriks *state space* menjadi:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9,9 & 0 \\ 0 & -9,9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 66,667 & 33,333 \\ -33,33 & 33,333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - e_{ab} \\ V_{bc} - e_{bc} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dengan,

$$A = \begin{bmatrix} -9,9 & 0 \\ 0 & -9,9 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 66,667 & 33,333 \\ -33,333 & 33,333 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$$

Nilai kesalahan aktuator dan sensor diberikan sebagai:

$$F_a = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, F_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E_a = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

Di mana F_a merupakan kesalahan aktuator, F_s merupakan kesalahan sensor, dan E_a merupakan kesalahan gabungan. Variabel kesalahan tersebut masuk ke dalam persamaan *state space* sesuai dengan persamaan (2.12) dan (2.13) sehingga diperoleh persamaan *state space* yang mengandung kesalahan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9,9 & 0 \\ 0 & -9,9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 66,667 & 33,333 \\ -33,333 & 33,333 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - e_{ab} \\ V_{bc} - e_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{a_a} \\ f_{a_b} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_s \quad (3.20)$$

Selanjutnya, nilai kesalahan dimasukkan ke dalam matriks *state* sesuai dengan persamaan (2.20) dan (2.21) sehingga diperoleh persamaan ruang keadaan diperluas sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E_a \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3.21)$$

$$[\dot{y}] = C \begin{bmatrix} \dot{x} \\ f \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Dengan,

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & E_a \\ 0 & I \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{C} = [I \quad 0]$$

Sehingga,

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -9,9 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & -9,9 & 0 & 100 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 66,667 & 33,33 \\ -33,33 & 33,33 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

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

Dengan fungsi LQR, dengan menentukan nilai variabel Q dan R secara trial and error hingga diperoleh hasil akhir:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,07 & 0 \\ 0 & 0,07 \end{bmatrix}$$

Fungsi LQR tersebut menghasilkan gain K untuk difungsikan sebagai gain observer yaitu:

$$\begin{bmatrix} 78,6935 & -1,1827e-14 & 38,6825 & -3,0070e-15 \\ -1,1827e-14 & 78,6935 & -1,1089e-14 & 38,6825 \end{bmatrix}$$

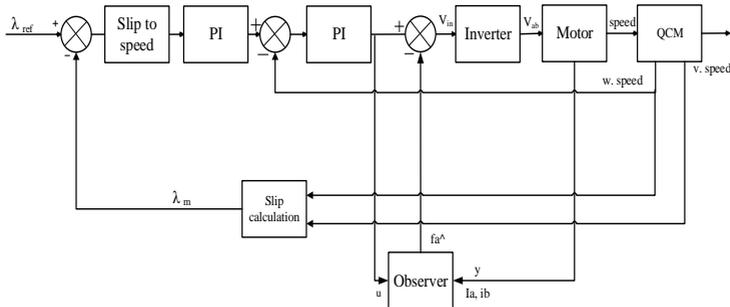
Nilai gain tersebut dimasukkan pada simulink sesuai dengan Gambar 2.5. Observer dinilai telah valid apabila telah mampu mengestimasi kesalahan dengan benar.

Pada simulasi yang digunakan, sinyal kontrol yang diambil ada pada loop kontrol kecepatan yang merupakan referensi tegangan. Nilai referensi tegangan tersebut dikonversi menjadi nilai *line voltage inverter* sesuai dengan persamaan (2.7).

3.5 Rekonfigurasi Kontrol

Fault tolerant control dilakukan dengan memberikan kompensasi kepada sinyal kontrol sesuai dengan hasil estimasi dari observer sesuai dengan struktur pada Gambar 2.6. Estimasi kesalahan ada dalam besaran keluaran state yaitu arus sedangkan kompensasi diberikan dengan melakukan konversi terlebih dahulu ke besaran sinyal kontrol yaitu tegangan. Konversi dilakukan dengan menggunakan persamaan pada (2.8). Nantinya, sinyal kontrol yang telah dikompensasi tersebut akan masuk ke dalam aktuator.

Skema rekonfigurasi yang dirancang adalah sesuai dengan [16] yaitu:



Gambar 3. 6 Skema Rekonfigurasi

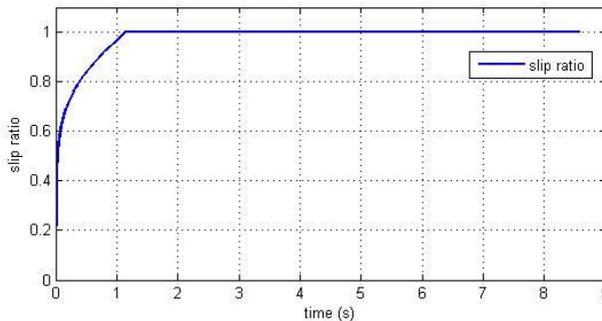
Fault tolerant control diuji dengan memberikan variasi kesalahan berupa *open circuit* pada *switch inverter* dan melihat apakah kesalahan tersebut dapat dikompensasi oleh kontrol yang telah dirancang. Kesalahan yang diberikan disimulasikan dengan memberikan sinyal nol pada nilai masukan *gate switch* untuk mensimulasikan *open circuit* dimulai pada detik ke-0,2.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Perancangan *fault tolerant control* dilakukan pada *environment* Matlab Simulink R2014a dimulai dari deklarasi variabel, pemodelan sistem hingga aplikasi kontrol. Pengujian dan validasi terhadap pemodelan, kontrol, observer, dan FTC dilakukan untuk memastikan model dapat merepresentasikan sistem dengan baik, kontrol dapat memberikan respon yang sesuai, observer dapat memberikan estimasi yang tepat, dan FTC dapat melakukan kompensasi sesuai kesalahan yang ada.

