



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *WHEEL SLIP CONTROL* (WSC)
DENGAN TORSI DISTRIBUSI PADA APLIKASI
REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
UNTUK MOBIL LISTRIK**

**RAIHAN NUGROHO PANGESTU
NRP. 02311640000158**

Dosen Pembimbing:
Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***DESIGN OF WHEEL SLIP CONTROL (WSC) WITH
TORQUE DISTRIBUTION IN THE APPLICATION
OF REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING
SYSTEM FOR ELECTRIC CAR***

**RAIHAN NUGROHO PANGESTU
NRP. 02311640000158**

Supervisors:
Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T.

*Engineering Physics Department
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Raihan Nugroho Pangestu
NRP : 02311640000158
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "*Perancangan Wheel Slip Control (WSC) dengan Torsi Distribusi pada Aplikasi Regenerative Anti-Lock Braking System Untuk Mobil Listrik*" 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, 28 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



METERAI
TEMPEL
PT766AAHF532503807
6000
ENAM RIBU RUPIAH

Raihan Nugroho Pangestu

NRP. 02311640000158

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

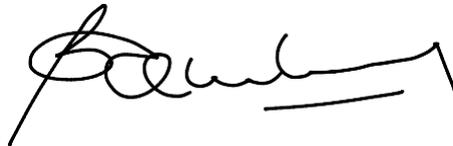
**PERANCANGAN *WHEEL SLIP CONTROL* (WSC) DENGAN TORSI
DISTRIBUSI PADA APLIKASI *REGENERATIVE ANTI-LOCK*
BRAKING SYSTEM UNTUK MOBIL LISTRIK**

Oleh:

Raihan Nugroho Pangestu
NRP. 02311640000158

Surabaya, 29 Juli 2020

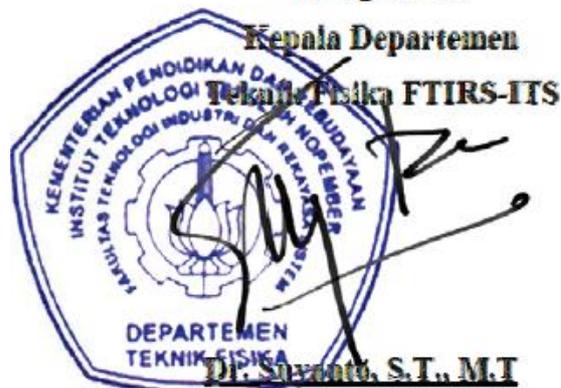
Menyetujui,
Pembimbing



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

Mengetahui,

Kepala Departemen



NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *WHEEL SLIP CONTROL* (WSC) DENGAN TORSI DISTRIBUSI PADA APLIKASI *REGENERATIVE ANTI-LOCK* *BRAKING SYSTEM* UNTUK MOBIL LISTRIK

TUGAS AKHIR

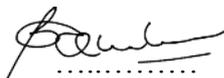
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RAIHAN NUGROHO PANGESTU

NRP. 02311640000158

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|--|--|-----------------|
| 1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. |  | (Pembimbing I) |
| 2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. |  | (Ketua Penguji) |
| 3. Dr. Suyanto, S.T., M.T. |  | (Penguji I) |
| 4. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T. |  | (Penguji II) |

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN *WHEEL SLIP CONTROL* (WSC) DENGAN TORSI DISTRIBUSI PADA APLIKASI *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* UNTUK MOBIL LISTRIK

Nama : Raihan Nugroho Pangestu
NRP : 02311640000158
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Lelono W., S., M.T.

ABSTRAK

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan *Wheel Slip Control* pada sistem pengereman mobil listrik. Dalam perancangan WSC dipakai strategi kontrol SMC yang akan menghasilkan nilai rasio torsi distribusi, kemudian dilakukan perhitungan nilai torsi optimum sebagai masukan motor. Pengujian WSC dilakukan dengan memberikan 4 kondisi jalan yang berbeda, yakni kondisi jalan es, salju, aspal basah dan aspal kering, serta menguji sistem pada kondisi perubahan jalan es ke aspal kering dan sebaliknya. Pada pengujian kondisi aspal kering *slip ratio* roda depan 0,018 dan roda belakang 0,028. Pada kondisi aspal basah *slip ratio* roda depan 0,012 dan roda belakang sebesar 0,018. Pada kondisi salju *slip ratio* roda depan 0,011 dan roda belakang sebesar 0,016. Pada kondisi es *slip ratio* roda depan 0,007 dan roda belakang sebesar 0,009. Pada pengujian perubahan jalan dari es menjadi aspal kering, nilai *slip ratio* pada roda depan dari 0,007 menjadi 0,018, roda belakang dari 0,009 menjadi 0,028. Pada pengujian perubahan jalan dari aspal kering menjadi es nilai *slip ratio* roda depan dari 0,018 menjadi 0,007, sedangkan *slip ratio* roda belakang dari 0,028 menjadi 0,009. Waktu pengereman untuk 4 kondisi pengujian ini yaitu 2,659 detik.

Kata kunci: *half car*, WSC, *slip ratio*

Halaman ini sengaja dikosongkan

***DESIGN OF WHEEL SLIP CONTROL (WSC) WITH TORQUE
DISTRIBUTION IN THE APPLICATION OF REGENERATIVE
ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM FOR ELECTRIC CAR***

Name : Raihan Nugroho Pangestu
NRP : 02311640000158
Department : Engineering Physics FTIRS – ITS
Supervisors : Dr. Bambang Lelono W., S., M.T.

ABSTRACT

In this final project, Wheel Slip Control is designed on the electric car braking system. In designing the WSC the SMC control strategy is used which will produce a distribution torque ratio value, then an optimum torque value calculation is performed as the motor input. WSC testing is done by giving 4 different road conditions, ice, snow, wet asphalt, dry asphalt, as well as testing the system on the condition of the road from ice to dry asphalt and vice versa. In the dry asphalt slip ratio of front wheel is 0.018 and the rear wheel is 0.028. In the wet asphalt slip ratio of front wheel is 0.012 and the rear wheel is 0.018. In snow conditions the front wheel slip ratio is 0.011 and the rear wheel is 0.016. In ice slip ratio of the front wheel is 0.007 and the rear wheel is 0.009. In testing the road change from ice to dry asphalt, the slip ratio on the front wheels from 0.007 to 0.018, rear wheels from 0.009 to 0.028. From dry asphalt to ice the front wheel slip ratio from 0.018 to 0.007, while the rear wheel slip ratio from 0.028 to 0.009. The braking time for these 4 test conditions is 2.659 seconds.

Keywords: half car, WSC, slip ratio

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang, puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran tuhan yang maha esa karena berkat rahmat dan hidayah nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“PERANCANGAN *WHEEL SLIP CONTROL (WSC) DENGAN TORSI DISTRIBUSI PADA APLIKASI REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM* UNTUK MOBIL LISTRIK”**.

Adapun dalam penulisan tugas akhir ini penulis sangat banyak mendapat bantuan serta dukungan baik moril maupun materil. Sehingga penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih tersebut kepada:

1. Bapak Sigit Putranto, Ibu Tuti Sundari, dan Zahra Putri H atas dukungan moril serta materil selama ini
2. Bapak Dr. Suyanto S.T., M.T selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS
3. Bapak Dr. Bambang L. Widjiantoro S.T., M.T selaku dosen pembimbing dan Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
4. Bapak Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D selaku dosen wali
5. Dea Faiza Febrianty S.T., Muh. Indjra Dj, Muhammad Mukhlis Jamali yang telah banyak membantu penulis selama mengerjakan tugas akhir ini
6. Teman-teman TA-wan Laboratorium *Embedded and Cyber-Physical System*
7. Teman-teman Teknik Fisika 2016, *Thalassinus Fortis*
8. Teman-teman FKMTF 2018/2019
9. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademika Departemen Teknik Fisika ITS atas kerjasamanya
10. Dan semua pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan laporan tugas akhir ini yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu

Penulis menyadari bahwa terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan ini sehingga penulis sangat terbuka untuk segala kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, penulis berharap agar laporan ini dapat bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 26 Juni 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
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	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Half Car Model</i>	5
2.2 <i>Anti-Lock Braking System</i>	6
2.3 Regenerative Braking	9
2.4 Kontrol PI.....	10
2.5 SMC.....	11
2.6 Motor Brushless Direct Control	12
2.7 Wheel Slip Control	15
2.8 Torsi Distribusi.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Pemodelan Half Car	21
3.2 Pemodelan Motor	22

3.3	Perancangan Kontroler	23
3.4	Perancangan <i>Wheel Slip Control</i>	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		27
4.1	Uji Validasi Half Car Model (HCM)	27
4.2	Uji Performa Kontroler	29
4.3	Uji <i>Wheel Slip Control</i>	30
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	40
DAFTAR PUSTAKA.....		41
LAMPIRAN		45
BIODATA PENULIS		51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gaya yang bekerja pada pengereman mobil	5
Gambar 2.2	Skema ABS	7
Gambar 2.3	Kurva hubungan <i>slip ratio</i> dengan friction coefficient	8
Gambar 2.4	Kurva hubungan <i>slip ratio</i> dengan friction coefficient	9
Gambar 2.5	Diagram blok kontrol PI.....	11
Gambar 2.6	Interpretasi SMC	11
Gambar 2.7	Ilustrasi motor BLDC.....	13
Gambar 2.8	Skema six <i>step</i> inverter pada motor BLDC.....	14
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	19
Gambar 3.2	Diagram blok sistem.....	20
Gambar 3.3	Skema motor	23
Gambar 4.1	Respon <i>slip ratio</i> saat pengereman.....	27
Gambar 4.2	Perbandingan kecepatan kendaraan dengan kecepatan roda.....	28
Gambar 4.3	Uji SOC pada baterai.....	28
Gambar 4.4	Respon torsi roda depan	29
Gambar 4.5	Respon torsi roda belakang	29
Gambar 4.6	Respon <i>slip ratio</i> aspal kering.....	31
Gambar 4.7	Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada aspal kering.....	31
Gambar 4.8	Respon <i>slip ratio</i> roda depan dan belakang pada aspal basah.....	32
Gambar 4.9	Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada aspal basah.....	32
Gambar 4.10	Respon <i>slip ratio</i> roda depan dan belakang pada salju	32
Gambar 4.11	Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada salju	32
Gambar 4.12	Respon <i>slip ratio</i> roda depan dan belakang pada es.....	32
Gambar 4.13	Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada es	32

Gambar 4.14	Respon <i>slip ratio</i> roda depan dan belakang pada perubahan jalan (es- aspal kering)	33
Gambar 4.15	Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada perubahan jalan (es- aspal kering).....	33
Gambar 4.16	Respon <i>slip ratio</i> roda depan dan belakang pada perubahan jalan (aspal kering - es)	37
Gambar 4.17	Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada perubahan jalan (aspal kering-es).....	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter koefisien gesekan pada berbagai kondisi jalan	8
Tabel 2.2 Urutan komutasi <i>six-step</i> inverter	14
Tabel 3.1 Variabel pada persamaan gaya	21
Tabel 3.2 Parameter koefisien gesekan pada aspal kering	22
Tabel 3.3 Parameter kontroler PI.....	24
Tabel 3.4 Parameter torsi distribusi.....	25
Tabel 4.1 Performansi kontrol torsi.....	30

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan salah satu sektor yang erat kaitannya dengan kehidupan masyarakat. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, pada tahun 2018 jumlah kendaraan bermotor yang beredar di Indonesia telah menyentuh angka 147 juta unit, dengan mobil penumpang menyumbang angka 16 juta unit dalam total tersebut (BPS, 2018). Bahkan, rata-rata pertumbuhan mobil di Indonesia dalam kurun waktu 2014-2018 adalah yang paling tinggi dengan angka 10,58 dibandingkan dengan kendaraan jenis lain dalam kategori yang sama, yakni transportasi darat (Kemenhub, 2018). Adapun di Indonesia, hampir seluruh moda transportasi yang digunakan masih merupakan kendaraan berbahan bakar minyak atau fosil. Yang diketahui memiliki dampak buruk bagi lingkungan akibat emisi gas buang yang mengandung bahan pencemar udara. Tentu saja, tingginya angka pertumbuhan kendaraan bermotor ini sejalan dengan meningkatnya tingkat polusi udara di Indonesia. Pada survei yang telah dilakukan oleh *World Bank*, Indonesia berada pada posisi ke-4 negara berpolusi tertinggi di dunia setelah Mesir, India, dan Cina. Dengan emisi kendaraan menjadi faktor penyumbang polusi udara terbesar, yakni 85 persen (Syaifullah, Kurniawan, & Priyohandoko, 2013).

Dengan adanya hal tersebut, mengakibatkan penelitian akan mobil berbasis listrik, baik *hybrid* maupun *electrical vehicle* (EV) pun menjadi serius untuk dikembangkan. Mobil listrik sendiri mulai mendapat perhatian sejak pertengahan abad 19 hingga awal abad 20. Alasannya selain karena krisis lingkungan, mobil listrik dianggap memiliki tingkat keamanan dan kemudahan dalam pengoperasian yang tidak dapat dicapai oleh mobil berbahan bakar fosil (Varocky, 2011). Pada suatu mobil, baik konvensional maupun listrik, tersusun dari banyak sistem yang saling berkesinambungan antar satu sama lain. Salah satu sistem terpenting yang ada dalam suatu mobil adalah sistem pengereman. Sistem pengereman yang baik diperlukan dalam sebuah kendaraan untuk mendapatkan perlambatan dan stabilitas yang aman dalam semua kondisi operasi dari kendaraan. (Day, 2014).

