UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PERFORMANSI KENDARAAN SADAR LINGKUNGAN (KARLING) DENGAN SISTEM PENGENDALI PENGEREMAN REGENERATIF

SKRIPSI

NADYA NOORFATIMA

1406531082

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

MEI 2018

UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PERFORMANSI KENDARAAN SADAR LINGKUNGAN (KARLING) DENGAN SISTEM PENGENDALI PENGEREMAN REGENERATIF

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

NADYA NOORFATIMA

1406531082

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

KEKHUSUSAN TEKIK TENAGA LISTRIK

DEPOK

MEI 2018

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,

dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk

telah saya nyatakan dengan benar

Nama : **Nadya Noorfatima**

NPM : **1406531082**

Tanda Tangan :

Tanggal : **17 Mei 2018**

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nadya Noorfatima

NPM : 1406531082

Program Studi : Teknik Tenaga Listrik

Judul Skripsi : Studi Performansi Kendaraan Sadar Lingkungan (KARLING) Dengan Sistem Pengendali Pengereman Regeneratif

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gerlar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa, M.K., M.T. ( )

Penguji 1 : Ir. I Made Ardita Y, M.T. ( )

Penguji 2 : Dr.-Ing Budi Sudiarto, S.T., M.T. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Mei 2018

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas berkat rahmat dan ridho-Nya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul "Studi Performansi dan Optimasi Kendaraan Sadar Lingkungan (KARLING) Dengan Sistem Pengendali Pengereman Regeneratif". Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas bimbingan, arahan, maupun pendampingan selama pelaksanaan skripsi ini, terutama kepada :

1. Keluarga penulis terutama Bapak Idik Samsul Islam dan Ibu Tutik Siswanti yang telah memberikan dukungan moral, doa, serta materi sehingga penulisan skripsi ini dapat berjalan dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa, M.K., M.T. selaku dosen pembimbing yang sudah mengarahkan mendukung, serta memberikan masukan dalam penulisan skripsi ini.
3. Saudara Bima Dipantara, Guardio Orlando, dan Muhammad Very Nugroho selaku tim KARLING Universitas Indonesia yang sudah membantu pelaksanaan uji KARLING.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, maka dari itu penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat dan inspirasi bagi pengembengan ilmu pengetahuan khususnya pada ilmu tenaga listrik.

Depok, 17 Mei 2018

Penulis

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai Sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nadya Noorfatima
NPM : 1406531082
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (***Non-exclusive Royalty-Free Right***) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

"Studi Performansi Kendaraan Sadar Lingkungan (KARLING) Dengan Sistem Pengendali Pengereman Regeneratif"

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 17 Mei 2018
Yang menyatakan

Nadya Noorfatima

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

ABSTRAK

Nama : Nadya Noorfatima

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Studi Performansi Kendaraan Sadar Lingkungan (KARLING) Dengan Sistem Pengendali Pengereman Regeneratif

Aktivitas manusia modern membutuhkan kendaraan berbahan bakar fosil sebagai moda transportasi yang cepat serta efisien. Kendaraan berbahan bakar fosil menghasilkan emisi gas buang yang berdampak buruk bagi lingkungan. Salah satu upaya untuk mengatasinya adalah dengan mengganti kendaraan berbahan bakar minyak bumi dengan Kendaraan Sadar Lingkungan (KARLING) yang lebih ramah lingkungan. KARLING menggunakan motor listrik BLDC berbahan bakar listrik sebagai penggerak sehingga tidak menghasilkan gas emisi sehingga aman bagi lingkungan. Dengan latar belakang tersebut, skripsi ini bertujuan untuk mengkaji sistem kerja dan performansi pengendali yang digunakan untuk pengoperasian metode pengereman regeneratif pada KARLING, sebagaimana pengereman regeneratif dapat menjadi solusi untuk meningkatkan performa kendaraan. Metode yang penulis gunakan dalam skripsi ini yaitu studi literatur, simulasi dengan menggunakan SIMULINK, dan pengujian pada prototipe. Simulasi dilakukan untuk mengetahui prinsip kerja pengendali terhadap pengereman regeneratif. Pengujian dilakukan untuk mengetahui respon KARLING selama pengereman regeneratif.

Kata kunci: Kendaraan Sadar Lingkungan, Motor BLDC, SIMULINK, Pengereman Regeneratif

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

ABSTRACT

Name : Nadya Noorfatima
Study Program : Electrical Engineering
Judul : Study of The Performance of Environment Conscious Vehicle with Regenerative Braking Control System

Modern human activities need fuel vehicles as their transportation tools. Fuel vehicles emit waste gases which are have bad effect for the environment. There is one way to cope the problem is exchanging fuel vehicle with Environment Conscious Vehicle (*Kendaraan Sadar Lingkungan / KARLING*). KARLING uses electric BLDC Motor which is moved by electrical energy so it will not emit any kind of gas. Therefore it will be eco-friendly. Based on the backgrounds, the thesis's purposes are to research about regenerative braking ways of working and its performance towards KARLING. So that regenerative braking shall be solution for increasing compact size vehicles. The methods that the researcher use are study of literature, simulation using SIMULINK, and prototype test. The simulation shows ways of working of regenerative braking to generate electricity. Otherwise, prototype test is important to know the performance of regenerative braking towards compact vehicle.

Keywords: Environment Conscious Vehicle, BLDC Motor, SIMULINK, Regenerative Braking

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS iii
HALAMAN PENGESAHAN iv
KATA PENGANTAR v
ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR TABEL vii
DAFTAR GAMBAR viii
BAB 1 11
PENDAHULUAN 11
1.1 Latar Belakang 11
1.2 Tujuan Penelitian 12
1.3 Batasan Masalah 12
1.4 Metodologi Skripsi 12
1.5 Sistematika Penulisan 12
BAB 2 14
KENDALI MOTOR LISTRIK 14
2.1 Motor Sinkron 14
2.1.1 Prinsip Kerja Motor Sinkron 14
2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Sinkron 15
2.1.3 Operasi Motor Sinkron pada Kondisi Tunak 16
2.2 Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) 17
2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC 17
2.2.2 Konstruksi Motor BLDC 18
2.2.3 Material Motor BLDC 18
2.2.5 Fluks Magnet pada Motor BLDC 21
2.2.6 Kebocoran Fluks dan BEMF 22
2.2.7 Konstanta *Back-Electromotive Force* (K_e) 22
2.2.8 Konstanta Torsi (K_t) 23
2.2.9 Reaksi Jangkar 23
2.2.10 Induktansi 24
2.3 Dasar Sistem Kendali Motor BLDC 25

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

2.3.1 Pendahuluan 25
2.3.2 Pemodelan Dasar 26
2.3.3 Sistem Kendali 28
2.3.4 Desain Sistem Kendali 30
BAB 3 31
PROSES PEMBUATAN SIMULASI DAN PROTOTIPE DAN PENGUJIAN KARLING 31
3.1 Simulasi Pengereman Regeneratif 31
3.1.1 Membuat Pemodelan Rangkaian Sistem Pengereman Regeneratif 31
3.1.2 Menentukan Karakteristik Komponen Sistem Pengendali Pengereman Regeneratif. 35
3.2 Pembuatan Prototipe KARLING 38
3.2.1 Gambar Rangka KARLING 38
3.2.2 Dimensi KARLING 42
3.3 Pembuatan Rangkaian Kelistrikan KARLING 44
3.3.1 Merangkai Pengkabelan Kontroler 44
3.3.2 Merangkai Sambungan Motor dan Baterai 48
3.4 Metodologi Pengujian Pengereman Regeneratif KARLING 49
3.4.1 Menentukan Skema Penelitian Pengereman Regeneratif 49
3.4.2 Merangkai Komponen KARLING Berdasarkan Skema Pengujian 52
3.4.3 Menentukan Skema Pengukuran Pengereman Regeneratif 52
3.5 Melakukan Perhitungan Efisiensi Pengereman Regeneratif 53
BAB 4 55
EVALUASI SIMULASI DAN PENGUJIAN PENGEREMAN REGENERATIF PADA KARLING 55
4.1 Simulasi Pemodelan Pengereman Regeneratif Menggunakan SIMULINK MATLAB 2016a 55
4.1.1 Simulasi Sensor Hall Motor BLDC 55
4.1.2 Simulasi Pengsaklaran Menggunakan MOSFET 56
4.1.3 Grafik Arus dan Tegangan Baterai 58
4.1.4 Grafik State of Charge (SoC) 59
4.2 Pengujian Pengereman Regeneratif pada KARLING 60
4.2.1 Pengukuran Tegangan Fasa 60
4.2.2 Pengukuran Arus Fasa 62
4.2.3 Pengukuran Daya Motor BLDC 63
4.2.4 Pengukuran Tegangan Baterai 65

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

4.2.5 Pengukuran Arus Baterai 67
4.2.6 Pengukuran Daya Baterai 69
4.3 Analisis Konversi Energi Pengereman Regeneratif 71
4.3.1 Analisis Kemampuan Konversi Pengereman Regeneratif terhadap Tegangan Baterai 72
BAB 5 75
KESIMPULAN DAN SARAN 75
5.1 Kesimpulan 75
5.2 Saran dan Rekomendasi 75
DAFTAR ACUAN 77
DAFTAR PUSTAKA 78
LAMPIRAN 79

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Sel Baterai 35
Tabel 3. 2 Spesifikasi Sistem Manajemen Baterai (BMS) 35
Tabel 3. 3 Spesifikasi Motor BLDC KARLING 36
Tabel 3.4 Dimensi KARLING 42
Tabel 3. 5 Spesifikasi Kontroler Motor BLDC 1000 Watt 45

Tabel 4. 1 Kondisi baterai sebelum dan sesudah pengereman regeneratif beban nol 72
Tabel 4. 2 Kondisi baterai sebelum dan sesudah pengereman regeneratif beban penuh 74

Universitas Indonesia
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Motor sinkron dua kutub [2] 14
Gambar 2. 2(a)Rangkaian ekuivalen keseluruhan motor sinkron (b) Rangkaian ekuivalen per fasa [2] 15
Gambar 2. 3 Kurva karakteristik kecepatan-torsi pada motor sinkron [2] 16
Gambar 2. 4 Aturan tangan kiri Flemming dan (b) Aturan tangan kanan Flemming untuk Hukum BLI, BLV [5] 18
Gambar 2. 5 Kurva B-H material feromagnetik [4] 19
Gambar 2. 6 Exterior-Rotor [7] 20
Gambar 2. 7 Interior-Rotor [7] 21
Gambar 2. 8 Pengaruh induktansi pada kurva kecepatan dan torsi [7] 25
Gambar 2. 9 Rangkaian ekuivalen motor 26
Gambar 2. 10 Diagram blok feedback sistem kendali dengan kompensator 28
Gambar 2. 11 Diagram blok elemen Hall 29

Gambar 3. 1 Simbol MOSFET daya. 32
Gambar 3. 2 a. Blok pembalik. b. Motor BLDC. c. Blok Pengsaklaran pada sistem pengereman regeneratif 33
Gambar 3. 3 Rangka KARLING tampak samping. 38
Gambar 3. 4 Rangka KARLING tampak atas 39
Gambar 3. 5 Rangka KARLING tampak bawah 40
Gambar 3. 6 Rangka KARLING tampak depan 41
Gambar 3. 7 Rangka KARLING tampak belakang 42
Gambar 3. 8 Dimensi panjang KARLING 43
Gambar 3. 9 Dimensi tinggi KARLING 43
Gambar 3. 10 Dimensi lebar KARLING 44
Gambar 3. 11 Dimensi tinggi dudukan terhadap tanah KARLING 44
Gambar 3. 12 Diagram rangkaian dalam kontoler 46
Gambar 3. 13 Penampang melintang kepala kabel J2 46
Gambar 3. 14 Konfigurasi kabel pedal gas 47
Gambar 3. 15 Konfigurasi kabel pedal rem. 47

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Gambar 3. 16 Konfigurasi kabel saklar pembalik 47
Gambar 3. 17 Konfigurasi kabel sensor Hall 48
Gambar 3. 18 Gambar penampang samping kontroler 49
Gambar 3. 19 Skema Penelitian Pengereman Regeneratif 51
Gambar 3. 20 Konfigurasi komponen KARLING untuk pengujian 52
Gambar 3. 21 Skema pengukuran parameter pengereman regeneratif 53

Gambar 4. 1 (a) Grafik efek Hall A (b) Grafik efek Hall B (c) Grafik efek Hall C 56
Gambar 4. 2 Grafik pulsa sinyal inverter (a) saklar 1 (b) saklar 2 (c) saklar 3 (d) saklar 4 (e) saklar 5 (f) saklar 6 58
Gambar 4. 3 Grafik hasil simulasi arus dan tegangan baterai Litium Ion 59
Gambar 4. 4 Grafik hasil simulasi SOC Litium Ion 60
Gambar 4. 5 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 5% 60
Gambar 4. 6 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 10% 61
Gambar 4. 7 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 15% 61
Gambar 4. 8 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 15% 61
Gambar 4. 9 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 5% 62
Gambar 4. 10 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 10% 62
Gambar 4. 11 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 15% 63
Gambar 4. 12 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 20% 63
Gambar 4. 13 Grafik daya pengereman regeneratif 5% 64
Gambar 4. 14 Grafik daya pengereman regeneratif 10% 64
Gambar 4. 15 Grafik daya pengereman regeneratif 15% 65
Gambar 4. 16 Grafik daya pengereman regeneratif 20% 65
Gambar 4. 17 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 5% 66
Gambar 4. 18 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 10% 66
Gambar 4. 19 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 15% 66
Gambar 4. 20 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 20% 67
Gambar 4. 21 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 5% 68
Gambar 4. 22 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 10% 68
Gambar 4. 23 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 15% 68
Gambar 4. 24 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 20% 69

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Gambar 4. 25 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 5% 70
Gambar 4. 26 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 10% 70
Gambar 4. 27 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 15% 70
Gambar 4. 28 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 20% 71
Gambar 4. 29 Grafik tegangan beban penuh. 73
Gambar 4. 30 Grafik arus beban penuh 73
Gambar 4. 31 Grafik daya beban penuh 74

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengereman regeneratif merupakan salah satu metode pengendalian dalam mobil listrik untuk memperpanjang waktu pakai kendaraan listrik. Kendaraan listrik memiliki kapasitas penyimpanan yang terbatas dikarenakan kapasitas tersebut dipengaruhi oleh dimensinya. Semakin besar kapasitas yang diinginkan maka dimensi penyimpanannya pun akan semakin besar.

Sedangkan durasi pemakaian kendaraan listrik dipengaruhi oleh kapasitas penyimpanannya. Semakin besar kapasitas maka durasi pemakaian akan semakin lama. Hal tersebut tentu tidak sejalan dengan upaya pembuatan kendaraan listrik dengan desain *compact* dan *simple.* Kendaraan listrik membutuhkan kapasitas penyimpanan yang besar apabila dibutuhkan untuk penggunaan berdurasi lama. Selain itu, kondisi jalan yang tidak dapat diprediksi mempengaruhi kendaaraan dalam mengonsumsi listrik.

Pengereman regeneratif menjadi solusi atas permasalahan penyimpanan kendaraan listrik yang terbatas terhadap durasi pemakaian kendaraan listrik. Melalui penambahan metode pengendali pengereman regeneratif pada sistem kendali kecepatan dapat memperpanjang durasi pemakaian kendaraan listrik. Hal tersebut karena pengereman regeneratif dapat memberikan suplai listrik selama berkendara terutama saat melakukan pengereman.

Pengereman regeneratif adalah metode mengubah motor listrik menjadi generator selama dilakukan pengereman. Dengan menggunakan metode pengkodean tertentu memungkinkan kutub-kutub motor berubah sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Penelitian ini tentu bukan tanpa halangan, diperlukan parameter-parameter pengendali tertentu untuk memperoleh efisiensi sistem pengendali yang terbaik untuk diterapkan pada kendaraan listrik.

