



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *FAULT TOLERANT
TRACTION CONTROL* PADA MOBIL
LISTRIK UNTUK MENGATASI *MODEL
UNCERTAINTY***

MUHAMMAD HILMAN HAKIM
NRP. 02311540000120

Dosen Pembimbing :
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

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

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 181801

**DESIGN OF FAULT TOLERANT TRACTION
CONTROL ON ELECTRIC VEHICLE TO
RESOLVE MODEL UNCERTAINTY**

Muhammad Hilman Hakim
NRP. 02311540000120

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

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

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Muhammad Hilman Hakim
NRP : 02311540000120
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
PerguruanTinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Fault Tolerant Traction Control* Pada Mobil Listrik Untuk Mengatasi *Model Uncertainty*” 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 pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 9 Mei 2019



Muhammad Hilman Hakim
NRP.02311540000120

“Halaman ini memang dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR
PERANCANGAN *FAULT TOLERANT TRACTION*
CONTROL PADA MOBIL LISTRIK UNTUK MENGATASI
MODEL UNCERTAINTY

Oleh:
Muhammad Hilman Hakim
NRP.0231154000120

Surabaya, 9 Mei 2019

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN.197605232000122001

Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN.197809022003121002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**PERANCANGAN FAULT TOLERANT TRACTION
CONTROL PADA MOBIL LISTRIK UNTUK MENGATASI
MODEL UNCERTAINTY**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada


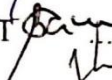


Bidang Minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD HILMAN HAKIM

NRP.02311540000120

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Pembimbing)
2. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T.,M.T (Penguji I)
3. Ir. Yaumar, M.T. (Penguji II)
4. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc (Penguji III)

**SURABAYA
MEL, 2019**

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERANCANGAN *FAULT TOLERANT TRACTION CONTROL* PADA MOBIL LISTRIK UNTUK MENGATASI *MODEL UNCERTAINTY*

Nama : **Muhammad Hilman Hakim**
NRP : **02311540000120**
Departemen : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**

Abstrak

Traction control pada kendaraan listrik berguna untuk mengurangi gejala tergelincirnya roda pada permukaan jalan. Namun, *disturbance* berupa *drag force* udara dan kesalahan *plant* pada ketidakpastian model matematis dapat mengakibatkan kegagalan pada sistem sehingga mengganggu stabilitas kemudi. Tugas akhir ini mengajukan pendekatan *fault tolerant* berdasarkan pada skema *maximum transmissible torque estimation* (MTTE) yang digunakan untuk mengurangi kedua faktor tersebut dan juga untuk mencegah kendaraan listrik dari tergelincir. PI *observer* digunakan untuk meningkatkan stabilitas kemudi dari pendekatan MTTE. Adapun respon yang diuji berupa sistem *open loop*, sistem *fault tolerant traction control* (FTTC), serta FTTC dengan kesalahan pada inersia roda sebesar 0,3 Kg.m², 0,4 Kg.m², dan 0,5 Kg.m². Pada uji coba algoritma FTTC, ditemukan bahwa sistem FTTC dapat mengurangi *slip ratio* sebesar 0,72 dari sistem *open loop* dan dapat mengatasi kesalahan pada inersia roda.

Kata Kunci : ***Fault Tolerant, Traction Control, MTTE***

“Halaman ini memang dikosongkan”

**DESIGN OF FAULT TOLERANT TRACTION CONTROL ON
ELECTRIC VEHICLE TO RESOLVE MODEL
UNCERTAINTY**

Name : **Muhammad Hilman Hakim**
NRP : **02311540000120**
Department : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Supervisor : **Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**

Abstract

Traction control on electric vehicles is useful to reduce the symptoms of wheel slip on the road surface. However, the disturbance in the form of drag force and plant errors in the uncertainty of mathematical models can result in failure of the system which disrupts steering stability. This final project proposes a fault tolerant approach based on the scheme of maximum transmissible torque estimation (MTTE) which is used to reduce both of these factors and also to prevent electric vehicles from slipping. PI observers are used to improve steering stability from the MTTE approach. The responses tested were in the form of an open loop system, fault tolerant traction control (FTTC) system, and FTTC with a fault in wheel inertia of $0,3 \text{ Kg.m}^2$, $0,4 \text{ Kg.m}^2$ and $0,5 \text{ Kg.m}^2$. In the FTTC algorithm test, it was found that the FTTC system can reduce the slip ratio by $0,72$ from the open loop system and can overcome errors in wheel inertia.

Keywords : **Fault Tolerant, Traction Control, MTTE**

“Halaman ini memang dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran 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 *FAULT TOLERANT TRACTION CONTROL* PADA MOBIL LISTRIK UNTUK MENGATASI *MODEL UNCERTAINTY*”**.

Penulisan telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Orang tua yang selalu memberikan cinta dan kasih sayang baik secara moril dan materil serta semangat yang tak ada habisnya.
2. 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.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, nasihat, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika – ITS.
5. Sahabat penulis Rifyan Alana yang telah bersedia diajak diskusi dalam pengerjaan tugas-tugas akademik selama kuliah, kerja praktik, hingga tugas akhir.
6. Asisten Laboratorium Fisika Rekayasa angkatan 2017, 2016, 2015, dan 2014 yang sangat berjasa sebagai wadah berkumpul dan berorganisasi, juga memberikan tempat dan fasilitas dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

7. Seluruh teman-teman Teknik Fisika angkatan 2015 yang selalu memberikan dukungan dan bantuan selama pengerjaan Tugas Akhir dan kuliah.
8. Teman seperjuangan pengerjaan TA di laboratorium fisika rekayasa selama semester genap tahun ajaran 2018/2019.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu

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, 9 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
Abstrak.....	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1 Fitur Teknologi Keselamatan Kendaraan.....	5
2.2 <i>Traction Control</i>	10
2.3 <i>Fault Tolerant System</i>	11
2.4 Motor DC	11
2.5 Pemodelan <i>Quarter Car</i>	12
2.6 Pemodelan Aerodinamika Kendaraan	14
2.7 <i>Burckhardt Model</i>	15
2.8 <i>Sensor Hall Effect</i>	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Prosedur Umum Penelitian.....	19
3.2 Pemodelan	19
3.3 Perancangan <i>Traction Control</i>	22
3.4 <i>Maximum Transmissible Torque Estimation</i>	23

3.5 Perancangan <i>Observer</i>	24
3.6 Pengujian Sistem <i>Fault Tolerant Traction Control</i> (FTTC) Untuk Kesalahan Inersia Roda	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Analisa Sistem Open Loop.....	31
4.2 Hasil Estimasi <i>Observer</i>	35
4.3 Respon Sistem FTTC.....	35
4.4 Analisa Sistem <i>Fault Tolerant Traction Control</i> (FTTC) Dengan Kesalahan Pada Inersia Roda.....	40
BAB V PENUTUP	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN A	51
LAMPIRAN B	53
LAMPIRAN C	55
LAMPIRAN D	57
LAMPIRAN E	59
BIODATA PENULIS	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Electronic Stability Control	6
Gambar 2.2	Hill Start Assist	7
Gambar 2.3	Anti-lock Braking System.....	8
Gambar 2.4	Electronic Brake-force Distribution	9
Gambar 2.5	Traction Control	10
Gambar 2.6	Model dinamis gerak longitudinal dari mobil	12
Gambar 2.7	Penampang sensor hall effect pada tooth wheel.	17
Gambar 3.1	Flowchart penelitian	20
Gambar 3.2	Diagram Blok open loop.....	23
Gambar 3.3	PI observer	26
Gambar 3.4	Estimasi disturbance dengan model uncertainty	29
Gambar 3.5	Diagram Blok Fault Tolerant Traction Control..	30
Gambar 4.1	Grafik kecepatan open loop	32
Gambar 4.2	Grafik torsi <i>open loop</i>	33
Gambar 4.3	Grafik slip ratio open loop	34
Gambar 4.4	Perbandingan nilai torsi disturbance aktual dengan estimasi observer.....	36
Gambar 4.5	Grafik perbandingan kecepatan FTTC dengan <i>open loop</i>	37
Gambar 4.6	Grafik perbandingan torsi FTTC dengan <i>open</i> <i>loop</i>	38
Gambar 4.7	Grafik perbandingan <i>slip ratio</i> FTTC dengan <i>open loop</i>	39
Gambar 4.8	Grafik kecepatan dengan kesalahan pada inersia roda.....	41
Gambar 4.9	Grafik torsi dengan kesalahan pada inersia roda	42
Gambar 4.10	Grafik slip ratio dengan kesalahan pada inersia roda.....	43

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Pemodelan Mobil	21
Tabel 3.2	Parameter Kurva Gesekan	22
Tabel 4.1	Perbandingan nilai kecepatan, torsi dan slip ratio dari kesalahan inersia roda	44

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring pesatnya perkembangan teknologi, maka hubungan teknologi pada kehidupan sehari-hari semakin berkaitan dan tidak dapat dipisahkan, termasuk dalam aplikasi bidang kontrol. Bagaimanapun, perangkat hasil teknologi tetap merupakan sebuah alat yang perlu dirawat secara berkala untuk menghindari kerusakan komponen yang terprediksi maupun tidak. Kerusakan ini mungkin hal yang dapat dimaklumi untuk kategori peralatan-peralatan rumah tangga dengan biaya yang relatif terjangkau. Namun, untuk sistem kontrol yang kompleks dengan biaya yang relatif mahal, hal tersebut perlu diperhitungkan.

Mobil listrik ditenagai oleh baterai yang mana bila dioperasikan akan lebih senyap dan lebih bebas polusi, karena kendaraan dapat diisi dengan menggunakan tenaga listrik baik yang dihasilkan dari renewable energy maupun dari PLTU. Walaupun mendapatkan listrik dari PLTU, mobil listrik tetap lebih efisien dikarenakan efisiensi dari power plant lebih baik dari internal combustion engine (Brennan & Barder, 2015). Tidak seperti kendaraan mesin pembakaran internal, kendaraan listrik menggunakan motor yang dilengkapi secara independen untuk menggerakkan roda. Motor yang dilengkapi secara independen memberikan daya yang lebih tinggi, keandalan untuk keselamatan yang lebih baik, dan kinerja dinamis yang lebih baik. Aspek-aspek ini memudahkan untuk memperkirakan kekuatan penggerak atau pengereman antara ban dan permukaan jalan secara real time, yang berpengaruh pada penerapan *traction control* berdasarkan pada estimasi kondisi jalan.

Traction Control adalah mekanisme anti *slip*, dimana ketika kendaraan berakselerasi di jalan yang licin, *traction control* akan

menjamin efektivitas output torsi untuk menjaga stabilitas kendaraan dengan cara melakukan pengereman maupun menurunkan output torsi motor. Gejala roda *slip* ini diakibatkan kondisi ban yang licin, berlumpur, dan inersia roda yang berubah dan berakibat pada penurunan grip antara ban dan bidang jalan. *Traction control* merupakan gambaran dimana fitur keselamatan berkendara yang menggunakan algoritma kompleks dan harga relatif mahal, dimana komponen ini umumnya terintegrasi dengan sistem *anti-lock braking system* (ABS) sehingga membutuhkan *repair cost* yang besar (YourMechanic, 2019).

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan diajukan mengenai penelitian terhadap kesalahan kontrol traksi ban yang disebabkan oleh kesalahan inersia roda sehingga akan didapatkan sistem *traction control* yang adaptif terhadap kondisi dilapangan pada seperempat mobil listrik (*quarter electric vehicle*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dapat diperoleh rumusan masalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang *Traction Control* untuk mengendalikan output motor DC.
- b. Bagaimana merancang *Fault Tolerant Traction Control* untuk mengatasi kesalahan pada inersia roda.
- c. Bagaimana kinerja dari *Fault Tolerant Traction Control*.

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Merancang *Traction Control* untuk mengendalikan output motor DC.

- b. Merancang *Fault Tolerant Traction Control* untuk mengatasi kesalahan pada inersia roda.
- c. Menganalisa kinerja dari *Fault Tolerant Traction Control*.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari luasnya permasalahan yang dapat muncul pada saat penelitian berlangsung, maka pada tugas akhir ini ditentukan batasan permasalahan sebagai berikut.