Karena apabila sistem pengereman tidak didesain dengan baik, dapat menyebabkan kegagalan yang membahayakan nyawa dari pengguna mobil. Contoh kegagalan yang dapat terjadi adalah saat pengereman mendadak. Yakni roda mengalami keadaan terkunci sementara kendaraan masih melaju. Hal ini diakibatkan oleh gaya pengereman yang terlalu besar yang diberikan pada roda. Dan untuk mengantisipasi hal tersebut, kini kendaraan berpenumpang telah menerapkan suatu standar yaitu penggunaan Anti-Lock Braking System (ABS). (Guo, J., Jiang, X., & Lian, G., 2014)

Selain dapat mencegah terkunci nya roda saat pengereman mendadak, ABS juga dapat menjaga kemampuan manuver kendaraan karena slip roda dikontrol tetap pada kisaran yang dapat diterima. Dengan mempertahankan gaya gesek maksimal selama pengereman, ABS dapat memperpendek jarak pengereman. (Chen C. K. & Wang Y. C, 1996)

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan desain kontrol ABS dengan menggunakan asumsi *slip ratio* dijaga pada nilai yang sama. Padahal kendaraan tidak selalu bekerja pada kondisi jalan yang sama, yang berarti roda depan dan belakang memiliki nilai *slip ratio* yang berbeda. Penerapan nilai *slip ratio* yang sama pada kondisi jalan yang berbeda dapat menyebabkan waktu pengereman menjadi lebih panjang. Untuk itulah diperlukan sebuah kontrol slip roda yang yang mampu menyesuaikan dengan kondisi jalan yang sebenarnya. Oleh karena itu dilakukan Perancangan *Wheel Slip Control* dengan Torsi Distribusi pada Aplikasi *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS) Untuk Mobil Listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas sebelumnya, maka rumusan masalah yang dapat diberikan pada tugas akhir ini adalah bagaimana merancang *Wheel slip Control* (WSC) dengan torsi distribusi pada pengereman *regenerative anti-lock braking system*

1.3 Tujuan

Untuk menjawab dari rumusan masalah yang ada, maka ditetapkan tujuan dari tugas akhir ini yaitu merancang *Wheel Slip Control* (WSC) dengan torsi

distribusi pada pengereman *regenerative anti-lock braking system*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini diantaranya:

- a) *Plant* yang digunakan adalah *Half car Model*
- b) Variabel yang dikontrol adalah *slip ratio*, variabel yang dimanipulasi adalah torsi pengereman
- c) Motor yang digunakan bejenis BLDC
- d) Penyimpanan daya hasil pengereman *regenerative* yaitu baterai berjenis lithium-ion
- e) Komponen inverter dan motor yang digunakan diasumsikan ideal
- f) Simulasi dilakukan pada kondisi pengereman penuh

1.5 Sistematika Laporan

Adapun dalam laporan tugas akhir ini, terbagi kedalam 5 bagian utama, yakni sebagai berikut:

- a) BAB I PENDAHULUAN
Pada bab ini berisikan latar belakang dari dilakukannya tugas akhir ini, rumusan masalah, tujuan serta batasan masalah yang ditetapkan, dan sistematika laporan
- b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA
Pada bab ini berisikan teori yang berkaitan dengan pengerjaan tugas akhir, yakni *Half Car Model*, *Anti-lock Braking System*, *Regenerative Braking*, kontrol PI, SMC, motor BLDC, *Wheel Slip Control*, torsi distribusi
- c) BAB III METODOLOGI PENELITIAN
Pada bab ini berisikan diagram alir sebagai rancangan dari alur pengerjaan tugas akhir. Selain itu terdapat penjelasan dari tiap langkah dalam diagram alir tersebut
- d) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
Pada bab ini disajikan hasil pengerjaan perancangan *wheel slip control* dengan torsi distribusi dalam bentuk grafik yang kemudian dianalisa
- e) BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisikan kesimpulan yang didapat dari pengerjaan tugas akhir, serta saran yang dapat diberikan untuk kedepannya

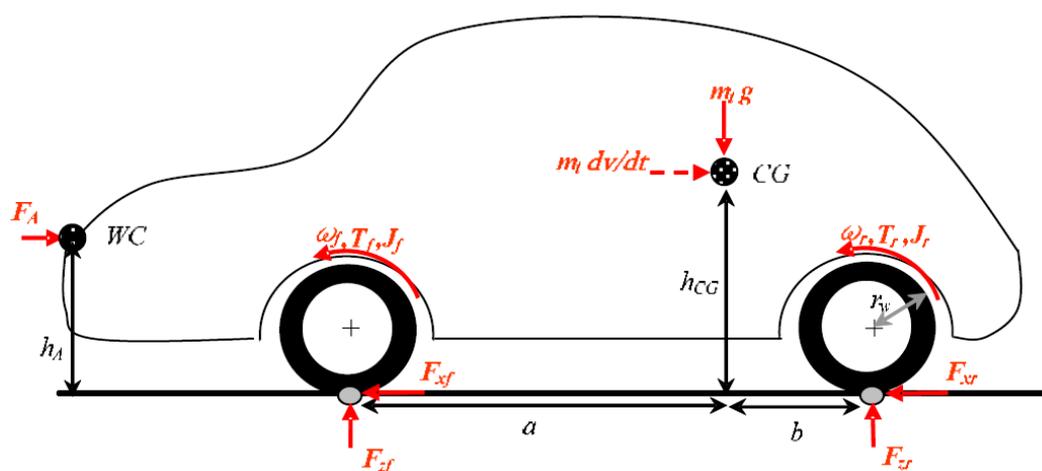
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Half Car Model

Pemodelan terhadap kendaraan dapat dilakukan dengan *Quarter Car Model* yang menggunakan satu roda dan menganggap karakteristik 3 roda lainnya sama, *Half Car Model* yang menggunakan satu roda depan dan satu roda belakang, dan *Full Car Model* yang memodelkan ke empat roda. Pada tugas akhir ini digunakan *Half Car Model* karena dianggap sudah cukup untuk merepresentasikan *Full Car*.

Adapun gaya yang bekerja pada HCM selama proses pengereman terjadi dapat dilihat pada gambar dibawah ini



Gambar 2 1 Gaya yang bekerja pada pengereman mobil (Yu, Tseng, & Chang, 2012)

Vektor gaya yang bekerja pada *half car model* yakni sesuai dengan Hukum II Newton:

$$\sum F = m \cdot a \tag{2.1}$$

$$\mu_f \cdot F_{zf} + \mu_r \cdot F_{zr} - F_A - f_r \cdot F_{zr} - f_f \cdot F_{zf} = m_i \cdot \frac{dv}{dt} \tag{2.2}$$

Dengan:

$$F_A = 0.5 \times C_r A \rho v^2 \tag{2.3}$$

$$F_{zf} = \frac{m_t}{a+b}(gb - v h_{CG}) - \frac{h_A}{a+b} F_A \quad (2.4)$$

$$F_{zr} = \frac{m_t}{a+b}(gb + v h_{CG}) + \frac{h_A}{a+b} F_A \quad (2.5)$$

Adapun untuk pemodelan roda digunakan persamaan berikut

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J} [T_r - r_w \mu_r F_{zr}] - \frac{1}{J} \beta_r \omega_r \quad (2.6)$$

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{J} [T_f - r_f \mu_f F_{zf}] - \frac{1}{J} \beta_f \omega_f \quad (2.7)$$

Dimana F_z adalah gaya normal roda (N), F_A adalah gaya aerodinamis (N), μ adalah koefisien gesek roda, f adalah koefisien resistansi putaran roda, m adalah massa setengah kendaraan (kg), v adalah kecepatan kendaraan (m/s), a dan b adalah jarak roda depan dan roda belakang dari pusat gravitasi (m), J adalah momen inersia dari roda (kg.m^3), ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3), C_r adalah koefisien resistansi aerodinamik, A adalah area karakteristik dari kendaraan (m), dan h_A adalah tinggi aplikasi F_A dari permukaan jalan (m).

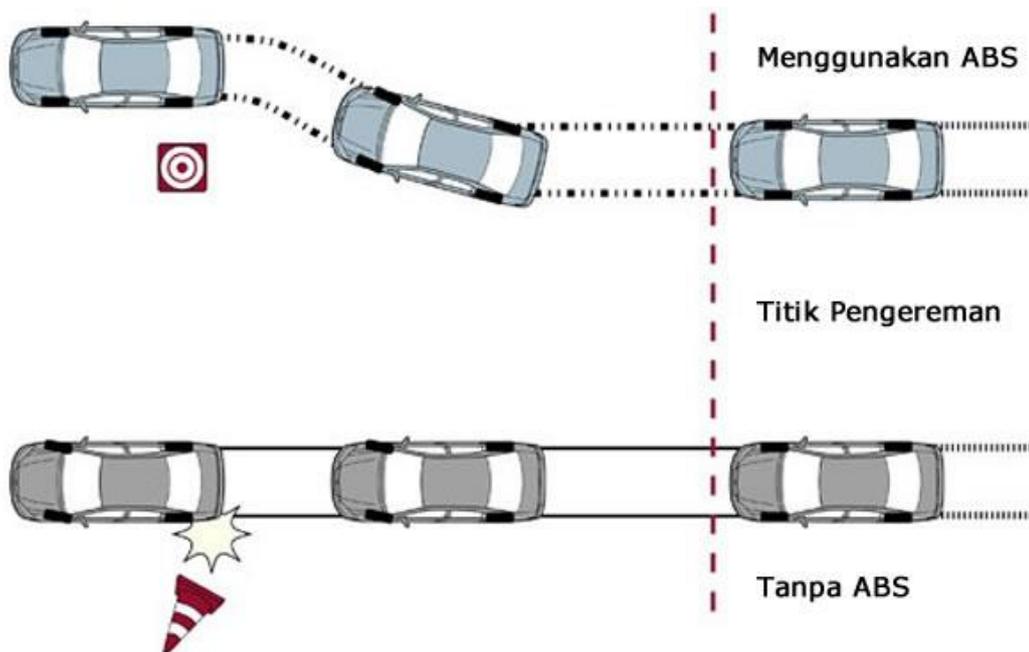
2.2 Anti-Lock Braking System

Anti-lock braking system telah digunakan di industri otomotif sejak tahun 1980-an. Kini ABS telah menjadi standar untuk kendaraan penumpang di Eropa, Amerika dan Jepang. Alasan ABS digunakan sebagai sistem keamanan kendaraan adalah karena dianggap mampu untuk mencegah terkuncinya ban saat pengereman mendadak terjadi, sehingga dapat menjaga stabilitas kemudi, dan memperpendek jarak pengereman. (W.Li, 2010). Ban dikatakan terkunci ketika pengemudi memberikan torsi maksimum pada ban yang mengakibatkan ban kehilangan kecepatannya secara cepat namun kendaraan masih memiliki kecepatan longitudinal, Sehingga kendaraan meluncur pada permukaan jalan. Kondisi ini lebih mungkin terjadi ketika terjadi pengereman mendadak ataupun pengereman pada kondisi permukaan jalan yang licin.

Dalam pengereman, ketika ban mengalami kondisi terkunci dapat mengakibatkan beberapa hal, antara lain jarak pengereman yang semakin jauh,

dan hilangnya kontrol terhadap setir. Sehingga kemungkinan untuk terjadi kecelakaan menjadi lebih besar (Aly, 2011).

Performansi ABS bergantung pada identifikasi tipe permukaan jalan. Langkah yang dapat dilakukan untuk memperoleh informasi tipe permukaan jalan ini dapat melalui *brake pressure* kendaraan, pengukuran nilai slip roda, dan perbandingan laju perlambatan (Will, 1998). Ataupun saat ini telah ada sensor yang terpasang pada roda dan mampu untuk mendapatkan informasi ini. Ketika pengereman terjadi, sensor akan mendeteksi kecepatan roda. Ketika kecepatan roda berada dibawah kecepatan kendaraan, sensor mengirim sinyal ke kontroler yang kemudian kontroler akan memberikan perintah pada aktuator untuk mengurangi gaya pengereman pada roda sehingga roda dapat mengimbangi kecepatan dari kendaraan.



Gambar 2.2 Skema ABS (David, 2014)

Ketika pengereman terjadi gaya kontak antara ban dan jalan, gaya kontak ini disebut sebagai gaya gesek F_x . Persamaan pada gaya gesek dapat dilihat pada persamaan berikut

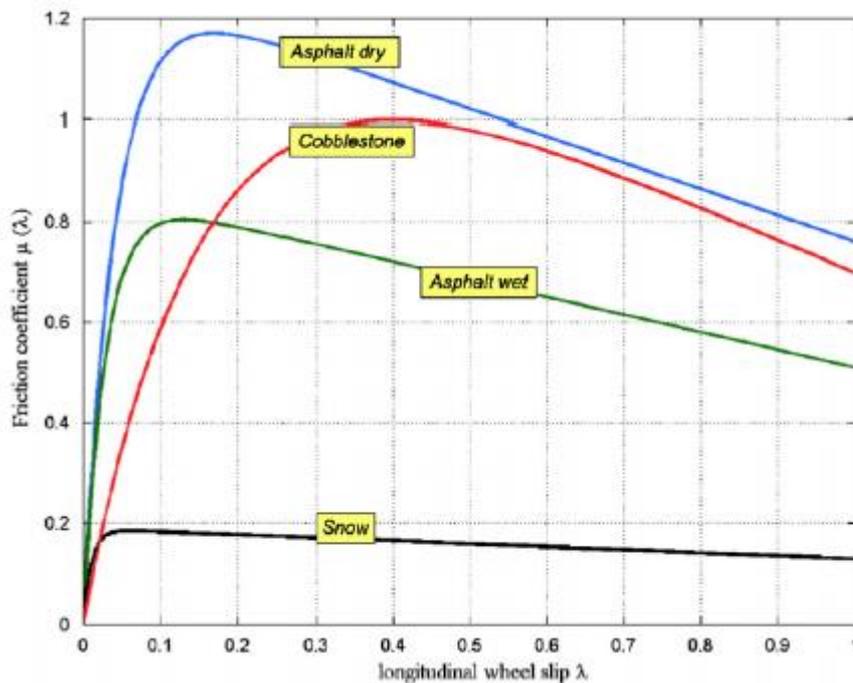
$$F_x = \mu \cdot F_z \quad (2.8)$$

Dimana μ adalah koefisien gesek, F_{zf} adalah gaya normal roda (N). Koefisien gesek antara berbagai kondisi jalan memiliki nilai yang berbeda. Untuk

mendapatkan nilai koefisien dapat melalui grafik hubungan gaya gesek dan *slip ratio* atau melalui persamaan berikut

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \quad (2.9)$$

Dimana C_1 adalah nilai maksimum kurva gesekan, C_2 adalah bentuk kurva gesekan, C_3 adalah beda antara kurva gesekan saat nilai maksimum dan pada saat λ , dan C_4 adalah nilai karakteristik kebasahan jalan.



Gambar 2.3 Kurva hubungan *slip ratio* dengan *friction coefficient* (W.Li, 2010)

Tabel 2.1 Parameter koefisien gesekan pada berbagai kondisi jalan (Guo, J., Jiang, X., & Lian, G., 2014)

Parameter	Aspal Kering	Aspal Basah	Salju	Es
C_1	1,029	1,1973	0,1946	0,05
C_2	17,16	25,168	94,129	306,39
C_3	0,523	0,5373	0,0646	0
C_4	0,03	0,03	0,03	0,03

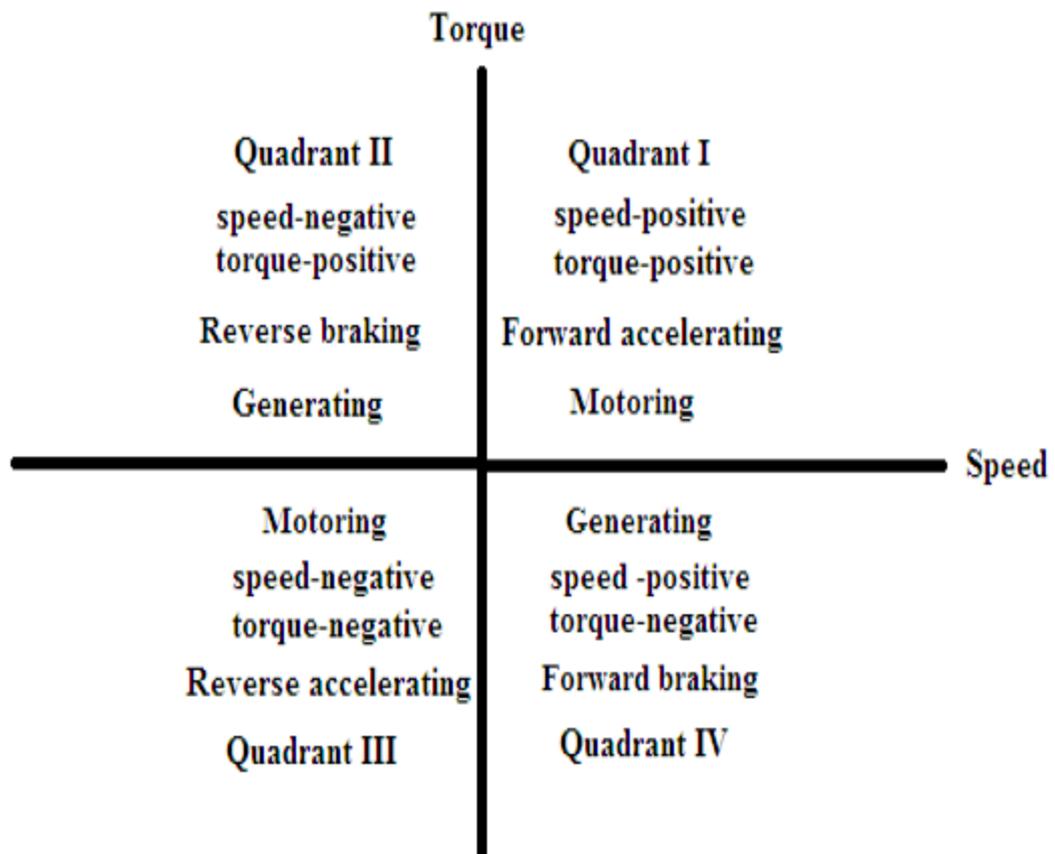
Dalam proses pengereman yang terjadi nilai *slip ratio* dikalkulasi melalui persamaan berikut

$$\lambda = 1 - \frac{v}{r_w \omega_i} \quad (2.10)$$

Dimana λ adalah *slip ratio*, v adalah kecepatan kendaraan (m/s), r_w adalah jari-jari roda (m), dan ω adalah kecepatan rotasional roda (rad/s).