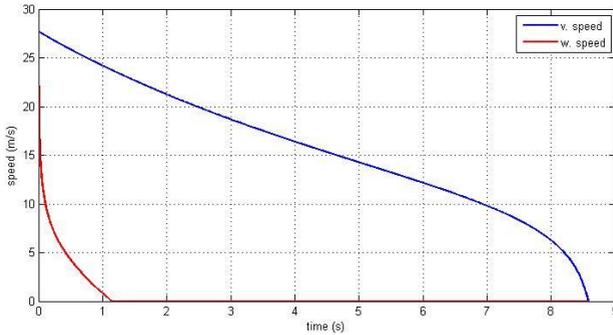
4.1 Validasi Regenerative Braking

Pemodelan sistem untuk diterapkannya *fault tolerant control* yaitu pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* pada *quarter car model* telah disimulasikan dan dengan hasil sebagai berikut:



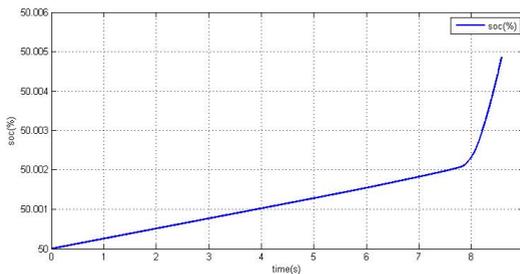
Gambar 4. 1 Respon Slip Ratio Saat Pengereman

Model dinilai mampu mensimulasikan pengereman dari kecepatan awal 27,78 m/s hingga berhenti pada sistem. Gambar 4.1 menunjukkan respon *slip ratio* pada saat pengereman. Terlihat bahwa dimulai dari detik ke-1,13 *slip ratio* bernilai 1 yang artinya terjadi peristiwa roda terkunci. Juga dihasilkan respon kecepatan saat pengereman adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 2 Respon Kecepatan Kendaraan dan Roda saat Pengereman

Gambar 4.2 memperlihatkan kecepatan roda turun dan berhenti pada detik ke-1,13 dengan kendaraan kecepatan turun hingga berhenti pada detik ke-8,57. Artinya, roda terkunci terlebih dahulu sebelum kendaraan berhenti. Hal ini merupakan hal yang tidak diinginkan karena pada saat terjadinya roda terkunci, kendaraan akan sulit dikendalikan serta jarak dan waktu pengereman akan lebih jauh dan lama. Pada saat pengereman diperoleh bahwa jarak pengereman kendaraan yaitu 163,8 meter dan selama pengereman terjadi regenerative yaitu pengisian kembali baterai pada kendaraan pada saat pengereman dibuktikan dengan SOC pada baterai naik sesuai dengan Gambar 4.3.

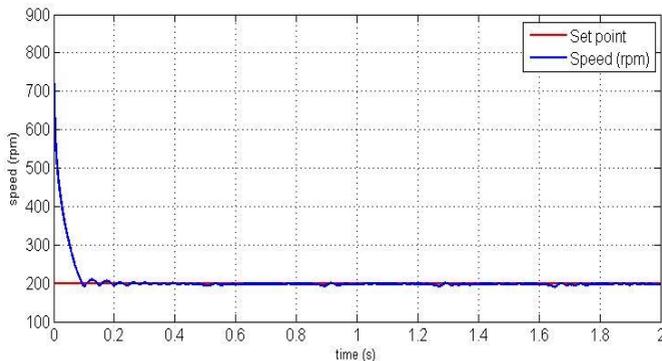


Gambar 4. 3 State of Charge Baterai selama pengereman

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa persentase state of charge dari baterai bertambah saat dilakukannya pengereman dari nilai awal yang diatur pada baterai yaitu 50% menuju 50,005 pada saat kendaraan telah berhenti. Baterai yang digunakan dalam simulasi adalah baterai dengan kapasitas 37,5 Ah.

4.2 Uji Performa Kontrol

Performa kontrol dilakukan dengan uji *closed loop* sistem. Kontroler dipasang untuk menghasilkan PV sesuai dengan set point untuk menjalankan fungsi kontrol sebagai *anti-lock braking system*. Terdapat 2 kontroler pada simulasi ini yang disusun secara cascade: kontroler slip ratio pada loop luar dan kontroler kecepatan roda pada loop dalam. Kontroler PI dilakukan *tuning* secara *trial and error*. Kontrol kecepatan dilakukan uji terlebih dahulu dengan memasang nilai *setpoint* senilai 200 dan dilakukan uji *closed loop* pada loop dalam dan dihasilkan respon sebagai berikut:



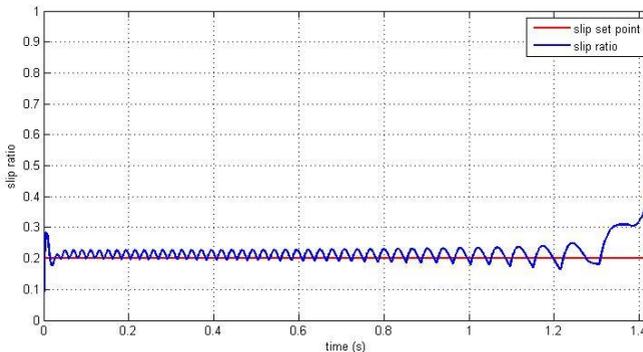
Gambar 4. 4 Respon uji closed loop speed

Gambar 4.4 menunjukkan kontroler mampu mengendalikan speed hingga pada *set point* yang dipasang dengan respon yang baik. Nantinya, kontroler ini menerima masukan error dari setpoint sebagai referensi speed dari keluaran loop luar. Kontroler loop dalam dipasang dengan parameter tuning P: 3 dan I: 0,2 dan menghasilkan performansi respon sebagai berikut:

Tabel 4.1 Performansi kontrol speed

Kriteria Performansi	Nilai
Rise time	0,12 s
Settling Time	0,18 s
Max. overshoot	0%

Sementara itu, kontroller luar juga dipasang kontrol PI dengan parameter P: 1,03 dan I: 0,05 untuk mengendalikan slip ratio. Dihasilkan respon slip ratio sebagai berikut:



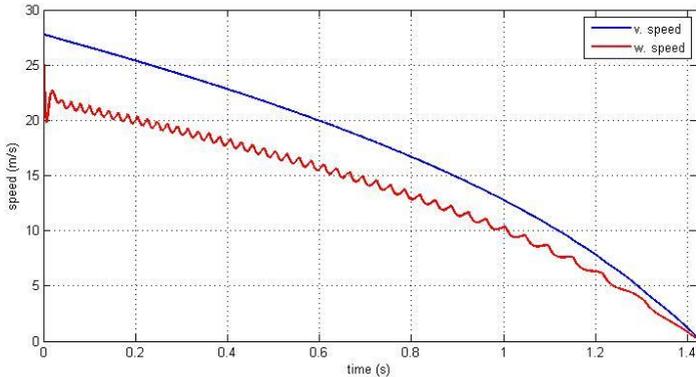
Gambar 4.5 Respon slip ratio abs

Respon pada Gambar 4.5 menunjukkan kontroler berhasil menjaga nilai slip ratio sesuai dengan setpoint dengan toleransi menurut [16] dengan batas bawah 0,15 sampai batas atas 0,25, hingga pada detik ke-1,2 slip ratio naik menandakan kendaraan akan berhenti. Berikut performansi kontrol diperoleh dari fungsi stepinfo pada Matlab yang diperoleh hasil:

Tabel 4.2 Performansi Kontrol Slip Ratio

Kriteria Performansi	Nilai
Rise time	0,0017 s
Settling Time	0,0115 s
Max. overshoot	41,9413%
Peak time	0,0069 s

Selanjutnya, sistem yang sudah memiliki *anti-lock braking system* memiliki grafik respon kecepatan kendaraan dan roda sebagai:



Gambar 4. 6 Respon Kecepatan dengan ABS

Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa roda dan kendaraan berhenti pada waktu yang sama yaitu pada detik ke-1,42 tanpa ada peristiwa roda terkunci. Roda sempat mengalami penurunan kecepatan sebelum detik ke-0,1 namun kontrol pada ABS berhasil membawa kembali slip ratio pada 0,2 sehingga kecepatan tetap mengikuti kecepatan roda, menghasilkan waktu pengereman 1,42 detik dan jarak pengereman 24,08 meter.

Pengaplikasian ABS pada pengereman kendaraan meningkatkan performa pengereman. Berikut perbandingan performa pengereman non-ABS dengan ABS dibandingkan berdasarkan tabel berikut:

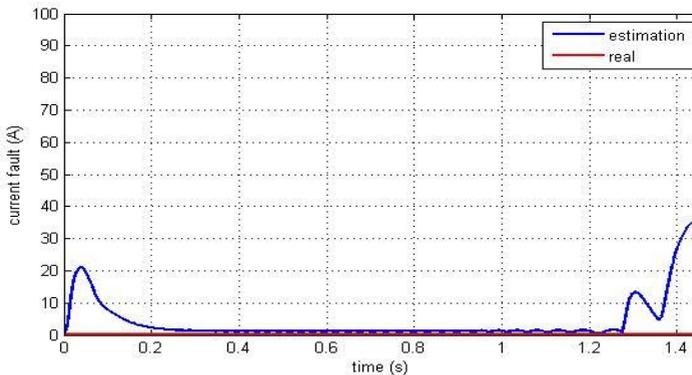
Tabel 4.3 Perbandingan Parameter Pengereman ABS dan Non-ABS

Parameter	ABS	Non-ABS
Waktu pengereman	1,42 s	8,57 s
Jarak pengereman	24,08 m	163,8 m

4.3 Validasi *Observer*

Observer yang telah dirancang perlu dilakukan validasi untuk mengetahui apakah estimasi yang diberikan adalah sesuai dengan nilai sebenarnya. Dalam validasi ini dilakukan variasi kesalahan yang diberikan pada *inverter* untuk membandingkan antara kesalahan aktual dan kesalahan yang diestimasi. Kesalahan aktual diperoleh dengan mengetahui efek dari kesalahan yang diberikan terhadap keluaran sistem (arus).

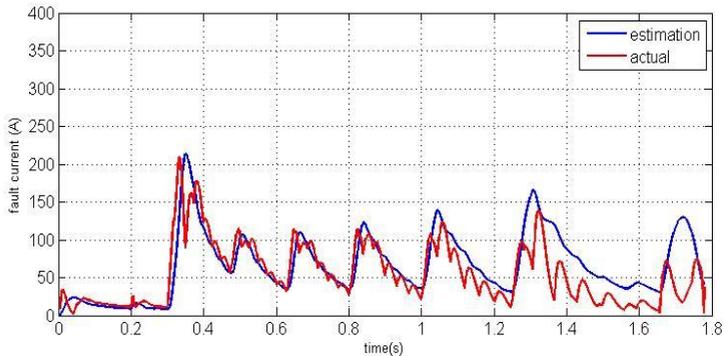
Nilai estimasi *observer* saat belum diberikan kesalahan ditunjukkan pada:



Gambar 4. 7 Perbandingan Kesalahan Estimasi dan Aktual

Hasil tersebut menunjukkan bahwa *observer* mampu menunjukkan nilai kesalahan yang sesuai dengan kesalahan aslinya pada saat aktuator belum diberikan kesalahan dengan performa *settling time* 0,3s dan *rise time* 0,032s. Terdapat ketidaksesuaian besar hasil estimasi pada bagian awal dari simulasi yaitu pada awal pengereman dan akhir dari simulasi yaitu saat kendaraan akan berhenti, sedangkan pada keadaan normal nilai estimasi memiliki error yang lebih kecil. Ketidaksesuaian tersebut timbul akibat adanya perubahan nilai keluaran pada sistem yang tidak dapat diestimasi oleh sinyal kontrol masukan *observer*. Sementara itu, untuk variasi lain ditunjukkan perbandingan hasil estimasi pada saat *inverter* diberikan kesalahan berupa *open circuit* mulai detik

ke-0,2 pada switch pertama. Perbandingan hasil estimasi kesalahan oleh observer dengan sebenarnya ditunjukkan pada:



Gambar 4. 8 Perbandingan Kesalahan Estimasi dan Aktual pada Kesalahan Open Circuit

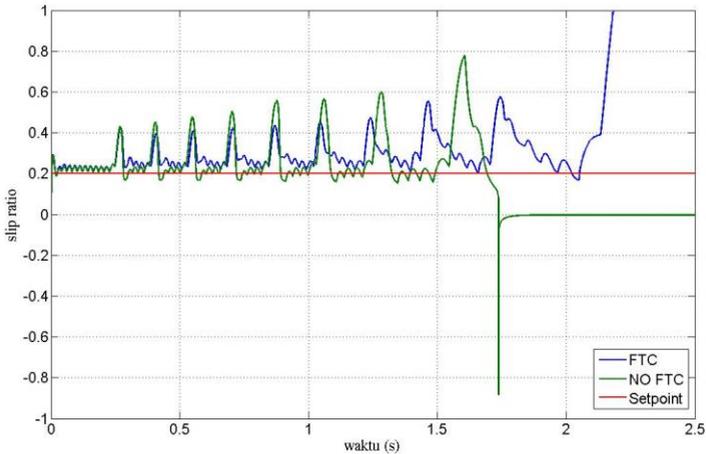
Hasil estimasi pada Gambar 4.8 menunjukkan estimasi sesuai dengan besaran kesalahan aktual. Kesalahan aktual merupakan selisih dari keluaran dalam keadaan normal dengan keluaran pada saat terjadi kesalahan.