- a. Kendaraan yang digunakan adalah *quarter car* (satu roda).
- b. Kesalahan yang digunakan adalah kesalahan inersia roda.
- c. Sistem yang dibuat merupakan hubungan antara input pedal gas dengan torsi yang dihasilkan.
- d. Input pedal gas konstan.
- e. Kendaraan diasumsikan berada pada lintasan lurus dikondisi jalan aspal, datar, dan tidak bergelombang. Kemudian terjadi perubahan kondisi jalan menjadi licin selama 2 detik.
- f. Aktuator diasumsikan memiliki respon instan.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Fitur Teknologi Keselamatan Kendaraan

Fitur Teknologi Keselamatan Kendaraan dalam industri otomotif mengacu pada teknologi khusus yang dikembangkan untuk memastikan keselamatan dan keamanan mobil dan penumpang. Istilah ini mencakup banyak proyek dan perangkat di dunia otomotif. Contoh penting termasuk perangkat komunikasi mobil-ke-komputer yang memanfaatkan fitur pelacakan GPS, kemampuan *geo-fencing*, penginderaan kecepatan jarak jauh, pencegahan kerusakan, mitigasi kerusakan, dan komunikasi kendaraan ke kendaraan. (National Highway Traffic Safety Administration, 2019)

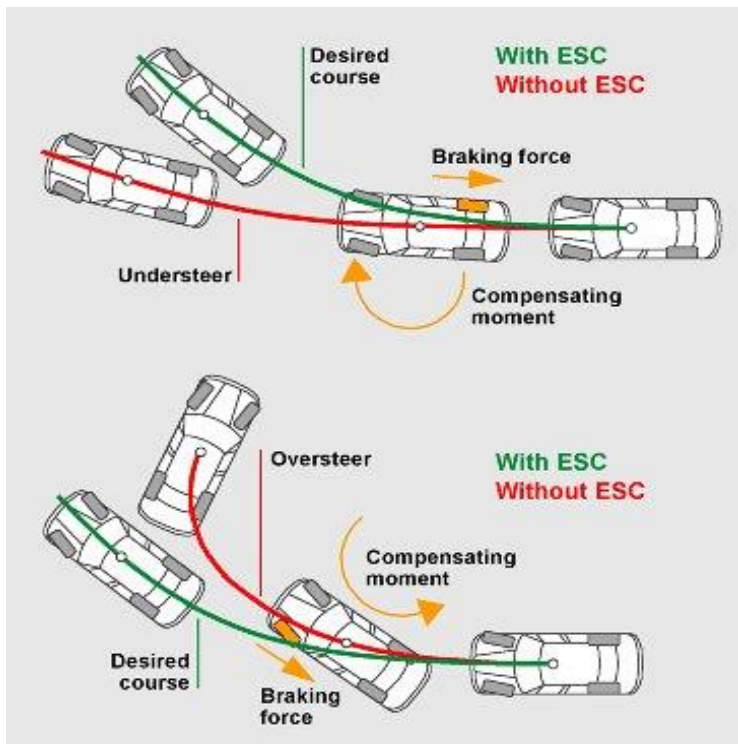
Pendekatan ilmiah untuk keselamatan kendaraan dimulai pada tahun 1934 ketika General Motors melakukan uji tabrakan kecelakaan pertama. Secara bertahap, sistem yang ada distabilkan diikuti dengan pengenalan rem cakram dan sistem *anti-lock braking system (ABS)*. Pengenalan sistem keamanan *hi-tech* dimulai pada tahun 1995 dengan *Electronic Stability Control (ESC)*, *Lane Departure Warning System* pada tahun 1999 dan *Radar Assisted Adaptive Cruise Control* diperkenalkan pada 2005. Dari sanalah teknologi keamanan berkembang hingga saat ini. (National Highway Traffic Safety Administration, 2019)

Adapun macam-macam teknologi keselamatan kendaraan antara lain (National Highway Traffic Safety Administration, 2019):

- Electronic Stability Control
- Hill Start Assist
- Anti-lock Braking System
- Electronic Brake force Distribution
- Traction Control

2.1.1. Electronic Stability Control

Electronic stability control (ESC) adalah teknologi yang meningkatkan stabilitas kendaraan dengan mendeteksi dan mengurangi kehilangan traksi (gaya gesek antara dua permukaan). Ketika ESC mendeteksi hilangnya kontrol kemudi, rem secara otomatis aktif untuk membantu "mengarahkan" kendaraan ke mana pengemudi ingin pergi. Dari Gambar 2.1, pengereman secara otomatis diterapkan ke roda secara individual, seperti roda depan luar untuk melawan *oversteer*, atau roda belakang bagian dalam untuk melawan *understeer* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1.

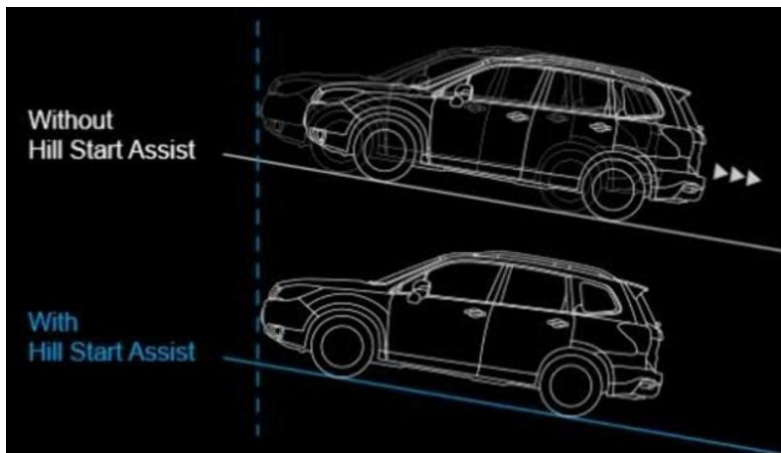


Gambar 2.1 *Electronic Stability Control* (Jeremy, 2017)

Beberapa sistem ESC juga mengurangi daya mesin hingga kendali pulih kembali. ESC tidak meningkatkan kinerja *cornering* kendaraan, melainkan membantu meminimalkan kehilangan control. (Liebemann, Meder, Schuh, & Nenninger, 2004)

2.1.2. Hill Start Assist

Fitur *Hill Start Assist* (HSA) dapat mencegah *rollback* kendaraan pada saat tanjakan dengan menahan rem saat pengendara beralih pijakan antara pedal rem dan pedal gas seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.2.

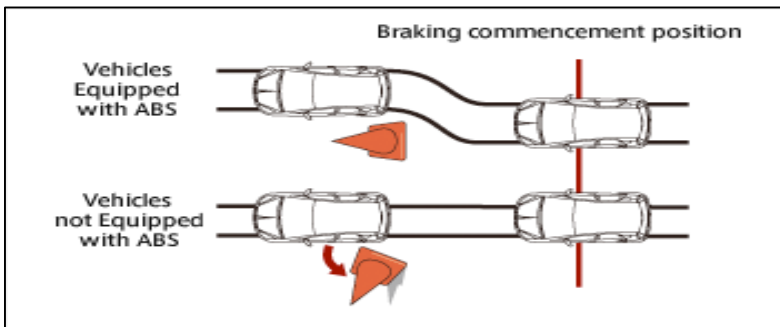


Gambar 2.2 *Hill Start Assist* (Sudjatmiko, 2019)

Beberapa versi juga dapat mencegah mobil terguling ke depan saat menurun. Sensor dalam kendaraan digunakan untuk mendeteksi ketika kendaraan berada di tanjakan. Setelah pengendara menekan pedal gas, rem akan terlepas. Pada mobil dengan transmisi manual yang memiliki fitur HSA, fitur *hill start assist* akan mempertahankan tekanan rem hingga pengemudi memiliki waktu untuk memindahkan kopling dan menekan pedal gas. (National Safety Council, 2019)

2.1.3. Anti-lock Braking System

Anti-lock Braking System (ABS) adalah fitur keselamatan sistem pengereman anti *slip* yang digunakan pada berbagai kendaraan mulai dari pesawat hingga kendaraan darat seperti mobil, motor, truk, dan bus. ABS beroperasi dengan mencegah roda mengunci selama pengereman, sehingga menjaga traksi antara roda dengan permukaan jalan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Anti-lock Braking System (Bulgaria Mitsubishi Motors, 2019)*

ABS adalah sistem otomatis yang menggunakan prinsip-prinsip pengereman ambang batas dan pengereman irama, teknik yang pernah dipraktikkan oleh pengemudi yang mahir sebelum sistem pengereman ABS tersebar luas dimana pengemudi menekan secara berkala rem kendaraan. Sejak ABS diperkenalkan di kendaraan komersil, sistem seperti itu menjadi semakin canggih dan efektif. Versi modern mungkin tidak hanya mencegah roda mengunci saat pengereman, tetapi juga dapat mengubah bias rem dari depan ke belakang (Heißing & Bernd, 2011).

2.1.4. Electronic Brake-force Distribution

Electronic Brake-force Distribution adalah teknologi yang mengkombinasikan antara teknologi elektronik dan hidrolis dengan memvariasikan distribusi tekanan yang diterapkan pada sistem pengereman di setiap roda, baik roda depan maupun belakang untuk memberikan kinerja pengereman yang lebih kuat dan lebih aman dalam situasi darurat, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4.

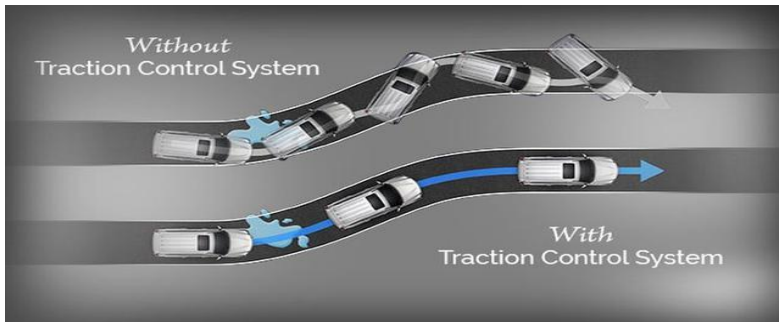


Gambar 2.4 *Electronic Brake-force Distribution* (Chriss, 2019)

EBD adalah bagian dari rangkaian teknologi pengereman dan stabilitas kendaraan yang terintegrasi agar tidak hanya memaksimalkan kinerja pengereman, tetapi juga untuk memastikan mobil tidak lepas kendali karena kehilangan traksi. EBD umumnya diaplikasikan berupa sub-sistem utama dari teknologi *anti lock braking system* (ABS) dan *electronic stability control* (ESC) (Iain, 2018).

2.2 Traction Control

Traction Control adalah mekanisme anti slip, dimana ketika kendaraan berakselerasi di jalan yang licin, *traction control* akan menjamin efektivitas output torsi untuk menjaga stabilitas kendaraan dengan cara melakukan pengereman maupun menurunkan output torsi motor seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.5. Selain itu, sistem *traction control* umumnya terintegrasi dengan fungsi ABS, namun pada kendaraan listrik dapat dihubungkan dengan motor, karena motor dapat menghasilkan torsi *deceleration* dan *acceleration* dengan cara yang mirip (Mutoh, Hayano, Yahagi, & Takita, 2007).



Gambar 2.5 *Traction Control (How Mechanism Works, 2018)*

Namun di lapangan, sistem kendaraan sebenarnya membatasi pengembangan *traction control*. Seperti gaya gesek roda dan *drag force* udara yang variatif (Baffet, Charara, & Lechner, 2009). Secara umum, sistem *traction control* mengetahui kecepatan *chasis* dari kecepatan roda yang tidak digerakkan sehingga dapat memberikan perkiraan kecepatan kendaraan yang mudah dan ekonomis.

2.3 *Fault Tolerant System*

Fault Tolerant System adalah sistem yang memiliki kemampuan bawaan (tanpa bantuan eksternal) untuk menjaga kelanjutan pelaksanaan program dan fungsi input / output (I / O) yang benar meskipun ada serangkaian kesalahan perangkat operasional. Kesalahan operasional merupakan sebuah *disturbance* dalam nilai satu atau lebih variabel logika pada *hardware* sistem, yang merupakan konsekuensi langsung dari peristiwa kegagalan *hardware* yang terjadi.

Peristiwa dapat berupa kegagalan komponen permanen, kerusakan komponen sementara (intermiten), atau gangguan yang berasal dari luar dengan pengoperasian sistem. "Eksekusi yang benar" berarti bahwa program, data, dan hasil tidak mengandung kesalahan, dan bahwa waktu eksekusi tidak melebihi batas yang ditentukan.

2.4 **Motor DC**

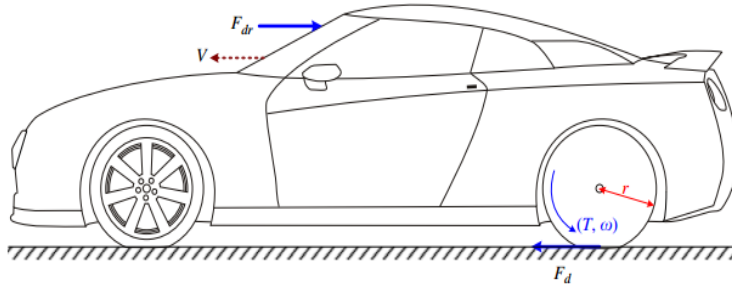
Pada kendaraan listrik, motor DC yang umum digunakan yaitu motor DC *permanent magnet synchronous motor* (PMSM). PMSM terdiri dari satu stator dan satu rotor, di mana struktur lilitan stator dibangun sedemikian rupa untuk menghasilkan kerapatan fluks sinusoidal di celah udara mesin. Namun, struktur rotor mirip dengan motor BLDC, yang berisi motor magnet permanen. Pada PMSM terdapat converter yang berfungsi untuk mengubah arus AC yang berasal dari putaran pada generator menjadi DC untuk kemudian diarahkan ke baterai. Umumnya PMSM memiliki *reduction gear* agar putaran rotor dari PMSM memiliki rasio yang sesuai dengan putaran roda agar tidak tergelincir pada saat mobil berjalan.