Pada penelitian ini, penulis berusaha untuk mengetahui cara kerja sistem pengendali pengereman regeneratif dan performanya pada kendaraan *ultra-compact*.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

1.2 Tujuan Penelitian

Skripsi ini bertujuan untuk mengetahui cara kerja pengendali pengereman regeneratif menggunakan SIMULINK dan performanya pada Kendaraan Sadar Lingkungan (KARLING).

1.3 Batasan Masalah

1) Simulasi penerapan pengereman regeneratif menggunakan metode CMEX pada SIMULINK
2) Sistem pengendali hanya digunakan untuk motor arus searah.
3) Kendaraan Sadar Lingkungan yang dibahas adalah kendaraan roda empat berukuran *ultra-compact*.
4) Pengujian dilakukan pada kondisi permukaan jalan datar dengan gesekan udara, dan gesekan ban terhadap tanah diabaikan.

1.4 Metodologi Skripsi

Skripsi ini memiliki tahapan penulisan sebagai berikut :

1) Menentukan masalah dan tujuan dari penulisan skripsi
2) Melakukan studi literatur jurnal, buku, dan tesis mengenai sistem pengendali pengereman regeneratif pada motor BLDC
3) Simulasi menggunakan perangkat lunak SIMULINK
4) Pembuatan prototipe Kendaraan Sadar Lingkungan
5) Evaluasi kemampuan pengereman regeneratif pada KARLING
6) Studi bimbingan: diskusi dengan dengan dosen pembimbing, rekan penelitian yang terkait yang telah ditunjuk Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia.

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini disusun berdasarkan sistematika pembahasan berikut :

Bab satu berisi pendahuluan berupa latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan penelitian pengendali pengereman regeneratif KARLING. Bab dua merupakan bagian yang memaparkan landasan teori dari penelitian ini. Bab ini menjelaskan tentang pengertian motor sinkron, motor BLDC, dan pengendali secara umum. Bab tiga menjelaskan tentang proses pembuatan simulasi menggunakan

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

SIMULINK dan CMEX. Dalam bab tersebut juga dijelaskan mengenai proses pembuatan dan pengujian prototipe KARLING. Bab empat berisi hasil pengujian simulasi dan pengujian KARLING. Pengujian KARLING dilakukan dalam dua metode berbeda yaitu metode pengujian laboratorium dan pengujian lapangan. Bab lima adalah penutup yang berisikan tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

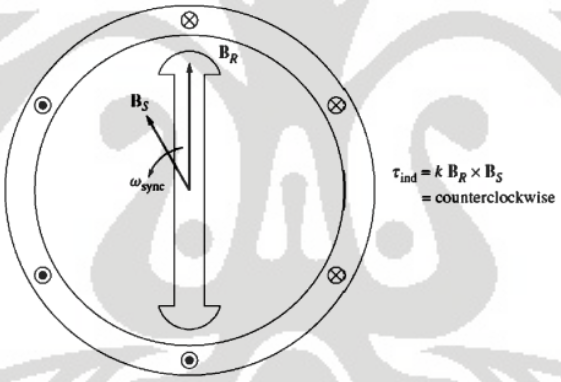
BAB 2
KENDALI MOTOR LISTRIK

2.1 Motor Sinkron

Motor sinkron adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengonversi energi listrik menjadi energi mekanik. [2]

2.1.1 Prinsip Kerja Motor Sinkron

Untuk dapat memahami konsep dasar motor sinkron maka kita perlu memperhatikan gambar 2.1 berikut, menunjukkan motor sinkron dua kutub. Arus medan (If) motor menghasilkan medan magnet kondisi tunak Br. Tegangan tiga fasa diaplikasikan ke stator dari mesin, dimana menghasilkan aliran arus tiga fasa pada lilitan.



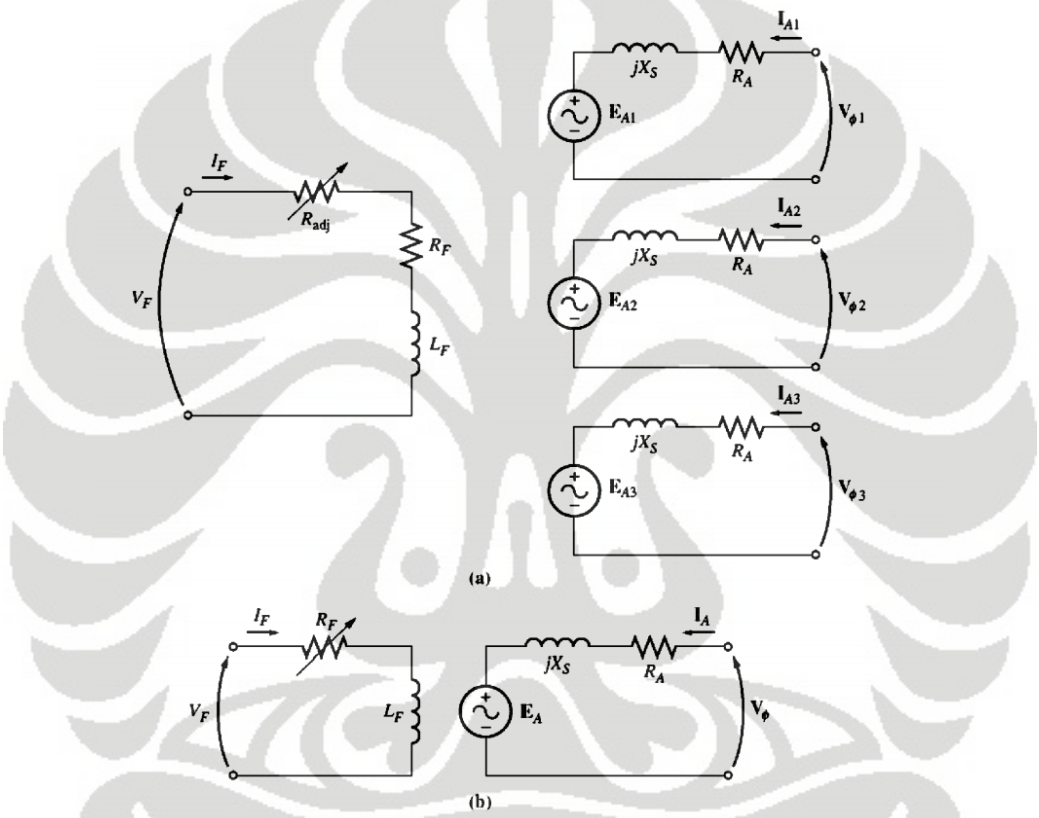
Gambar 2. 1 Motor sinkron dua kutub [2]

Arus pada jangkar menghasilkan medan magnet berputar Bs. Selanjutnya, terdapat dua medan magnet pada mesin, dan medan rotor akan cenderung untuk mengikuti medan stator sebagaimana dua kutub magnet yang berlawanan akan mengikuti satu sama lain jika didekatkan. Karena medan magnet stator berputar, maka medan magnet rotor dan rotornya itu sendiri akan secara langsung berusaha mengikuti medan putar stator. Semakin besar sudut antara dua medan magnet, maka akan semakin besar torsi dari rotor. Prinsip dasar operasi motor sinkron adalah rotor ‘mengejar’ medan putar stator.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Sinkron

Pada dasarnya motor sinkron dapat dikatakan sama dengan generator sinkron, kecuali bahwa arah aliran dayanya berkebalikan satu sama lain. Karena arah aliran daya pada mesin berlawanan menyebabkan arah aliran arus di stator pada motor berkebalikan pula. Oleh sebab itu, rangkaian ekuivalen motor sinkron persis sama dengan rangkaian ekuivalen pada generator sinkron. Hal ini yang kemudian dapat dimanfaatkan untuk melakukan pengereman regeneratif.



Gambar 2. 2(a)Rangkaian ekuivalen keseluruhan motor sinkron (b) Rangkaian ekuivalen per fasa [2]

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya arah arus jangkar berkebalikan antara motor sinkron dan generator sinkron sehingga merubah hukum persamaan Tegangan Kirchoff milik rangkaian.

$$V_\varphi = E_A + jX_S I_A + R_A I_A \qquad (2-1)$$

atau

$$E_A = V_\varphi - jX_S I_A - R_A I_A \qquad (2-2)$$

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Keterangan :

V_φ=Tegangan Keluaran (volt)

E_A=Tegangan Jangkar (volt)

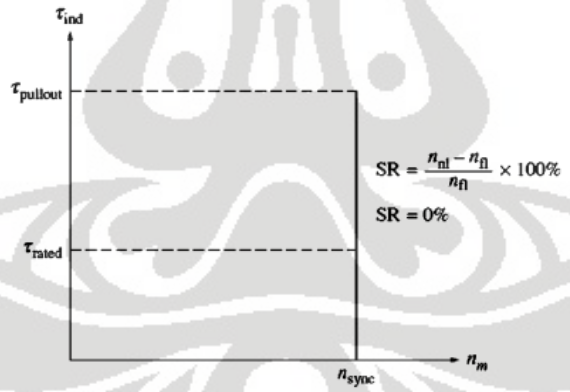
X_S=Impedansi Stator (ohm)

I_A=Arus Jangkar (ampere)

R_A =Resistansi Jangkar (ohm)

2.1.3 Operasi Motor Sinkron pada Kondisi Tunak

Motor sinkron menyuplai daya beban yang pada umumnya merupakan peralatan dengan kecepatan konstan. Mereka biasanya terhubung ke sistem daya lebih banyak dibandingkan dengan motor individual, sehingga sistem daya muncul sebagai bus tak hingga terhadap motor. Hal ini berarti tegangan terminal dan frekuensi sistem akan tetap konstan tak terkecuali jumlah daya yang digunakan oleh motor. Kecepatan putar motor dikunci terhadap frekuensi elektris yang digunakan, sehingga kecepatan motor akan konstan tidak peduli seberapa pun nilai beban. Kurva karakteristik torsi – kecepatan dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut. Kecepatan kondisi tunak motor adalah tetap dari tidak berbeban sampai dengan nilai torsi maksimum.



Gambar 2. 3 Kurva karakteristik kecepatan-torsi pada motor sinkron [2]

Persamaan torsi ialah sebagai berikut :

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\varphi E_A \sin\delta}{\omega_m X_S} \qquad (2-3)$$

Keterangan :

τ_{ind} = Torsi Induksi (newton meter)

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

δ = sudut torsi (rad)

ω_m = frekuensi motor (rad per detik)

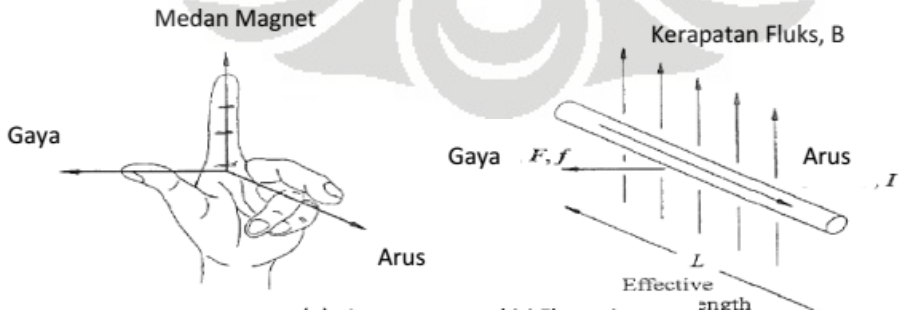
Jika beban terhubung dengan poros motor sinkron, motor akan menghasilkan torsi yang cukup untuk menjaga motor dan bebannya berputar pada kecepatan yang sinkron. Atau dengan kata lain dibutuhkan daya tambahan agar motor tetap berputar dengan kecepatan yang sinkron. Jika beban pada poros motor meningkat, rotor akan pada awalnya melambat. Seiring dengan itu, sudut torsi δ menjadi lebih besar sehingga torsi yang terinduksi akan semakin besar. Peningkatan pada torsi yang terinduksi akan mempercepat rotor dan motor akan berputar kembali ke kecepetan sinkron dengan sudut torsi yang lebih besar. [2]

2.2 Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

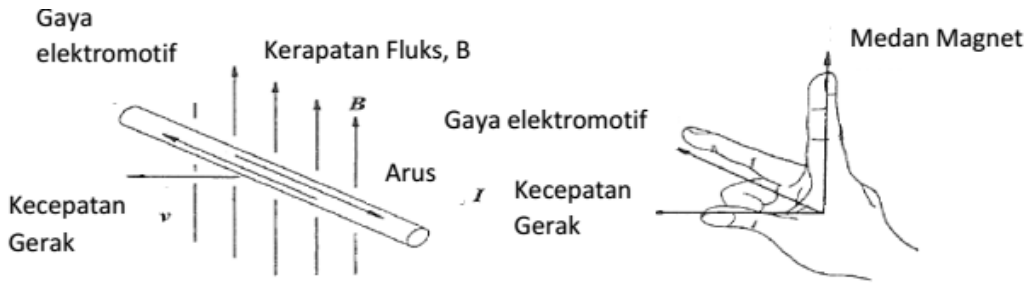
Motor BLDC adalah motor yang pembangkitan medan magnetnya menggunakan material magnet permanen yang terletak pada rotor dan masukannya berupa arus listrik searah. Motor BLDC serupa dengan motor sinkron arus bolak-balik. Perbedaan utamanya yaitu motor sinkron menghasilkan gelombang *Electromotive Force* (EMF) balik berbentuk sinusoidal, sedangkan motor BLDC menghasilkan keluaran gelombang balik EMF trapezoidal.

2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC

Prinsip kerja mesin listrik dapat dipahami dengan menggunakan prinsip aturan tangan Flemming dan hukum BLI. Motor listrik menggunakan prinsip tangan kiri dan generator menggunakan aturan tangan kanan. Aturan tangan kiri menjelaskan hukum Lorentz, sedangkan aturan tangan kanan menjelaskan tentang fenomena tegangan induksi.



(a)



(b)

Gambar 2. 4 Aturan tangan kiri Flemming dan (b) Aturan tangan kanan Flemming untuk Hukum BLI, BLV [5]

Motor BLDC dapat berputar dan menghasilkan torsi karena adanya aliran energi listrik dari baterai ke konduktor yang dililitkan pada stator. Arus yang mengalir pada kawat konduktor menimbulkan medan magnet. Sedangkan material magnet permanen dengan arah magnet tertentu disusun pada rotor. Interaksi antara magnet rotor dan stator akan menghasilkan aksi dan reaksi sehingga rotor akan memiliki gerakan berputar. [5]

2.2.2 Konstruksi Motor BLDC

Konstruksi dari motor *brushless* modern sangat mirip dengan motor AC, atau sering dikenal dengan motor sinkron magnet permanen. Kumparan stator pada motor ini serupa dengan yang ada pada motor AC dengan polifasa, dan rotornya terdiri dari satu atau lebih magnet. Motor *brushless* arus searah berbeda dengan motor arus bolak balik sinkron dalam hal menentukan posisi rotor (kutub magnet) dalam memproduksi sinyal untuk pengendalian pengsaklaran elektronik. Sensor posisi kutub yang paling umum digunakan adalah *Hall element*, tetapi sejumlah motor juga ada yang menggunakan sensor optik. [5]

2.2.3 Material Motor BLDC

Material yang dibutuhkan untuk motor BLDC adalah material untuk magnet permanen, material inti, dan material kawat konduktor.

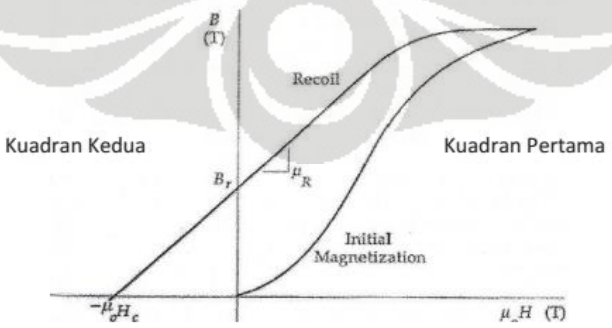
2.2.3.1 Magnet Permanen

Material magnet permanen adalah material yang dapat menghasilkan medan magnet tanpa harus menggunakan eksitasi. Magnet permanen disebut juga material *hard magnet* karena memiliki rentang kurva demagnetisasi yang lebar.[3] Kurva demagnetisasi adalah kurva yang menunjukkan karakteristik dari material feromagnetik.