2.3 Regenerative Braking

Pada kendaraan elektrik, regenerative braking memfungsikan motor sebagai generator, yaitu mengirim kembali daya hasil pengereman menuju baterai. Sehingga dapat didefinisikan regenerative braking merupakan suatu mekanisme pengembalian daya pada baterai saat pengereman. (Varocky, 2011)



Gambar 2.4 Kurva hubungan *slip ratio* dengan *friction coefficient* (Murali, 2017)

Gambar 2.4 diatas menjelaskan tentang kendaraan elektrik yang beroperasi sebagai motor dan generator, juga dalam keadaan maju dan mundur. Kondisi ini disebut juga mode operasi 4 kuadran. (Shanmugasundram, Zakariah, & Yadaiah, 2009)

Kuadran I adalah kondisi saat kecepatan dan torsi bernilai positif sehingga kendaraan bergerak maju, Kuadran III adalah kondisi ketika nilai torsi dan kecepatan negatif sehingga kendaraan bergerak mundur. Kuadran I dan III ini adalah kondisi ketika mode motor. Kuadran II adalah kondisi ketika kendaraan sedang bergerak mundur yang kemudian terjadi pengereman, sehingga nilai kecepatan negatif sedangkan torsi bernilai positif. Kuadran IV adalah kondisi ketika kendaraan bergerak maju dan terjadi pengereman. Nilai kecepatan adalah positif dan torsi bernilai negatif. Kuadran II dan IV ini adalah menjelaskan kondisi dari mode generator (Khrisnan, Park, & Ha, 2005). Pada pengereman regenerative, motor bekerja pada kuadran II dan IV. Daya yang disimpan pada baterai ini kemudian dapat digunakan lagi sebagai tenaga penggerak kendaraan, sehingga dengan metode ini, efisiensi kendaraan dapat meningkat.

2.4 Kontrol PI

“PI” merupakan kependekan dari Proporsional dan Integral. Kontrol ini pertama kali digunakan pada tahun 1939, dan merupakan salah satu kontroler yang paling banyak digunakan pada kontrol proses industri hingga saat ini. Kontroler PI memiliki tujuan untuk membuat variable proses mengikuti nilai *set point* yang diberikan. Cara kerjanya yakni dengan membaca eror antara *set point* yang diberikan dengan hasil pengukuran variabel proses. Elemen P memiliki karakteristik untuk mempercepat *rise time*, dan elemen I memiliki karakteristik untuk memperkecil eror (Araki.M) Adapun untuk mendapatkan nilai parameter dari kontroler PI ini dilakukan dengan cara *tuning*. Ilustrasi kontrol PI dapat dilihat seperti pada gambar 2.5

Algoritma dari kontrol PI didefinisikan sebagai berikut:

$$m(t) = K[e(t) + 1/T_i \int e(\tau) dt] \quad (2.11)$$

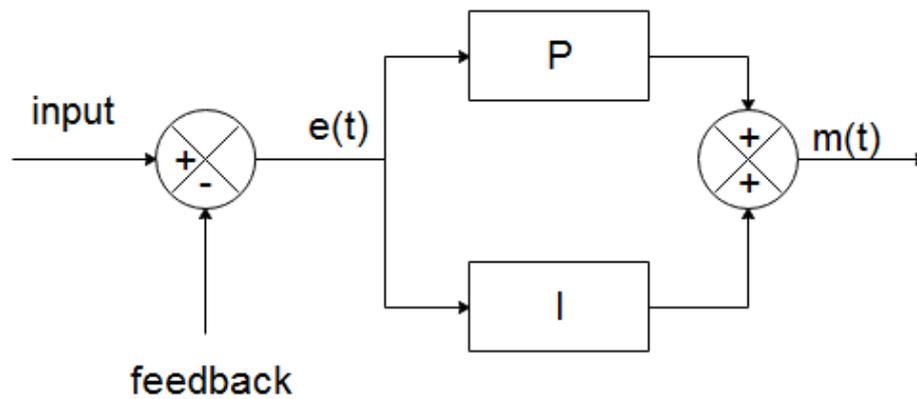
Dimana:

$m(t)$ = sinyal error

$e(t)$ = *error*

K = *gain* kontroler

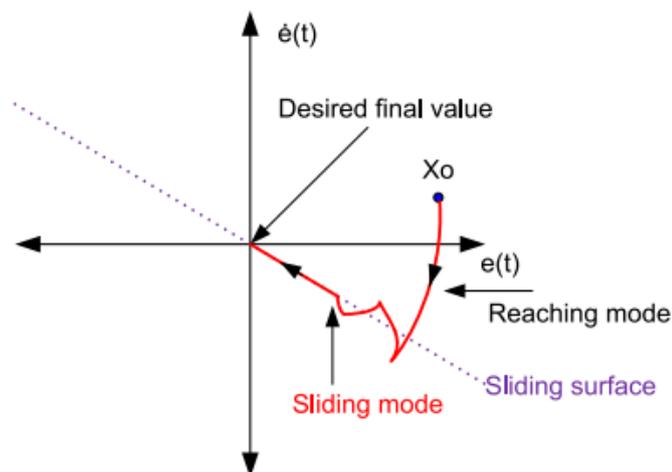
T_i = *integral time* (s)



Gambar 2.5 Diagram blok kontrol PI

2.5 SMC

Sliding Mode Control (SMC) merupakan suatu metode kontrol yang mengubah dinamika sistem non-linier untuk kemudian meluncur sepanjang penampang normal suatu sistem. Cara kerja SMC ini adalah dengan mengendalikan *trajectory state* sistem untuk menuju *sliding surface* dan mempertahankan nilai tertentu. Keunggulan SMC antara lain adalah memiliki ketahanan pada *high tracking trajectory* dan menghasilkan solusi yang bersifat *robust* untuk mengestimasi parameter, diagnosis kesalahan dan kontrol. SMC banyak diaplikasikan untuk mendesain suatu sistem kontrol pada plant yang kompleks, memiliki dinamika non-linear derajat tinggi yang bekerja pada tingkat ketidakpastian dan terdapat gangguan luar, serta sensitivitas rendah terhadap variasi parameter. (Rahmani, Ghanbari, & Etefagh, 2016)



Gambar 2.6 Interpretasi SMC (Holkar & Waghmare, 2013)

Gambar 2.6 menjelaskan bahwa dengan fase-bidang terlihat representasi SMC yang terdiri dari kesalahan ($e(t)$) dan turunannya ($\dot{e}(t)$). Sistem yang berada pada kondisi awal X_0 bergerak sepanjang lintasan keadaan (*trajectory surface*) menuju *sliding surface* pada waktu tertentu (*reaching mode*) dan meluncur sepanjang permukaan menuju nilai yang diinginkan (*sliding mode*). (Holkar & Waghmare, 2013)

Hal pertama yang dilakukan dalam mendesain SMC adalah dengan menentukan persamaan permukaan geser (*sliding surface*). Pada *Sliding Mode*, sistem dinamik dibatasi oleh persamaan permukaan yang mampu mengimbangi ketidakpastian plant serta gangguan luar (Camacho, Smith, & Moreno, 2003). Langkah kedua, membuat *Feedback Control Law* untuk memberikan konvergensi lintasan sistem ke *Sliding Surface*. Gerakan sistem pada permukaan geser disebut *Sliding Mode* (Holkar & Waghmare, 2013). *Sliding Surface* ditentukan dengan persamaan (2.10).

$$S = \omega_f - \omega_r \quad (2.12)$$

ω_f merupakan kecepatan rotasional roda depan (rad/s), dan ω_r merupakan kecepatan rotasional roda belakang (rad/s). *Sliding surface* ini kemudian ditentukan sebagai nilai error dari sistem atau dapat ditulis $e = \omega_f - \omega_r$. Dalam fase *sliding mode*, *tracking error* akan menuju titik kesetimbangan yang mana akan membuat terperangkap pada *sliding surface* atau dapat dituliskan menjadi $s(t) = \dot{s} = 0$. (Ghozali, Sam, Rahmat, Hasyim, & Zulfatman, 2011)

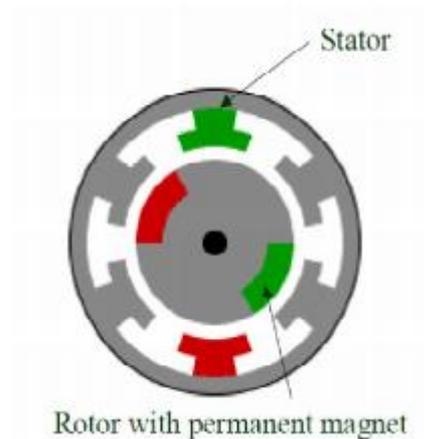
2.6 Motor Brushless Direct Control

Fungsi dari sebuah motor adalah sebagai penggerak kendaraan, dengan cara mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Motor memiliki berbagai macam tipe, salah satu yang umum digunakan terutama dalam aplikasi mobil listrik ialah motor brushless direct current (BLDC) (Reneas, 2020). Sesuai dengan namanya, sumber arus sistem penggerak ini adalah listrik DC. BLDC digunakan dalam industri otomotif, aerospace, konsumen, medis, industri alat otomasi, dan instrumentasi. (Sungaya & Rameshkumar, 2014)

Motor BLDC saat ini lebih banyak dipilih ketimbang motor BDC. Keuntungan penggunaan motor BLDC adalah karena membutuhkan *maintenance*

yang lebih sedikit, memiliki efisiensi yang lebih tinggi, *range* kecepatan lebih tinggi, serta lebih sedikit noise. Selain itu kekurangan motor BLDC adalah harganya yang lebih mahal, serta desain pengontrol lebih kompleks daripada motor BDC. (Cham & Samad, 2014)

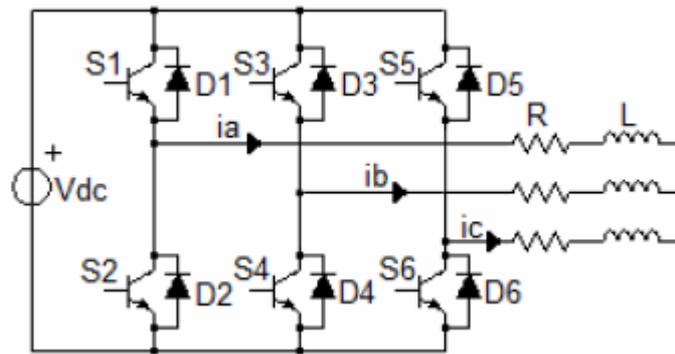
Motor BLDC adalah jenis *synchronous motor*, yaitu medan magnet dihasilkan oleh stator dan rotor yang berputar pada frekuensi yang sama. Motor BLDC yang paling banyak digunakan adalah motor 3 fasa. (Sungaya & Rameshkumar, 2014). Motor ini disebut BLDC dikarenakan sumber arusnya yang berupa arus listrik DC yang kemudian dirubah menjadi arus AC dengan menggunakan inverter 3 fasa.



Gambar 2.7 Ilustrasi motor BLDC (Sungaya & Rameshkumar, 2014)

Gambar 2.7 menjelaskan 2 komponen utama dari motor BLDC, yakni stator sebagai bagian yang diam, dan rotor sebagai kutub magnet yang berputar. Pada motor BLDC tidak menggunakan komutator mekanik seperti halnya motor BDC, melainkan menggunakan komutasi elektrik sehingga bebas perawatan. (Mullick, 2017). Selain inverter, juga dibutuhkan sensor posisi yang umumnya digunakan adalah sensor *hall effect* yang tertanam pada stator. Fungsinya adalah untuk menentukan kumparan yang akan menerima arus listrik. Setiap sensor dilewati kutub magnet, sensor akan memberi sinyal *high* dan *low*. (Sungaya & Rameshkumar, 2014). Posisi rotor dipandu oleh saklar elektronik untuk memastikan komutasi terjadi secara tepat dan motor dapat berputar. *Six step inverter* digunakan pada motor BLDC untuk mengatur aliran yang masuk ke

motor. Cara kerjanya, yaitu mengalirkan energi hanya pada 2 kumparan dalam 1 waktu dengan arah arus yang saling berkebalikan. Satu putaran motor terdiri dari 6 *step*, artinya tiap *step* aktif setiap 60 derajat. Adapun skema *switching* komutasi ditunjukkan pada tabel 2.2.



Gambar 2.8 Skema *six step inverter* pada motor BLDC (Cham & Samad, 2014)

Tabel 2.2 Urutan komutasi *six-step inverter* (Cham & Samad, 2014)

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	-	+

Dalam upaya mengurangi kompleksitas matematis motor BLDC, ditetapkan beberapa asumsi sebagai berikut: Jumlah lilitan masing-masing kumparan sama, saturasi magnetic diabaikan, tidak ada losses dari hysteresis, induktansi mutual diabaikan, reaksi armatur diabaikan (Singh, 2012). Sehingga pemodelan mengikuti persamaan berikut

$$\begin{cases} V_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (2.13)$$

Dengan :

V_a, V_b, V_c = Voltase tiap fasa (V)

i_a, i_b, i_c = Arus stator tiap fasa (i)

e_a, e_b, e_c = back EMF tiap fasa (V)

L = induktansi tiap fasa (H)

R = resistansi tiap fasa (Ω)

Back Emf pada motor BLDC berbeda fasa sebesar 120 pada masing – masing fasa nya, dan dapat dinyatakan dalam persamaan (2.12)

$$\begin{cases} e_a = K_e f(\theta_e) \omega_m \\ e_b = K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \omega_m \\ e_c = K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \omega_m \end{cases} \quad (2.14)$$

Dengan:

ω_m = rotor speed (rad/s)

K_e = konstanta *back emf* (V/rad.s⁻¹)

$f(\theta_e)$ = fungsi trapezoidal

θ_e = posisi sudut rotor (rad)

Torsi elektomagnetik yang dihasilkan oleh motor BLDC dapat dilihat pada persamaan (2.7)

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2.15)$$

atau

$$T_e = K_t \left[f(\theta_e) i_a + f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.16)$$

Dengan :

T_e = torsi elektomagnetik (Nm)

K_t = konstanta torsi (Nm/A)

2.7 Wheel Slip Control

Wheel slip longitudinal mengurangi efisiensi dalam mengemudi. Selain itu, kemampuan mengemudi juga berkurang yang menyebabkan rentan terjadi kecelakaan. Slip roda longitudinal ini terjadi ketika torsi yang diberikan melebihi batas. Kondisi ini lebih mungkin terjadi ketika koefisien gesek antara ban dan jalan rendah seperti pada jalanan basah atau bersalju. Akibatnya butuh kontrol tepat untuk menghilangkan slip roda secara *real-time* demi meningkatkan keamanan kendaraan. (Lam, Qian, & Xu, 2014)

WSC berfungsi hampir di setiap kelas keselamatan mengemudi seperti ABS, kontrol traksi dan sistem kontrol kestabilan kendaraan. (Savitski, Schleinin, Ivanov, & Augsborg, 2018). WSC atau kontrol slip roda merupakan salah satu sistem kontrol aktif pada kendaraan. Pada Anti-Lock Braking System (ABS), WSC diperlukan sebagai penghasil gaya longitudinal ban, dan juga gaya ban lateral. Secara intrinsik Slip roda adalah kondisi dimana torsi keluaran motor melebihi gaya gesek maksimum antara ban dan permukaan jalan. Namun, gaya gesek tidak dapat dikalkulasi secara langsung dan berubah tergantung permukaan jalan dan kondisi kendaraan. Untuk mengatasi masalah dalam hal kontrol dinamis kendaraan, implementasi kontrol slip roda (WSC) dapat dibagi menjadi dua, yakni metode kontrol torsi tidak langsung berdasarkan rasio slip roda dan metode kontrol torsi langsung berdasarkan model kendaraan atau roda. (Limited, 2020)

Sistem WSC terdiri dari dua komponen utama, yaitu kontroler rasio torsi dan generator torsi referensi. Bagian pertama menyangkut masalah pemilihan kontroler yang tepat dan desain, sedangkan bagian kedua berkaitan dengan cara menghasilkan nilai referensi. (Savitski, Schleinin, Ivanov, & Augsborg, 2018)

2.8 Torsi Distribusi

Torsi distribusi merupakan mekanisme untuk mendistribusikan torsi pada motor depan dan belakang sesuai dengan koefisien gesek antara ban-jalan pada tiap roda. (Yu, Tseng, & Chang, 2012). Alasan utama dikembangkannya metode distribusi torsi pada kendaraan elektrik adalah sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi motor penggerak pada kecepatan tertentu (Wu, Zheng, Wang, & Du, 2019)

Untuk mendapatkan torsi distribusi pada tiap motor, dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$T_{mfref} = \frac{T_{req}s}{g_f} \quad (2.17)$$

$$T_{mrref} = \frac{T_{req}(1-s)}{g_r} \quad (2.18)$$

$$T_{mfref} \cdot g_f = T_f \quad (2.19)$$

$$T_{mrref} \cdot g_r = T_r \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} T_f + T_r = T_{req} \\ 0 \leq T_f \leq T_{req} \\ 0 \leq T_r \leq T_{req} \\ 0 \leq s \leq 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

Dimana T_{mref} merupakan torsi motor referensi pada roda depan dan belakang (Nm), T_{req} adalah torsi total yang dibutuhkan pada sistem (Nm), s adalah rasio distribusi torsi, g adalah gear reduction, T_f adalah torsi motor depan (Nm), T_r adalah torsi motor belakang (Nm).