Pada saat pengereman *regenerative*, motor akan bekerja berkebalikan dan menjadi generator untuk menghasilkan listrik. Gaya elektrik yang dihasilkan, bergantung

pada besarnya kecepatan angular motor saat terjadi proses pengereman. Karena percepatan putaran motor berpengaruh pada pengereman kendaraan listrik yang bekerja bersamaan dengan pengereman *hydraulic*.

2.5 Pemodelan *Quarter Car*

Pemodelan yang digunakan adalah pemodelan *quarter car* yang artinya roda yang digunakan hanyalah satu untuk mewakili roda lainnya. Pada pemodelan dinamik gerak longitudinal kendaraan untuk sistem *traction control* pada *quarter car model*, digunakan Hukum Newton II. Persamaan (2.1) menunjukkan Hukum Newton II yang menyatakan bahwa benda selalu berbanding lurus dengan gaya yang bekerja pada suatu benda dan berbanding terbalik dengan massa benda. Gaya-gaya yang bekerja pada sistem *traction control* ditunjukkan dengan Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Model dinamis gerak longitudinal dari mobil (Hu, Yin, & Hori, 2010)

Gaya-gaya yang bekerja pada bidang mobil antara lain, gaya *driving resistance* (F_{dr}), torsi yang dihasilkan motor (T), dan gaya friksi pada roda (F_d). Persamaan gaya yang terjadi ditunjukkan dengan Persamaan (2.1), (2.2) dan (2.3). (Hu, Yin, & Hori, 2010).

$$m \cdot a = \Sigma F \quad (2.1)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_d - F_{dr} \quad (2.2)$$

Roda berfungsi untuk menghubungkan torsi eksternal dengan gerakan longitudinal kendaraan. Pada saat proses pengereman secara mendadak, maka diperoleh kecepatan tangensial permukaan roda dan kecepatan pada permukaan jalan yang berbeda sehingga terjadi slip atau tergelincir.

Model gerak rotasi roda diberikan oleh Persamaan:

$$T - T_d = J_w \frac{d\omega}{dt} \quad (2.3)$$

$$V_w = r\omega \quad (2.4)$$

Dimana :

r = jari-jari roda

T = torsi

J_w = momen inersia

V_w = kecepatan roda

ω = kecepatan angular roda

Dengan nilai gaya yang bekerja pada *quarter car model* antara lain sebagai berikut.

$$F_d = \mu \cdot N = m \cdot g \quad (2.5)$$

Dimana :

m = Massa kendaraan *quarter car model* (kg)

g = Gaya gravitasi (m/s^2)

N = Gaya normal (N)

μ = Koefisien gesekan antara roda dengan jalan dari gaya pengereman

Persamaan *transfer function* didapat dari Persamaan (2.3) dan (2.4), yaitu

$$\frac{J_w \dot{V}_w}{r} = T - T_d \quad (2.6)$$

atau bila disusun ulang menjadi

$$V_{w(s)} \left(\frac{J_w s}{r} \right) = T_{applied(s)} \quad (2.7)$$

$$\frac{V_{w(s)}}{T_{applied(s)}} = \frac{r}{J_w s} \quad (2.8)$$

Dimana gaya friksi antara roda dan permukaan jalan dapat dikalkulasi dengan

$$F_d = \frac{T}{r} - \frac{J_w \dot{V}_w}{r^2} \quad (2.9)$$

2.6 Pemodelan Aerodinamika Kendaraan

Fluida dicirikan sebagai material yang tidak dapat menahan *drag force* untuk waktu yang cukup lama, sehingga fluida cenderung mudah dipengaruhi oleh gaya yang bekerja pada fluida tersebut. Hal ini membuat fluida sulit dipegang tetapi mudah dituangkan, diaduk, dan disebar. Fluida tidak memiliki bentuk yang pasti tetapi mengambil bentuk wadahnya. Fluida menghasilkan ruang yang relatif mudah untuk materi lainnya mengisi celah celah antar partikel fluida jika dibandingkan dengan padatan, dimana hal ini bergantung pada besarnya massa jenis dari fluida (The Physics Hypertextbook, 2019)

Sehingga dari pengertian tersebut, sisi aerodinamis dari kendaraan perlu diperhatikan, dimulai dengan Persamaan Bernoulli.

$$P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.10)$$

Persamaan Bernoulli menjelaskan tentang gaya yang terjadi pada fluida bergerak yang tiap titiknya memiliki nilai penjumlahan yang sama, yang dipengaruhi oleh posisi, energi potensial dan

energi kinetik dari fluida yang ditinjau. Karena pada tugas akhir ini *drag force* yang ditinjau secara horizontal, maka yang berpengaruh hanya energi kinetik dari fluida sehingga didapat Persamaan.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.11)$$

Kemudian definisi dari tekanan adalah gaya per area yang tertekan, sehingga.

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

$$F = P \times A \quad (2.13)$$

Pada *drag force*, $F = F_d$ dan dengan mensubstitusikan Persamaan (2.11) ke Persamaan (2.13), maka.

$$F_d = P \times A = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \times A \quad (2.14)$$

Karena *drag force* dipengaruhi oleh bentuk, tekstur, viskositas dan lainnya. Maka ditetapkan konstanta C untuk menentukan koefisien *drag force*-nya, sehingga Persamaan (2.14) menjadi.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \times A \times C \quad (2.15)$$

2.7 Burckhardt Model

Burckhardt model adalah representasi dari gaya yang dihasilkan oleh ban sebagai akibat dari interaksi antara ban dengan jalan yang kurang tepat. Seperti ketika ban disetir sedikit ke kanan atau ke kiri, maka hal ini merupakan input berupa sudut slip dalam *burckhardt model* yang memberikan gaya menyamping. Kemudian bila menekan pedal gas dan roda mulai berputar sedikit, hal ini memberikan input rasio kecepatan putaran roda yang berbeda dengan kecepatan gerak, yang memberikan gaya ke depan (longitudinal) pada kendaraan. (Oudghiri, Chadli, & Hajjaji, 2007)

Adapun Persamaan yang menghubungkan antara $\mu - \lambda$ yang terdapat pada *burckhardt model* yaitu

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.16)$$

Dimana :

μ = Koefisien gesekan antara roda dengan jalan dari gaya pengereman

λ = *Slip ratio*

v = Kecepatan *chasis* (m/s)

C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan

C_2 = Koefisien bentuk kurva gesekan

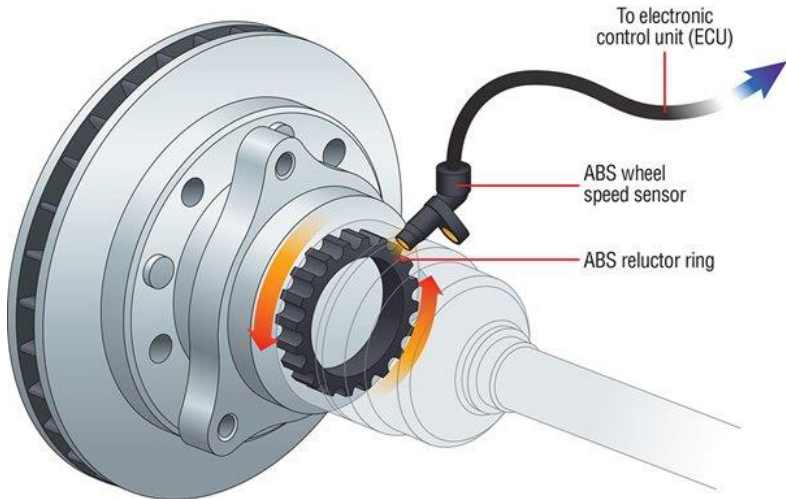
C_3 = Perbedaan kurva gesekan pada $\lambda = 1$

C_4 = Nilai Karakteristik kebasahan

2.8 Sensor *Hall Effect*

Sistem keamanan pada kendaraan bermotor sangat penting untuk keamanan pengemudi serta penumpang. Salah satu komponen penting untuk menjaga keamanan pada kendaraan adalah sensor. Sensor kecepatan roda adalah salah satu pendukung keselamatan yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi pada sistem kontrol kendaraan.

Sensor kecepatan roda yang digunakan adalah sensor *Effect Hall*. Sensor ini dipasang langsung diatas roda yang terhubung dengan poros penggerak atau hub roda seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.7. Pin kutub (utara dan selatan) di dalam koil dihubungkan dengan medan magnet yang terhubung dengan roda. Gerakan rotasi pada roda serta pergantian gigi mempengaruhi perubahan fluks magnetic. Medan magnet yang berubah menginduksi tegangan pada koil yang diukur. Frekuensi dan amplitude tegangan bolak balik yang dihasilkan berhubungan dengan kecepatan roda.



Gambar 2.7 Penampang sensor hall effect pada tooth wheel
(*Graeme, Matt, & Siti, 2019*)

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

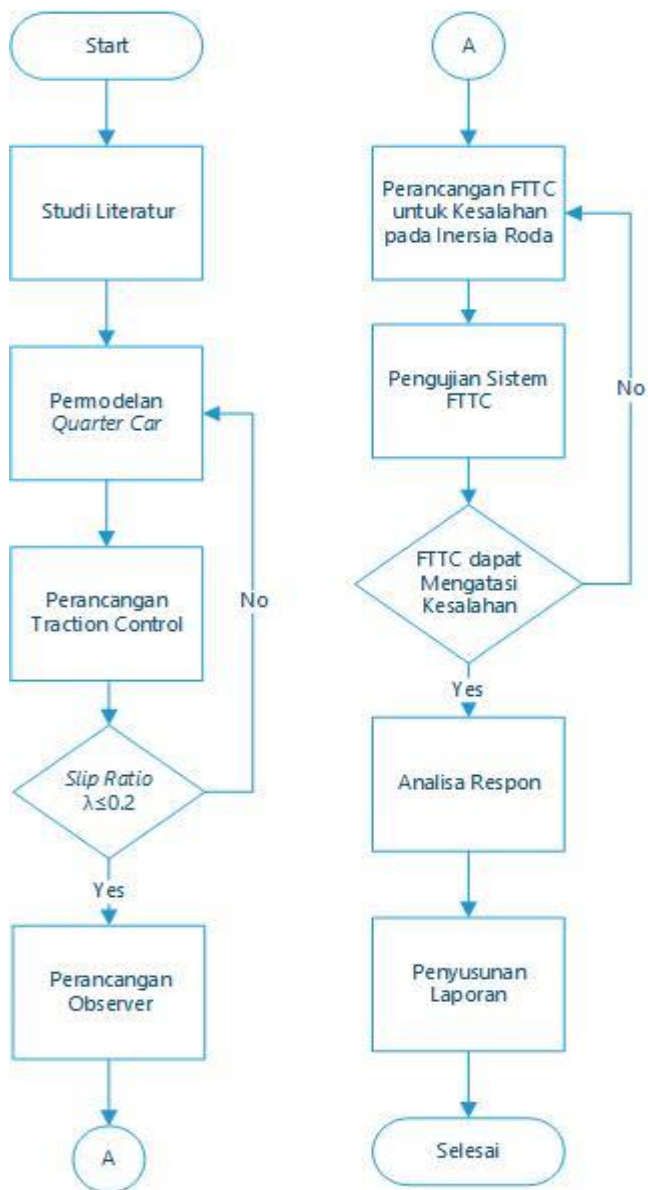
3.1 Prosedur Umum Penelitian

Metodologi untuk mencapai tujuan tugas akhir ini dijabarkan melalui *flowchart* pada Gambar 3.1 yang menjelaskan tahap tahap dari tugas akhir ini. Pada tahap pertama dilakukan proses studi literatur berdasarkan tema tugas akhir ini yaitu mengenai sistem pengendali traksi pada kendaraan listrik berdasarkan pada buku, jurnal, dan penelitian yang telah dilakukan mengenai kontrol traksi pada mobil listrik khususnya mengenai *traction control*, *maximum transmissible torque estimation* (MTTE), dan *fault tolerant control*.