Beberapa material, yang digunakan sebagai bahan magnet permanen adalah material golongan *alnicos* (Al, Ni, Co, Fe), *Ferrites*, dan *rare-earth*.[3] Magnet alnicos memiliki keunggulan yaitu nilai intensitas fluks magnet *remanence* yang sangat tinggi. Namun material-material ini memiliki *coercive-force* yang sangat rendah sehingga sangat mudah mengalami demagnetisasi. Sedangkan magnet ferrites memiliki *coercive force* yang lebih besar daripada alnicos namun memiliki harga yang lebih murah. Material rare-earth magnet yang banyak digunakan adalah *samarium-cobalt* ($SmCO_5$) dan *neodymium iron baron* (NdFeB). Magnet ini memiliki nilai remanence yang lebih tinggi daripada *alnicos* dan memiliki *coercive force* yang lebih tinggi daripada *ferrite*. Namun kekurangannya adalah harganya yang lebih mahal.

2.2.3.2 Kurva B-H

Jika suatu material diberi intensitas magnet (H) dengan nilai positif, maka densitas fluks magnet (B) bertambah besar hingga mencapai nilai saturasi seperti pada bagian kuadran pertama kurva pada Gambar 2.5. Apabila setelah itu sumber intensitas medan magnet diputuskan sehingga H bernilai nol, maka intensitas medan magnet akan menurun hingga mencapai nilai *remanence* (Br). Magnet permanen pada motor BLDC beroperasi pada kuadran kedua kurva Gambar 2.5 yang disebut juga kurva demagnetisasi. Sedangkan energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan *remanence* adalah *coercive force*. Material magnet yang memiliki rentang kurva demagnetisasi yang lebar atau membutuhkan nilai *coercive force* yang besar untuk menghilangkan sifat kemagnetan, disebut dengan *hard magnet.* Sementara *soft magnet* pada umumnya digunakan sebagai material inti untuk stator dan rotor.



Gambar 2. 5 Kurva B-H material feromagnetik [4]

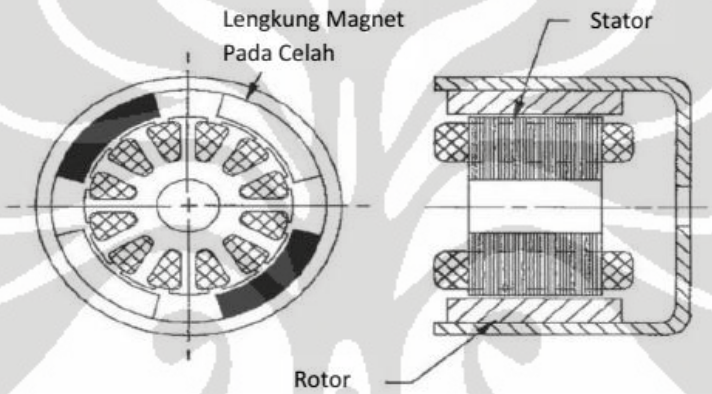
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

2.2.4 Jenis-jenis Motor BLDC

Berdasarkan letak rotor, motor BLDC dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

2.2.3.3 Rotor Interior

Motor BLDC tipe *exterior-rotor* yang rotornya atau bagian yang berputar, merupakan bagian luar seperti pada Gambar 2.6. Motor tipe ini memiliki efisiensi yang baik dan proses pelilitan yang pada umumnya lebih sederhana. Motor ini pada umumnya digunakan pada aplikasi yang membutuhkan kecepatan sedang dan konstan. Contoh penggunaan motor jenis ini adalah pada *fan* atau *blower*. [7]



Gambar 2.6 Rotor Eksterior [7]

2.2.3.4 Rotor Interior

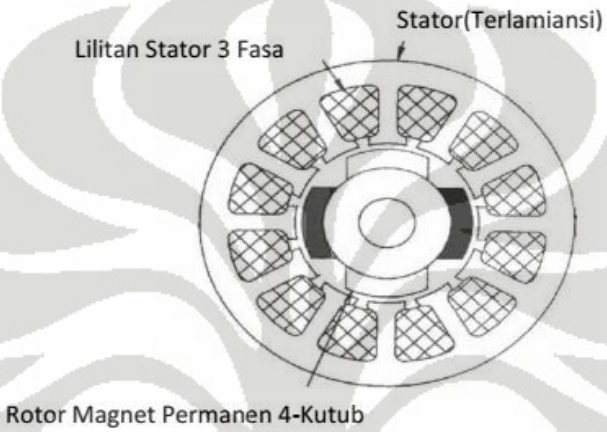
Motor BLDC tipe interior-roto adalah motor dengan bagian rotor yaitu bagian yang berputar, berada di dalam lingkaran stator yang merupakan bagian yang diam. Konfigurasi pemasangan kutub pada rotor terdiri dari beberapa jenis seperti surface mounted, spoke, dan bonded ring magnet. Gambar 2.7 merupakan konfigurasi surface mounted interior-rotor. Pada umumnya jenis motor ini didesain untuk aplikasi yang membutuhkan torsi yang besar dan dapat melakukan percepatan dan perlambatan dengan respon yang baik. Contoh aplikasinya adalah untuk mesin penggerak mobil listrik.

Rancangan magnet interior dikembangkan untuk mengatasi sejumlah kekurangan pada magnet di permukaan sebagai berikut :

- Rancangan ini membuat kerapatan fluks di celah udara menjadi lebih tinggi daripada kerapatan fluks pada magnet itu sendiri.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

- Pada rancangan magnet interior terdapat beberapa derajat perlindungan terhadap magnet dari medan harmonik berorder tinggi oleh bagian-bagian kutub.
- Ada sejumlah keuntungan pengendalian untuk beberapa tipe rancangan magnet interior. Pada dasarnya, mereka memiliki saliensi negatif yang besar yang mana mendukung "pelemahan fluks" untuk pengoperasian pada kecepatan tinggi.
- Beberapa tipe dari rancangan interior magnet memiliki keuntungan secara struktur dari pada rancangan magnet pada permukaan.



Gambar 2.7 Rotor Interior [7]

2.2.5 Fluks Magnet pada Motor BLDC

Fluks pada BLDC bersumber dari magnet permanen pada rotor. Fluks sangatlah berperan penting terhadap parameter kecepatan dan torsi motor. Stator berperan sebagai fluxguide yang menghantarkan pergerakan fluks. Fluks pada motor ditujukan agar terhubung dengan kumparan pada stator. Fluks yang bergerak dari kutub positif menuju kutub negatif namun tanpa melewati kumparan seperti yang seharusnya, disebut kebocoran (*leakage*) [7].

Kebocoran Fluks atau *Flux leakage* adalah fluks dari kutub rotor yang bergerak menuju udara dimana seharusnya fluks ini bergerak menuju ke arah kumparan. Sedangkan *fringing* adalah fluks seharusnya mengikuti jalur *flux guide* atau *core*, justru ke luar jalur menuju udara. [8] *Leakage* dan *fringing* adalah masalah yang berasal dari desain geometri motor. Fenomona *leakage* dan *fringing* dapat menambah nilai rugi-rugi dan mengurangi efisiensi motor. Material memiliki batas kemampuan dalam menghantarkan fluks. Jika nilai fluks telah melebihi batas kemampuan material *flux*

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

guide, maka kondisi ini disebut saturasi. Saat saturasi, kemampuan *fluxguide* untuk menghantarkan fluks akan berkurang.

2.2.6 Kebocoran Fluks dan BEMF

Flux Linkage adalah hasil perkalian dari fluks yang menembus kumparan pada motor dengan jumlah lilitan. Pembangkitan tegangan pada mesin listrik merupakan fenomena yang dijelaskan dengan hukum Faraday yang menyatakan bahwa tegangan induksi pada suatu rangkaian dihasilkan dari perubahan nilai kebocoran fluks pada setiap perubahan waktu. Perubahan nilai flux linkage bisa berasal dari gerakan rotasi dari magnet atau dari perubahan polaritas arus listrik yang membangkitkan fluks.[7] Tegangan induksi pada motor BLDC yang dihasilkan dari gerakan rotasi magnet adalah BEMF (*Back Electromotive Force*) atau juga disebut tegangan rangkaian terbuka. Pada hukum Faraday, tegangan induksi dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = -N\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \qquad (2-4)$$

Keterangan :

λ = Flux Linkage (weber W)

ε = Tegangan induksi (volt V)

φ = Fluks magnet (tesla T)

N = jumlah lilitan

2.2.7 Konstanta *Back-Electromotive Force* (K_e)

Ke adalah konstanta *back electromotive force*. Nilai Ke menunjukkan berapa tegangan induksi yang dihasilkan pada konduktor suatu motor ataupun generator pada setiap kecepatan putar tertentu. Pada motor, dengan mengetahui nilai Ke, maka dapat diketahui tegangan yang harus diberikan kepada motor agar dapat memiliki kecepatan putar yang diinginkan.

$$\varepsilon = \omega\frac{d\psi}{d\xi} \qquad (2-5)$$

$$K_e = \omega\frac{d\psi}{d\xi} = \frac{\varepsilon}{\omega} \qquad (2-6)$$

Keterangan :

K_e = konstanta bemf ($\frac{\text{volt.sekon}}{\text{rad}}$, $\frac{\text{Vs}}{\text{rad}}$)

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

ε = Back Electromotive Force (volt [V])

ω = kecepatan motor (rad per detik)

ψ = fluks linkage (Weber)

ξ = posisi rotor (rad)

Pengukuran nilai Ke dapat dilakukan melakukan simulasi motor yang diperlakukan seperti generator yang dijalankan dengan kecepatan tertentu. Hal ini bisa dilakukan dengan menggunakan shaft motor dengan motor lain sehingga kecepatan putar rotor dapat diatur. Lalu nilai Ke bisa didapatkan dengan membandingkan nilai tegangan yang diukur pada motor dengan kecepatan putar yang diberikan.

2.2.8 Konstanta Torsi (K_t)

Konstanta torsi adalah besarnya torsi yang dihasilkan motor setiap unit ampere yang dialirkan dari sumber arus. Saat rotor bergerak dengan sudut tertentu dengan arus yang konstan, maka torsi elektromagnetik yang dihasilkan adalah :

$$T = I\frac{d\psi}{d\xi} \qquad (2-7)$$

$$Kt = \frac{T}{I} \qquad (2-8)$$

Maka dari persamaan (2 - 8) dan (2 - 9) dapat diketahui bahwa nilai Ke dan Kt adalah sama.

$$\frac{\varepsilon}{\omega} = \frac{T}{I} = K_e = K_t \qquad (2-9)$$

Keterangan :

K_t=Konstanta torsi (newton meter per ampere)

T=torsi elektromagnetik (newtonmeter [Nm])

I=arus listrik (Ampere [A])

ψ=fluks linkage (weber [W])

ξ=posisi rotor (rad)

2.2.9 Reaksi Jangkar

Pada motor, konduktor pada stator akan dialiri oleh arus listrik sumber agar bisa bekerja. Arus listrik yang mengalir pada lilitan stator ini akan menghasilkan medan magnet yang mendistorsi medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor. Semakin besar arus stator, maka akan semakin besar distorsi medan magnet yang

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

terjadi. Bahkan bila terjadi kesalahan operasi motor sehingga arus yang mengalir sangat besar, medan magnet yang dihasilkan arus pada konduktor dapat melakukan demagnetisasi atau menghilangkan sifat kemagnetan dari magnet kutub rotor. Fenomena interaksi antara medan magnet yang muncul akibat arus listrik pada slot stator dengan medan magnet permanen disebut dengan reaksi jangkar. [4]

2.2.10 Induktansi

Pada motor, induktansi sangat berpengaruh terhadap performa kecepatan dan torsi motor. Induktansi dapat membatasi nilai kebangkitan arus pada konduktor sehingga nilai arus yang diinginkan dapat tidak tercapai. Tentunya hal ini berpengaruh juga ke nilai torsi dimana besarnya arus akan menentukan besar torsi motor. Hubungan kecepatan, BEMF, induktansi, dan nilai arus dapat dilihat dari rumus berikut :

$$\frac{di}{dt} = \frac{Vs - E}{L} \qquad (2-10)$$

$$\frac{di}{d\theta} = \frac{di}{dt} \Big/ \frac{d\theta}{dt} = \frac{Vs - K_e W_m}{W_m L} \qquad (2-11)$$

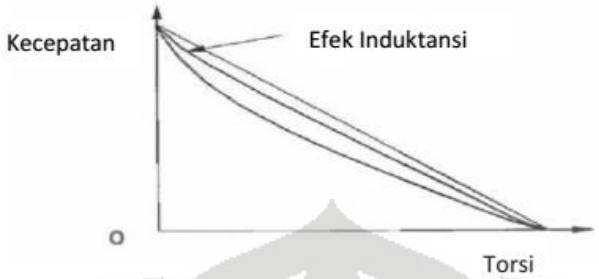
Keterangan :

$i = arus\ listrik\ (Ampere\ [A])$
$Vs = Tegangan\ Sumber\ (volt\ [V])$
$E = back - EMF\ (volt[V])$
$L = induktansi\ (henry\ [H])$
$\theta = posisi\ rotor\ (radian)$
$W_m = kecepatan\ rotor\ (radian\ per\ sekon)$
$K_e = konstanta\ BEMF\ (\frac{V_s}{rad})$

Jika motor dalam kecepatan tinggi, BEMF yang dihasilkan pun besar. Nilai $(Vs - E)$ akan semakin kecil sehingga kenaikan arus pada konduktor juga akan kecil sehingga torsi akan mengecil. Sedangkan jika motor dalam kecepatan rendah, BEMF yang dihasilkan pun rendah. Maka, nilai $(Vs - E)$ akan lebih besar daripada saat motor dalam kecepatan tinggi. Dalam kondisi ini, besar arus listrik akan naik dengan cepat. Dapat dilihat dari persamaan diatas bahwa semakin besar induktansi, maka semakin kecil kenaikan arus listrik. Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa hubungan kecepatan dan torsi akan sangat dipengaruhi oleh induktansi. Gambar 2.8 menunjukkan hubungan

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

torsi dan kecepatan saat daya konstan. Efek induktansi menyebabkan perubahan lengkungan kurva torsi dan kecepatan.



Gambar 2.8 Pengaruh induktansi pada kurva kecepatan dan torsi [7]

Induktansi pada motor terdiri dari induktansi diri dan induktansi mutual yang masing-masingnya terdiri dari tiga komponen induktansi yaitu komponen induktansi celah udara (*airgap*), induktansi *slot-leakage*, dan induktansi *end-winding*. [4]:

1. Induktansi *airgap* didefinisikan sebagai induktansi terhadap fluks dari kutub rotor yang akan melalui *airgap*.
2. Induktansi *slot-leakage* adalah medan magnet yang menembus kumparan pada celah.
3. Induktansi *end-winding* adalah medan magnet yang berada pada kumparan yang tidak berada di dalam celah.

2.3 Dasar Sistem Kendali Motor BLDC

Motor BLDC merupakan motor yang bekerja dengan menerapkan prinsip-prinsip motor sinkron. Oleh karena itu, motor BLDC memiliki kecenderungan lebih mudah dikendalikan dibandingkan dengan jenis motor DC lainnya. Untuk dapat memahami metode pengendalian yang tepat untuk motor BLDC maka terlebih dahulu kita harus memahami prinsip-prinsip dasar pengendalian.