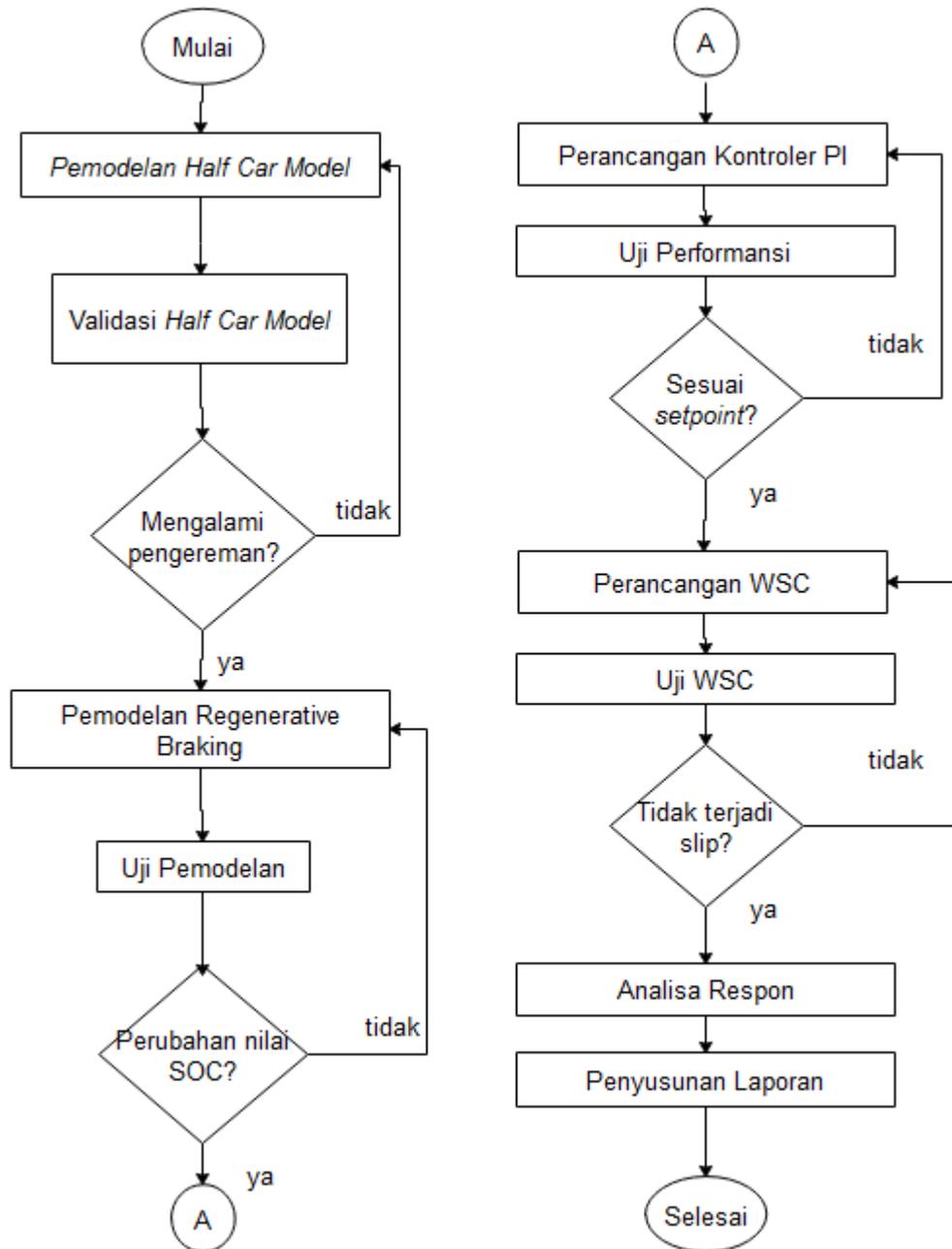
Ketika nilai $s=0$ hal ini berarti Torsi pengereman sepenuhnya dialihkan ke motor belakang, ketika $s=1$ merupakan kondisi sebaliknya, yakni torsi pengereman sepenuhnya dialokasikan ke motor depan. Namun, ketika nilai $s=0,5$ artinya torsi pengereman terdistribusi secara merata antara motor depan dan belakang (Wu & Zheng, 2017)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

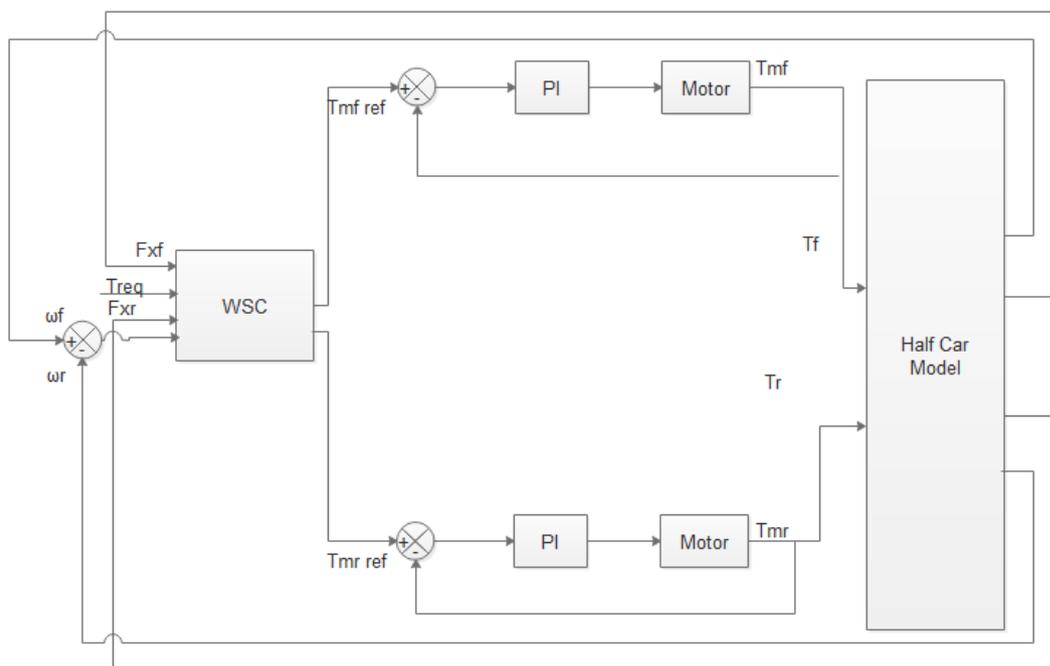
METODOLOGI PENELITIAN

Dalam pengerjaan tugas akhir ini mengikuti diagram alir seperti dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Perancangan sistem diawali dengan pemodelan terhadap *half car* yang kemudian divalidasi dengan melihat respon model sampai melakukan pengereman, kemudian melakukan pemodelan terhadap regenerative braking system dan diuji dengan memeriksa perubahan nilai SOC. Setelah tahap ini kemudian dilakukan perancangan kontroler. Kontroler dipakai untuk melakukan kontrol terhadap torsi motor yang mana kontroler yang digunakan adalah kontroler PI dan diberikan pada tiap roda, lalu dilakukan uji performasi dari kontroler yang telah dibuat. Langkah berikutnya adalah melakukan perancangan WSC, lalu WSC diuji dengan memberi 2 macam kondisi jalan, serta melihat perubahan terhadap 2 kondisi jalan tersebut. Diagram blok pengendalian sistem dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut



Gambar 3.2 Diagram blok sistem

Gambar 3.2 menunjukkan diagram blok sistem yang dirancang, dengan *output* blok *half car model* saat proses pengereman berupa gaya gesek roda depan dan belakang (F_{xi}), serta kecepatan roda depan dan belakang (ω_i). *Output* blok HCM menjadi *input* dari blok WSC dengan kecepatan roda depan diselisihkan dengan kecepatan roda belakang sebagai nilai *error*, dengan T_{req} menjadi inputan lainnya bagi blok WSC. *Output* blok WSC berupa torsi motor referensi untuk

motor depan dan belakang ($T_{mi\ ref}$). *Output* blok WSC dikontrol menggunakan metode kontrol PI dengan *feedback* berupa torsi motor (T_{mi}). *Output* pengontrol PI selanjutnya menjadi *input* bagi blok motor yang kemudian menghasilkan *output* berupa torsi motor (T_{mi}). *Output* blok motor ini selanjutnya akan dikalikan dengan konstanta *gear reduction* (g_i) dan menjadi *input* dari blok HCM.

3.1 Pemodelan Half Car

Pemodelan half car pada simulink dilakukan sesuai persamaan (2.1) hingga persamaan (2.7). Dengan parameter yang digunakan pada kendaraan dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Variabel pada persamaan gaya (Tur & Osgur, 2007)

No.	Simbol	Variabel (satuan)	Nilai
1.	m	Massa HCM (kg)	850
2.	g	Percepatan gravitasi (m/s^2)	10
3.	c_r	Koefisien aerodinamik	0,01
4.	δ	Densitas udara (kg/m^3)	1,2041
5.	A_f	Luas permukaan frontal (m^2)	3,1
6.	f	Koefisien resistansi putaran roda	0,3
7.	r	Jari jari roda (m)	0.3
8.	J	Momen inersia roda ($kgms^2$)	0.5

Adapun kemudian nilai dari koefisien gesek dapat diperoleh melalui perhitungan pada persamaan dibawah:

$$\mu(\lambda, v) = [C_1^{(1-e^{-C_2\lambda})-C_3\lambda}]e^{-C_4\lambda v} \quad (3.1)$$

Dimana λ adalah nilai *slip ratio*, v adalah kecepatan kendaraan (m/s), C_1 adalah nilai maksimum kurva gesekan, C_2 adalah bentuk kurva gesekan, C_3

adalah beda antara kurva gesekan saat nilai maksimum dan pada saat lambda, dan C_4 adalah nilai karakteristik kebasahan jalan.

Kondisi jalan yang digunakan dalam simulasi pada matlab adalah pada aspal kering dan es. Sehingga parameter C_1 , C_2 , C_3 , dan C_4 ditentukan seperti pada tabel 3.2

Untuk gaya longitudinal roda F_{xi} dapat dirumuskan sebagai persamaan berikut

$$F_{xi} = \mu_i(\lambda_i)F_{zi} \quad (3.2)$$

Dimana F_{xi} adalah gaya gesek roda (N), μ_i adalah koefisien gesek roda, λ_i adalah *slip ratio* roda, dan F_{zi} adalah gaya normal roda (N).

Slip ratio dapat didefinisikan sebagai nilai perbandingan antara selisih kecepatan roda dan kecepatan kendaraan dengan kecepatan kendaraan, yang juga dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\lambda = 1 - \frac{v}{r_w \omega_i} \quad (3.3)$$

Tabel 3.2 Parameter koefisien gesekan pada aspal kering (Guo, J., Jiang, X., & Lian, G., 2014)

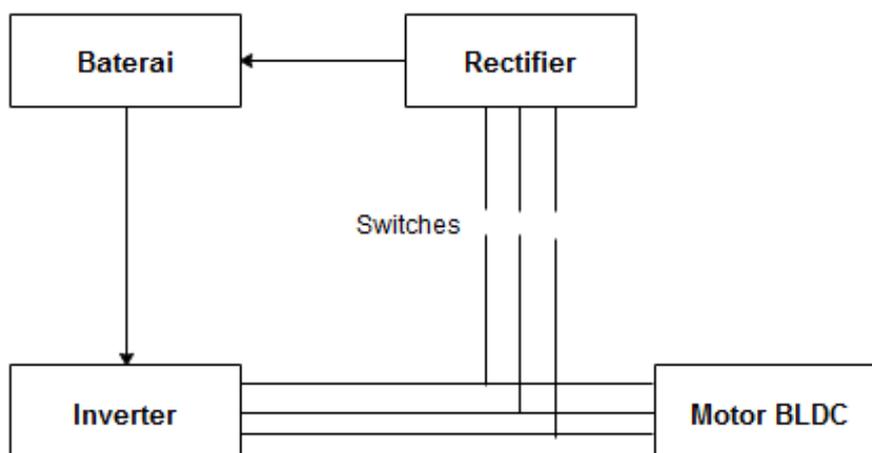
Parameter	Aspal Kering	Es
C_1	1,029	0,05
C_2	17,16	306,39
C_3	0,523	0
C_4	0,03	0,03

3.2 Pemodelan Motor

Motor yang digunakan pada tugas akhir ini adalah motor BLDC. Adapun fungsi dari motor BLDC ini adalah sebagai penggerak kendaraan. Pemodelan dilakukan pada baterai sebagai *power supply* motor, driver motor yang berupa *inverter*, *rectifier*, dan motor dengan jenis *permanent magnet synchronous motor*.

Skema kerja dari motor adalah berawal dari sumber daya berupa baterai yang mengalirkan daya menuju *inverter*. Pada *inverter* menerima masukan *gate* PWM yang kemudian akan mengalirkan sumber 3 fasa menuju *rectifier* yang

dapat melakukan proses pengecasan pada baterai saat terjadi pengereman. Hal ini terjadi karena motor telah berada pada mode *generator*. Namun bila motor berada pada mode *motoring*, sumber 3 fasa dari *inverter* akan dialirkan kepada motor yang akan menggerakkan kendaraan.



Gambar 3.3 Skema motor

Validasi dari motor ini dilakukan dengan cara melihat kondisi motor saat pengereman. Yakni saat kendaraan tersebut berhenti nilai *slip ratio* bernilai 1 atau roda telah terkunci. Selain itu juga dapat menunjukkan bahwa telah terjadi pengereman secara *regenerative* yang dibuktikan dengan persentase *State of Charge* yang bernilai lebih baik ketimbang saat pengereman *non regenerative*.

3.3 Perancangan Kontroler

Kontroler dipakai untuk melakukan control terhadap nilai torsi motor. Pada sistem pengereman *regenerative* sebagai *anti-lock braking system* ini perancangan kontroler dipilih metode kontrol PI yang diaplikasikan pada masing-masing motor depan dan belakang. Proporsional (P) digunakan untuk mempercepat *rise time*, sedangkan Integral (I) digunakan untuk memperkecil *error* dalam sistem.