Pada langkah selanjutnya dilakukan pemodelan dari kendaraan listrik dengan pendekatan *quarter model car* serta perancangan *fault tolerant traction control*-nya untuk kemudian dilakukan simulasi pada Simulink Matlab R2016a. Pada simulasi sistem pengendalian *traction control*, digunakan *closed loop observer* dengan *compensator* proporsional integral (PI). Kesalahan yang diberikan pada sistem ini berupa kesalahan inersia roda sebesar $0,3 \text{ Kg.m}^2$, $0,4 \text{ Kg.m}^2$, dan $0,5 \text{ Kg.m}^2$. Perancangan pada *observer* dilakukan dengan representasi dari *plant* sesungguhnya yang diharapkan dapat menjadi kompensasi apabila terjadi kesalahan pada inersia roda.

3.2 Pemodelan

Pemodelan sistem dinamik pada kendaraan roda empat, umumnya dibagi menjadi tiga jenis pemodelan yaitu *quarter car*, *half car* dan *full car model*. Pada penelitian ini jenis pemodelan yang digunakan adalah jenis pendekatan *quarter car model*.



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

Quarter car model adalah pemodelan yang dilakukan disalah satu roda pada mobil. Selain memodelkan kendaraan dengan pendekatan *quarter car model*, pemodelan juga meliputi pemodelan aerodinamik. Persamaan matematis dapat dilihat pada Persamaan (2.1) dan (2.2) yang membahas hukum Newton ke-2, pemodelan roda dan gaya gesek roda yang dibahas pada Persamaan (2.3) sampai (2.9), dan pemodelan aerodinamik pada Persamaan (2.10) hingga (2.15).

Adapun nilai parameter yang bekerja pada sistem terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Pemodelan Mobil (*Hu, Yin, & Hori, 2010*)

Parameter	Deskripsi	Nilai
M	Massa Mobil	360 kg
Jw	Inersia Roda	0.5 kg.m ²
r	Radius	0.22 m
ρ	Massa Jenis Udara	1.225 kg/m ³
A	Luas Permukaan	2.58741 m ²
C	<i>Drag Coefficient</i>	0.25
L	Delay Time	0.02 s

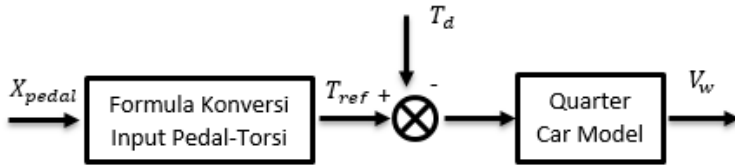
Dengan perbedaan nilai parameter gesekan antara roda dengan permukaan jalan yaitu nilai $C_1 - C_4$ digunakan untuk kondisi aspal kering, dan nilai $C_5 - C_8$ digunakan untuk kondisi jalan licin. Parameter gesekan pada Tabel 3.2 digunakan pada Persamaan (2.15) untuk mencari nilai koefisien gesekan μ dari nilai *slip ratio* λ .

Tabel 3.2 Parameter Kurva Gesekan (*Guo, Jian, & Lin, 2014*)

Parameter	Deskripsi	Nilai
C ₁	Nilai maksimal kurva gesekan (aspal kering)	1.029
C ₂	Bentuk kurva gesekan (aspal kering)	17.16
C ₃	Perbedaan kurva gesekan pada $\lambda = 1$ (aspal kering)	0.523
C ₄	Nilai karakteristik kebasahan (aspal kering)	0.03
C ₅	Nilai maksimal kurva gesekan permukaan licin	1.029
C ₆	Bentuk kurva gesekan permukaan licin	17.16
C ₇	Perbedaan kurva gesekan pada $\lambda = 1$ permukaan licin	0.523
C ₈	Nilai karakteristik kebasahan permukaan licin	0.03

3.3 Perancangan *Traction Control*

Dalam merancang *traction control*, pertama-tama perlu dilakukan perancangan sistem dengan *loop* terbuka seperti diilustrasikan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Diagram Blok *open loop*

Dimana $T_{ref} = \text{Gain Konversi Pedal_Torsi} \times X_{pedal}$. Setelah *traction control* dimodelkan, kemudian dilakukan perancangan *observer* agar didapat *feedback* berupa T_{max} yang digunakan untuk membatasi torsi yang disalurkan ke roda.

3.4 Maximum Transmissible Torque Estimation

Maximum Transmissible Torque Estimation (MTTE) adalah estimasi jumlah torsi maksimum yang dapat ditransmisikan berdasarkan hasil estimasi *observer*, dalam tugas akhir ini yaitu berdasarkan estimasi nilai gaya friksi \hat{F}_d . (Hu, Yin, & Hori, 2010)

Dalam kondisi jalan normal, nilai F_d akan kurang dari gaya gesek maksimum jalan dan meningkat ketika T naik. Namun, ketika *slip* terjadi, F_d tidak dapat meningkat dengan kenaikan T . Dengan demikian, ketika *slip* terjadi, perbedaan antara kecepatan roda dan *chassis* menjadi lebih besar yang berhubungan dengan percepatan roda yang lebih besar daripada percepatan *chassis* (koefisien α mengecil). Selain itu, mengacu hubungan $\mu - \lambda$ yang dijelaskan dalam *burckhardt model*, perbedaan yang tepat antara kecepatan *chassis* dan kecepatan roda diperlukan untuk mengetahui gaya gesekan. Maka, dari Persamaan (2.2) dan (2.7) didapat

$$\alpha = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_w} = \frac{(F_d - F_{dr})/M}{(T_{max} - rF_d)r/J_w} \quad (3.1)$$

dengan T_{max} merupakan torsi maksimum yang dapat disalurkan. Untuk memastikan bahwa *slip* tidak terjadi, nilai α (perbandingan

antara percepatan *chasis* dengan percepatan roda) harus mendekati 1. Sehingga dengan nilai α yang sudah diatur yaitu mendekati 1, nilai T_{max} akan berkurang mengikuti nilai F_d . Karena nilai $F_d - F_{dr}$ dapat diestimasi (\hat{F}_d), maka T_{max} dapat diformulasikan menjadi

$$\frac{\hat{F}_d}{M} = \frac{(T_{max} - r\hat{F}_d)r\alpha}{J_w} \quad (3.2)$$

dimana bila disusun ulang menjadi

$$T_{max} = \frac{\hat{F}_d J_w}{\alpha M r} + r\hat{F}_d \quad (3.3)$$

$$T_{max} = \left(\frac{J_w}{\alpha M r^2} + 1 \right) r\hat{F}_d \quad (3.4)$$

3.5 Perancangan *Observer*

Dalam tugas akhir ini, akan digunakan *PI-type disturbance observer* dalam skema MTTE untuk meningkatkan kinerja anti-slip. Untuk menganalisis kinerja *observer* PI ke dalam bentuk umum, maka *PI-type disturbance estimator* akan diformulasikan dalam bentuk *state space* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.

Dari Persamaan *plant* (2.3), didapatkan Persamaan *state space* berikut

$$x_1 = y \quad (3.5)$$

$$x_2 = \dot{y} \quad (3.6)$$

kemudian didapatkan

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.7)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{y} = \frac{r}{J_w} T - \frac{r}{J_w} T_d \quad (3.8)$$

dimana Persamaan *output* dari sistem yaitu

$$y = x_1 \quad (3.9)$$

Dalam bentuk *vector-matrix*, Persamaan (3.7) dan (3.8) dapat dituliskan menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ J_w \end{bmatrix} T + \begin{bmatrix} 0 \\ -r \\ J_w \end{bmatrix} T_d \quad (3.10)$$

Dengan Persamaan *output* (3.9) dapat dituliskan menjadi

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Dengan mempertimbangkan realisasi *state space* dari *plant quarter car* $G(s)$

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_d T_d \quad (3.12)$$

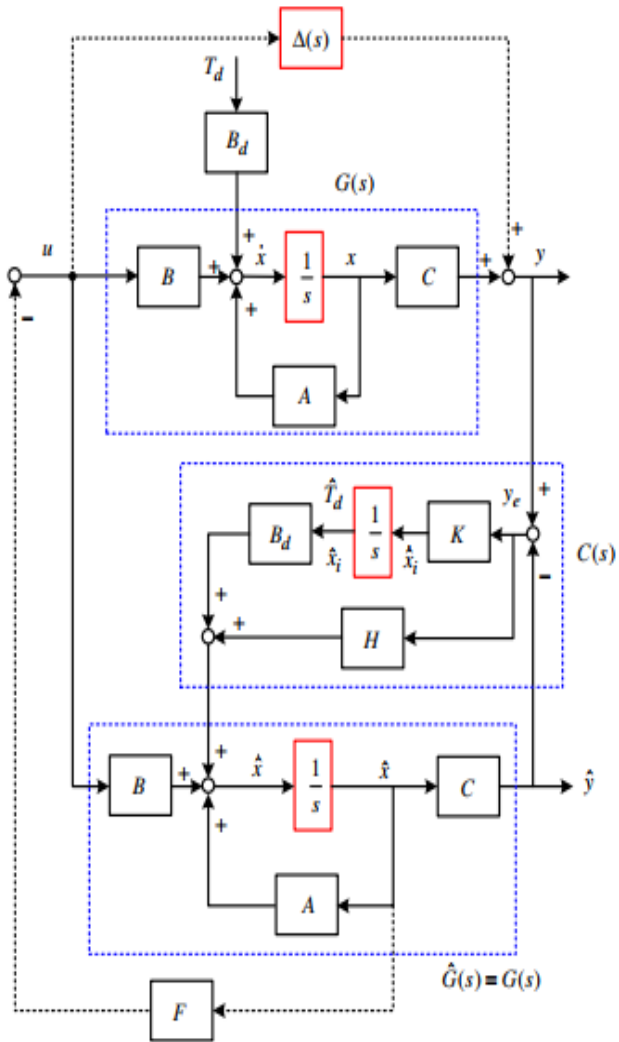
$$y = Cx \quad (3.13)$$

dengan

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ J_w \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -r \\ J_w \end{bmatrix}, C = [1 \ 0] \quad (3.14)$$

Dimana $x \in \mathbb{R}^n$ merupakan *internal state*, input $u \in \mathbb{R}^r$, output $y \in \mathbb{R}^m$, dan juga $T_d \in \mathbb{R}^p$ merupakan *external disturbance*. Diasumsikan bahwa semua kondisi *state* awal adalah 0 dan $B_d \in \mathbb{R}^{n \times p}$ adalah *full column rank* sehingga

$$p \leq m \quad (3.15)$$



Gambar 3.3 PI observer (Hu, Yin, & Hori, 2010)

Persamaan nominal *full order PI observer* pada Gambar 3.3 yaitu *estimator* $\hat{G}(s)$ dan kompensator $C(s)$

$$\dot{\hat{x}} = (A - HC)\hat{x} + B_d\hat{x}_i + Bu + Hy_e \quad (3.16)$$

$$\dot{\hat{x}}_i = -KC\hat{x} + Ky \quad (3.17)$$

$$\hat{T}_d = \hat{x}_i \quad (3.18)$$

Dimana $H \in \mathbb{R}^{n \times m}$ dan $K \in \mathbb{R}^{p \times m}$ merupakan *gain observer*, maka

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{x}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ HC & A - HC & B_d \\ KC & -KC & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & B_d \\ B & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ T_d \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\hat{T}_d = [0 \ 0 \ I_p] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x}_i \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Didefinisikan $x_e = \hat{x} - x$ dan $\hat{x}_i = \hat{T}_d$. Dengan asumsi bahwa tidak ada *disturbance* yaitu $T_d = 0$. Maka dari Persamaan (3.12) hingga (3.18) didapat

$$\dot{x}_e = \dot{\hat{x}} - \dot{x} = (A - HC)x_e + B_d\hat{T}_d \quad (3.21)$$

dan

$$\dot{\hat{x}}_i = \dot{\hat{T}}_d = -KCx_e \quad (3.22)$$

Kemudian Persamaan (3.21) dan (3.22) ditransformasi laplace untuk mendapatkan

$$\hat{x} - x = [sI_n - (A - HC)]^{-1} B_d \hat{T}_d \quad (3.23)$$

$$\hat{T}_d = -(sI_p)^{-1} KC(\hat{x} - x) \quad (3.24)$$

Diasumsikan bahwa *proportional gain* H dari *observer* dipilih sedemikian rupa sehingga $A - HC$ adalah matriks Hurwitz dan *integrator gain* K dipilih sedemikian rupa agar KC menjadi matriks *full row rank*. Substitusikan Persamaan (3.24) ke (3.23), didapat

$$\left\{ I_n + [sI_n - (A - HC)]^{-1} B_d (sI_p)^{-1} KC \right\} \hat{x} = \left\{ I_n + [sI_n - (A - HC)]^{-1} B_d (sI_p)^{-1} KC \right\} x \quad (3.25)$$