4.4 Pengujian *Fault Tolerant Control*

Fault tolerant control dilakukan dengan memberikan kompensasi sinyal kontrol yang rusak akibat kesalahan. Kesalahan yang diberikan berupa kesalahan open circuit pada switch sesuai dengan penomoran switch pada Gambar 2.4 dimulai dari detik ke-0,2. Akibat dari kesalahan tersebut ialah terjadi deviasi terhadap sinyal arus, kecepatan, hingga ke performa ABS. Nilai kesalahan dilakukan estimasi oleh observer sesuai dengan tahap sebelumnya. Kesalahan berupa arus dilakukan konversi menjadi satuan sinyal kontrol yaitu tegangan dc inverter sesuai dengan persamaan (2.7) sehingga dapat dilakukan koreksi terhadap sinyal kontrol dengan mengurangi sinyal kontrol awal dengan nilai nilai estimasi. Koreksi tersebut mengubah sinyal kontrol yang masuk ke aktuator sehingga mempengaruhi keluaran dari kontrol kecepatan hingga kontrol slip ratio. Untuk menguji performa *fault tolerant control*, diberikan variasi kesalahan yaitu:

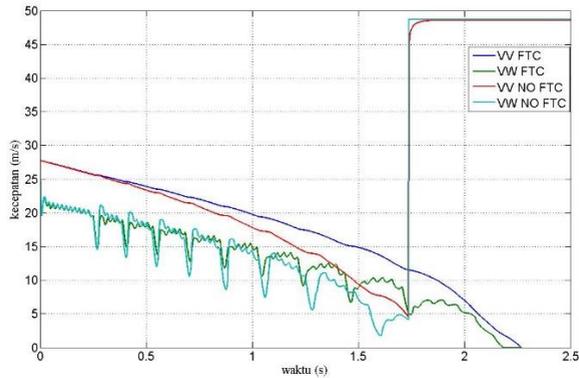
4.4.1 Kesalahan pada Switch 1

Kesalahan *open circuit* pada *switch* pertama diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai slip ratio dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.9 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.10 sebagai berikut:



Gambar 4.9 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 1

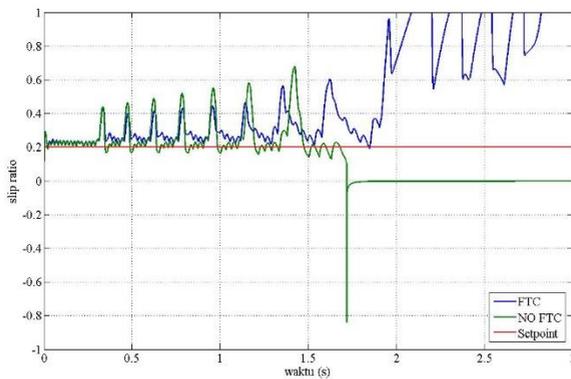
Gambar 4.9 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-1,75 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,6 dengan nilai maksimal 0,78 atau 280% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-2,24.



Gambar 4. 10 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 1

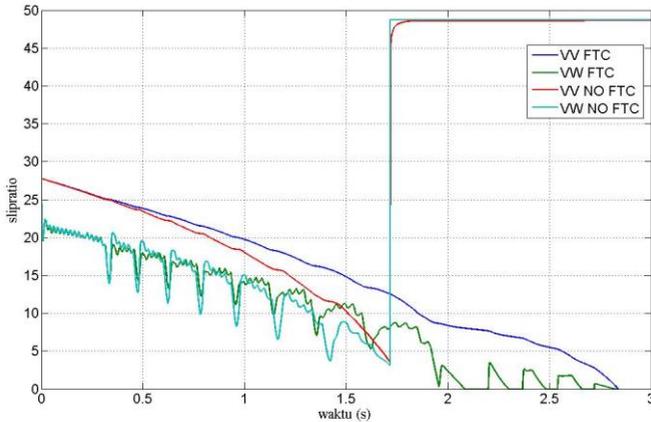
4.4.2 Kesalahan pada Switch 2

Kesalahan *open circuit* pada *switch* kedua diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai slip ratio dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.11 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.12 sebagai berikut:



Gambar 4. 11 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 2

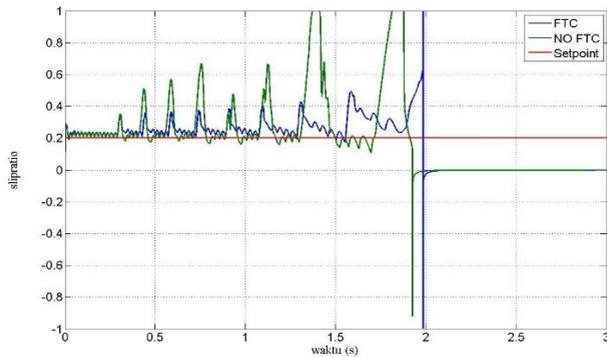
Gambar 4.11 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-1,75 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,4 dengan nilai maksimal 0,65 atau 225% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-2,8.



Gambar 4. 12 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 2

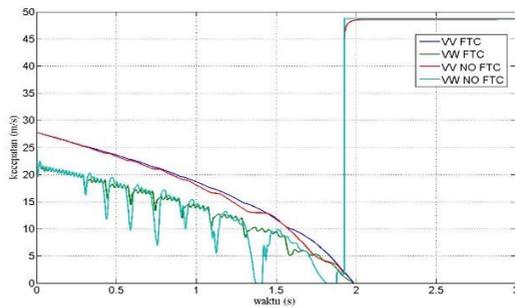
4.4.3 Kesalahan pada Switch 3

Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-3 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai slip ratio dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.13 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.14 sebagai berikut:



Gambar 4. 13 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 3

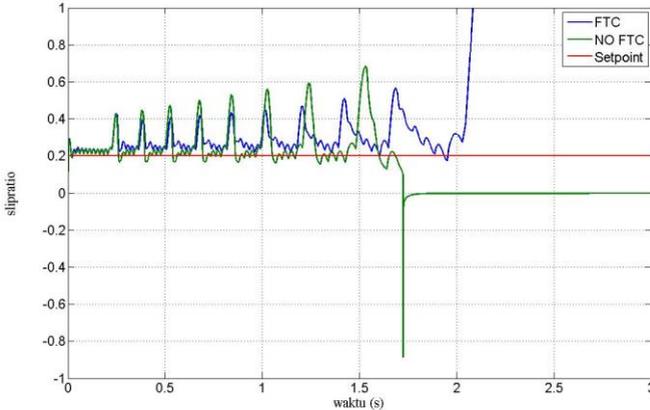
Gambar 4.13 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai akhir negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-1,9 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,3 dan 1,6 dengan nilai maksimal 1 atau 400% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-2.