2.3.1 Pendahuluan

Teknik kendali merupakan salah satu ilmu dasar dalam bidang teknik elektro. Setiap peralatan yang berbasis listrik membutuhkan pengendali. Hal tersebut bertujuan untuk memastikan sistem berjalan sesuai dengan keinginan kita. Begitu pula dengan kendaraan listrik, bahwa kendaraan harus mudah untuk dikendalikan terlebih lagi beroperasi dalam kondisi yang optimal.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Motor tanpa sikat (*brushless*) magnet permanen memiliki karakteristik arus/torsi yang linear, riak torsi rendah, dan respon cepat [7]. Kondisi tersebut merupakan kelebihan dari motor BLDC. Tujuan dari pengendalian motor BLDC diantaranya adalah memperoleh titik kestabilan kerja motor, meningkatkan efisiensi, dan mengoptimalkan kerja motor. Desain sistem kendali dideskripsikan memiliki hubungan dengan operasi lingkar-tertutup (*closed-loop*), respon frekuensi, respon step, galat kondisi tunak (*steady-state error*), akar lokus (*root locus*), dan lain sebagainya.[7]

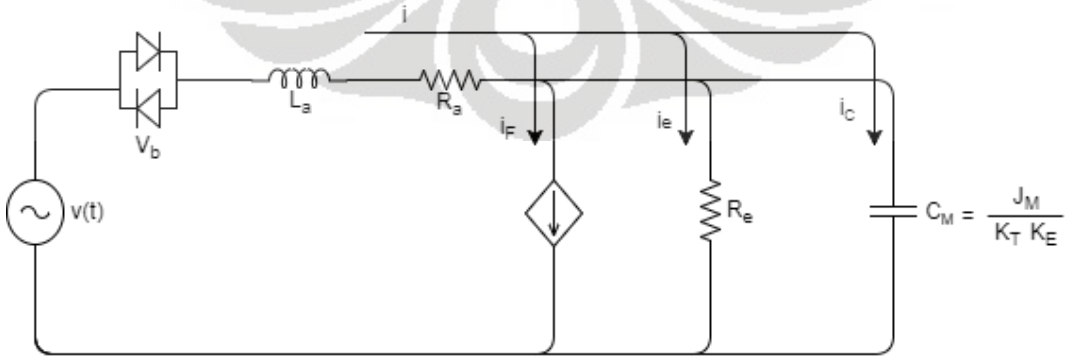
2.3.2 Pemodelan Dasar

Sistem kendali dari suatu kendaraan berasal dari definisi matematis dari pemodelan matematis dari kendaraan tersebut. Untuk dapat memodelkan secara matematis suatu objek maka diperlukan pemahaman mengenai parameter-parameter masukan maupun keluaran yang ingin dicapai dari suatu objek. Kemudian setelah mendapatkan pemodelan secara matematis, akan dilakukan analisis untuk mengetahui posisi akar-akar dari persamaan tersebut. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan titik-titik kesetimbangan sistem pengendali.

Kestabilan sistem kendali penting untuk membuat alat bekerja secara stabil dan optimal. Berikut akan dijelaskan metode-metode untuk memodelkan objek diantaranya adalah menentukan persamaan matematis dari karakteristik elektris, dan mengubahnya dengan transformasi Laplace.

2.3.2.1 Karakteristik Elektrikal

Pada penjelasan sebelumnya telah dijelaskan rangkaian ekuivalen dengan karakteristik dasar rangkaian tersebut. Selanjutnya perlu dikembangkan rangkaian tersebut sehingga dapat digunakan untuk mendapatkan pemodelan matematis.



Gambar 2. 9 Rangkaian ekuivalen motor

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Dari rangkaian ekuivalen diperoleh karakteristik elektris sehingga dapat diperoleh pemodelan persamaan matematis sebagai berikut:

$$v_b + L_a \frac{di}{dt} + R_a i + K_E \omega = v(t) \quad (2-12)$$

Persamaan tersebut dapat diubah ke dalam bentuk seperti formula (2 – 13) untuk memudahkan perhitungan komputasional.

$$L_a \frac{di}{dt} + R_a i = v(t) - K_E \omega - v_b \quad (2-13)$$

$Keterangan$:

$i = arus\ jangkar\ (ampere)$

$v_b = tegangan\ jatuh\ sikat\ (volt)$

$L_a = Induktansi\ jangkar\ (Henry)$

$R_a = Resistansi\ jangkar\ (Ohm)$

$\omega = Kecepatan\ sudut\ motor$ (rad per detik)

$K_E = Konstanta\ back\ emf$ (meter)

$v(t) = tegangan\ sumber\ (volt)$ [6]

2.3.2.2 Transformasi Laplace

Setelah menentukan pemodelan persamaan matematis dengan melibatkan persamaan rangkaian elektris dengan mekanisnya menjadi suatu persamaan lingkaran kendali untuk torsi, kecepatan dan lain sebagainya, persamaan tersebut kemudian dapat digunakan untuk memprediksi dan menentukan karakterisasi respon sistem untuk memvariasikan masukan (*input*). Respon dapat berupa grafik posisi atau kecepatan terhadap waktu, dan masukan dapat berupa perubahan beban atau perubahan sinyal kendali.

Manipulasi dan aplikasi dari persamaan sistem diferensial akan lebih mudah dibuat apabila diaplikasikan dalam transformasi Laplace. Definisi transformasi Laplace ialah sebagai berikut :

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^\infty f(t)e^{-t}dt \quad (2-14)$$

Setelah melakukan transformasi Laplace, persamaan diferensial dalam variable waktu akan berubah menjadi persamaan aljabar dalam domain frekuensi s. Secara umum

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

s didefinisikan sebagai bilangan kompleks $\sigma + j\omega$. Persamaan Laplace digunakan untuk membuat fungsi transfer. Fungsi transfer merepresentasikan hubungan antara sinyal pengendali (masukan) dan sinyal respon (keluaran) sistem dinamis. Fungsi transfer merupakan perbandingan antara transformasi Laplace keluaran sistem terhadap masukannya dengan berasumsi nol adalah kondisi inisialnya. Dengan akar penyebut dari fungsi transfer adalah kutub (*poles*).[7]

2.3.3 Sistem Kendali

Suatu sistem kendali yang baik harus memiliki umpan balik. Apabila suatu sistem memiliki umpan balik maka dapat dikatakan sistem tersebut merupakan sistem tertutup. Sistem kendali yang ideal, variabel yang dikendalikan merupakan fungsi dari sinyal yang dibutuhkan dan merupakan variabel yang bebas. Derajat kebebasan dari pengaruh ekstra dinyatakan sebagai ketahanan (*robustness*). Untuk menjamin *robustness*, seluruh sistem kendali melibatkan umpan balik (*feedback*).[7]

2.3.3.1 Kendali Umpan Balik dan Putaran Tertutup (*Feedback and Closed-loop Control*)

Umpan balik (*feedback*) berarti membandingkan variabel keluaran dengan sinyal yang dibutuhkan yang direpresentasikan dalam keluaran yang diiginkan. Sinyal merepresentasikan nilai yang diinginkan dari variabel terikat dinyatakan sebagai referensi. Ketika perbandingan dari sinyal sebenarnya dengan sinyal referensi berupa pengurangan, maka *feedback* tersebut dinyatakan sebagai *feedback* negatif. Tanda sinyal terhubung dengan peningkat galat sangatlah penting. Apabila polaritasnya salah maka *feedback* menjadi positif sehingga bukannya mengurangi galat justru akan meningkatkan ketidakstabilan.[7] Diagram blok seperti pada gambar 2.10 dapat digunakan untuk merepresentasikan persamaan umpan balik.

Gambar 2. 10 Diagram blok feedback sistem kendali dengan kompensator

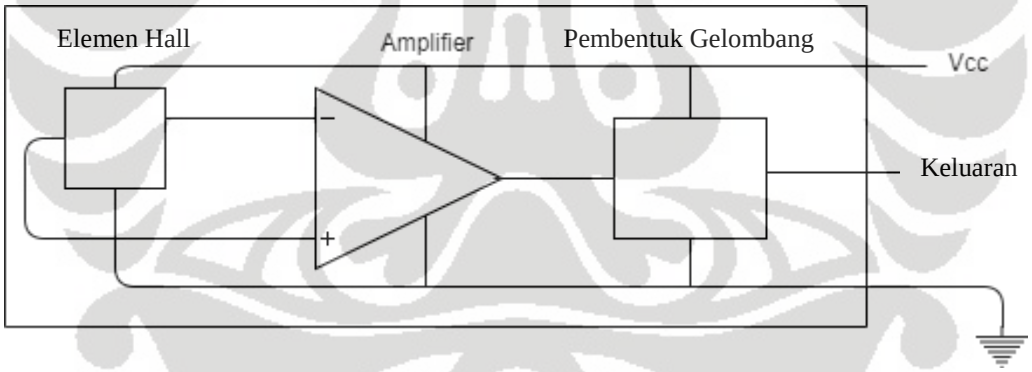
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

2.3.3.2 Kendali Kecepatan

Pengendali kecepatan hanya mengendalikan kecepatan maju dan tidak dapat menghasilkan torsi pengereman dinyatakan sebagai pengendali kuadran tunggal. Sistem servo dapat beroperasi pada keempat kuadran. Sistem kendali mengubah sistem dinamis untuk memberikan kendali kecepatan, dan posisi yang akurat. Hal itu dibutuhka untuk mendapat parameter performa seperti ketahanan, kestabilan, dan respon kilat. Sinyal kecepatan diperoleh langsung melalui tachometer atau dapat dibuat dari pulsa enkoder. Kemudian akan dibandingkan dengan sinyal referensi. Kendali kecepatan merupakan bentuk kendali motor yang paling umum. [7]

2.3.3.3 Kendali Posisi

Posisi diukur dengan menggunakan enkoder atau potensiometer dan umpan balik untuk perbandingan dengan sinyal komando posisi. Keputusan sistem kendali bergantung pada sensor. [7] Selain itu elemen Hall merupakan alat yang paling umum digunakan sebagai sensor posisi untuk mendeteksi posisi rotor dari motor *brushless,* Elemen Hall adalah divais analog yang tegangan keluaran proporsional terhadap kerapatan fluks magnetik.[5]



Gambar 2. 11 Diagram blok elemen Hall

2.3.3.4 Kestabilan

Suatu sistem dinyatakan stabil apabila output bersifat konvergen menuju kondisi tunak mengikuti gangguan maupun perubahan pada sinyal yang dibutuhkan. Sistem linear menentukan kestabilan melalui fungsi transfer, namun sistem tidak linear kestabilannya dapat diperoleh apabila gangguannya kecil namun pada gangguan besar sistem akan kembali tidak stabil.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Kestabilan merupakan kriteria yang sangat penting bagi seluruh sistem kendali lingkaran tertutup. Untuk memastikan sistem tersebut stabil pada variasi parameter objek dan gangguan eksternal, maka perlu memastikan pengukuran stabilitas relatif. Pengukuran yang umumnya dilakukan adalah menentukan batas peningkatan (*gain margin*) dan batas fasa (*phase margin*). Margin tersebut dapat ditentukan dari respon frekuensi sistem secara grafis maupun fungsi transfer dari sistem. [7]

2.3.4 Desain Sistem Kendali

Sistem kendali didesain untuk mendapatkan kriteria performa yang spesifik. Kriteria umum diantaranya yaitu:

1. Galat dalam pengoperasian harus sekecil mungkin.
2. Respon dapat diredam dengan baik agar tidak berosilasi.
3. Ketahanan parameter sistem menyesuaikan seiring dengan gangguan dari eksternal.

Terdapat beberapa pendekatan untuk mendesain sistem kendali. Diantaranya adalah dengan menggunakan metode kompensasi mendahului/tertinggal (*lead/lag compensation*). Kompensator dapat didesain dengan menggunakan data respon frekuensi lingkaran terbuka dan diimplementasikan dengan rangkaian R-C sederhana. Kompensator mendahului (*lead compensator*) dapat meningkatkan *gain* pada frekuensi lebih tinggi dan kestabilan dengan memperbesar *gain margin* dan *phase margin.* Kompensator tertinggal (*lag compensator*) merupakan kebalikan dari *lead compensator*. [7]

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

BAB 3
PROSES PEMBUATAN SIMULASI DAN PROTOTIPE DAN PENGUJIAN KARLING

3.1 Simulasi Pengereman Regeneratif

3.1.1 Membuat Pemodelan Rangkaian Sistem Pengereman Regeneratif

Pengereman Regeneratif merupakan salah satu metode yang memanfaatkan energi mekanik untuk kemudian diubah menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan selama proses pengereman akan digunakan untuk pengisian baterai. Metode ini merupakan salah satu metode yang tepat untuk meningkatkan performa kendaraan listrik. Pengereman regeneratif mengubah motor menjadi generator dengan mengubah sudut putar motor. Motor yang berputar pada sudut putar positif dicatu dengan sudut putar negatif sehingga menghasilkan tegangan induksi yang lebih besar dibandingkan tegangan pada rotor. Selisih tegangan ini akan digunakan untuk pengisian baterai.

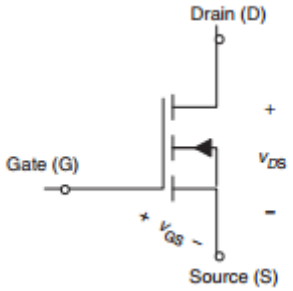
Rangkaian sistem pengendali pengereman regeneratif terdiri atas beberapa blok atau bagian. Bagian-bagian tersebut antara lain:

1. Blok Pembalik (*Inverter*)

Pengendali pengereman regeneratif pada dasarnya tergabung dengan sistem pengendali kecepatan motor BLDC. Diperlukan pembalik jembatan penuh tiga fasa (*Inverter Full Bridge Three Phase*) sebagai masukan untuk arah putar rotor. Pembalik akan memberikan inputan sesuai dengan sinyal yang berasal dari blok pengsaklaran (*switching*).

Blok pembalik terdiri atas komponen saklar berjenis MOSFET. MOSFET dipilih karena dapat bekerja pada wilayah kerja dengan tegangan 1000 Volt dan arus hingga 300 A. Tegangan yang digunakan untuk mengoperasikan motor minimal ialah 48 Volt. Sedangkan arus yang digunakan untuk mencatu motor sekitar 20 Ampere. MOSFET dapat digunakan untuk frekuensi pengsaklaran yang sangat tinggi hingga mencapai 1 MHz.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



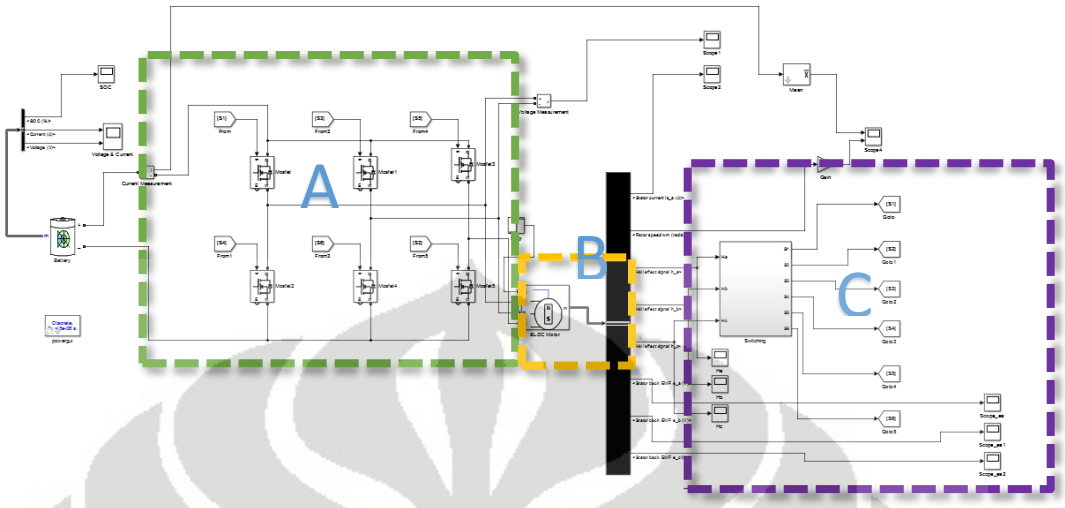
Gambar 3. 1 Simbol MOSFET daya.