Dengan pertimbangan bahwa *PI observer* dengan *disturbance* $T_d \neq 0$. Dari Persamaan (3.12) hingga (3.18) didapat

$$\dot{x}_e = \hat{x} - \dot{x} = (A - HC)x_e + B_d(\hat{T}_d - T_d) \quad (3.26)$$

atau bila disusun ulang menjadi

$$\hat{x} = x + [sI_n - (A - HC)]^{-1} B_d(\hat{T}_d - T_d) \quad (3.27)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (3.24) ke (3.27), didapatkan Persamaan

$$\hat{T}_d = \{sI_p - KC[sI_n - (A - HC)]^{-1} B_d^{-1}\} KC[sI_n - (A - HC)]^{-1} B_d T_d \quad (3.28)$$

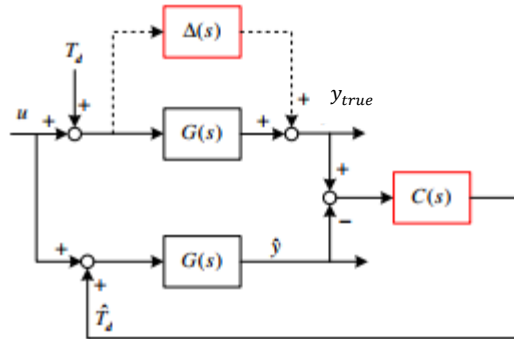
dengan definisi

$$A_x = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_x = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, H_x = \begin{bmatrix} H \\ K \end{bmatrix}, C_x = [C \ 0], \\ F_x = [F \ 0] \quad (3.29)$$

Persamaan *observer* kemudian dapat direpresentasikan menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{x}}_i \end{bmatrix} = A_x \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x}_i \end{bmatrix} + B_x u + H_x (y - C_x \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{x}_i \end{bmatrix}) \quad (3.30)$$

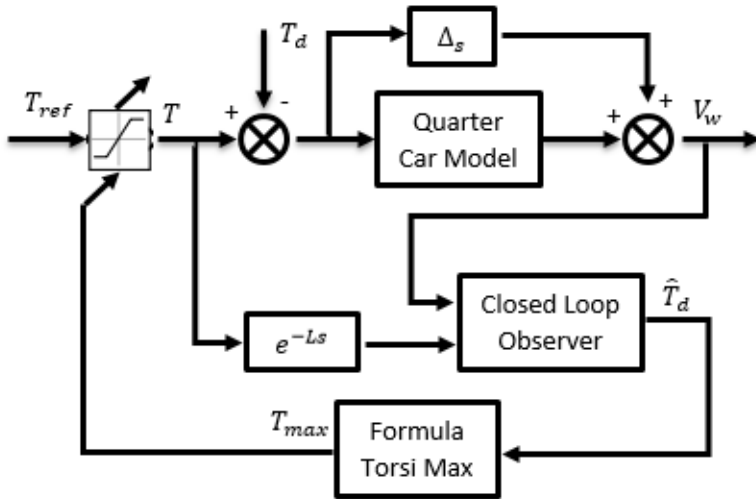
Kemudian observer pada Gambar 3.3 dapat disederhanakan menjadi seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Estimasi *disturbance* dengan *model uncertainty* (Hu, Yin, & Hori, 2010)

3.6 Pengujian Sistem *Fault Tolerant Traction Control* (FTTC) Untuk Kesalahan Inersia Roda

Pengujian sistem *FTTC* bertujuan agar dapat mengetahui sistem yang telah dirancang mampu untuk mengatasi dan mengkompensasi kesalahan bias dan sensitivitas pada sensor. Pengujian dilakukan dengan medan jalan aspal kering dimana pada detik 5-7 diberikan kondisi jalan licin seperti pada Tabel 3.2 untuk mengetahui pengaruh *traction control*. Selanjutnya, dilakukan pengujian respon dengan pemberian nilai kesalahan pada inersia roda sebesar 0,3 Kg.m², 0,4 Kg.m², dan 0,5 Kg.m². Adapun diagram blok dari sistem *FTTC* diilustrasikan seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram Blok *Fault Tolerant Traction Control*

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV berisi tentang penjelasan hasil dari perancangan *Fault Tolerant Traction Control* pada sistem pengendalian torsi kendaraan listrik yang telah dilakukan. Pengujian dilakukan dengan medan jalan aspal kering dimana pada detik 5-7 diberikan kondisi jalan licin seperti pada Tabel 3.2 untuk mengetahui pengaruh *traction control*. Selanjutnya, dilakukan pengujian respon dari pemberian nilai kesalahan pada inersia roda.

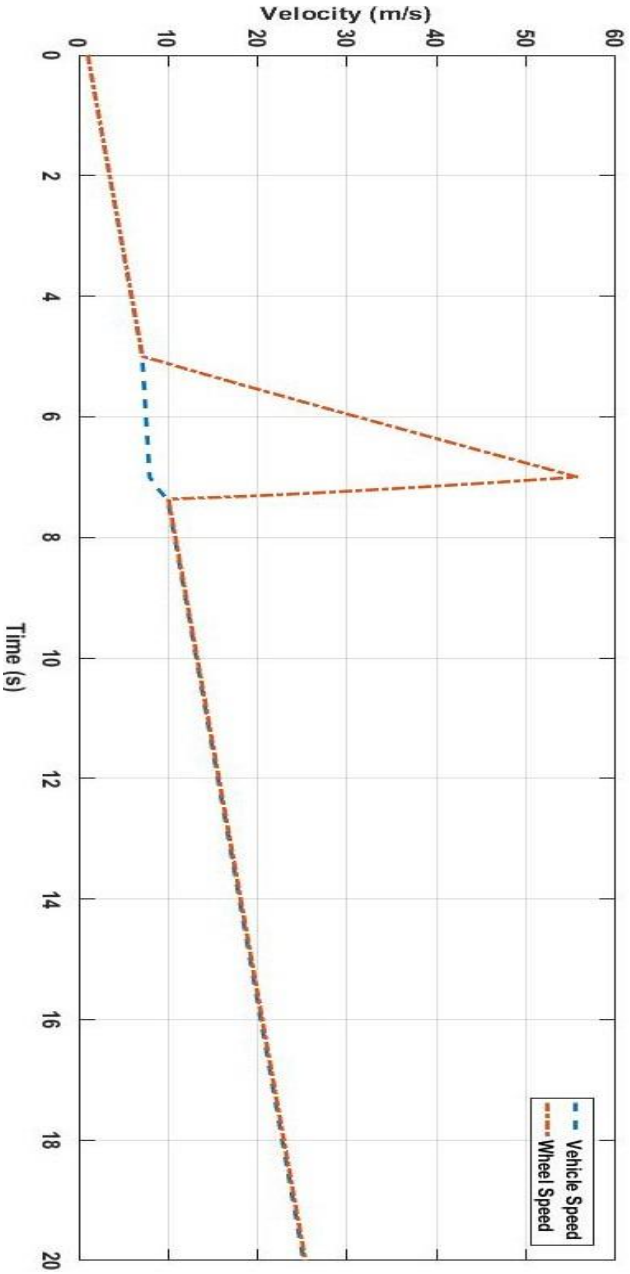
4.1 Analisa Sistem Open Loop

Uji *open loop* dibuat menggunakan *simulink Matlab R2016b*. Pengujian ini dilakukan untuk meninjau respon *slip ratio*, kecepatan dan torsi yang dihasilkan dari sistem *open loop*.

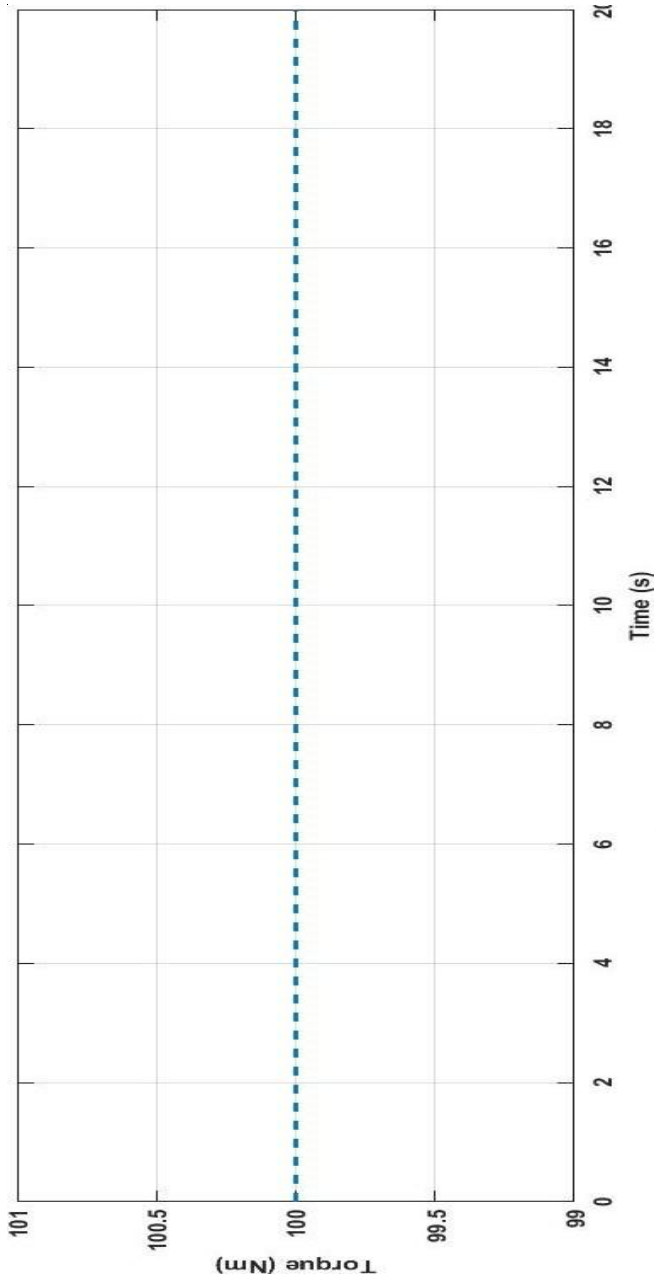
Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa kecepatan roda dengan sistem *open loop* terlihat membesar bila dibandingkan dengan kecepatan *chasis* pada detik 5-7 dimana diberikan kondisi jalan licin.

Hal ini dikarenakan torsi pada Gambar 4.2 konstan yang menyebabkan kecepatan roda tak terkendali dan terus naik pada saat kondisi jalan licin, sedangkan kecepatan *chasis* cenderung tidak bertambah dikarenakan terjadinya *slip* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.

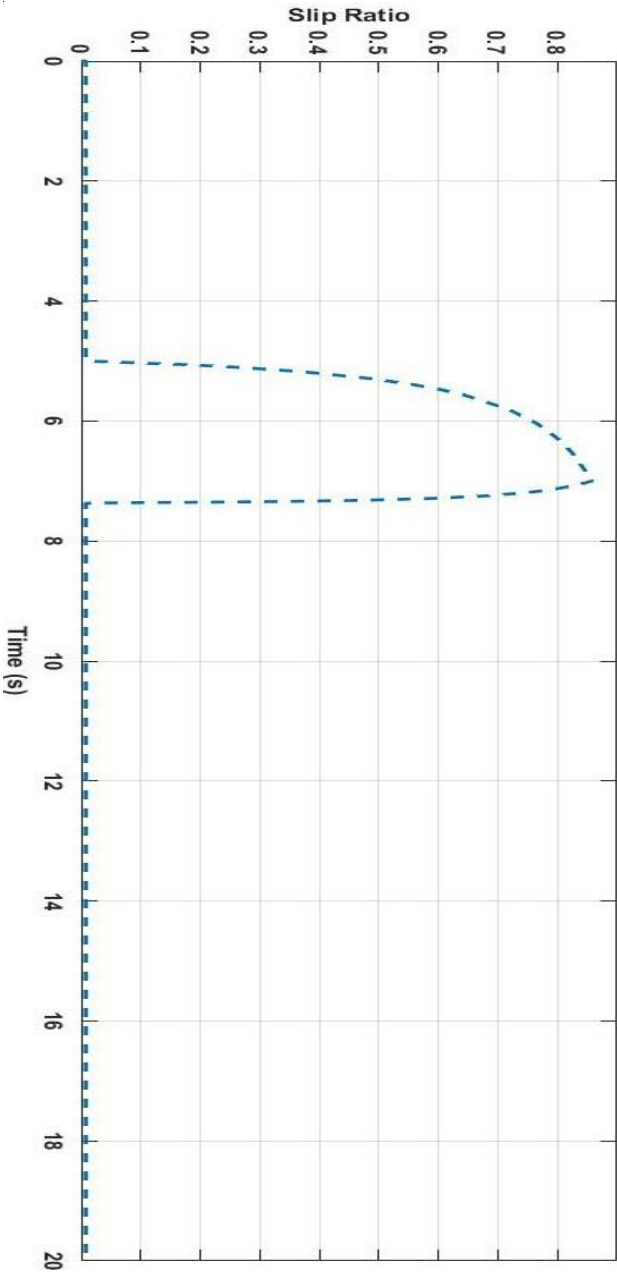
Sehingga nilai *slip ratio* pada Gambar 4.3 menunjukkan nilai mencapai 0,88. Hal ini menyebabkan kecepatan roda terus meningkat tanpa dibarengi dengan penambahan kecepatan *chasis* secara proporsional, dikarenakan tidak adanya *feedback* dari sistem.