Gambar 4. 14 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 3

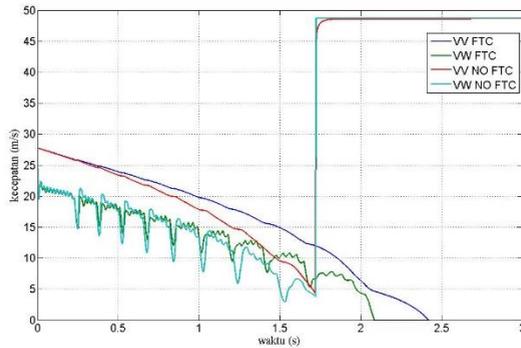
4.4.4 Kesalahan pada Switch 4

Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-4 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai slip ratio dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.15 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.16 sebagai berikut:



Gambar 4. 15 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 4

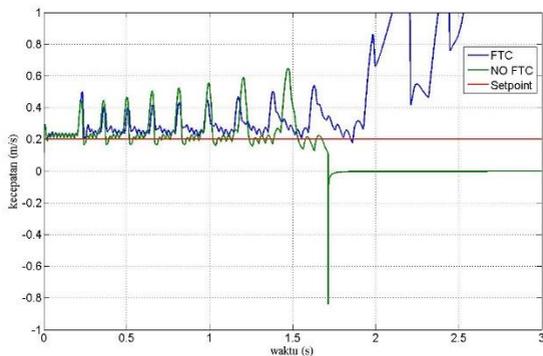
Gambar 4.15 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-1,7 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,55 dengan nilai maksimal 0,67 atau 235% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-2,4.



Gambar 4. 16 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 4

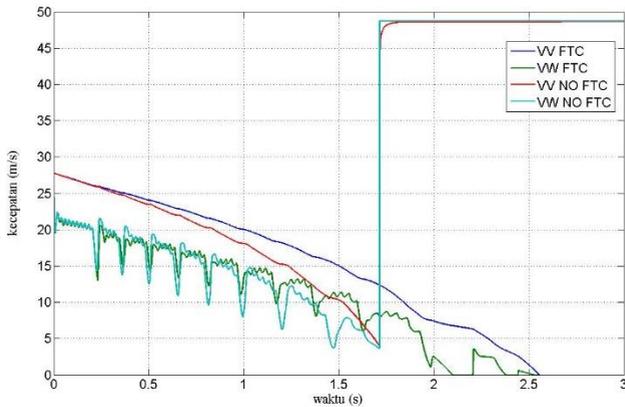
4.4.5 Kesalahan pada Switch 5

Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-5 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai slip ratio dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.17 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.18 sebagai berikut:



Gambar 4. 17 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 5

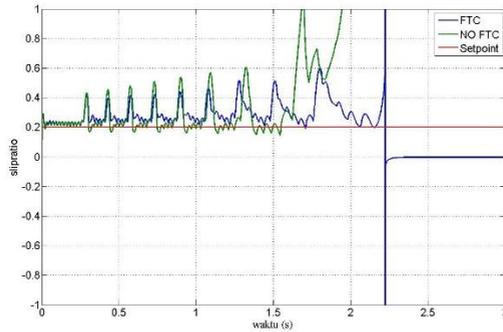
Gambar 4.13 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-1,65 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,46 dengan nilai maksimal 0,65 atau 225% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-2,55.



Gambar 4. 18 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 5

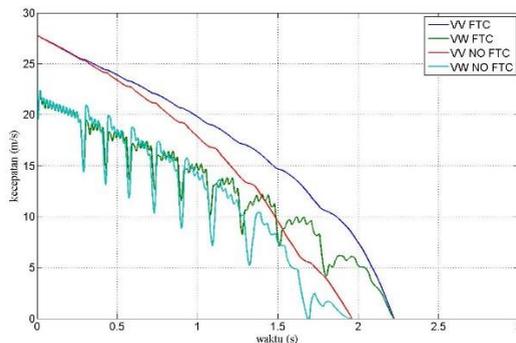
4.4.6 Kesalahan pada Switch 6

Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-6 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai *slip ratio* dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.19 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.20 sebagai berikut:



Gambar 4. 19 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 6

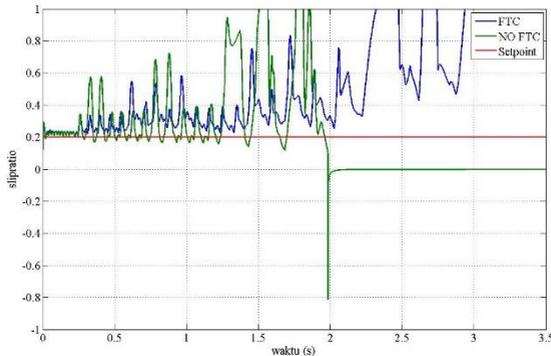
Gambar 4.13 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-2,23 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,6 dan 1,9 dengan nilai maksimal 1 atau 400% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-2,24.