Dengan input kontroler berupa selisih dari T_{mref} dengan output torsi motor sebagai feedback dari kontroler. Parameter yang digunakan untuk tuning kontroler diperoleh dengan cara *trial and error*. Adapun *set point* yang dipakai pada roda depan adalah sebesar 149 Nm dan pada roda belakang adalah 151 Nm yang

merupakan hasil dari perhitungan torsi distribusi. Nilai parameter tuning kontrol PI pada motor depan dan belakang dapat dilihat pada Tabel 3.3

Tabel 3.3 Parameter kontroler PI

Roda	Parameter	Nilai
Depan	P	150
	I	100
Belakang	P	170
	I	120

Kontroler dikatakan valid apabila mampu mengatur variabel proses agar sesuai dengan *set point* yang diberikan dengan performa yang baik.

3.4 Perancangan *Wheel Slip Control*

Dalam merancang *wheel slip control* pada tugas akhir ini menggunakan strategi kontrol *Sliding Mode Control* (SMC). Output dari sliding mode control yang dirancang ini berupa nilai rasio torsi distribusi yang selanjutnya akan menjadi salah satu input dalam perhitungan torsi motor pada masing masing roda.

Berdasarkan perhitungan *slip ratio* roda yang terdapat pada persamaan 3.3, maka selisih dari kecepatan roda depan dengan roda belakang dapat dihitung sebagai fungsi *slip ratio*:

$$e = \omega_f - \omega_r = \frac{\lambda_f - \lambda_r}{(1 - \lambda_f)(1 - \lambda_r)} \quad (3.4)$$

Karena skema kontrol yang dipakai adalah SMC, maka S_0 ditentukan sebagai rasio torsi distribusi saat ini, dan $S = S_0 + \Delta s$ sebagai nilai rasio waktu berikutnya. Kemudian persamaan (3.4) dapat ditulis ulang menjadi sebagai berikut:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J} ((1 - s)T_{req} - r_w \mu_r(\lambda_r) F_{zr}) \quad (3.5)$$

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{J} (sT_{req} - r_w \mu_f(\lambda_f) F_{zf}) \quad (3.6)$$

Selanjutnya mendefinisikan *sliding surface*, yaitu $e = \omega_f - \omega_r$. Yang kemudian persamaan (3.5) dan (3.6) disubstitusikan pada turunan pertama dari e menjadi:

$$\dot{e} = \dot{\omega}_f - \dot{\omega}_r = \frac{1}{J} [(2s - 1)T_{req} - (\mu_f(\lambda_f)F_{zf} - \mu_r(\lambda_r)F_{zr})r_w] \quad (3.7)$$

Sehingga desain terhadap sliding mode control akan menjadi:

$$S = S_0 - k_1 \text{sgn}(e) \quad (3.8)$$

Dimana k_1 harus memenuhi kondisi $0.5 > k_1 > k_{1\min}$ dan

$$k_{1\min} = \left| \frac{(\mu_f(\lambda_f)F_{zf} - \mu_r(\lambda_r)F_{zr})r_w - (2s-1)T_{req}}{2T_{req}} \right| \quad (3.9)$$

Nilai s yang didapat dari persamaan (3.9) ini selanjutnya menjadi input dari pada perhitungan nilai torsi distribusi pada motor. Adapun nilai torsi distribusi dihitung dengan persamaan (2.11) dan (2.12). Dengan nilai parameter ditunjukkan pada tabel 3.4 berikut

Tabel 3.4 Parameter Torsi Distribusi (Tur & Osgur, 2007)

Parameter	Nilai
T_{req}	1500 Nm
g_f, g_r	5

Halaman ini sengaja dikosongkan

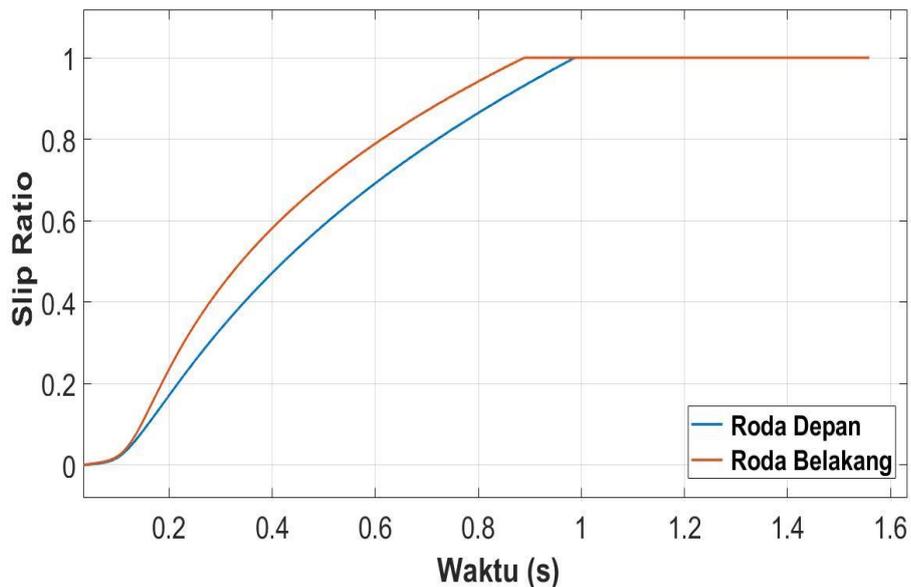
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan WSC dengan torsi distribusi pada regenerative ABS ini dilakukan melalui *software* Matlab simulink 2017a. Dengan kemudian dilakukan pengujian terhadap hasil rancangan yang telah dibuat dengan tujuan untuk melihat performansi sistem sudah baik atau belum

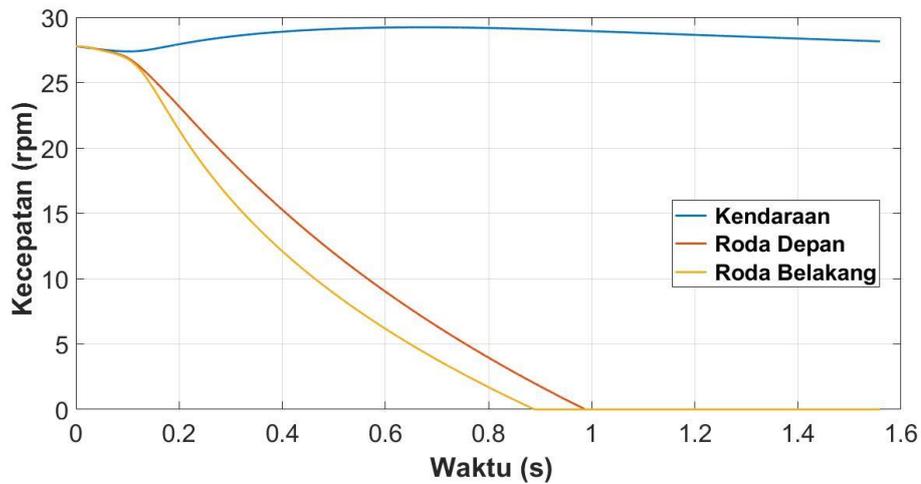
4.1 Uji Validasi Half Car Model (HCM)

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan simulasi pada simulink Matlab 2017a, dengan pengujian terhadap pemodelan yang telah dibuat diperlukan untuk mengetahui apakah HCM telah sesuai dengan jurnal acuan. Pengujian terhadap sistem dilakukan secara open loop tanpa memakai ABS. Dengan didapat hasil seperti grafik dibawah ini.



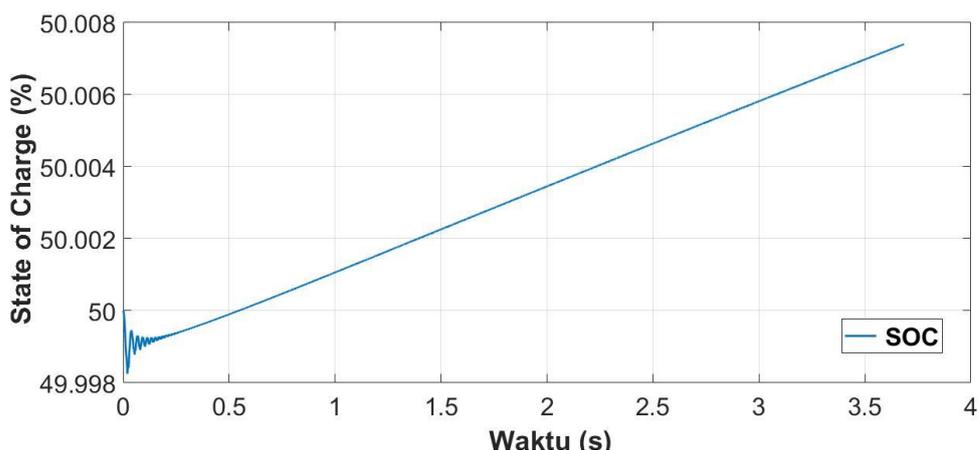
Gambar 4.1 Respon *slip ratio* saat pengereman

Berdasarkan Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa *slip ratio* pada roda depan maupun roda belakang mencapai nilai 1. Artinya adalah kedua roda telah mengalami kondisi terkunci pada saat pengereman berlangsung. Roda belakang terkunci saat detik ke 0,88 dan roda depan terkunci saat detik ke-0.98.



Gambar 4.2 Perbandingan kecepatan kendaraan dengan kecepatan roda

Gambar 4.2 menjelaskan mengenai perbandingan kecepatan roda depan-belakang dengan kecepatan kendaraan saat sistem mengalami pengereman tanpa ABS. Pada pengujian ini nilai kecepatan awal adalah sebesar 27,7778 m/s. Kemudian terlihat roda mengalami penurunan kecepatan hingga mencapai nol pada detik ke-0,88 dan 0,98 untuk roda belakang dan depan. Sedangkan kendaraan masih belum mencapai nilai 0 pada kondisi tersebut. Perbedaan waktu berhenti inilah yang disebut sebagai kondisi slip, yang mengakibatkan kendaraan akan sulit dikendalikan dan berbahaya bagi keselamatan.



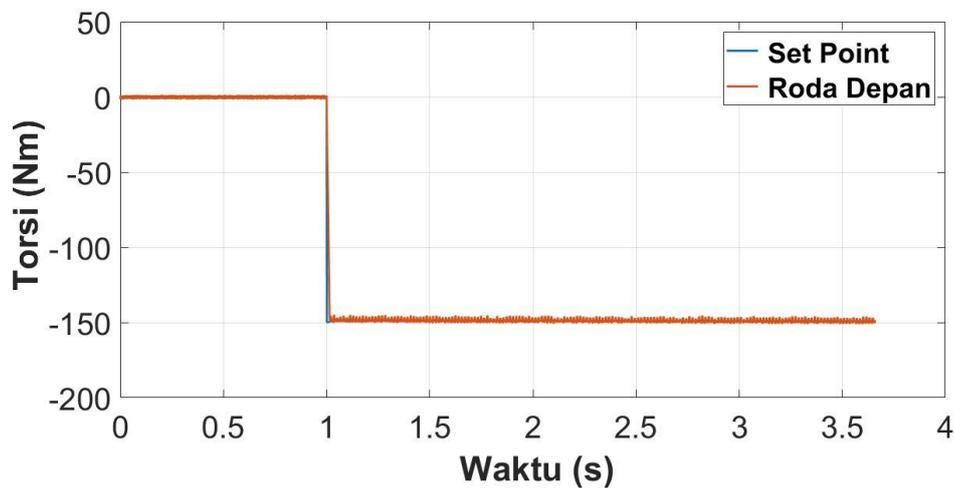
Gambar 4.3 Uji SOC pada baterai

Selanjutnya adalah melakukan pengujian *regenerative* dengan ditunjukkan oleh adanya kenaikan terhadap *State of Charge* (SOC) seperti pada Gambar 4.3.

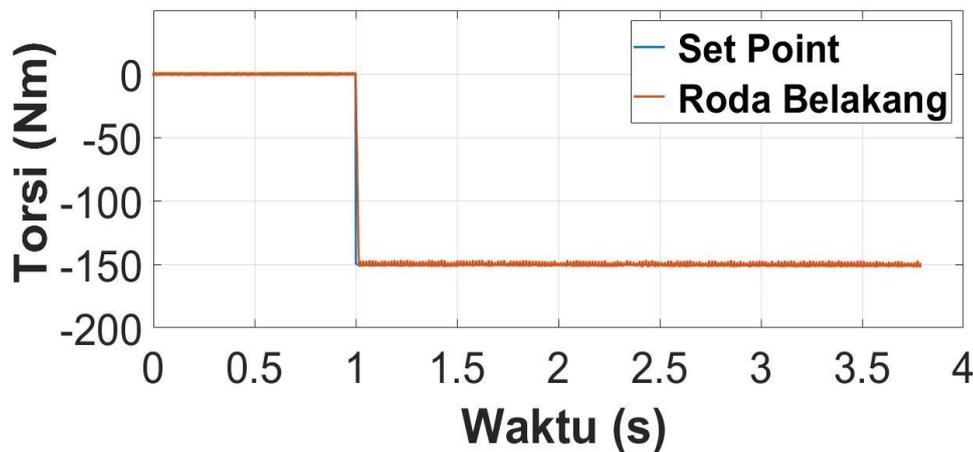
Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa nilai SOC mengalami kenaikan sebesar 0.007% dengan nilai awal sebesar 50% dan menjadi 50.007% pada akhir pengereman.

4.2 Uji Performa Kontroler

Pada pengujian performa kontroler dilakukan dengan menguji sistem secara closed loop. Adapun kontrol yang terdapat pada sistem ini adalah kontrol terhadap torsi motor. Kontroler yang dipakai berupa PI dengan cara tuning dilakukan secara *trial and error*. Cara menerapkan strategi kontrol PI ini adalah terlebih dahulu menetapkan *set point* torsi motor yakni sebesar 150 Nm. Dan dilakukan uji *closed loop* dengan hasil dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 dibawah ini



Gambar 4.4 Respon torsi roda depan



Gambar 4.5 Respon torsi roda belakang

Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 telah memberikan informasi bahwa kontrol PI yang digunakan telah berhasil diterapkan. Hal ini terlihat dari nilai respon torsi roda depan maupun belakang telah berhasil mengikuti *set point* yang ditetapkan. Adapun performansi dari tiap kontroler dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4.1 Performansi kontrol torsi

Roda	Kriteria Performansi	Nilai
Depan	Rise time	0,000315 s
	Settling Time	2.64195 s
	Max. overshoot	0.001%
Belakang	Rise time	0,000315
	Settling Time	2.64195 s
	Max. overshoot	0.001%

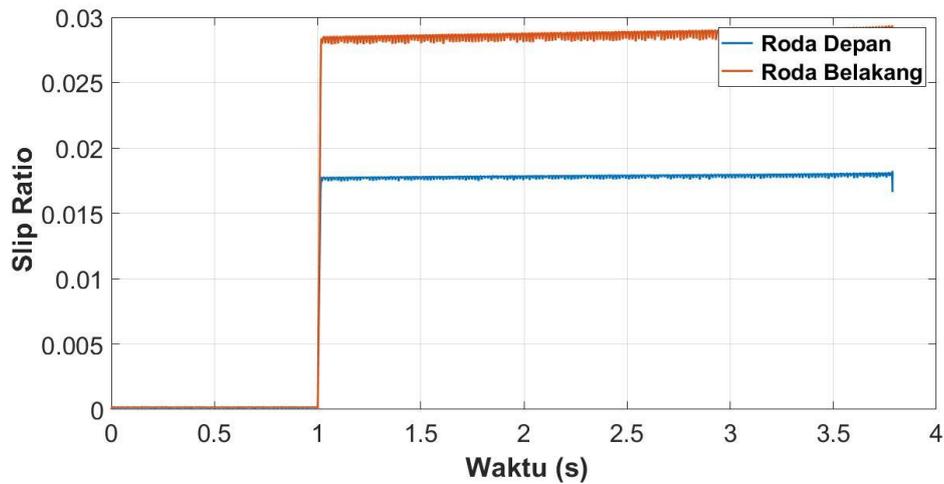
4.3 Uji Wheel Slip Control

Pada kondisi jalan yang sebenarnya, roda depan dan roda belakang tidaklah selalu berada pada kondisi jalan yang sama. Dalam upaya mendapat tenaga penggerak yang akurat pada tiap roda, perlu dipastikan terlebih dahulu bahwa torsi yang dihasilkan oleh motor roda depan dan roda belakang sesuai dengan koefisien gesek antara ban-jalan nya. Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap *wheel slip control* yang telah dirancang pada *Half vehicle* dengan ABS. Adapun pengujian dilakukan dengan cara memberikan beberapa kondisi jalan yang berbeda. WSC ini akan menghasilkan torsi referensi sebagai input motor.