Gambar 4.1 Grafik kecepatan *open loop*



Gambar 4.2 Grafik torsi *open loop*



Gambar 4.3 Grafik slip ratio open loop

4.2 Hasil Estimasi *Observer*

Estimasi dari *observer* perlu ditinjau untuk menganalisa apakah *observer* yang sudah dirancang dapat mengestimasi nilai torsi *disturbance* sesuai dengan nilai sebenarnya. Pengujian dilakukan dengan memberikan kondisi licin pada detik 5 – 7, hasil dari simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Dari Gambar 4.4 dapat dilihat ketika sistem diberi kondisi jalan licin, *observer* yang telah dirancang mampu mengestimasi nilai torsi *disturbance* dengan nilai estimasi terdeviasi sebesar 3,94% dari nilai sebenarnya, *rise time* 0,127 s, dan *settling time* 0,212 s. Dari performansi tersebut, dapat dilihat bahwa *observer* memiliki respon yang baik untuk mengestimasi torsi *disturbance*.

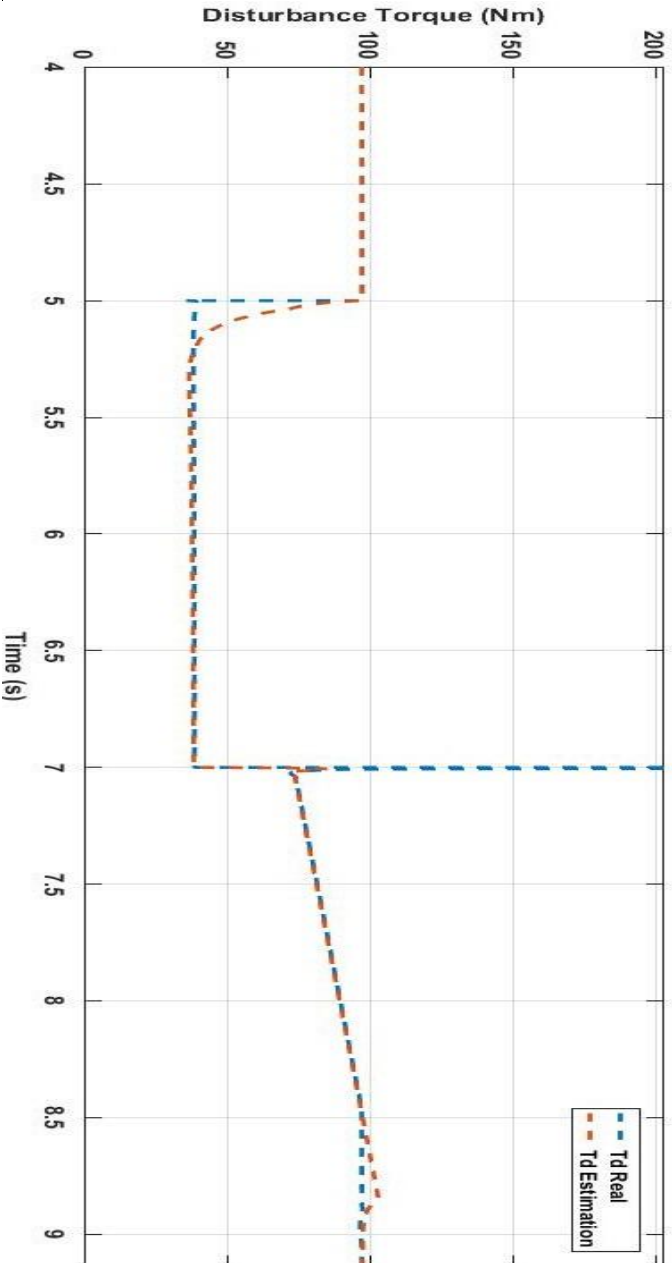
4.3 Respon Sistem FTTC

Pada percobaan ini dilakukan simulasi agar dapat menganalisa perbedaan respon antara menggunakan *Fault Tolerant Traction Control* dan tanpa kontrol (*open loop*).

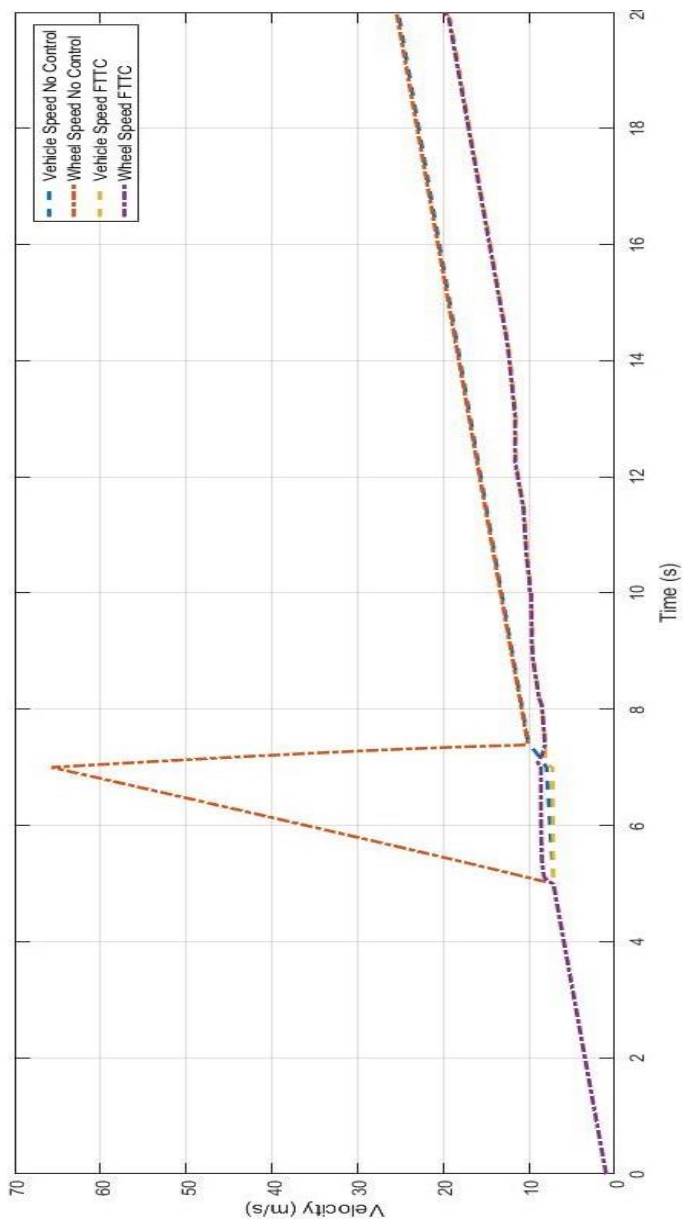
Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa perbedaan kecepatan roda antara FTTC dengan *open loop* terlihat membesar pada detik 5-7 dimana diberikan kondisi jalan licin. Perbedaan kecepatannya mencapai 57,07 m/s pada titik puncak.

Hal ini dikarenakan torsi pada Gambar 4.6 konstan untuk *open loop* yang menyebabkan kecepatan roda tak terkendali dan terus naik, sedangkan pada FTTC kecepatan roda dapat terjaga karena ada aksi untuk mengurangi torsi yang disalurkan.

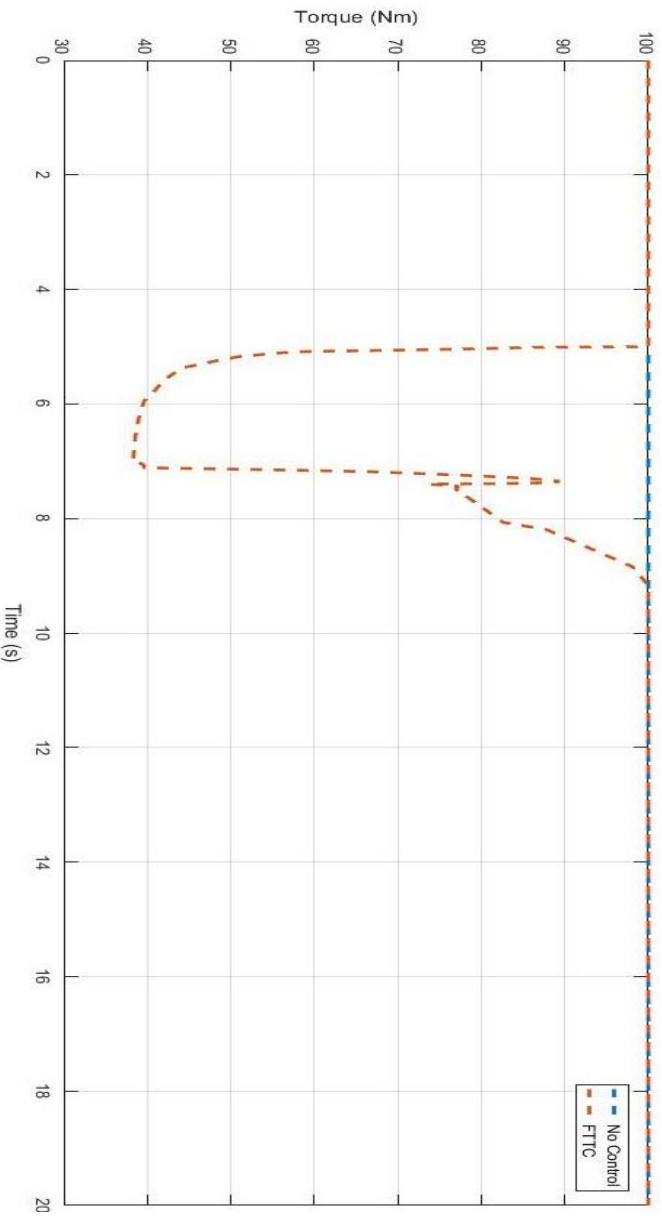
Sehingga perbedaan keduanya dari segi traksi sangat signifikan, dilihat dari *slip ratio* pada Gambar 4.7 yaitu sebesar 0,72. Hal ini dikarenakan adanya *feedback* dari sistem, sehingga kecepatan roda terus meningkat dibarengi dengan penambahan kecepatan *chasis*.



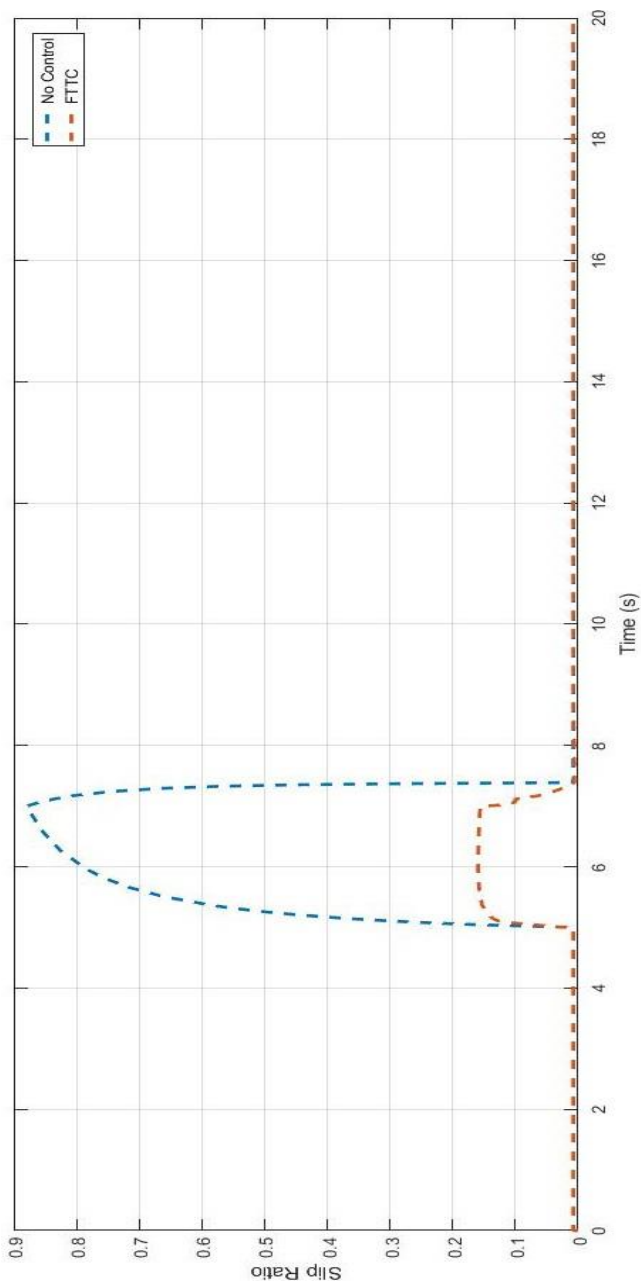
Gambar 4.4 Perbandingan nilai torsi *disturbance* aktual dengan estimasi *observer*