MOSFET kemudian disusun menjadi rangkaian pembalik jembatan penuh tiga fasa. Rangkaian tersebut terdiri atas enam buah MOSFET. Rangkaian terhubung dengan sumber tegangan yang berasal dari baterai Litium, motor BLDC, dan blok pengsaklaran.

2. Blok Pengsaklaran

Pada rangkaian pengereman pengendali diperlukan sinyal yang berasal dari sensor Hall untuk memberi masukan blok rangkaian pembalik. Sensor Hall merupakan sensor yang digunakan untuk mengetahui posisi dari rotor. Sensor Hall terdiri dari tiga buah sinyal yaitu Ha, Hb, dan Hc. Sensor ini masing-masing mewakili ketiga fasa dari motor BLDC. Kombinasi sinyal dari sensor Hall dan sinyal PWM merupakan bagian dari konfigurasi atau pengaturan rangkaian pembalik. Kombinasi akan menentukan bentuk gelombang yang akan dihasilkan oleh motor BLDC. Bentuk gelombang yang dihasilkan merupakan representasi dari tegangan dan arus.

Blok pengsaklaran terdiri atas rangkaian gerbang logika yang telah disesuaikan sebelumnya. Gerbang logika ditentukan terlebih dahulu untuk merangkai gerbang logika. Pada dasarnya, gerbang logika merupakan metode paling sederhana untuk menghasilkan rangkaian pengsaklaran pengendali motor.



Gambar 3. 2 a. Blok pembalik. b. Motor BLDC. c. Blok Pengsaklaran pada sistem pengereman regeneratif [13]

Blok pengsaklaran memiliki masukan yang berasal dari sensor Hall A, Hall B, dan Hall C motor BLDC. [10] Sensor Hall ini kemudian akan menentukan pengereman regeneratif dengan mempengaruhi pola pengsaklaran pembalik.

```
/*== SOURCE file list of “PWM.c” with Structure A ==*/
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME  switching
#include "simstruc.h"
#include <math.h>
#define U(element) (*uPtrs[element])  /*Pointer to Input Port0*/

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S){
  if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
  ssSetInputPortWidth(S, 0, 3);
  ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
  ssSetInputPortOverWritable(S, 0, 1);
  if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
  ssSetOutputPortWidth(S, 0, 6);
  ssSetNumSampleTimes(S, 1);
  ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE); }

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S) {
  ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
  ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0); }
```

```
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid) {
  real_T *Y = ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
InputRealPtrsType uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
  int_T   i;
  real_T t = ssGetT(S);
  real_T halA, halB, halC;
  real_T S1, S2, S3, S4, S5, S6;
  real_T halfVDC = (0.5*U(1));
  halA = U(0);
  halB = U(1);
  halC = U(2);
   if(halA == 1 && halB == 0 && halC == 0) {
    S1 = 0;
    S2 = 1;
    S3 = 1;
    S4 = 0;
    S5 = 0;
    S6 = 0;
  }
    if(halA == 1 && halB == 1 && halC == 0) {
    S1 = 0;
    S2 = 1;
    S3 = 0;
    S4 = 0;
    S5 = 1;
    S6 = 0;
  }
   if(halA == 0 && halB == 1 && halC == 0) {
    S1 = 0;
    S2 = 0;
    S3 = 0;
    S4 = 1;
    S5 = 1;
    S6 = 0;
  }
   if(halA == 0 && halB == 1 && halC == 1) {
    S1 = 1;
    S2 = 0;
    S3 = 0;
    S4 = 1;
    S5 = 0;
    S6 = 0;
  }
    if(halA == 0 && halB == 0 && halC == 1) {
    S1 = 1;
    S2 = 0;
    S3 = 0;
    S4 = 0;
```

```
  S5 = 0;
  S6 = 1;
  }
  Y[0] = S1;
  Y[1] = S2;
  Y[2] = S3;
  Y[3] = S4;
  Y[4] = S5;
  Y[5] = S6;
}
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{ } /*Keep this function empty since no memory is allocated*/

#ifdef  MATLAB_MEX_FILE
   /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c"    /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"  /*Code generation registration function*/
#endif
```

Kombinasi sensor Hall menentukan saklar mana yang akan aktif selama rentang periode waktu tertentu. Untuk dapat mengetahui kombinasi yang sesuai terhadap pola pengsaklaran maka diperlukan suatu teknik pengkodean sederhana menggunakan CMEX.

3.1.2 Menentukan Karakteristik Komponen Sistem Pengendali Pengereman Regeneratif

3.1.2.1 Baterai

Tabel 3. 1 Spesifikasi Sel Baterai

Nama Sel Baterai	Samsung INR18650-25R
Arus Pengosongan Kontinu Maksimum	20 A
Kapasitas Nominal	2500 mAh
Tegangan Nominal	3,7 V
Tegangan Pengosongan Akhir	2,5 V
Tegangan Pengisian	4,2 ± 0,05 V
Arus Pengisian Standar	1,25 Ampere

Tabel 3. 2 Spesifikasi Sistem Manajemen Baterai (BMS)

Nama Barang	BMS 13 S 50 A
Penyeimbangan Tegangan	4,20 ± 0,025 V
Penyeimbangan Arus – Tiap Sel	84 ± 10 mA
Arus Statis – Tiap Sel	≤ 20 µA

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Arus Pengisian Maksimum	8 A
Arus Pengosongan Kontinu Maksimum	50 A
Deteksi Proteksi Tegangan Lebih saat Pengisian	4,250 ± 0,025 V
Waktu Tunda Deteksi Tegangan Lebih saat Pengisian	0.5 detik - 2 detik
Pelepasan Proteksi Tegangan Lebih saat Pengisian	4,15 ± 0,025 V
Deteksi Proteksi Tegangan Kurang saat Pengosongan	2,50 ± 0,062 V
Waktu Tunda Deteksi Tegangan Kurang saat Pengosongan	10 mS – 200 mS
Pelepasan Proteksi Tegangan Kurang saat Pengosongan	2,9 ± 0,1 V
Tegangan Deteksi Arus Lebih	0,15 ± 0,02V
Deteksi Arus Lebih	120 ± 20 A
Waktu Tunda Deteksi Arus Lebih	5 mS – 60 mS
Pelepasan Proteksi Arus Lebih	Melepas beban
Temperatur Kerja	-40 oC - +80 oC
Temperatur Penyimpanan	-40 oC - +125 oC

3.1.2.2 Motor Arus Searah Tanpa Sikat (Brushless DC Motor)

Motor yang digunakan pada KARLING termasuk motor BLDC. Pemilihan motor BLDC dikarenakan motor jenis ini memiliki efisiensi yang sangat besar dan mudah untuk dikendalikan. Spesifikasi motor BLDC yang digunakan tertera pada tabel di bawah ini:

Tabel 3. 3 Spesifikasi Motor BLDC KARLING

Daya Terukur	1000 Watt
Tegangan Terukur	48 V – 96 V
Torsi Maksimum	100 Nm
Efisiensi Maksimum	>87,03%
Massa Bersih	8,04 kg
Massa Kotor	9,45 kg

a. Resistansi Stator

Resistansi kumparan stator motor BLDC dipengaruhi oleh konfigurasi kumparan. Konfigurasi kumparan motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini terhubung bintang (*wye*). Sehingga nilai resistansi fasa kumparan stator merupakan setengah dari nilai resistansi saluran.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Nilai resistansi fasa kumparan stator dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$R_{fasa-stator} = \frac{V_{dc-antarfasa}}{I_{dc-fasa}} \quad (3-1)$$

b. Induktansi Stator

Motor listrik terdiri atas kumparan yang terdapat stator. Kumparan tersebut dapat menghasilkan hambatan yang bersifat induktif apabila dicatu oleh tegangan dan arus bolak-balik. Nilai resistansi induktansi kumparan stator per fasa maka nilai induktansi kumparan stator per fasa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$L = \frac{2\pi f}{X_L} \quad (3-2)$$

Dengan,

L = Induktansi (Henry)

f = Frekuensi (Hz)

X_L= Reaktansi Induktif (Ω)

C. Konstanta Tegangan Induksi (Ke)

Konstanta tegangan induksi (K_e) adalah nilai tegangan yang terukur dibagi dengan kecepatan putar dalam radian per detik. Dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$K_e = \frac{E}{\omega} \quad (3-3)$$

Dengan,

K_e = Konstanta tegangan induksi (Volt detik per radian)

E = Tegangan terukur (Volt)

ω = Kecepatan putar (radian per detik)

D. Konstanta Torsi

Nilai konstanta torsi (K_t) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{T}{I} = K_t \quad (3-4)$$

Dengan,

T = Torsi (pon-inci)

I = Arus (A)

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

K_t = Konstanta Torsi (pon-inci per Ampere)

3.2 Pembuatan Prototipe KARLING

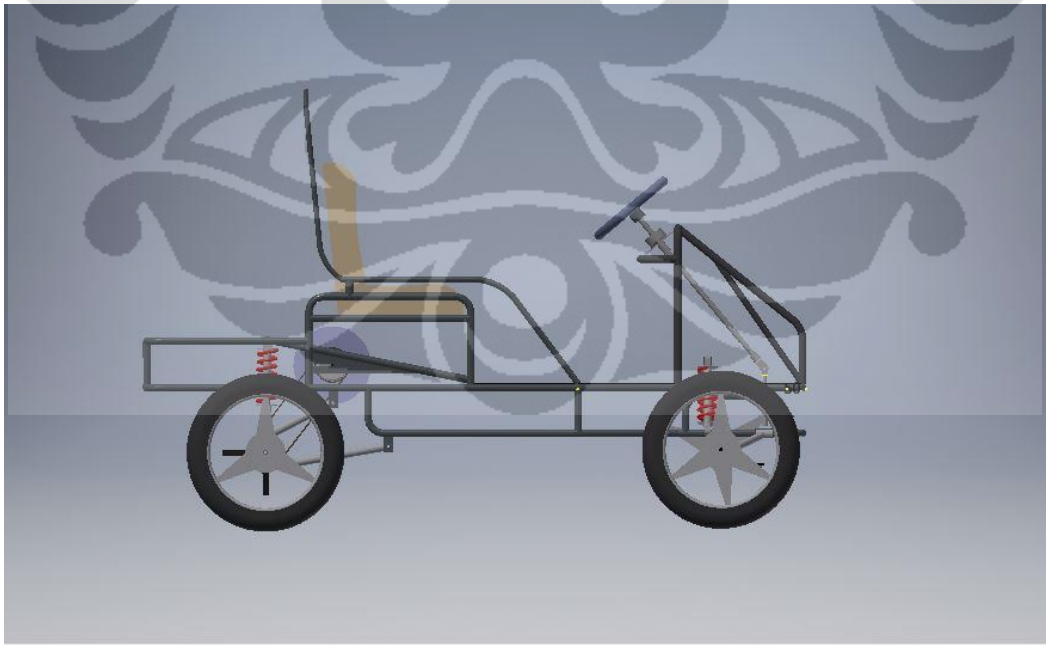
KARLING merupakan kendaraan yang dikategorikan sebagai kendaraan *ultra-compact*. Kendaraan *ultra-compact* adalah kendaraan yang dari dimensinya hanya dapat dinaiki oleh satu hingga dua orang saja. Hal tersebut dikarenakan KARLING ditujukan untuk penggunaan di lingkungan kampus sebagai kendaraan mobilisasi petugas keamanan. Selain itu KARLING dapat digunakan untuk kepentingan mobilisasi kawasan pariwisata dan sebagainya. Ukurannya yang ringkas membuat ia mudah untuk dikendarai.

KARLING dibuat dengan menggunakan besi berongga yang disambung dengan cara dilas. Hal tersebut membuat KARLING terasa kokoh saat dikendarai. Namun, hal tersebut juga menyebabkan KARLING memiliki massa yang berat yaitu sekitar 150 Kg. Massa yang berat tersebut membuat KARLING tidak dapat digunakan untuk kecepatan tinggi dikarenakan motor yang digunakan sebagai penggeraknya hanya merupakan motor dengan kapasitas kecil. Akan tetapi, kondisi tersebut tetap sesuai dengan fungsi KARLING untuk kendaraan mobilisasi yang tidak membutuhkan kecepatan tinggi.

3.2.1 Gambar Rangka KARLING

- Tampak Samping

Tampak samping KARLING dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut ini:



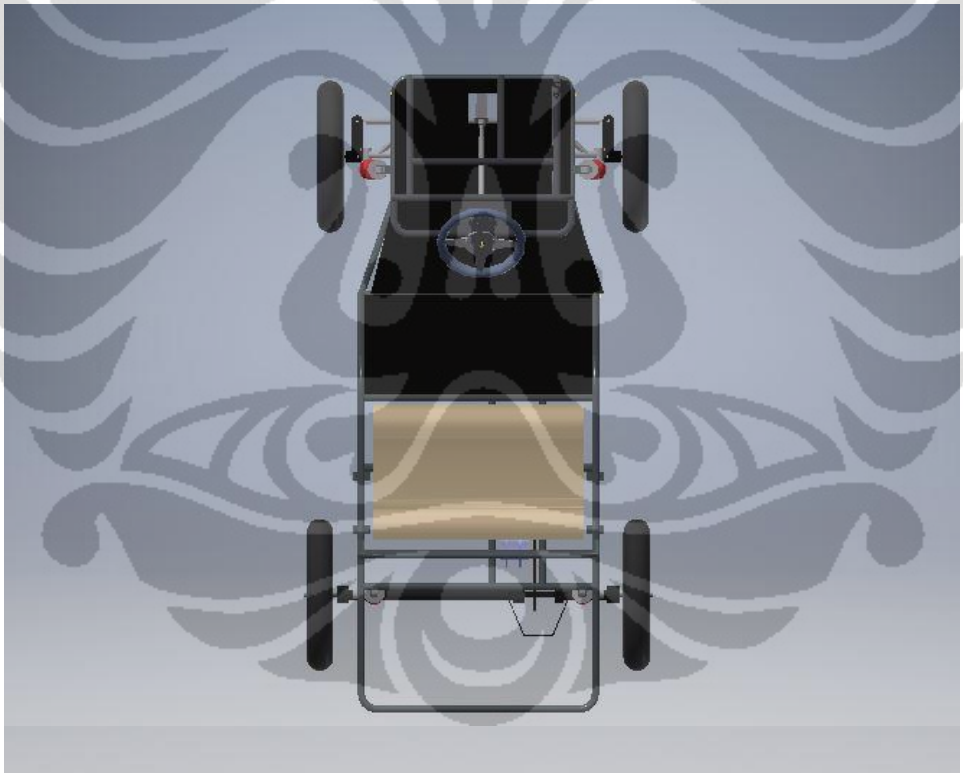
Gambar 3.3 Rangka KARLING tampak samping.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

KARLING memiliki dimensi yang panjang dengan bagian belakang mobil yang dapat digunakan untuk meletakkan barang-barang. Selain itu area untuk meletakkan kaki juga luas sehingga tidak akan terasa sempit sekalipun dinaiki oleh dua orang. Pusat massa KARLING terletak di bagian tengah lebih tepatnya di zona tempat duduk, karena pada area tersebut diletakkan peralatan seperti motor, kontroler, dan baterai yang masing-masing memiliki massa yang cukup berat. Untuk motor itu sendiri bermassa 3 Kg. Kontroler tidak lebih daripada 1 Kg. Baterai bermassa 2 Kg. Sehingga lengan gaya untuk motor agar dapat menggerakkan KARLING tidak begitu besar. Hal tersebut bertujuan untuk memperkecil torsi motor terhadap kendaraan.