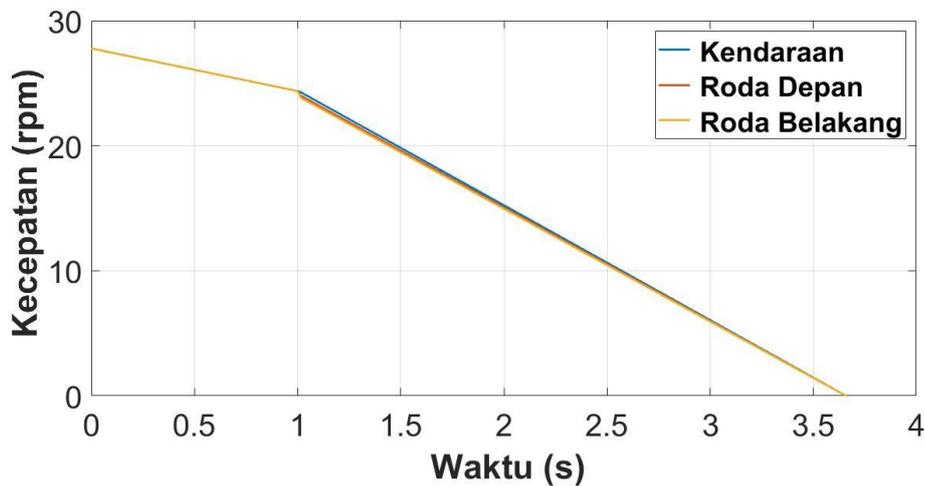
4.3.1 Pengujian pada jalan aspal kering

Pengujian pada kondisi jalan aspal kering dilakukan dengan memakai nilai parameter koefisien gesekan C1 sebesar 1,029, C2 sebesar 17,16, C3 sebesar 0,523, dan C4 sebesar 0,03.

Hasil pengujian pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa *slip ratio* yang dihasilkan pada roda depan dan belakang berbeda. Nilai *slip ratio* pada roda depan adalah 0.018 dan pada roda belakang adalah sebesar 0.028. Perbedaan nilai *slip ratio* yang dihasilkan antara roda depan dan belakang ini menandakan bahwa WSC yang dirancang telah berjalan secara baik.



Gambar 4.6 Respon *slip ratio* aspal kering



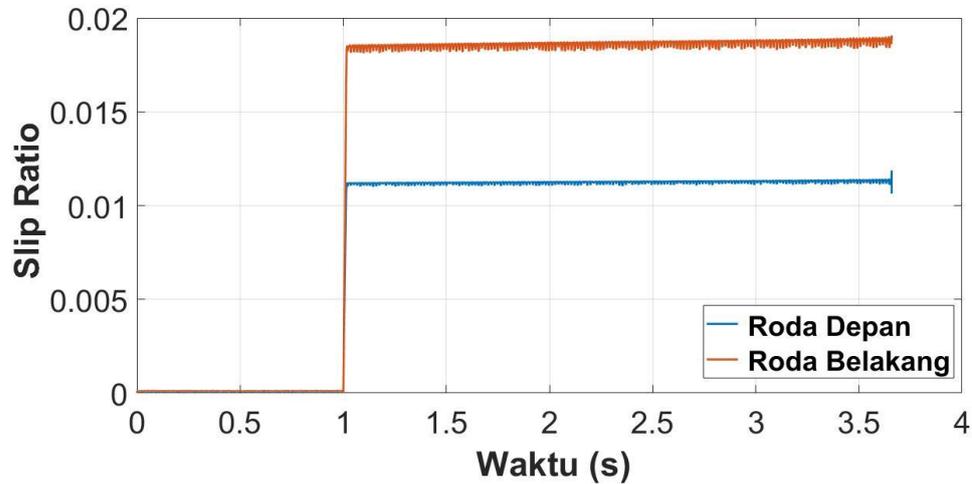
Gambar 4.7 Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada aspal kering

Kemudian pada Gambar 4.7 terlihat bahwa sistem mampu mengalami pengereman tanpa terjadi slip dan berhenti pada detik ke-3,659. Pada perancangan ini digunakan pedal yang pada simulink diberikan dengan input *step* pada detik ke-1, sehingga lama waktu pengereman yang dibutuhkan pada pengereman dengan kondisi jalan aspal kering ini adalah sebesar 2,659 detik.

4.3.2 Pengujian pada jalan aspal basah

Pengujian pada kondisi jalan aspal basah dilakukan dengan nilai parameter C1 sebesar 1,1973, C2 sebesar 25,168, C3 sebesar 0,5373, dan C4 sebesar 0,03.

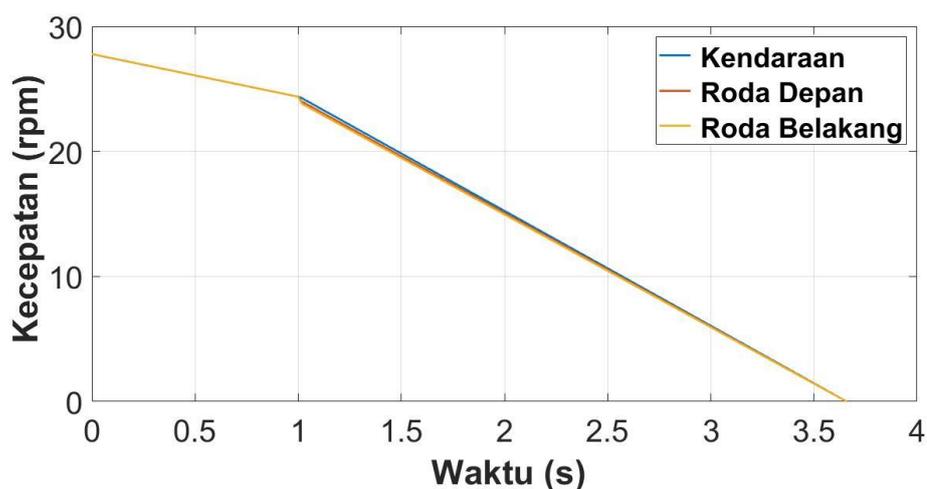
. Dengan respon *slip ratio* roda depan dan belakang dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Respon *slip ratio* roda depan dan belakang pada aspal basah

Hasil pengujian pada kondisi jalan aspal basah pada Gambar 4.8 adalah nilai *slip ratio* yang dihasilkan roda depan dan belakang berbeda. Nilai *slip ratio* pada roda depan adalah sebesar 0,012 sedangkan pada roda belakang adalah sebesar 0,018.

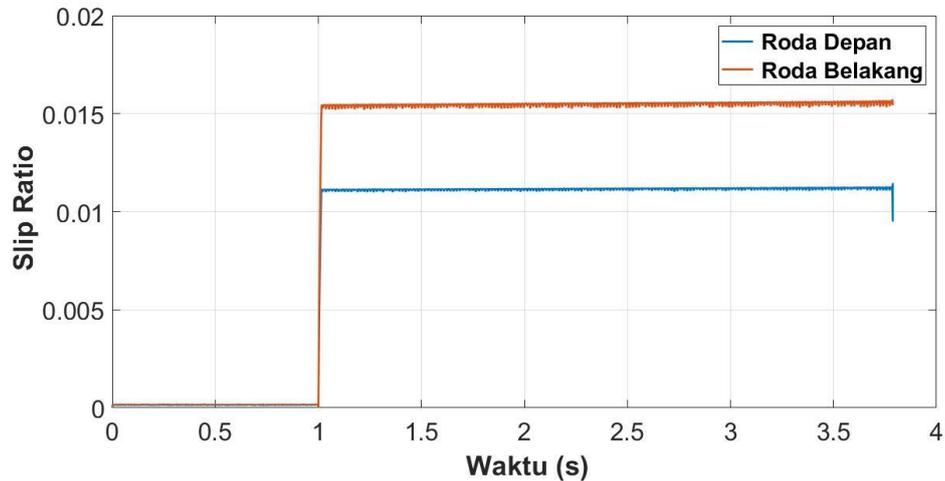
Gambar 4.9 terlihat bahwa sistem berhenti pada detik ke 3,659. Yang artinya waktu pengereman yang dibutuhkan hingga kendaraan berhenti sempurna tanpa terjadi slip adalah sebesar 2.659 detik.



Gambar 4.9 Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada aspal basah

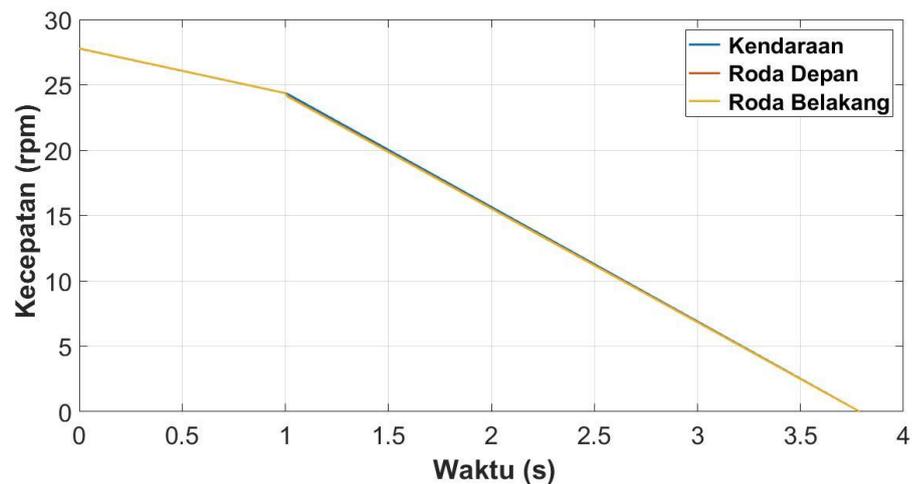
4.3.3 Pengujian pada jalan salju

Pengujian pada kondisi jalan bersalju dilakukan dengan nilai parameter C1 sebesar 0,1946, C2 sebesar 94,129, C3 sebesar 0,0646, C4 sebesar 0,03. Dengan hasil pengujian sebagai berikut



Gambar 4.10 Respon *slip ratio* roda depan dan belakang pada kondisi jalan salju

Hasil pengujian pada kondisi jalan aspal basah pada Gambar 4.10 adalah nilai *slip ratio* yang dihasilkan roda depan dan belakang berbeda. Nilai *slip ratio* pada roda depan adalah sebesar 0,011 sedangkan pada roda belakang adalah sebesar 0,016.

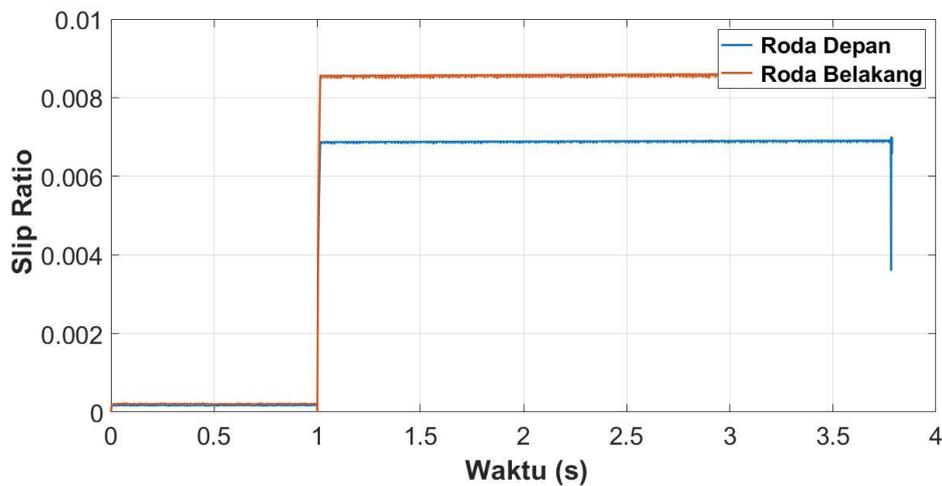


Gambar 4.11 Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada kondisi jalan salju

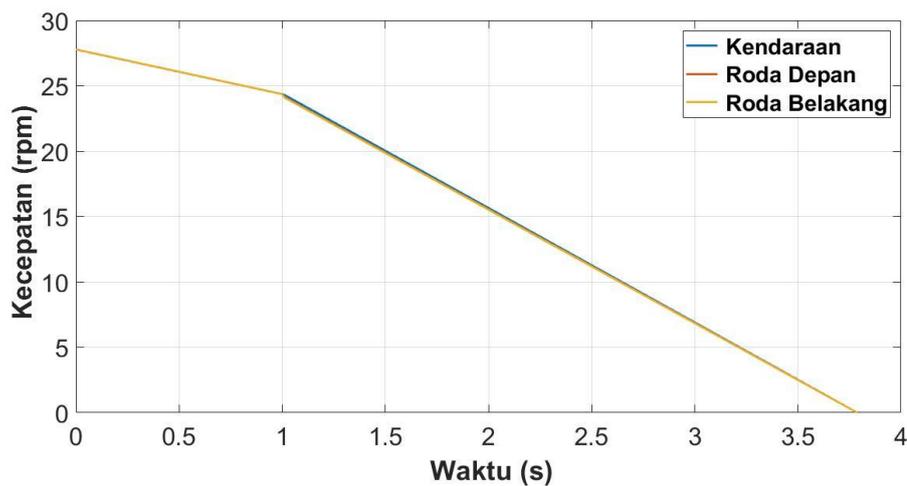
Gambar 4.11 terlihat bahwa sistem berhenti pada detik ke 3,659. Yang artinya waktu pengereman yang dibutuhkan hingga kendaraan berhenti sempurna tanpa terjadi slip adalah sebesar 2.659 detik.

4.3.4 Pengujian pada jalan es

Pengujian pada kondisi jalan bersalju dilakukan dengan nilai parameter C1 sebesar 0,05, C2 sebesar 306,39, C3 sebesar 0, C4 sebesar 0,03. Dengan hasil pengujian sebagai berikut



Gambar 4.12 Respon *slip ratio* roda depan dan belakang pada kondisi jalan es



Gambar 4.13 Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada kondisi jalan salju

Berdasarkan gambar 4.12 nilai *slip ratio* yang dihasilkan pada kondisi jalan es adalah berbeda untuk roda depan dan belakang. Nilai *slip ratio* yang diperoleh pada roda depan adalah sebesar 0,007, sedangkan pada roda belakang adalah sebesar 0,009. Gambar 4.13 terlihat bahwa sistem berhenti pada detik ke 3,659. Yang artinya waktu pengereman yang dibutuhkan hingga kendaraan berhenti sempurna tanpa terjadi slip adalah sebesar 2.659 detik.

Gambar 4.7, 4.9, 4.11, 4.13 menunjukkan antara roda depan dan belakang dengan kendaraan memiliki waktu henti yang sama. Hal ini dipengaruhi oleh ABS yang terpasang. Hal ini membuktikan bahwa dengan adanya ABS, kecepatan roda dapat dikontrol menyesuaikan kecepatan kendaraan saat berada dalam kondisi pengereman.