Gambar 4.5 Grafik perbandingan kecepatan FTTC dengan *open loop*



Gambar 4.6 Grafik perbandingan torsi FTTC dengan *open loop*



Gambar 4.7 Grafik perbandingan slip ratio FTTC dengan open loop

4.4 Analisa Sistem *Fault Tolerant Traction Control* (FTTC) Dengan Kesalahan Pada Inersia Roda

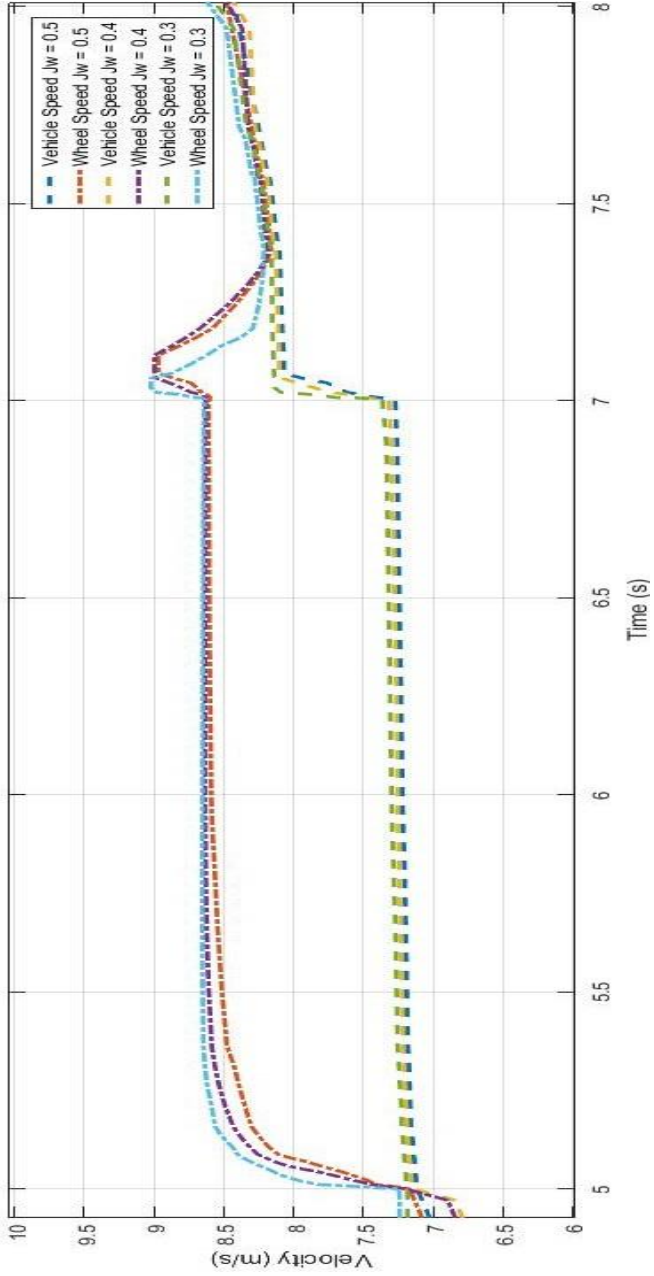
Pada percobaan ini dilakukan simulasi agar dapat menganalisa respon dengan diberikan kesalahan berupa perubahan nilai inersia roda pada model plant sebesar $0,3 \text{ Kg.m}^2$, $0,4 \text{ Kg.m}^2$, $0,5 \text{ Kg.m}^2$ (nominal).

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat respon ketika diberikan kesalahan inersia roda yaitu sebesar $0,3 \text{ Kg.m}^2$, dan $0,4 \text{ Kg.m}^2$ dimana nominal nilai inersia roda yang sesungguhnya sebesar $0,5 \text{ Kg.m}^2$. Diketahui dari Gambar 4.8 bahwa ketika diberikan kesalahan inersia roda, respon yang dihasilkan antara kecepatan roda dan *chasis* pada tiap-tiap kesalahan menghasilkan grafik yang berbeda, dimana pada kesalahan inersia roda $0,3 \text{ Kg.m}^2$ memiliki deviasi yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan kesalahan inersia roda $0,4 \text{ Kg.m}^2$ bila merujuk pada nominal inersia roda sebesar $0,5 \text{ Kg.m}^2$.

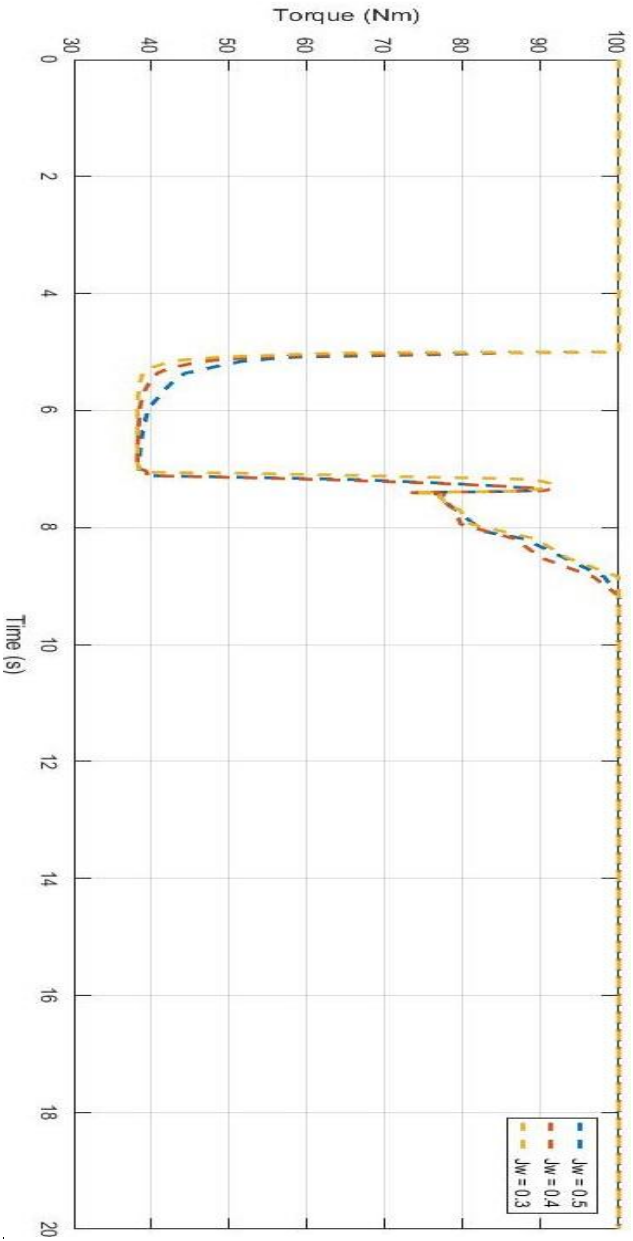
Hal serupa terjadi pada output torsi. Dimana dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa grafik torsi ketiganya memiliki nilai yang berbeda. Dimana nilai torsi yang didapat saat kondisi jalan licin berkisar antara 40 Nm dengan inersia roda $0,5 \text{ Kg.m}^2$ memiliki slope yang paling landai diantara kesalahan inersia roda $0,4 \text{ Kg.m}^2$ dan $0,3 \text{ Kg.m}^2$. Hal ini berhubungan dengan nilai *slip ratio* pada Gambar 4.10.

Dimana pada Gambar 4.10 nilai *slip ratio* didapat sebesar 0,16, dengan kesalahan inersia roda $0,3 \text{ Kg.m}^2$ dan $0,4 \text{ Kg.m}^2$ memiliki slope yang lebih curam kebawah yang menandakan respon lebih cepat sehingga torsi dapat lebih cepat kembali naik.

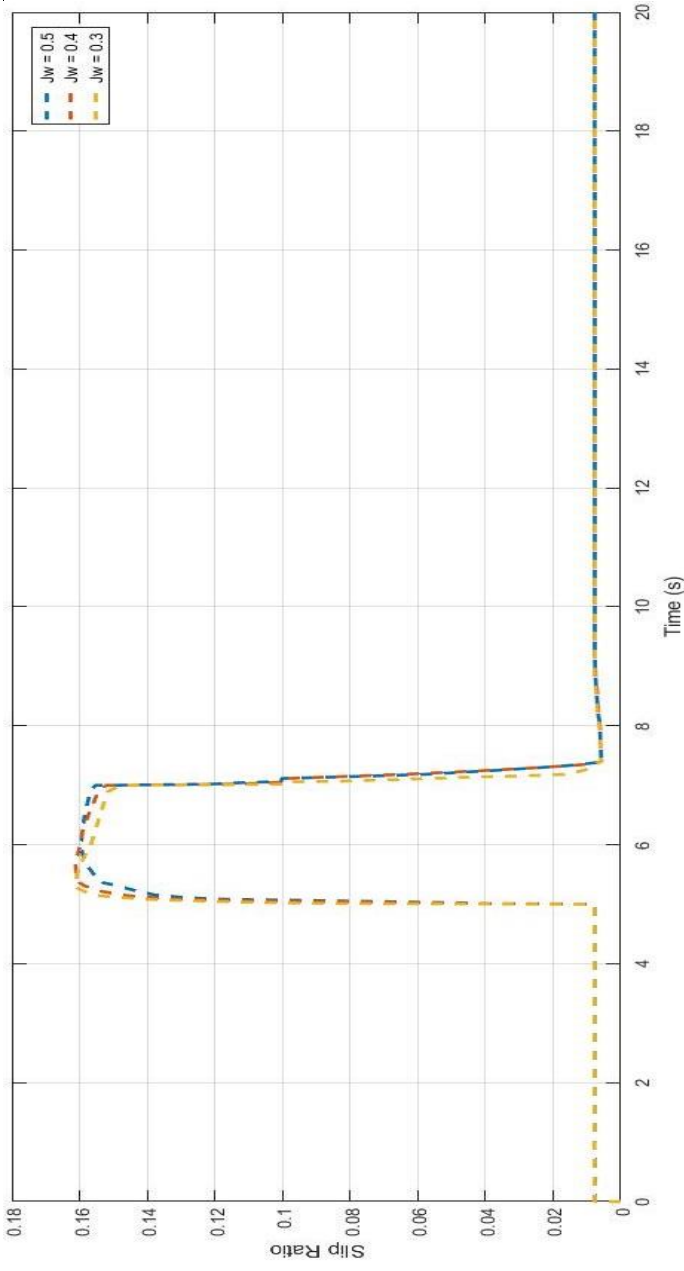
Perbedaan ketiga nilai inersia roda dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.8 Grafik kecepatan dengan kesalahan pada inersia roda



Gambar 4.9 Grafik torsi dengan kesalahan pada inersia roda



Gambar 4.10 Grafik slip ratio dengan kesalahan pada inersia roda

Tabel 4.1 Perbandingan nilai kecepatan, torsi dan *slip ratio* dari kesalahan inersia roda

	0.5	0.4	0.3
Kecepatan Roda Max (m/s)	23,80657	23,93089	24,05338
Kecepatan <i>Chasis</i> Max (m/s)	23,62307	23,74532	23,86573
<i>Slip Ratio</i> Max	0,159565	0,161147	0,161156
Torsi Min (Nm)	38,1946	38,15391	38,15177

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan beberapa analisa yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- a. *Traction Control* berhasil mengurangi fenomena tergelincir dimana sistem *open loop* memiliki *slip ratio* sebesar 0,88, sedangkan sistem dengan *fault tolerant traction control* memiliki *slip ratio* sebesar 0,16. Sehingga sistem dapat mengurangi *slip ratio* sebesar 0,72.
- b. *Fault Tolerant Traction Control* dapat memperbaiki pengaruh kesalahan nilai inersia roda yang digunakan pada model, yaitu sebesar 0,3 Kg.m², 0,4 Kg.m², dan 0,5 Kg.m². Dengan FTTC, ketiga nilai inersia roda tersebut menyebabkan sistem menghasilkan respon *slip ratio max* sebesar 0,16.
- c. Respon kecepatan yang dihasilkan dari sistem yaitu sebesar 23,8 m/s untuk kecepatan roda *max* dan 23,62 m/s untuk kecepatan *chasis max*. Sehingga didapatkan nilai kecepatan roda dan *chasis* yang tidak jauh berbeda dikarenakan MTTE bekerja dengan membatasi torsi yang dapat disalurkan ke roda agar tidak terjadi *slip*.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut.

- a. Penentuan nilai pada *PI compensator* menggunakan nilai lain yang berbeda.
- b. Validasi data dilakukan menggunakan alat bukan dari literatur.