Gambar 4. 20 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 6

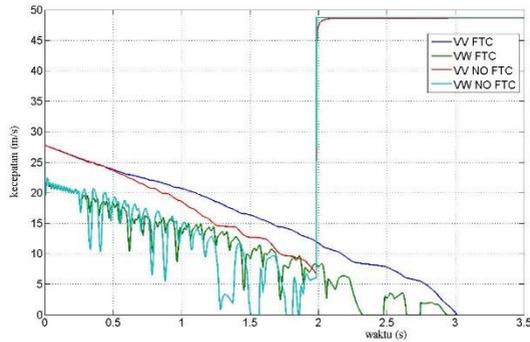
4.4.7 Kesalahan pada Switch 1 dan 2

Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-1 dan 2 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai *slip ratio* dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.21 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.22 sebagai berikut:



Gambar 4. 21 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 1 dan 2

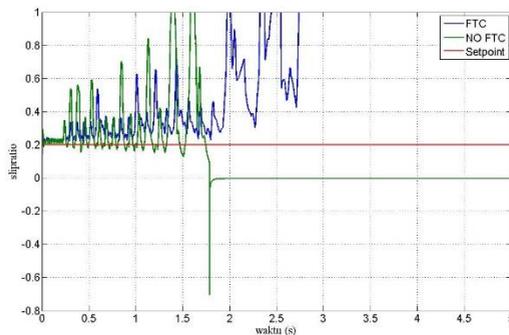
Gambar 4.13 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-2 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,6, 1,8, dan 1,9 dengan nilai maksimal 1 atau 400% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-3.



Gambar 4. 22 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 1 dan 2

4.4.8 Kesalahan pada Switch 3 dan 4

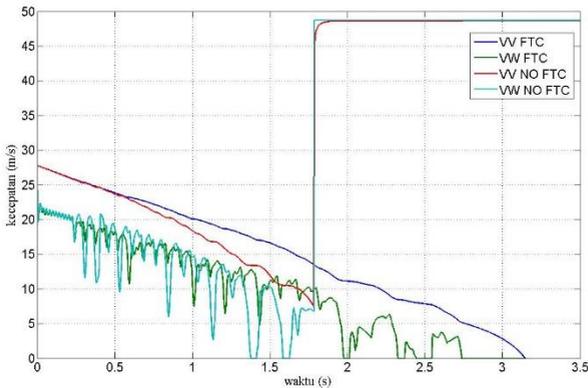
Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-3 dan 4 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai slip ratio dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.23 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.24 sebagai berikut:



Gambar 4. 23 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 3 dan 4

Gambar 4.13 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa

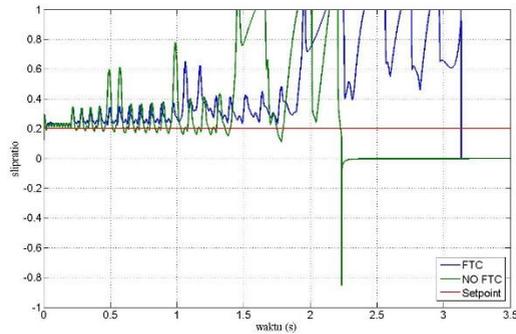
kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-1,8 yang artinya kendaraan gagal dan berhenti melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,4 dan 1,6 dengan nilai maksimal 1 atau 400% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-3,2.



Gambar 4. 24 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 3 dan 4

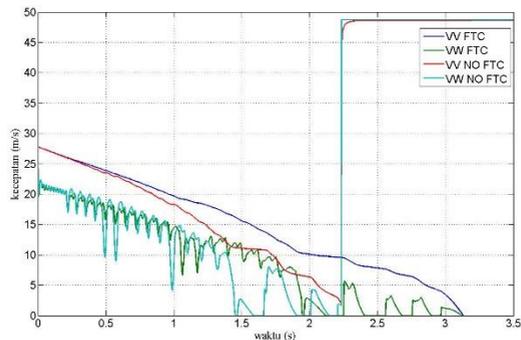
4.4.9 Kesalahan pada Switch 5 dan 6

Kesalahan *open circuit* pada *switch* ke-5 dan 6 diberikan dimulai pada detik ke-0,2 dan dilakukan simulasi. Perbandingan antara nilai *slip ratio* dari sistem pengereman tanpa FTC dan dengan FTC ditunjukkan dengan Gambar 4.25 serta penurunan kecepatan pada Gambar 4.26 sebagai berikut:



Gambar 4. 25 Perbandingan Nilai Slip Ratio dengan dan Tanpa FTC pada Kesalahan Switch 5 dan 6

Gambar 4.13 tersebut ditunjukkan bahwa sebelum diaplikasikannya FTC, nilai *slip ratio* mengalami *spike* beberapa kali dari nilai 0,2 sebelum akhirnya *slip ratio* menunjukkan nilai negatif lalu bernilai 0 pada detik ke-2,23 yang artinya kendaraan gagal melakukan pengereman dan kecepatan dibawa ke kecepatan maksimum. Selain itu, terjadi *spike* paling tinggi dialami pada detik ke-1,46; 1,5; 1,8; dan 2,1 dengan nilai maksimal 1 atau 400% dari nilai *slip ratio* set point yaitu 0,2. Setelah diaplikasikannya FTC, kompensasi sinyal kontrol mampu mengurangi *spike* tersebut, serta dapat membawa kendaraan berhenti pada detik ke-3,17.



Gambar 4. 26 Perbandingan Penurunan Kecepatan Kesalahan Switch 5 dan 6

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Sesuai dengan analisis hasil yang telah dilakukan, pada tugas akhir ini dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya:

- Pemodelan terhadap pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* telah dilakukan dengan performa kontrol *slip ratio* dengan *max. overshoot* 41,94%, *rise time* 0,0017s, dan *settling time* 0,0115s.
- *Observer* dirancang sehingga mampu mengestimasi kesalahan dengan parameter performansi *settling time* 0,3s dan *rise time* 0,032s.
- Kesalahan *open circuit* pada lengan *inverter* dapat dikompensasi dengan memberikan koreksi sinyal kontrol berupa referensi voltase pada kontrol kecepatan motor sehingga dapat mampu mempertahankan performa kontrol kecepatan dan *slip ratio* (ABS). FTC berhasil mengurangi deviasi pada *slip ratio* akibat terjadinya kesalahan dicontohkan pada kesalahan *switch 3* peningkatan *slip ratio* pada detik ke-1,7 yaitu nilai 1 berhasil diturunkan menjadi 0,35 sehingga berdampak pada performa pengereman secara umum yaitu berhasil berhentinya kendaraan dengan sempurna pada detik ke-1,98.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perkembangan penelitian mengenai topik sesuai ke depannya diantaranya:

- Diaplikasikan pada sistem *full car* agar model dapat merepresentasikan kendaraan lebih baik lagi.
- Diimplementasikan dalam bentuk *hardware* untuk melihat performa kontrol yang telah dirancang secara nyata.
- Menggunakan kontroler lanjutan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Westbrook, Development and future of battery, hybrid, and fuel-cell cars, London: The Institution of Electrical Engineers, 2005.
- [2] R. Shiosansi, "Emissions Impacts and Benefits of Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Services," *Environmental Science Technology*, pp. 1199-1204, 2008.
- [3] G. J. Offer, "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell, and hybrid vehicle in a future sustainable road transport system," *energy policy*, vol. 38, pp. 24-29, 2010.
- [4] O. Tur, "An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-Lock Braking System," in *Proceedings of 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Istanbul, 2007.
- [5] Y. Gao, "Electronic Braking System of EV and HEV-- Integration of Regenerative Braking, Automatic Braking Force Control and ABS," *42 Volt Technology and Advanced Vehicle Electrical Systems*, 2001.
- [6] T. Murali, "Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor," *International Conference on Circuits Power and Computing Technology*, 2017.
- [7] L. Bai, "Electric Drive System with BLDC Motor," *International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 2011.
- [8] R. Errabelli, "Fault-Tolerant Voltage Source Inverter for Permanent Magnet Drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, 2012.
- [9] M. Blanke, "Fault Tolerant Control Systems," *Departement of Control Engineering, Aalborg University*, 1999.

- [10] J. R. Cho, "Braking Distance Prediction by Hydroplanning Analysis of 3-D Patterned Tire Model," *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 1, no. 3, pp. 398-409, 2007.
- [11] M. K. Suganya, "Simulation of Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor Using Fuzzy," *International Journal of Innovative Research in Science. Engineering, and Technology*, vol. 3, no. 1, 2014.
- [12] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Arizona: Microchip Technology, 2003.
- [13] C. P. K. S. Singh, "State-space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control Using Fuzzy PID Controller," *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*, vol. 2, pp. 359-369, 2012.
- [14] S. Manias, *Power Electronics and Motor Drive Systems*, Athens: Academic Press, 2017.
- [15] A. M., "PID Control," *Control Systems, Robotics, and Automation*, vol. 2.
- [16] A. Urquizo, "PID Controller," 2011. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller#/media/File:PID_en.svg. [Diakses 28 Januari 2019].
- [17] K. Indriawati, "Robust Fuzzy Observer-based Fault Tolerant Tracking Control for Nonlinear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Series Motor Speed Drive," *Praise Worthy Prize*, pp. 375-385.
- [18] G. Cui and e. al., "Slip Control of Electric Vehicle Based on Tire-Road Friction Coefficient Estimation," *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- [19] A. Tashakori, "Modeling of BLDC Motor with Ideal Back-EMF for Automotive Applications," in *World Congress on Engineering*, London, 2011.
- [20] J. Guo, X. Jian and G. Lin, "Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a

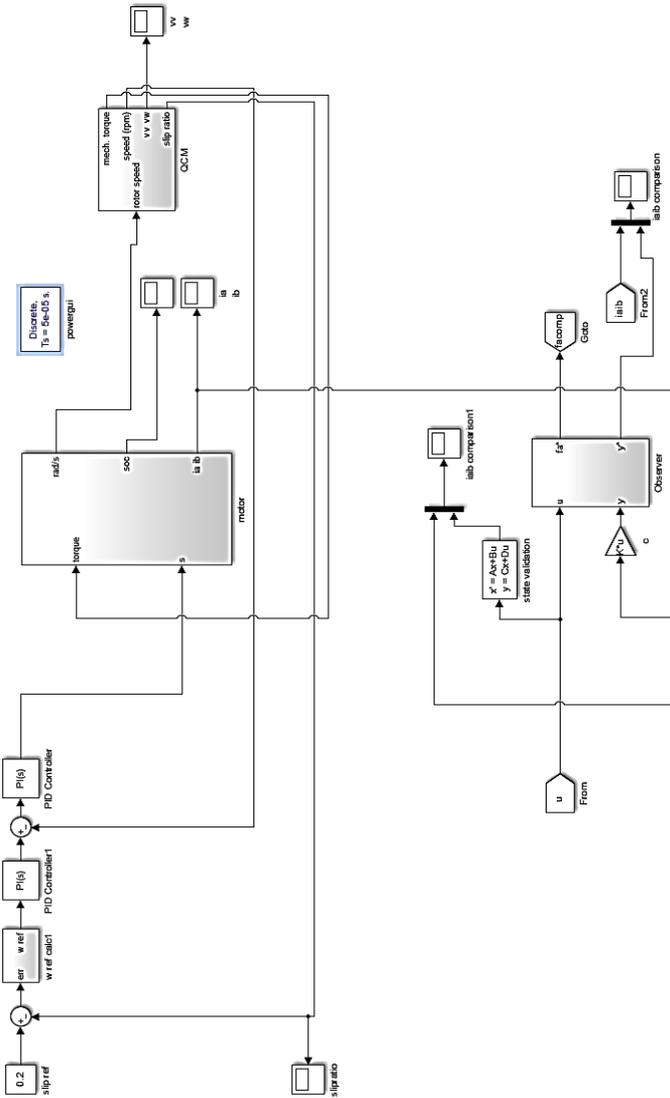
Fuzzy Sliding Mode Control," *Energies*, vol. 7, pp. 6459-6476, 2014.

- [21] A. Saleh, "Speed Control of Brushless DC Motor Based on Fractional Order PID Controller," *Internal Journal of Computer Applications*, 2014.