- Tampak Atas

Tampak atas menunjukkan alokasi penempatan peralatan yang digunakan pada KARLING seperti pada Gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4 Rangka KARLING tampak atas

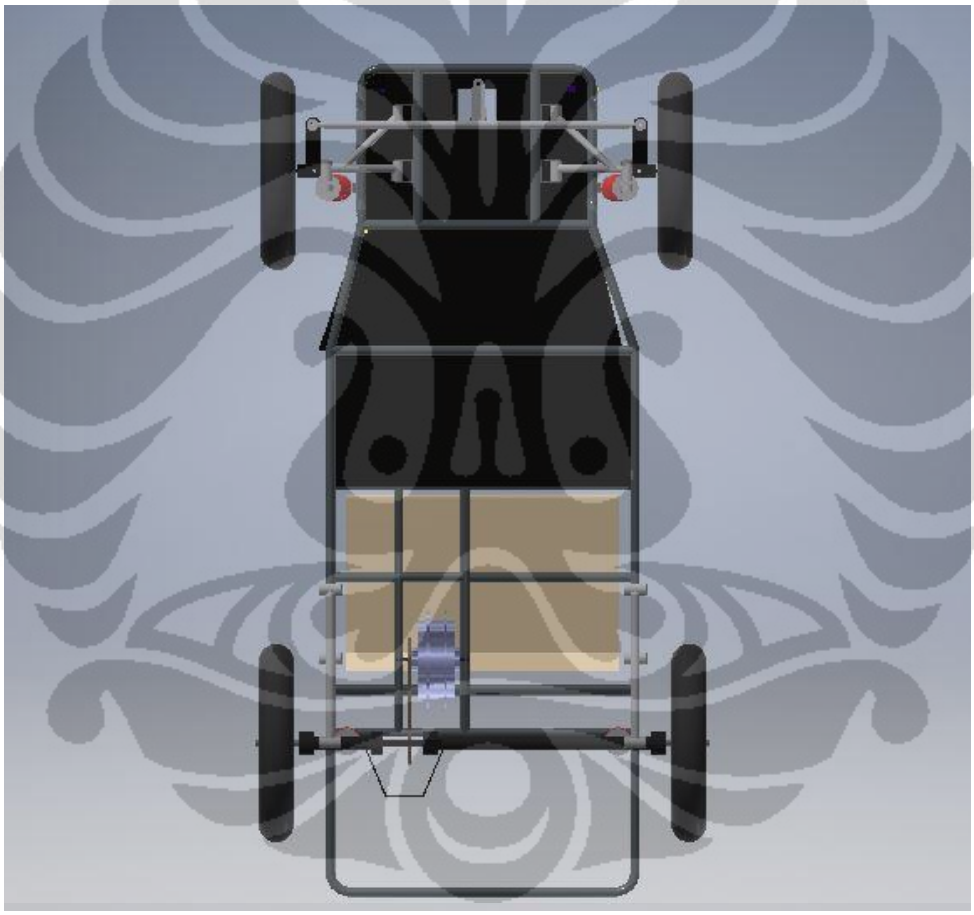
KARLING menggunakan stir untuk mengendalikan arah jalan kendaraan. Stir terletak di bagian depan, begitupula dengan rem kaki dan pedal gas. Pada setiap ban diberikan penahan getaran (*shock breaker*) yang berfungsi untuk menahan getaran kendaraan agar memberikan kenyamanan bagi penumpang dan pengendara. Pada bagian

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

dua ban belakang dipasang rem yang berjenis cakram yang berfungsi sebagai rem mekanis.

- Tampak Bawah

Pada KARLING motor terletak di bagian belakang dekat dengan pusat massa. Sehingga beban KARLING terbesar terletak di belakang. Motor KARLING terhubung dengan roda dengan menggunakan rantai. Rasio rantai pada motor dengan rantai roda ialah 31:35. Perbedaan rasio ini dilakukan untuk menaikkan kecepatan putar roda. Karena kecepatan putar motor maksimum hanya 550 putaran per menit.



Gambar 3. 5 Rangka KARLING tampak bawah

- Tampak Depan

KARLING merupakan kendaraan yang dapat dinaiki oleh dua orang pada kondisi normal. Jok mobil cukup untuk dua orang dengan posisi stir terletak di bagian kanan. Sehingga orang yang mengendarai duduk di sebelah kanan. Sebagaimana hampir semua

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

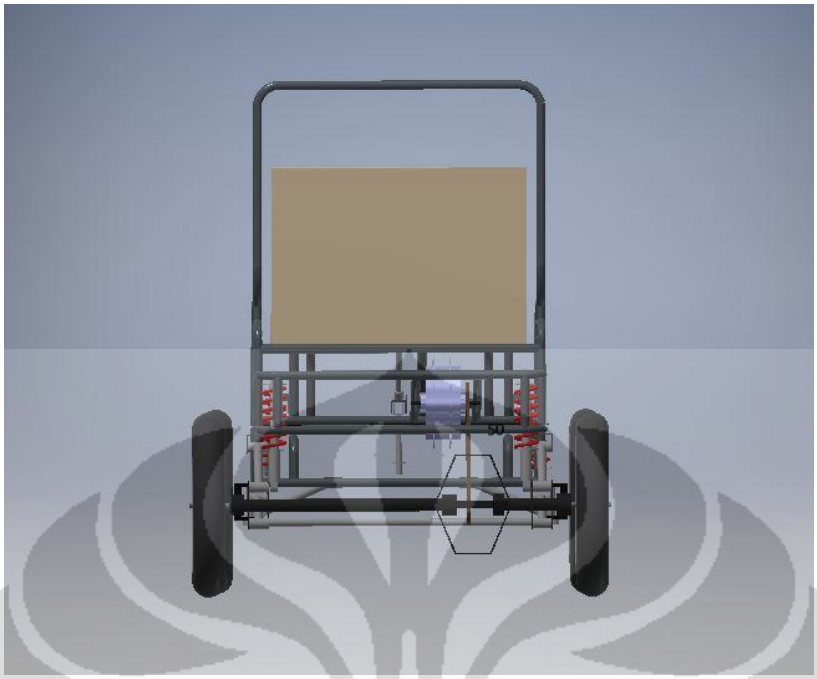
kendaraan di Indonesia memiliki posisi stir yang demikian. Akan tetapi, posisi stir tidak cukup ergonomis untuk digunakan karena stir terlalu pendek sehingga tangan perlu menjangkau lebih jauh. Posisi tersebut tentu membuat pengendara akan merasa lebih cepat lelah. Kondisi stir yang demikan merupakan kesalahan saat pembuatan dikarenakan keterbatasan bahan yang ada.

Gambar 3. 6 Rangka KARLING tampak depan

- Tampak Belakang

Ban belakang terhubung dengan *shaft* yang dipasang transmisi kendaraan berupa roda gigi bermata 35. Roda gigi tersebut terhubung dengan roda gigi di motor yang bermata 31 dengan menggunakan rantai berukuran mata 108. Selain itu pada rantai dipasang *tensioner* yang berfungsi untuk menahan rantai tetap tegang sekalipun mobil diberi beban berat. Apabila rantai tidak berada dalam kondisi tegang maka kemungkinan rantai putus akan semakin besar. Karena rantai akan tersangkut di roda gigi selama motor berputar.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



Gambar 3. 7 Rangka KARLING tampak belakang

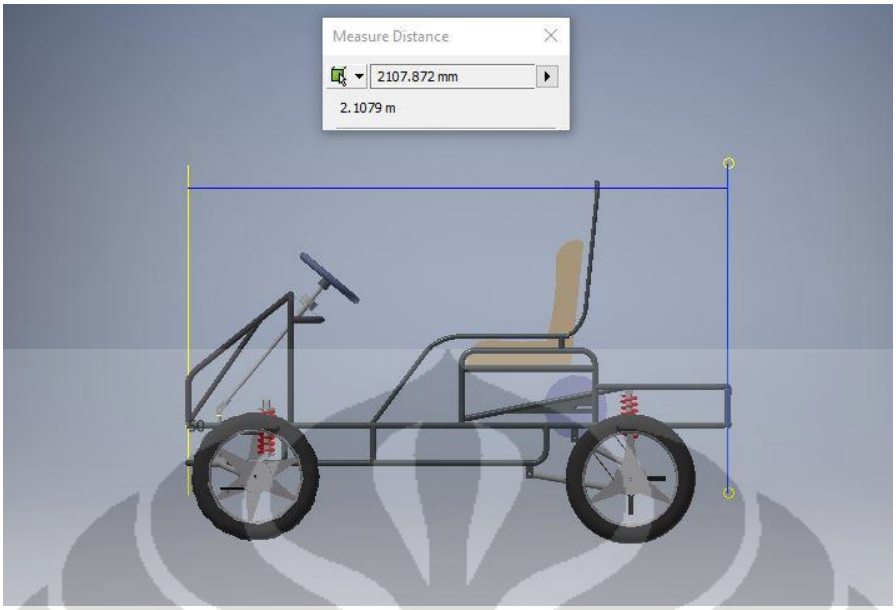
3.2.2 Dimensi KARLING

Ukuran KARLING berukuran *ultra-compact* yang dapat ditumpangi oleh dua orang. Secara keseluruhan dimensi KARLING dapat dilihat pada tabel 3.4. Secara keseluruhan divisualisasikan pada desain KARLING gambar dari 3.8 sampai 3.11.

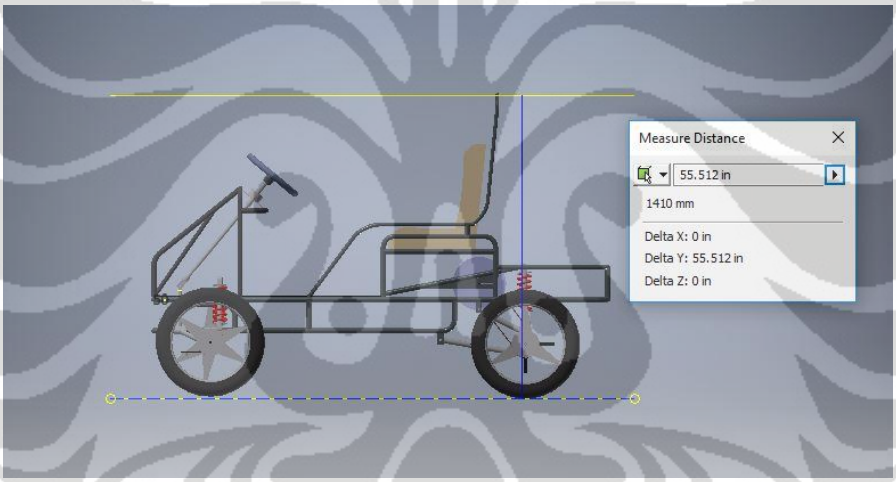
Tabel 3.4 Dimensi KARLING

Panjang Mobil	:	2,1079 m
Lebar Mobil	:	1,14 m
Tinggi Mobil	:	1,41 m
Tinggi dudukan terhadap tanah	:	31 cm

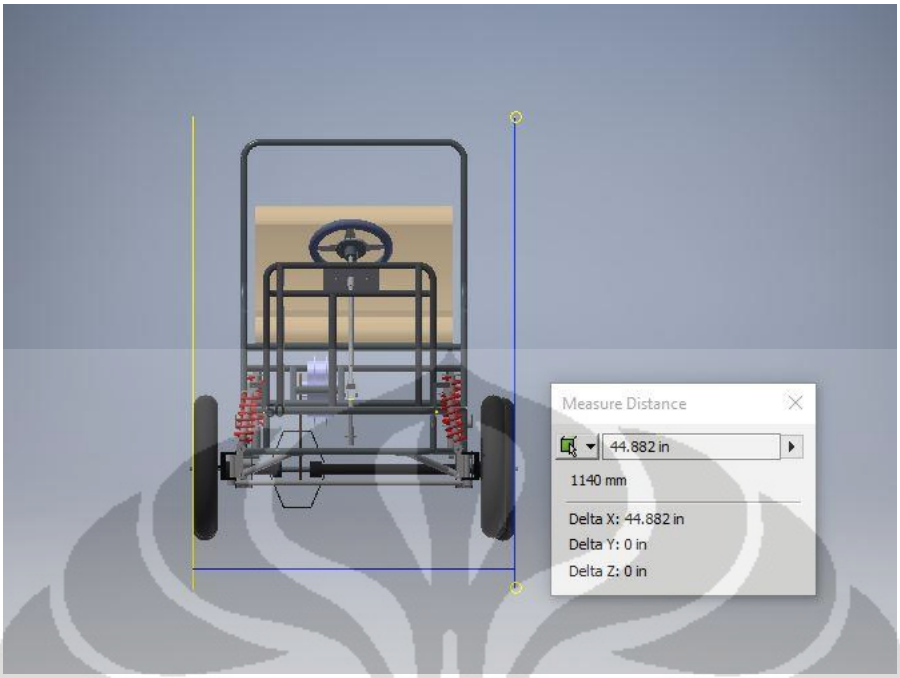
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



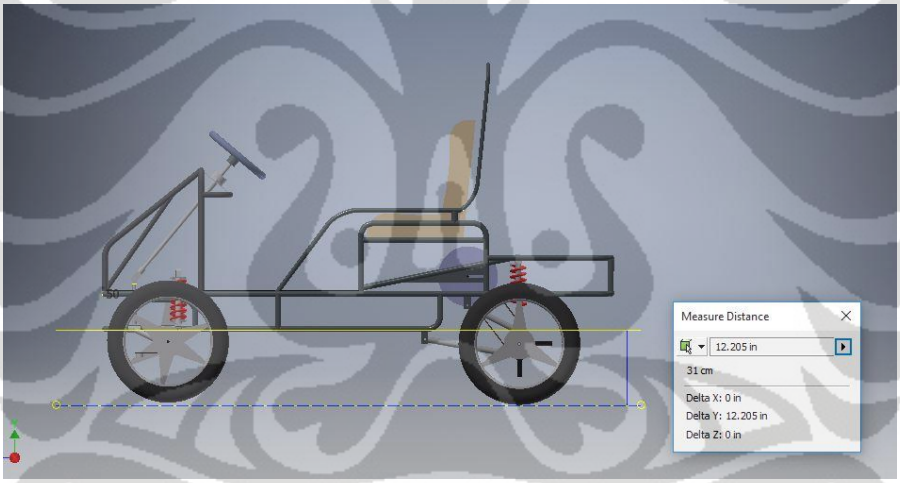
Gambar 3. 8 Dimensi *panjang* KARLING



Gambar 3. 9 Dimensi tinggi KARLING



Gambar 3. 10 Dimensi lebar KARLING



Gambar 3. 11 Dimensi tinggi dudukan terhadap tanah KARLING

3.3 Pembuatan Rangkaian Kelistrikan KARLING

3.3.1 Merangkai Pengkabelan Kontroler

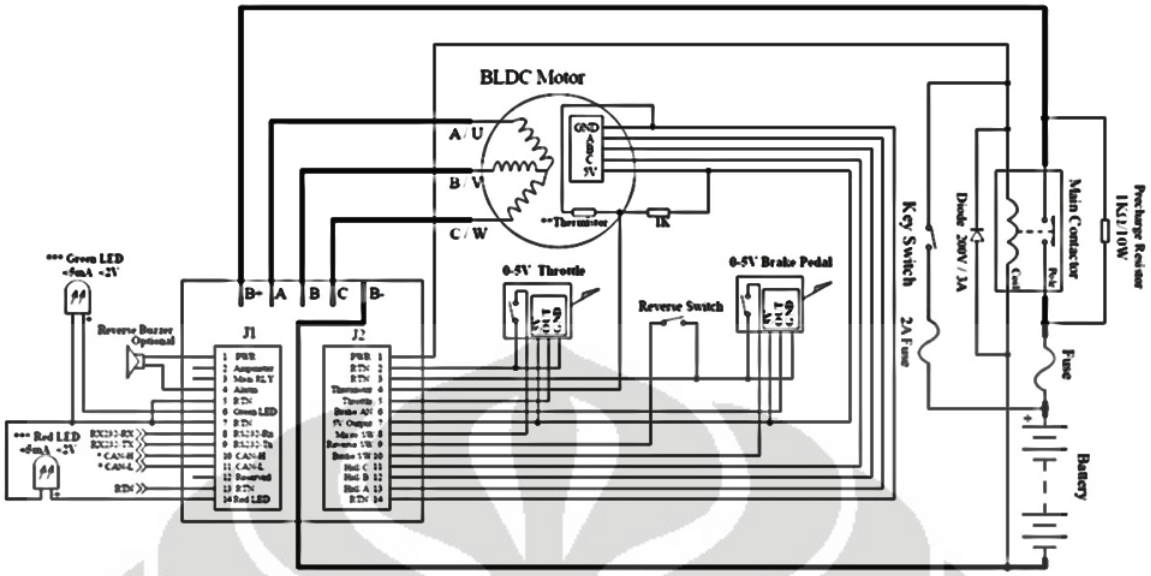
Kontroler merupakan objek penelitian yang penulis ujikan. Kontroler yang digunakan bertipe KBL48151X. Kontroler jenis ini memiliki kemampuan spesifikasi yang tinggi. Secara keseluruhan spesifikasi kontroler ini dapat dilihat pada tabel 3.5. Kegunaan kontroler di KARLING sebagai pengatur kecepatan. Cara kerja kontroler yang digunakan menjadi focus penelitian penulis. Kontroler dapat digunakan untuk pengoperasian standar maupun digunakan untuk pengereman regeneratif.