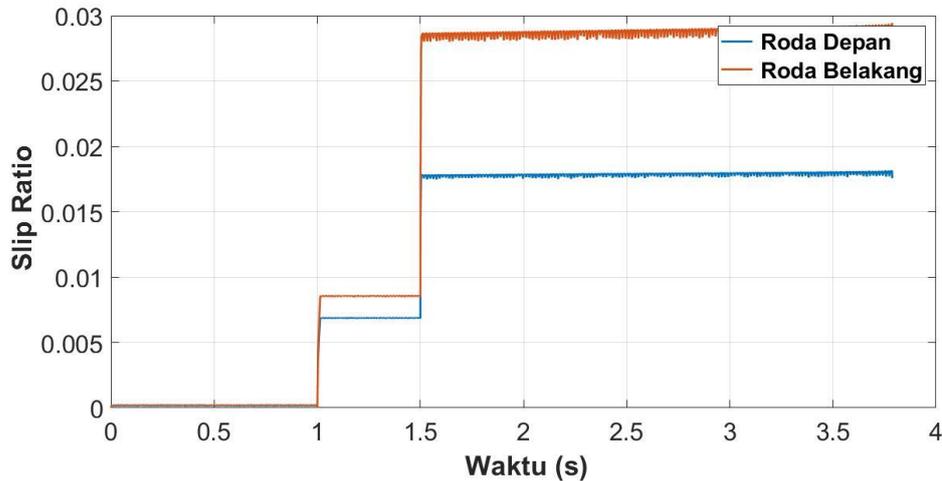
Waktu yang dibutuhkan untuk mengalami pengereman secara sempurna tanpa terjadi slip pada 4 kondisi jalan yang berbeda yakni aspal kering, aspal basah, salju, dan es tidak mengalami perbedaan, hal ini dikarenakan perbedaan *slip ratio* yang dihasilkan tidak besar, sehingga sistem memiliki durasi pengereman yang hampir sama.

4.3.5 Pengujian perubahan jalan

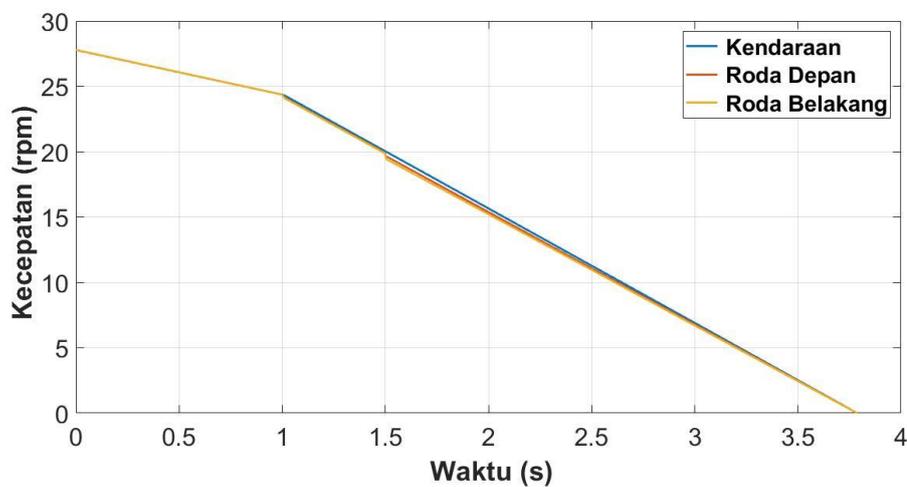
Pengujian perubahan jalan dilakukan dengan dua kondisi perubahan, yang pertama dari kondisi jalan es ke aspal kering, dan sebaliknya. Perubahan kondisi jalan dilakukan dengan merubah nilai C1, C2, C3, dan C4 dari masing-masing kondisi jalan. Cara melakukan perubahan nilai parameter ini adalah dengan memberikan *input step* pada tiap nilai C1, C2, C3, C4 dengan nilai awal memakai nilai parameter koefisien gesek es dan nilai akhir memakai nilai parameter koefisien gesek aspal kering, lalu *step time* ditetapkan pada detik ke 1,5.

Hasil simulasi perubahan jalan dari kondisi jalan es menuju jalan aspal kering ditunjukkan seperti pada gambar 4.14 dan 4.15. Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa respon *slip ratio* pada roda depan dan belakang mengalami perubahan saat *step time*. Nilai slip pada roda depan berubah dari 0,007 menjadi 0,018, nilai slip roda belakang berubah dari 0,009 menjadi 0,028. Sedangkan pada Gambar 4.15 menjelaskan tentang respon kecepatan antara kendaraan, roda depan dan belakang. Dengan waktu pengereman yang dihasilkan adalah sama yakni 2,659

detik. Selain itu pada saat nilai *slip ratio* naik akibat perubahan jalan, hal ini mempengaruhi kecepatan roda. Perbedaan kecepatan roda dengan kecepatan kendaraan menjadi semakin besar akibat dari kenaikan nilai slip ini. Semakin besar nilai *slip ratio* menyebabkan kecepatan roda menjadi semakin kecil.



Gambar 4.14 Respon *slip ratio* roda depan dan belakang pada perubahan jalan (es – aspal kering)

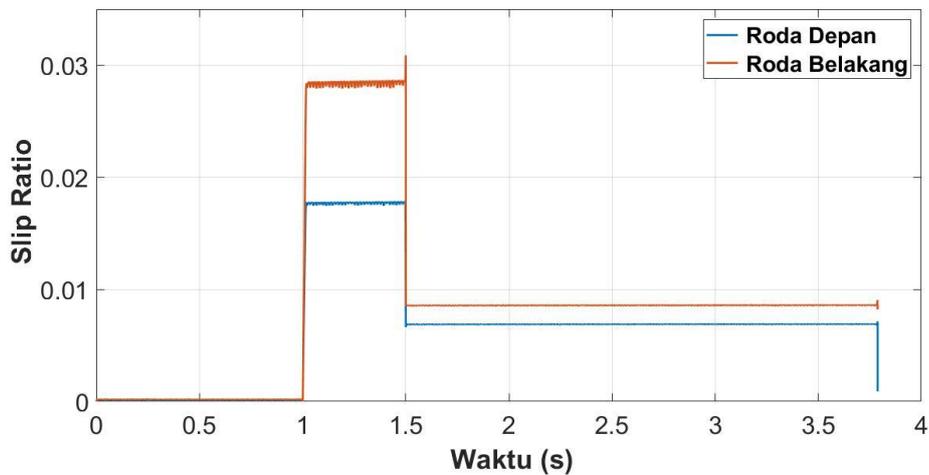


Gambar 4.15 Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada perubahan jalan (es- aspal kering)

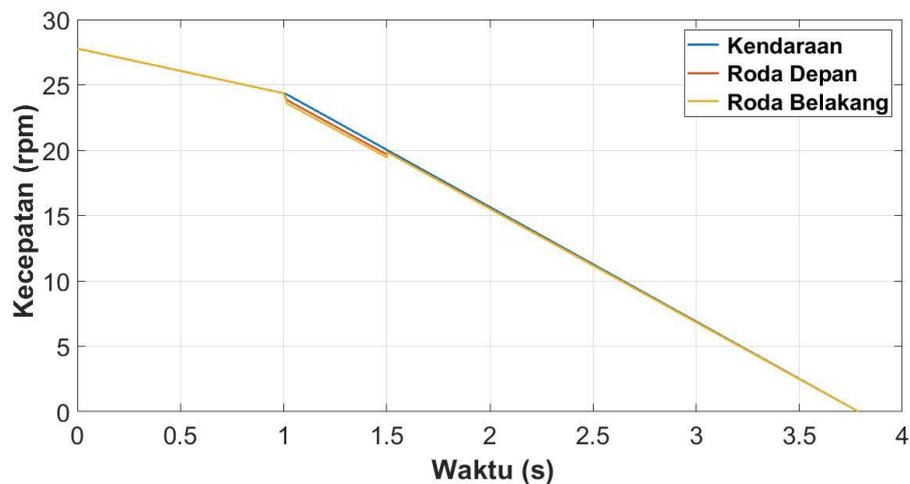
Pengujian perubahan jalan yang kedua adalah dengan kondisi kebalikan dari pengujian perubahan jalan sebelumnya, yakni nilai awal adalah nilai parameter koefisien gesek aspal kering dan nilai akhir adalah nilai parameter koefisien gesek es. Dengan menggunakan *step time* yang sama seperti pengujian sebelumnya,

yakni detik ke 1,5. Hasil pengujian kedua ini dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan 4.17 berikut.

Seperti pada Gambar 4.16, nilai *slip ratio* roda depan dan roda belakang mengalami perubahan akibat adanya perubahan kondisi jalan. Nilai *slip ratio* roda belakang awalnya adalah sebesar 0,028 yang kemudian mengalami penurunan ketika *step time* menjadi 0,009. Begitu pula dengan roda depan, nilai *slip ratio* awal adalah sebesar 0,018 dan turun menjadi 0,007.



Gambar 4.16 Respon *slip ratio* roda depan dan belakang pada perubahan jalan (aspal kering - es)



Gambar 4.17 Respon kecepatan kendaraan, roda depan dan belakang pada perubahan jalan (aspal kering - es)

Gambar 4.17 memberi informasi bahwa simulasi berhenti pada detik 3,659, yang artinya waktu pengereman adalah 2,659. Kemudian perubahan kondisi jalan

dari aspal kering menjadi aspal basah berakibat pada menjadi semakin kecilnya perbedaan kecepatan antara roda dengan kendaraan. Kondisi ini adalah berkebalikan dari perubahan jalan yang sebelumnya. Ketika transisi jalan aspal kering ke es, terjadi penurunan nilai *slip ratio* pada roda depan dan belakang. Sehingga kecepatan roda akan mendekati nilai kecepatan kendaraan.

Berdasarkan Gambar 4.15 dan 4.17, tidak terjadi perbedaan waktu pengereman. Hal ini dikarenakan pada saat pengereman dengan kondisi jalan aspal kering saja atau es saja, waktu pengeremannya juga sama. Sehingga ketika diuji terhadap kondisi perubahan jalan, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan pengereman penuh adalah sama.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a) Perancangan WSC telah mampu menghasilkan *slip ratio* pada roda depan dan belakang dengan optimal. Hal ini dibuktikan dengan pengujian WSC pada kondisi jalan yang berbeda. Yaitu pada aspal kering, aspal basah, salju dan es. Kemudian dilakukan juga pengujian terhadap perubahan jalan
- b) Pada pengujian dengan kondisi jalan aspal kering nilai *slip ratio* pada roda depan adalah sebesar 0,018 dan pada roda belakang adalah sebesar 0,028. Dengan waktu pengereman selama 2,659 detik
- c) Pada pengujian dengan kondisi jalan aspal basah nilai *slip ratio* pada roda depan adalah 0,012 dan pada roda belakang adalah sebesar 0,018. Dengan waktu pengereman selama 2,659 detik
- d) Pada pengujian dengan kondisi jalan salju nilai *slip ratio* pada roda depan adalah 0,011 dan pada roda belakang adalah sebesar 0,016. Dengan waktu pengereman selama 2,659 detik
- e) Pada pengujian dengan kondisi jalan es nilai *slip ratio* pada roda depan adalah 0,007 dan pada roda belakang adalah sebesar 0,009. Dengan waktu pengereman selama 2,659 detik
- f) Pada pengujian perubahan jalan dari es menjadi aspal kering, nilai *slip ratio* mengalami kenaikan. Pada roda depan dari 0,007 menjadi 0,018. Pada roda belakang dari 0,009 menjadi 0,028. Dengan waktu pengereman selama 2,659 detik
- g) Pada pengujian perubahan jalan dari aspal kering menjadi es, nilai *slip ratio* mengalami penurunan. Pada roda depan dari 0,018 menjadi 0,007. Pada roda belakang dari 0,028 menjadi 0,009. Dengan waktu pengereman selama 2,659 detik

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan atas pengerjaan tugas akhir ini adalah dapat melakukan perancangan WSC terhadap kondisi jalan berbeda, seperti pada lintasan berbelok, permukaan jalan menanjak atau menurun.

DAFTAR PUSTAKA

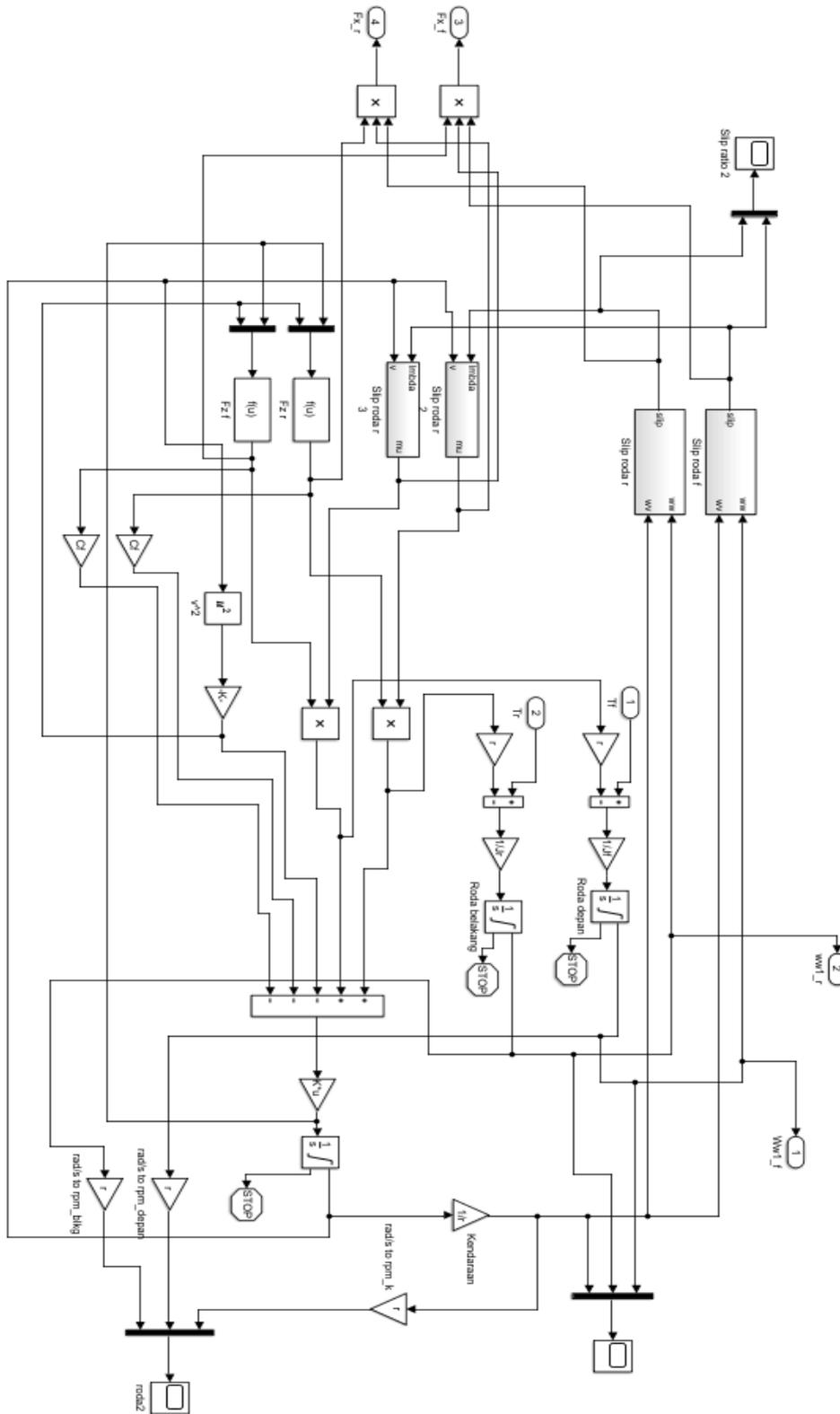
- Aly, A. A. (2011). An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 186-195.
- Araki.M. (n.d.). PID Control. *Control System, Robotics, and Automation*.
- BPS. (2018). *Jumlah Kendaraan Bermotor*. (Badan Pusat Statistik (BPS)) Retrieved 5 5, 2020, from Badan Pusat Statistik: <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/1133>
- Camacho, Smith, & Moreno. (2003). Development of an Internal Model Sliding Mode Controller. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 568-573.
- Castillo-Garcia, Hernandez, & Gil. (2017). Chapter 7 - Sliding Mode Control. In *Indoor Navigation Strategies for Aerial Autonomous Systems* (pp. 157-179).
- Cham, & Samad. (2014). Brushless DC motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing. *J Electr Eng School*, 866-872.
- Chen C. K., & Wang Y. C. (1996). Fuzzy Control for the Anti-lock Brake System. 67-72.
- David. (2014, July 4). *Mengenal ABS*. Retrieved from ABM Motorsport: <https://www.abm-motorsport.co.id/berita/5693/mengenal-abs--antilock-braking-sistem>
- Day, A. (2014). In *Braking of Road Vehicles* (pp. 1-8). Elsevier Inc.
- Ghozali, Sam, Rahmat, Hasyim, & Zulfatman. (2011). Performance Comparison between Sliding Mode Control with PID Sliding Surface and PID Controller for an Electro-hydraulic Positioning System. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information* .
- Guo, J., Jiang, X., & Lian, G. (2014). Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System for Electric Vehicles with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*, 6459-6476.
- Holkar, & Waghmare. (2013). Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface Improved Performance. *Int. Journal of Computer Applications*, 1-5.