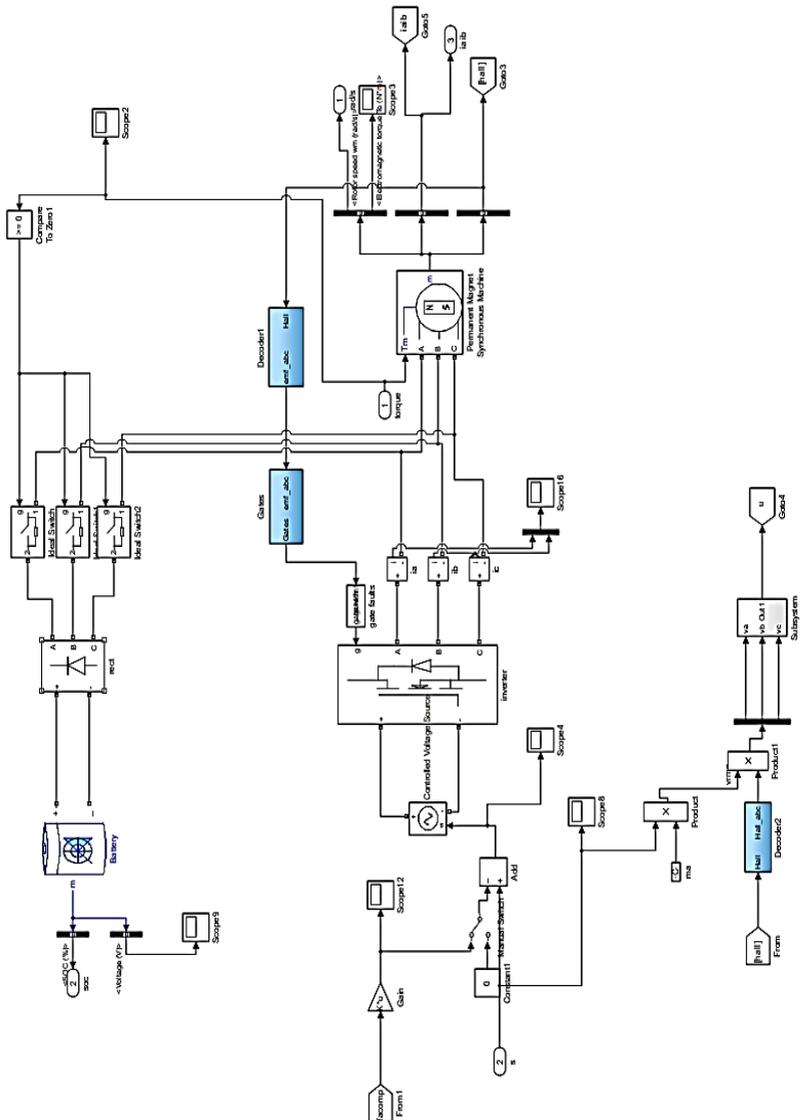
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

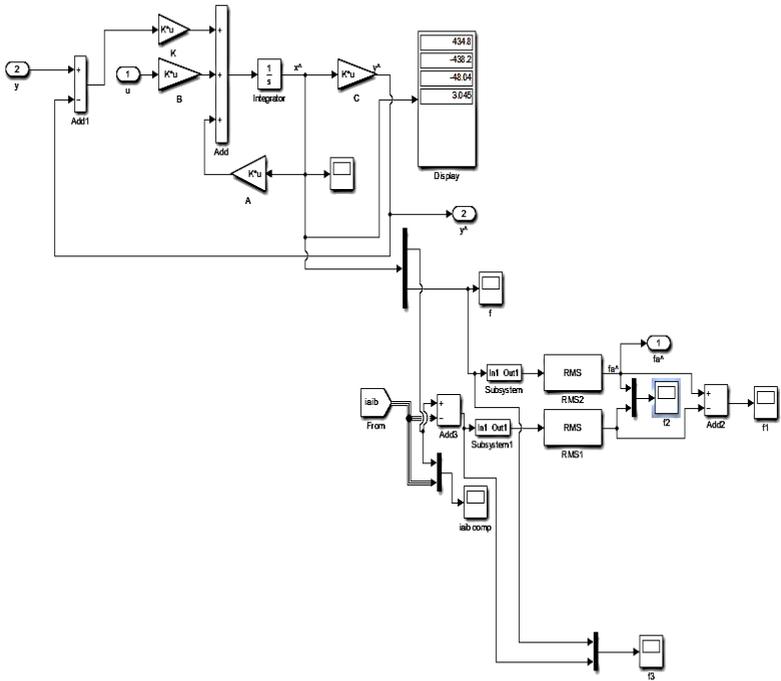
a. Sistem Pengereman Regeneratif sebagai ABS



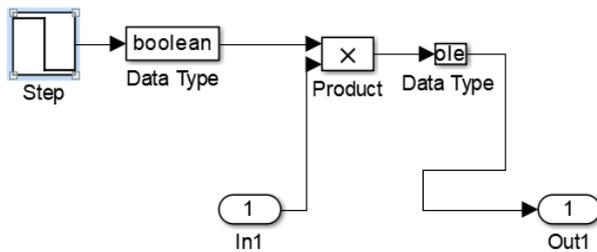
c. Sistem Motor



d. Observer



e. Pemberian kesalahan pada aktuator



f. Kode Matlab

```
clc;
%% parameter
m = 425;
r = 0.325;
Af = 3.1;
Cr = 0.3;
Ct = 0.01;
j = 0.5;
c1 = 1.2801;
c2 = 23.99;
c3 = 0.52;
c4 = 0.3;
g = 9.8;
sig = 1.225;
v0 = 27.778;
freq_max = 20000;
h=0.01;
nb_p=4;
lambda=0.07147;
Ts_vect=50e-6;

%% ss
A = [-9.9 0;0 -9.9];
B = [66.667 33.33;-33.33 33.33];
C = [1 0;0 1];
D = [0 0;0 0];

%% plant with faults
n = length(A);
mu = size(B,2);
p = size(C,1);
Az = 1;
Fa = [1/10e-3 0;0 1/10e-3];
fa = size(Fa,2);
i = eye(2);
Ea = [Fa];

%% observer
```

```
Atild = [A Ea;zeros(fa,p) eye(fa)];  
Btild = [B;zeros(fa,mu)];  
Ctild = [C zeros(p,fa)];  
sys = ss(Atild,Btild,Ctild,0);
```

```
% lqr  
Q = eye(4);  
  Q(3,3) = 1e2;  
  Q(4,4) = 1e2;  
R = eye(2);  
  R(1,1) = 7e-2;  
  R(2,2) = 7e-2;  
Ktild = lqr(Atild',Ctild',Q,R);  
% lqr
```

BIODATA PENULIS



Ananta Paramananda lahir di Bogor, 2 November 1998. Riwayat pendidikan penulis adalah SD Bina Insani Bogor (2004-2010), SMPN 5 Kota Bogor (2010-2013), SMAN 3 Kota Bogor (2013-2015), dan kini sedang menempuh pendidikan di S1 Teknik Fisika ITS dengan bidang minat rekayasa instrumentasi dan kontrol. Untuk korespondensi dapat menghubungi paramananda.ananta@gmail.com.