Gambar 3.12 Kontroler KBL48151X

Kontroler merupakan salah satu komponen kelistrikan utama KARLING. Kontroler yang digunakan merupakan tipe KLB48151X. Kontroler jenis ini memiliki rating sebagai berikut:

Tabel 3. 5 Spesifikasi Kontroler Motor BLDC 1000 Watt

Tegangan Suplai Kontroler	18V – 90V
Frekuensi Operasi	16.66kHz
Arus Baterai Terjaga	<0.5mA
Arus Suplai Sensor 5V	40mA
Rentang Tegangan Baterai	18V – 60V
Masukan Rem dan Pedal Analog	0 – 5 Volt
Rentang Temperatur Operasi Daya Penuh	0^{o}C – 50^{o}C
Rentang Temperatur Operasi	-30^{o}C – 90^{o}C
Arus Boost	200A
Batas Arus Maksimum (1 menit)	150A
Batas Arus Kontinyu	80A

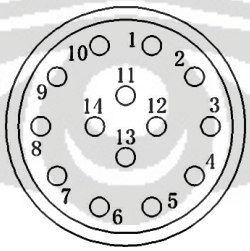


Gambar 3. 13 Diagram rangkaian dalam kontoler

3.3.1.1 Pedal Gas

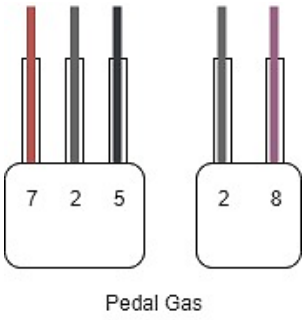
Berdasarkan skema pengaturan kontroler pada gambar 3.3 di atas, peneliti mengelompokkan pin untuk pedal gas ialah pin nomor 2, 5, 7, dan 8. Sebagaimana pin 2 sebagai pin netral (*ground*), pin 5 sebagai data sinyal 0-5 V, pin 7 sebagai keluaran 5 V, dan pin 8 sebagai saklar mikro (*micro switch*). Saklar mikro ini dapat diatur untuk diaktifkan atau tidak. Ketika saklar mikro diaktifkan maka untuk menyalakan motor maka saklar mikro harus berada dalam kondisi aktif. Sedangkan saat kondisi saklar mikro tidak aktif maka ia tak akan berpengaruh pada mekanisme pengasutan motor.

Kemudian pengkabelan tersebut harus terhubung dengan pin-pin pada kabel J2 kontroler.



Gambar 3. 14 Penampang melintang kepala kabel J2

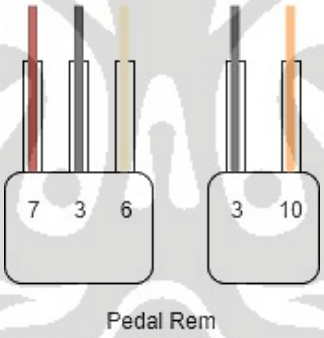
Sehingga *port* pedal gas menjadi seperti pada gambar 3.5 berikut.



Gambar 3. 15 Konfigurasi kabel pedal gas

3.3.1.2 Pedal Rem

Berdasarkan skema pengaturan kontroler pada gambar () di atas, peneliti mengelompokkan pin untuk pedal rem ialah pin nomor 3, 6, 7, dan 10. Sebagaimana pin 3 sebagai pin netral (*ground*), pin 6 sebagai rem analog (*Brake* AN), pin 7 sebagai keluaran 5 V, dan pin 10 sebagai saklar rem (*Brake Switch*). Fungsi saklar rem serupa dengan saklar mikro. Setelah mengelompokkan kabel yang terhubung dengan pin-pin tersebut selanjutnya dihubungkan ke kepala port seperti pada gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Konfigurasi kabel pedal rem.

3.3.1.3 Saklar Pembalik

Saklar pembalik merupakan salah satu fungsi dari kontroler yang dapat diterapkan untuk membuat motor berjalan berlawanan arah. Sehingga memungkinkan KARLING untuk berjalan mundur. Apabila dihubungkan maka saklar pembalik mengaktifkan fungsi *reverse* dari motor tersebut sehingga KARLING dapat berjalan mundur. Saklar pembalik harus terhubung dengan pin 9 dan pin 3 pada *port* J2 seperti pada gambar 3.7.

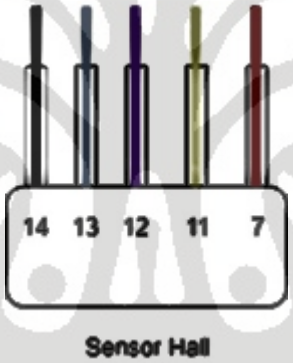
Gambar 3. 17 Konfigurasi kabel saklar pembalik

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

3.3.1.4 Sensor Hall Motor BLDC

Sensor Hall pada motor BLDC berfungsi untuk mengetahui lokasi atau posisi rotor. Sensor Hall memberikan masukan kepada kontroler untuk kemudian diproses oleh kontroler. Kontroler yang kemudian menentukan apakah motor bergerak maju, mundur, maupun pengereman regeneratif. Sensor Hall memiliki peran paling penting dalam menentukan arah dan laju kendaraan KARLING.

Untuk dapat memanfaatkan sensor Hall dengan baik maka sambungan kabel dari motor harus terhubung ke kontroler. Dalam hal ini, sensor Hall pada motor terhubung dengan pin 11, 12, 13, 14, dan 7. Pin 11 merupakan pin untuk sensor Hall A yaitu sensor Hall untuk fasa A, pin 12 untuk sensor Hall B, pin 13 untuk sensor Hall C, sedangkan pin 14 untuk kabel netral dan pin 7 untuk keluaran 5 V. Kemudian seluruh kabel yang terhubung dengan pin tersebut dapat digabungkan ke kepala *port* seperti pada gambar berikut.

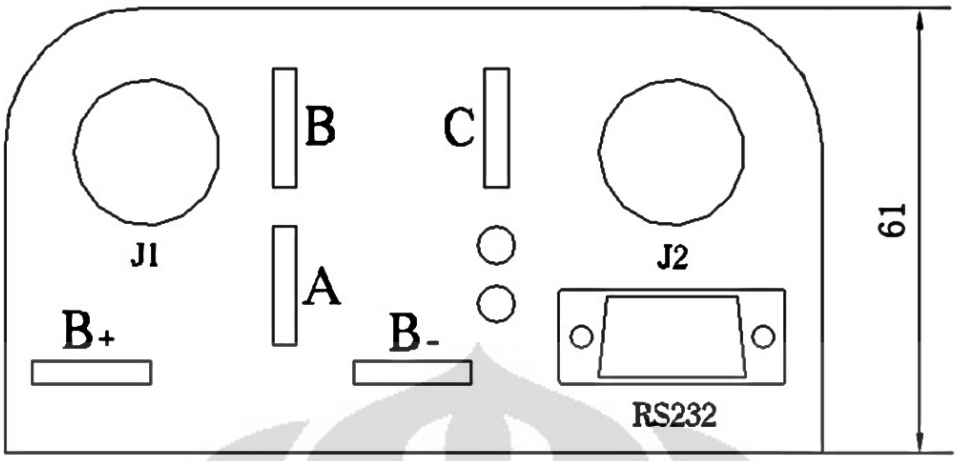


Gambar 3. 18 Konfigurasi kabel sensor Hall

3.3.2 Merangkai Sambungan Motor dan Baterai

Setelah menyelesaikan pengkabelan rangkaian, langkah selanjutnya adalah memastikan sambungan antar fasa motor dengan kontroler dan baterai terhubung dengan baik. Oleh karena itu, perlu diperhatikan sesuai konfigurasi pada kontroler dengan melihat gambar 3.9.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



Gambar 3. 19 Gambar penampang samping kontroler

Kabel baterai terdiri atas kabel positif dan negative. Kabel positif ditandai dengan kabel berwarna merah, dan kabel negative ditandai dengan kabel berwarna hitam. Kabel positif baterai dihubungkan dengan *port* B+, dan kabel negatif baterai dihubungkan dengan *port* B-.

Kemudian sambungan fasa dari motor ke kontroler harus disesuaikan dengan warna dari kabel masing-masing fasa dari motor yang digunakan. Berdasarkan buku manual dari motor fasa A ditandai dengan kabel hijau, fasa B ditandai dengan kabel biru, dan fasa C ditandai dengan kabel kuning. Masing-masing fasa harus terhubung sesuai *port* masing-masing pada skema tampilan penampang kontroler.

3.4 Metodologi Pengujian Pengereman Regeneratif KARLING

3.4.1 Menentukan Skema Penelitian Pengereman Regeneratif

Pengujian pengereman regeneratif akan sedikit berbeda dibandingkan dengan pengujian motor pada umumya. Pengereman regeneratif diujikan ketika kendaraan sedang melakukan pengereman dari kondisi kecepatan penuh hingga akan berhenti atau berhenti total. Namun sebelum itu perlu dilakukan beberapa langkah persiapan pengujian.

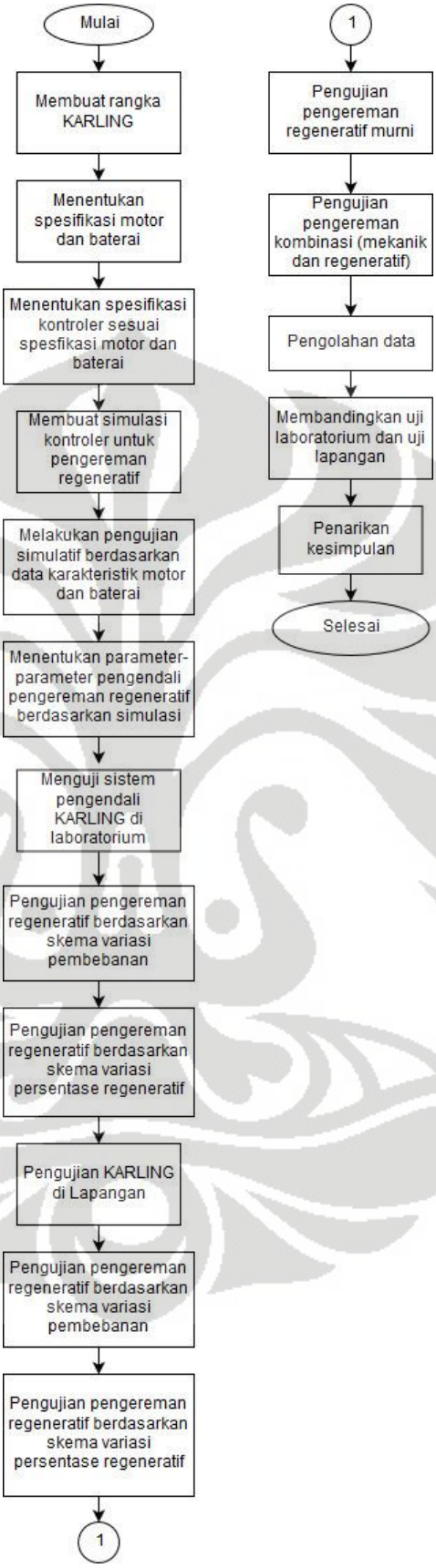
Skema penelitian yang saya lakukan ialah melakukan pengujian simulasi untuk kemudian hasilnya dibandingkan dengan pengujian riil di laboratorium dan uji berkendara. Pengujian dilakukan untuk memperoleh data berupa data tegangan keluaran dari motor menuju baterai selama pengereman berlangsung. Secara keseluruhan skema yang akan saya lakukan dirangkum dalam bagan pada gambar 3.10.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

Pada skema penelitian pengereman regeneratif ini penulis melakukan pengujian simulasi menggunakan SIMULINK MATLAB 2016a dan melakukan pengujian laboratorium dan lapangan dengan berbagai skema variasi. Skema variasi yang dilakukan diantaranya berdasarkan skema variasi pembebanan, skema variasi persentase regeneratif, sedangkan untuk pengujian di lapangan dilakukan uji pengereman regeneratif murni dan pengereman kombinasi dengan pengereman mekanik dan pengereman regeneratif.