- c. Pengambilan data menggunakan MATLAB R2014, karena *software* lebih stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Baffet, Charara, & Lechner. (2009). Estimation of vehicle sideslip, tire force and wheel cornering stiffness. *Control Engineering Practice*, 17(11), 1255-1264.
- Brennan, J. W., & Barder, T. E. (2015). Total Cost of Ownership and True Vehicle Cost. In T. E. John W. Brennan, *Battery Electric Vehicle vs Internal Engine Combustion* (pp. 10-12). California: Arthur D Little.
- Bulgaria Mitsubishi Motors. (2019). *Technological Dictionary*. Retrieved from Bulgaria Mitsubishi Motors: <http://www.mitsubishi-motors.bg/pages/Technology/>
- Chriss, T. (2019). *EBD*. Retrieved from Automobile Soft: <https://automobilesoft.net/mycar/automobile-safety/active-safety/ebd/>
- Graeme, Matt, & Siti. (2019). *ABS Sensors*. Retrieved from APEC Braking: <https://www.apecbraking.co.uk/Resources/TechniciansGuides/ABS-Sensors.aspx>
- Guo, J., Jian, X., & Lin, G. (2014). Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*, 7(10), 6459-6476.
- Heißing, & Bernd. (2011). *Chassis Handbook*. Springer.
- How Mechanism Works. (2018, August). *What is Traction Control System and why we need it*. Retrieved from How Mechanism Works:

<https://www.howmechanismworks.com/2018/08/what-is-traction-control-system-why-we.html>

Hu, J.-S., Yin, D., & Hori, Y. (2010). Fault-tolerant traction control of electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 19, 204-213.

Iain, K. (2018, September 5). *What is electronic brake force distribution or EBD?* (Cars Guide) Retrieved May 9, 2019, from <https://www.carsguide.com.au/car-advice/what-is-electronic-brake-force-distribution-or-ebd-70786>

Jeremy. (2017). *3 Car Safety Features – Crash Prevention*. Retrieved from TOC Automotive College : <https://www.toc.edu.my/news-event/2017/3-car-safety-features-crash-prevention>

Liebemann, E. K., Meder, K., Schuh, J., & Nenninger, G. (2004). Safety and Performance Enhancement: the Bosch Electronic Stability Control (ESP).

Mutoh, Hayano, Yahagi, & Takita. (2007). Electric Braking Control Methods for Electric Vehicles With Independently Driven Front and Rear Wheels. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(2), 1168-1176.

National Highway Traffic Safety Administration. (2019). *Driver Assistance Technologies*. Retrieved May 9, 2019, from <https://www.nhtsa.gov/equipment/driver-assistance-technologies>

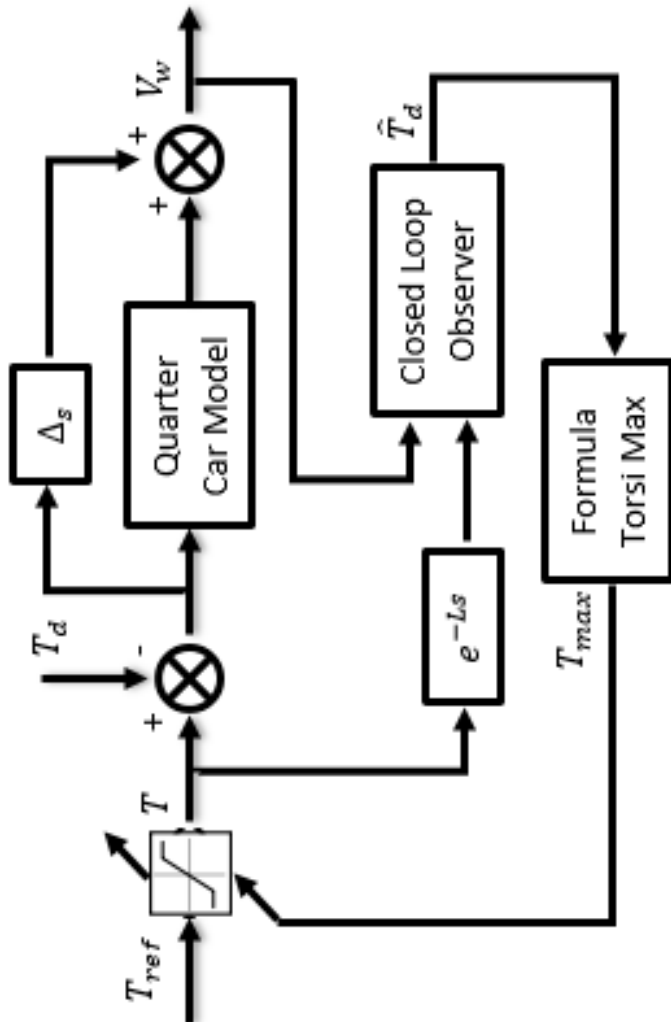
National Safety Council. (2019). *Hill Start Assist*. Retrieved May 9, 2019, from <https://mycardoeswhat.org/safety-features/hill-start-assist/>

- Oudghiri, M., Chadli, M., & Hajjaji, A. E. (2007). Robust Fuzzy Sliding Mode Control for Antilock Braking System. *International Journal on Sciences and Techniques of Automatic Control*, 13-27.
- Rahmat, M. S., Ahmad, F., Yamin, A. K., Apparow, V. R., & Tamaldin, N. (2013). Modelling And Torque Tracking COntrol of Permanent Magnet Synchronous Motor for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 955-967.
- Sudjatmiko, S. (2019, March 28). *Mengenal Lebih Jauh Fitur Hill Start Assist Control*. Retrieved from OTODRIVER.com: https://otodriver.com/article/view/mengenal-lebih-jauh-fitur-hill-start-assist-control/5pvOyxiE9VWaxRU7_zjn1UU9ta38qXj21iDOOr7rNIX0
- The Physics Hypertextbook. (2019). *Aerodynamic Drag*. Retrieved May 9, 2019, from <https://physics.info/drag/>
- YourMechanic. (2019, January 29). *Your Mechanic*. Retrieved from Traction Control Switch Replacement: <https://www.yourmechanic.com/services/traction-control-switch-replacement>

“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN A

DIAGRAM BLOK PENELITIAN *FAULT TOLERANT TRACTION CONTROL*

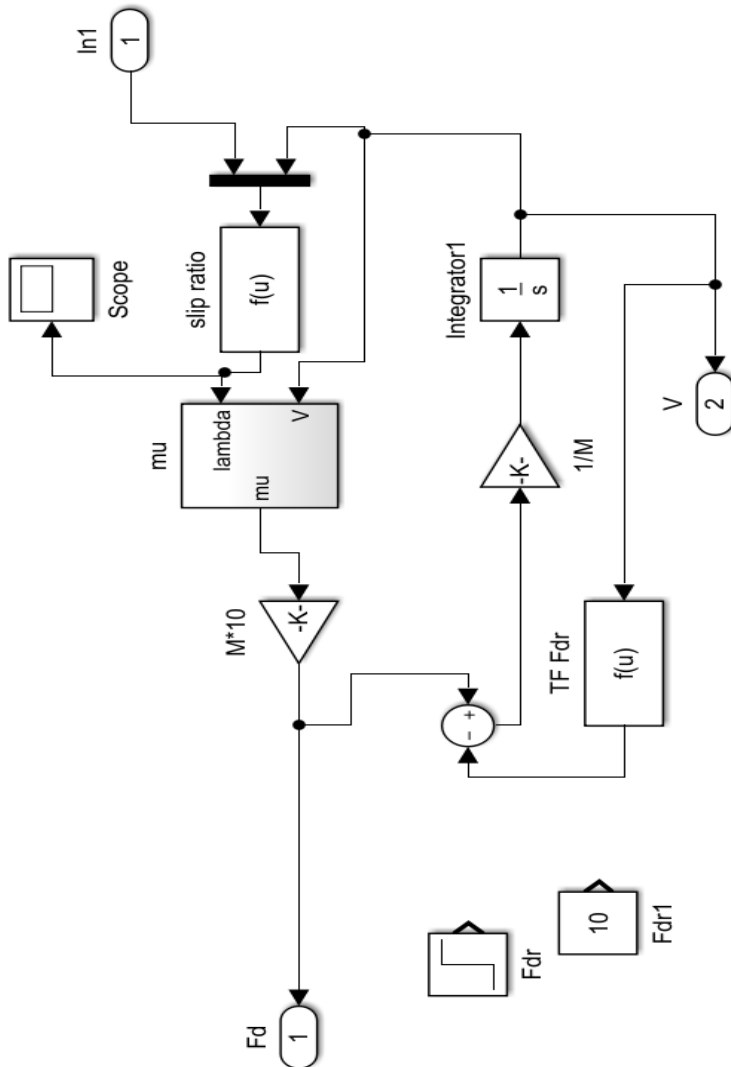


“Halaman ini memang dikosongkan”

“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN C

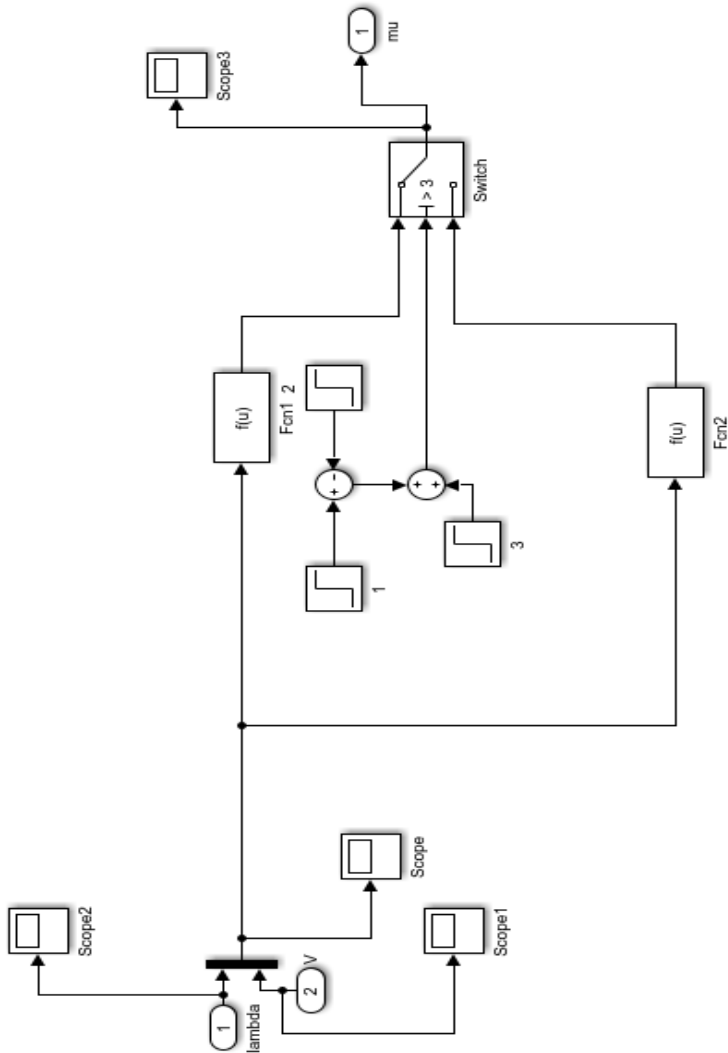
SIMULINK MATLAB R2016b SUB-VEHICLE PLANT



“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN D

SIMULINK MATLAB R2016b *BURCKHARDT MODEL*



“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN E**M-FILE MATLAB R2016b**

```
M = 360;  
Jw = 0.5;  
JwE = 0.5; (0.4&0.3 untuk kesalahan inersia roda)  
r = 0.22;  
c1 = 1.029;  
c2 = 17.16;  
c3 = 0.523;  
c4 = 0.03;  
rho = 1.225;  
A = 2.58741;  
C = 0.25;  
L = 0.02;  
c5 = 0.05;  
c6 = 306.39;  
c7 = 0;  
c8 = 0.03;
```

“Halaman ini memang dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Muhammad Hilman Hakim dilahirkan di Bogor, 16 Januari 1998. Penulis merupakan anak ke-empat dari lima bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Pengadilan 5 Bogor pada tahun 2009, SMPN 5 Bogor pada tahun 2012, SMAN 1 Leuwiliang pada tahun 2015, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang. Penulis memiliki pengalaman program *internship* selama satu bulan di PT Pupuk Kujang Cikampek dan pernah menjadi finalis di ajang Pekan Ilmiah Nasional yang diadakan KEMRISTEK-DIKTI dengan judul *Automatic Rearview Mirror Adjustment with Internet Network Capabilities*.

Pada bulan Juni 2019 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan *Fault Tolerant Traction Control* Pada Mobil Listrik Dengan *Model Uncertainty***. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui *email: hilmanhakim01@gmail.com*