- Kemenhub. (2018). Kementerian Perhubungan. *Informasi Transportasi 2018*, p. 102. Retrieved May 5, 2020, from http://dephub.go.id/public/ppid_assets/files/posts/buku-informasi-transportasi-2018-indonesia.pdf
- Khrisnan, Park, & Ha. (2005). Theory and operation of a fourquadrant switchced reluctance motor drive with a single controllable switch-the lowest cost four-quadrant brushless motor drive. *IEEE Trans. Ind. Appl. vol 41*, 1047-1055.
- Lam, Qian, & Xu. (2014). Longitudinal Wheel-slip Control for Four Wheel Independent Steering and Drive Vehicles. *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, 5280-5285.
- Limited, M. A. (2020, 05 31). *Features: Wheel-slip control for decentralized EVs*. Retrieved from Vehicles Dynamics International: <https://www.vehicledynamicsinternational.com/features/wheel-slip-control-for-decentralized-evs.html>
- Mullick. (2017). Fuzzy Controller for Speed Control of BLDC motor using MATLAB. *IRJET*, 1270-1274.
- Murali, T. (2017). Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor. *International Conference on Circuits Power and Computing Technology*.
- Rahmani, Ghanbari, & Ettefagh. (2016). Robust Adaptive Control of a Bio-inspired Robot Manipulator using BatAlgorithm. *Expert Systems with Applications*, 164-176.
- Reneas. (2020, June 21). *What are Brushless DC Motors*. Retrieved from Reneas Electronics: <https://www.renesas.com/us/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview.html>
- Savitski, Schleinin, Ivanov, & Augsburg. (2018). Robust Continuous Wheel Slip Control With Reference Adaptation: Application to the Brake System With Decoupled Architecture. *IEEE Transaction on Industrial Informations*, 4212-4223.

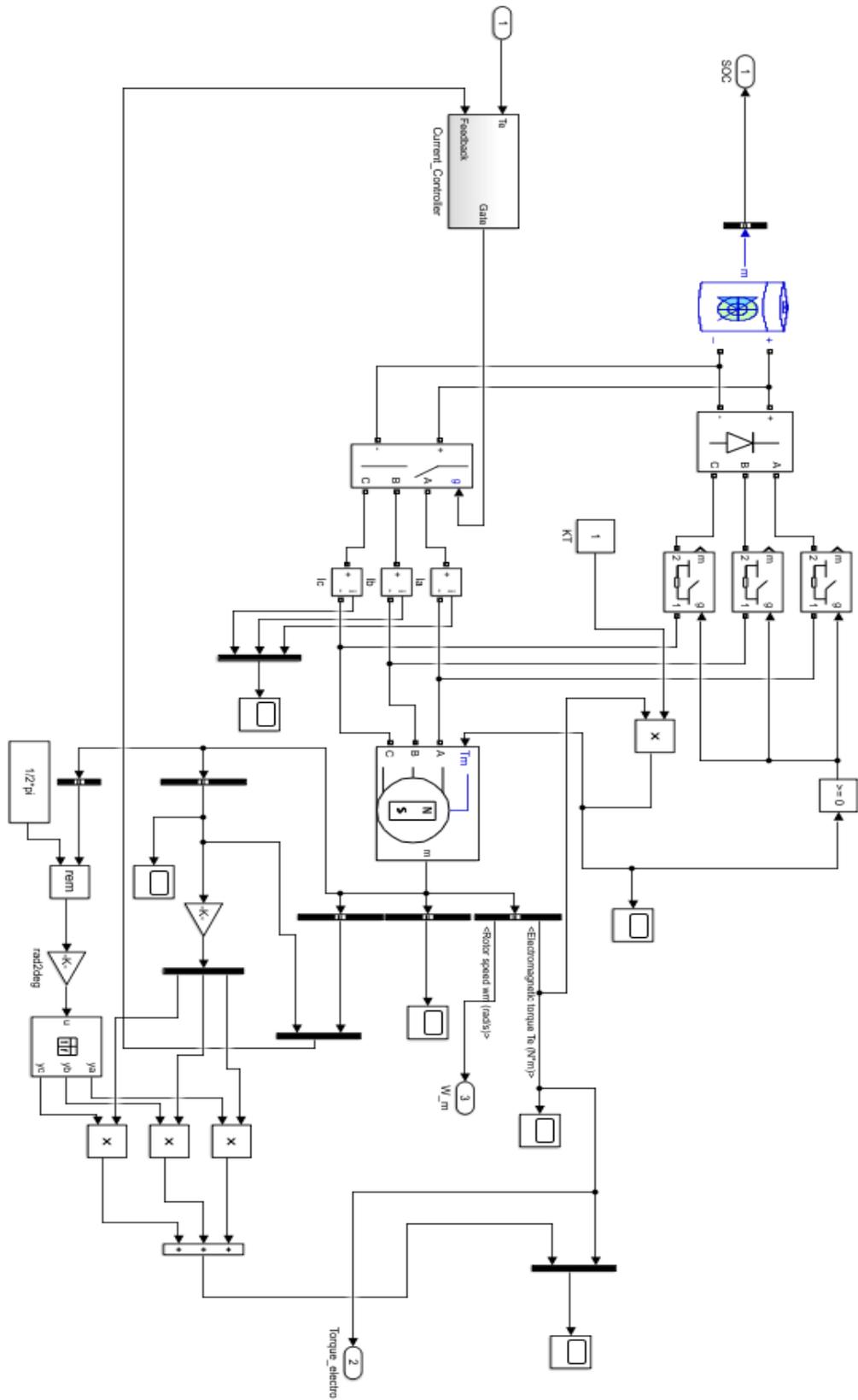
- Shanmugasundram, Zakariah, & Yadaiah. (2009). Low-cost high performance brushless DC motor drive for speed control applications. *Proc. Int. Conf. Advances in Recent Technologies Commun. Computing*, 456-460.
- Singh, C. P. (2012). State-space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control Using Fuzzy PID Controller. *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*, 2, 359-369.
- Sungaya, & Rameshkumar. (2014). Simulation of Four Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor Using Fuzzy. *Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 653-659.
- Syaifullah, R. A., Kurniawan, H. E., & Priyohandoko, B. (2013). Mobil Listrik 'ZEON' (Zero Pollution) Sebagai Sarana Wisata di Ekowisata Mangrove Wonorejo.
- Tur, O., & Osgur, U. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-Lock Braking System. *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Istanbul, Turkey, June 13-15*, 944-948.
- Varocky, B. J. (2011). *Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car*. Eindhoven.
- W.Li. (2010). ABS Control on Modern Vehicle Equipped with Regenerative Braking. Delft University of Technology.
- Will, A. B. (1998). Sliding mode wheel slip controller for an antilock braking system. *International Journal of Vehicle Design*, 523-539.
- Wu, & Zheng. (2017). Contrastive Study on Torque Distribution of Distributed Drive Electric Vehicle under Different Control Methods. *Journal of Control Science and Engineering*, 1-12.
- Wu, Zheng, Wang, & Du. (2019). Torque Optimal Allocation Strategy of All-Wheel Drive Electric Vehicle Based on Difference of Efficiency Characteristics between Axis Motors. *Energies*, 1-16.
- Yu, C. H., Tseng, C. Y., & Chang, C. M. (2012). Study on Power Train of Two Axles Four Wheel Drive Electric Vehicle. *Energy Procedia 14*, 1528-1535.

Halaman ini sengaja dikosongkan

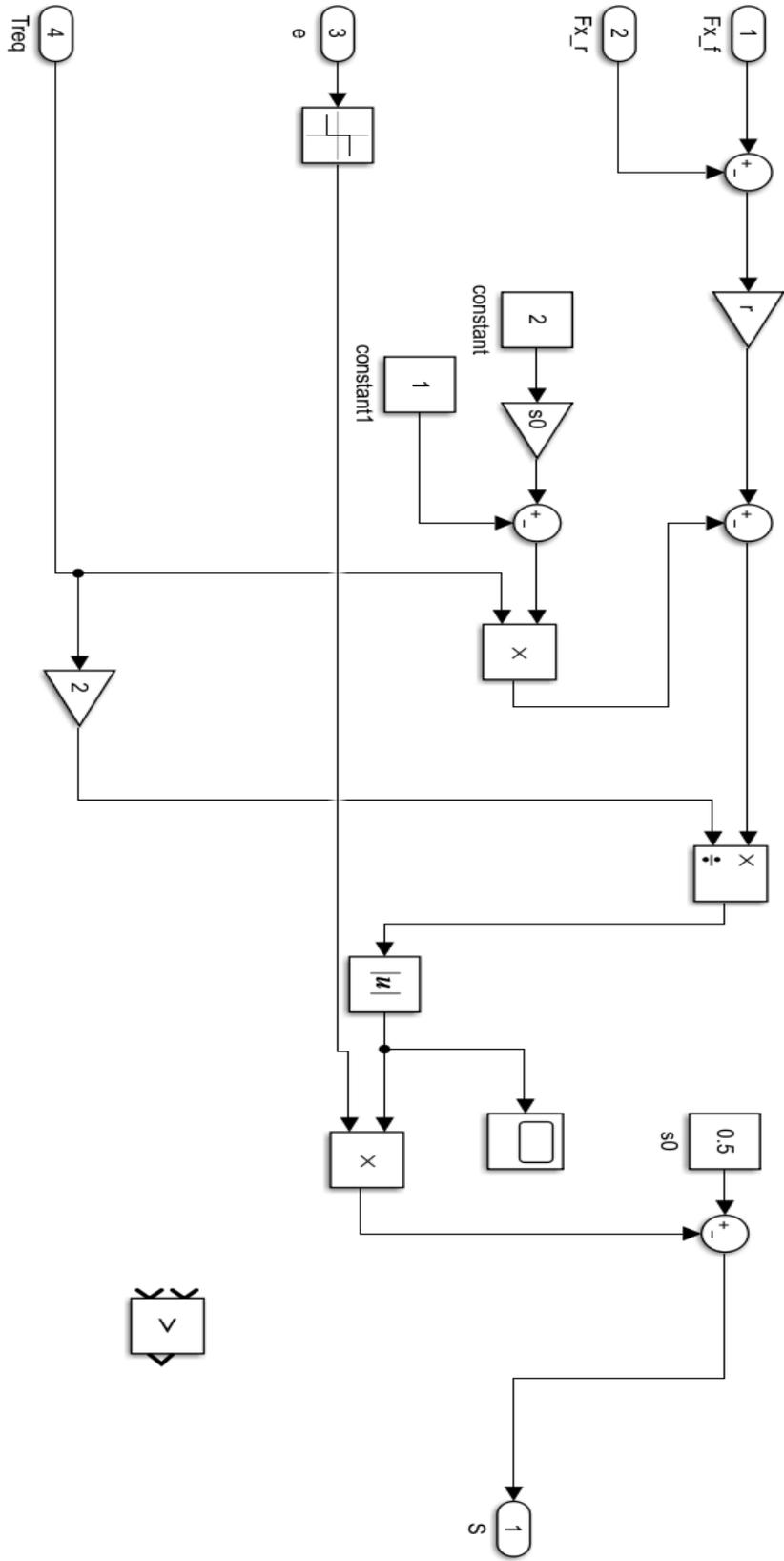
B. Half Car Model



C. Desain Motor BLDC dengan Simulink



D. Desain blok kontroler (SMC) pada WSC dengan Simulink



E. Kode Matlab Kondisi Jalan Aspal Kering	F. Kode Matlab Kondisi Jalan Aspal Basah
<pre> clc; m = 850; hcg = 0.506; ha = 0.4; a = 1.19276; b = 1.59724; r = 0.325; A = 3.1; Cd = 0.01; Cf = 0.3; Jf = 0.5; Jr = 0.5; rho = 1.2041; C1 = 1.029; C2 = 17.6; C3 = 0.523; C4 = 0.03; g = 10; Vin = 27.7778; pi = 22/7; freq_max = 20000; h = 1e-15; s0 = 0.50; </pre>	<pre> clc; m = 850; hcg = 0.506; ha = 0.4; a = 1.19276; b = 1.59724; r = 0.3; A = 3.1; Cd = 0.01; Cf = 0.3; Jf = 0.5; Jr = 0.5; rho = 1.2041; C1 = 0.857; C2 = 33.82; C3 = 0.347; C4 = 0.03; g = 10; Vin = 16.6667; pi = 22/7; freq_max = 20000; h = 1e-15; s0 = 0.5; </pre>

G. Kode Matlab Kondisi Jalan Salju	H. Kode Matlab Kondisi Jalan Es
<pre> clc; m = 850; hcg = 0.506; ha = 0.4; a = 1.19276; b = 1.59724; r = 0.325; A = 3.1; Cd = 0.01; Cf = 0.3; Jf = 0.5; Jr = 0.5; rho = 1.2041; C1 = 0.1946; C2 = 94.129; C3 = 0.0646; C4 = 0.03; g = 10; Vin = 27.7778; pi = 22/7; freq_max = 20000; h = 1e-15; Ts_vect = 5e-5; s0 = 0.50; </pre>	<pre> clc; m = 850; hcg = 0.506; ha = 0.4; a = 1.19276; b = 1.59724; r = 0.325; A = 3.1; Cd = 0.01; Cf = 0.3; Jf = 0.5; Jr = 0.5; rho = 1.2041; C1 = 0.05; C2 = 306.39; C3 = 0; C4 = 0.03; g = 10; Vin = 27.7778; pi = 22/7; freq_max = 20000; h = 1e-15; Ts_vect = 5e-5; s0 = 0.50; </pre>

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Banda Aceh pada 26 Juni 1998. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri 01 Pagi Pondok Bambu Jakarta (2006-2010), SMP Negeri 117 Jakarta (2010-2013), SMA Negeri 61 Jakarta (2013-2016), serta pendidikan S-1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama berkuliah penulis mengambil bidang minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol. Penulis pernah terlibat dalam beberapa kegiatan selama menjadi mahasiswa, diantaranya bertanggung jawab sebagai *External Relation* pada project W4SDG'S yang diselenggarakan oleh AIESEC Surabaya (2017), menjabat Deputy TF ITS pada FKMTF periode 2018/2019, serta melakukan kerja praktek di PT. Inti Karya Persada Tehnik (IKPT) Jakarta pada tahun 2019 sebagai *Associate Engineer* di Departemen Instrumentasi. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* raihanng868@gmail.com