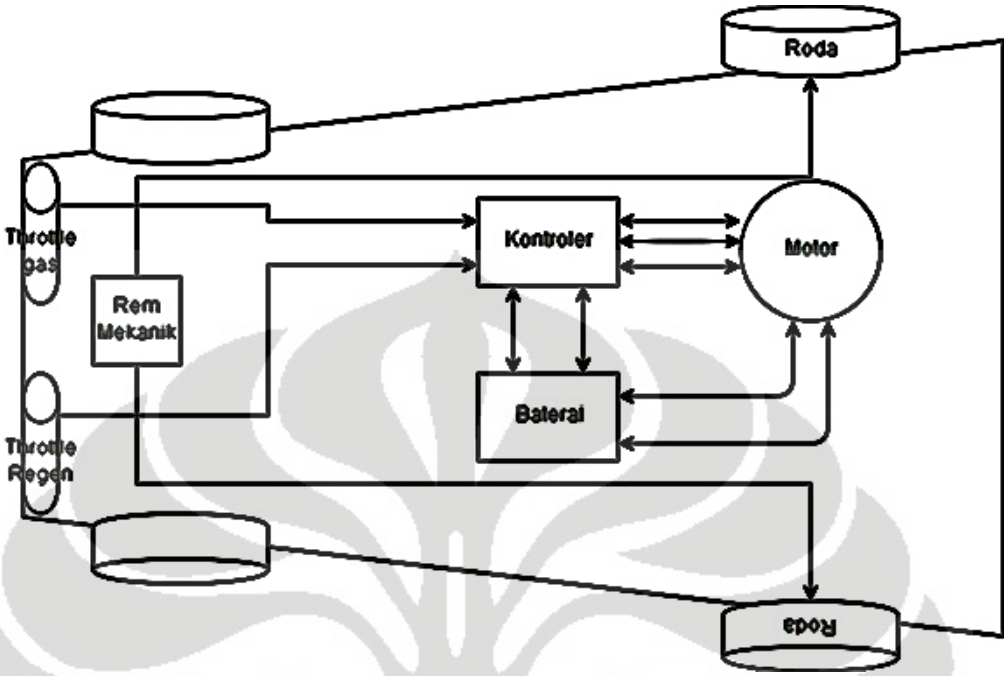
Langkah selanjutnya setelah memperoleh seluruh data pengujian ialah melakukan pengolahan data untuk memperoleh bentuk grafik dari masing-masing skenario pembebanan. Grafik hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan grafik hasil simulasi.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



Gambar 3. 20 Skema Penelitian Pengereman Regeneratif

3.4.2 Merangkai Komponen KARLING Berdasarkan Skema Pengujian



Gambar 3. 21 Konfigurasi komponen KARLING untuk pengujian

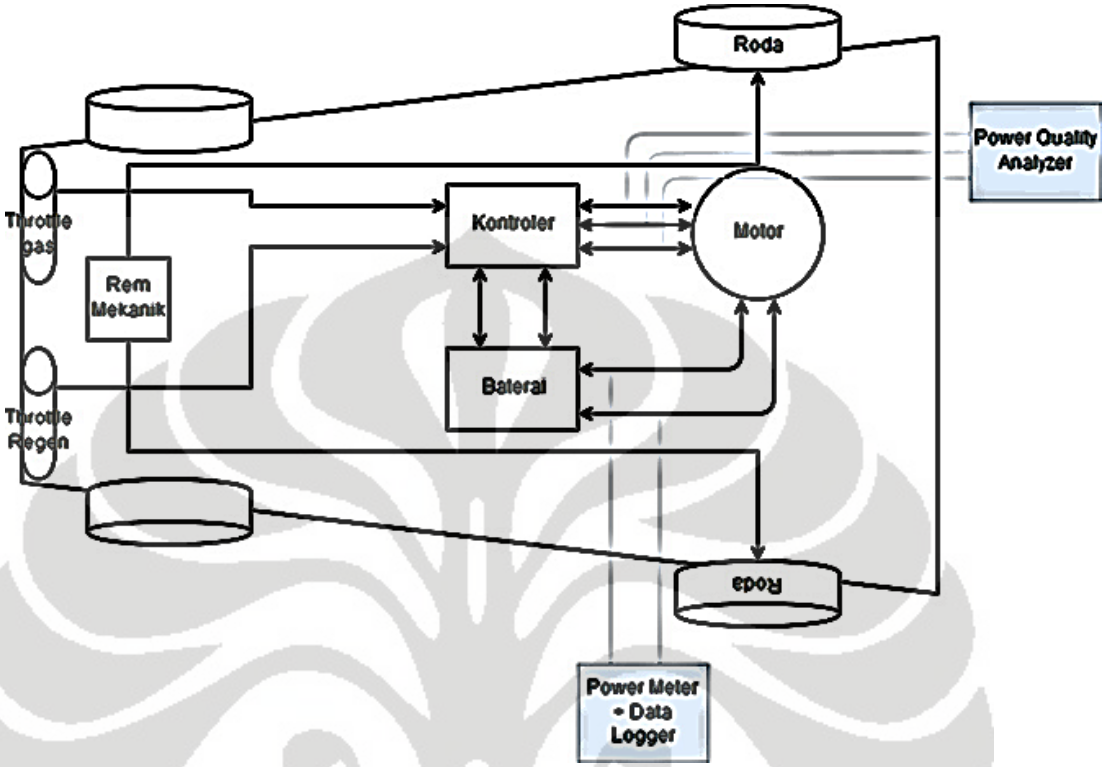
Pengujian pengereman regeneratif membutuhkan seluruh komponen kelistrikan KARLING sudah terpasang dengan baik karena merupakan kesatuan juga bagi sistem pengendalinya. Gambar 3.11 menunjukan diagram aliran informasi antarkomponen. Kontroler terhubung dengan seluruh komponen kecuali rem mekanik, karena rem mekanik tidak termasuk dalam bagian kelistrikan mobil KARLING. Kontroler berinteraksi dengan pedal gas dan pedal regeneratif. Kedua pedal berfungsi sebagai masukan. Pedal gas mengatur kecepatan KARLING, sedangkan pedal regeneratif mengatur laju pengereman regeneratif KARLING.

3.4.3 Menentukan Skema Pengukuran Pengereman Regeneratif

Pengujian pengereman regeneratif dilakukan untuk mendapatkan data tegangan dan arus keluaran dari motor ke baterai selama pengereman regeneratif berlangsung. Data tersebut dibandingkan dengan data arus dan tegangan yang dikonsumsi oleh motor selama berkendara. Pengujian dan pengukuran dilakukan menggunakan alat ukur yaitu *energy meter* ACUDC 240 dan PQA (*Power Quality Analyzer*). *Energy meter* dipasang pada sisi baterai untuk melihat laju tegangan dan arus selama berkendara dengan berbagai skenario. Sedangkan PQA digunakan di sisi antara motor dan kontroler untuk

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

memperoleh data aktivitas kontroler selama berkendara. Skema pengukuran dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3. 22 Skema pengukuran parameter pengereman regeneratif

3.5 Melakukan Perhitungan Efisiensi Pengereman Regeneratif

Pengereman regeneratif memanfaatkan putaran roda untuk kemudian merubah energi kinetik menjadi energi listrik. Dengan memanfaatkan konversi energi seperti itu peneliti dapat meningkatkan kembali performa baterai. Sehingga tegangan baterai mengalami kenaikan selama pengereman regeneratif.

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki oleh suatu benda yang memiliki kecepatan. Sedangkan energi listrik adalah suatu bentuk energi yang terdiri atas muatan yang bergerak pada daerah dengan perbedaan potensial. Fenomena konversi energi yang terjadi di alam ini dapat terjadi secara langsung maupun melalui mekanisme pembangkitan energi tertentu.

Pengereman regeneratif melakukan konversi energi dari energi kinetik menjadi energi listrik. Oleh karena itu, peneliti melakukan pengukuran terhadap efisiensi sistem dengan membandingkan energi listrik (energi baterai) dengan energi kinetik.

$$\eta = \frac{\sum E_{baterai}}{\sum E_{kinetik}} \qquad (3-5)$$

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

$$E_{kinetik} = \sum \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) \quad (3-6)$$

$$E_{baterai} = \int_{t=0}^{t=akhir} (I_t \, R_t \, I_i) \, dt \quad (3-7)$$

Dengan,

η = efisiensi sistem (%)

m = massa (kilogram)

V = kecepatan (meter per detik)

I_t = Arus akhir (Ampere)

R_t= Hambatan Akhir (Ohm)

I_i = Arus awal (Ampere)

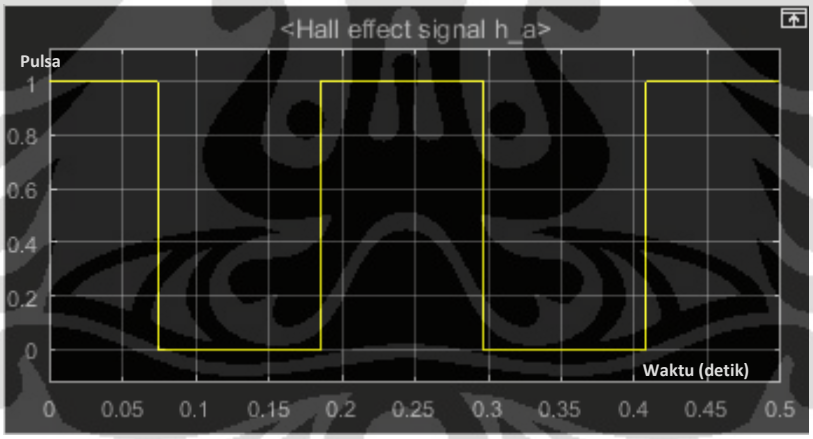
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

BAB 4
EVALUASI SIMULASI DAN PENGUJIAN PENGEREMAN REGENERATIF PADA KARLING

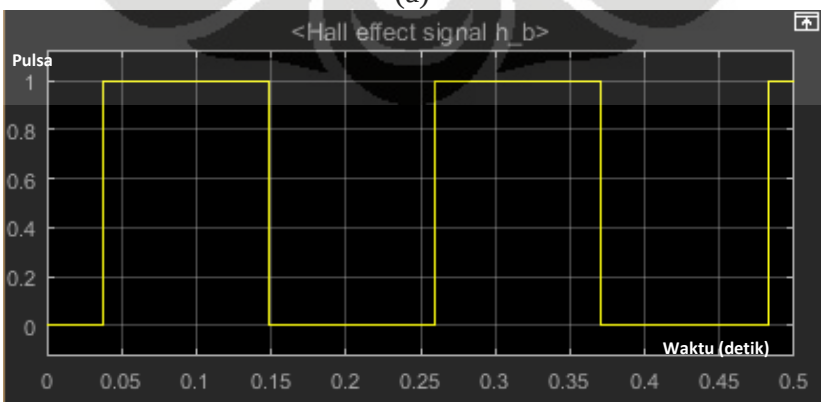
4.1 Simulasi Pemodelan Pengereman Regeneratif Menggunakan SIMULINK MATLAB 2016a

4.1.1 Simulasi Sensor Hall Motor BLDC

Sensor Hall memberikan masukan kepada kontroler berupa posisi rotor yang kemudian akan dikombinasikan dengan bentuk gelombang *back-EMF* akan menghasilkan suatu konfigurasi pengsaklaran pada rangkaian pembalik (*Inverter*). Dengan melakukan pengamatan pada bentuk gelombang sinusoidal *back-EMF* terhadap gelombang trapezoid sensor Hall maka akan diperoleh suatu kombinasi pengsaklaran yang ajeg. Hal tersebut kemudian dimanfaatkan untuk menyusun suatu program menggunakan bahasa C. Program tersebut membuat setiap saklar pada rangkaian pembalik bekerja sesuai dengan inputan dari sensor Hall. Berikut bentuk grafik deteksi rotor oleh sensor Hall pada motor BLDC:

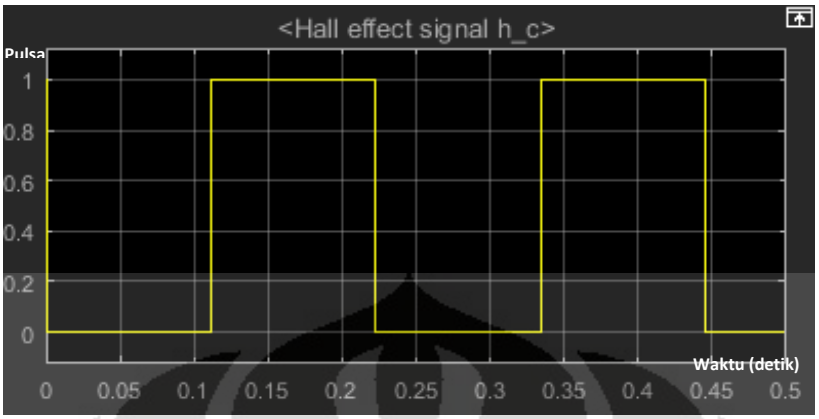


(a)



(b)

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



(c)

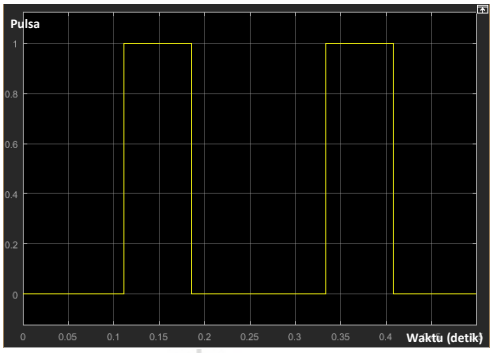
Gambar 4. 1 (a) Grafik efek Hall A (b) Grafik efek Hall B (c) Grafik efek Hall C

Berdasarkan data grafik tersebut diketahui bahwa masing-masing sensor secara bergantian berada pada kondisi HIGH dan LOW. Pada kondisi HIGH tersebut menunjukkan bahwa sensor Hall membaca rotor berada pada posisi A, B, maupun C, sedangkan pada kondisi LOW maka hal sebaliknya yang terjadi. Saya mengatur simulasi hanya berjalan selama 0.5 detik dikarenakan grafik sensor Hall sangat dipengaruhi oleh kecepatan putar rotor. Frekuensi angular maksimum motor yang dimiliki oleh motor BLDC berkapasitas 1000 Watt dengan tegangan 48 Volt sekitar 57,567 radian/detik atau 9,167 putaran/detik atau dibutuhkan 0,1 detik untuk satu putaran. Dengan menggunakan pengaturan 0,5 detik waktu simulasi dapat menunjukkan 6 fase posisi rotor.

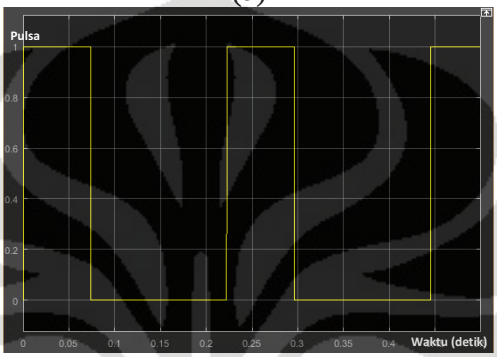
4.1.2 Simulasi Pengsaklaran Menggunakan MOSFET

Data masukan dari motor BLDC berupa sensor Hall yang bersifat diskrit memudahkan saya untuk mengatur kombinasi kerja pengsaklaran dengan membuat program bahasa C sederhana menggunakan CMEX. CMEX merupakan perangkat lunak yang memungkinkan pengguna memasukkan program pada blok diagram SIMULINK. Sebagaimana program yang telah dipaparkan pada bab tiga maka saya dapat memperoleh konfigurasi pengsaklaran sebagai berikut :

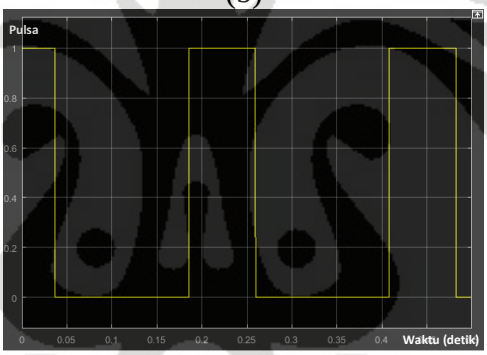
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018


Pulsa
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4
Waktu (detik)

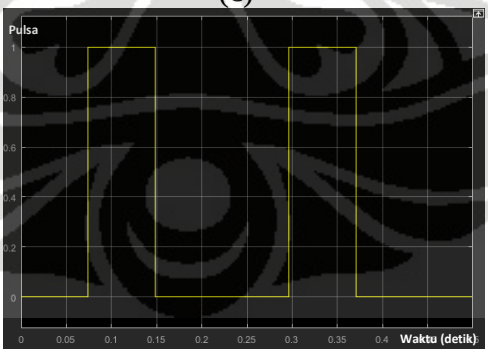
(a)


Pulsa
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4
Waktu (detik)

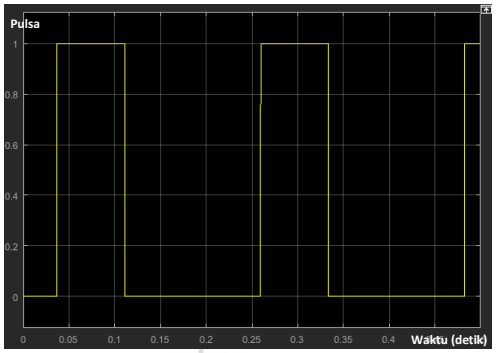
(b)


Pulsa
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4
Waktu (detik)

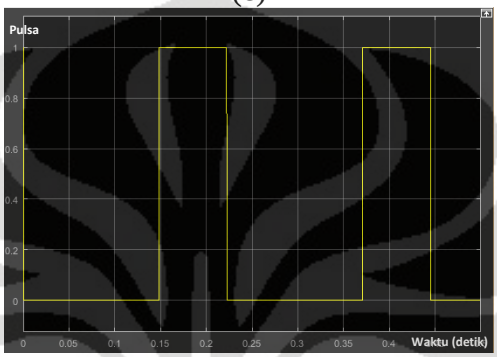
(c)


Pulsa
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4
Waktu (detik)

(d)



(e)



(f)

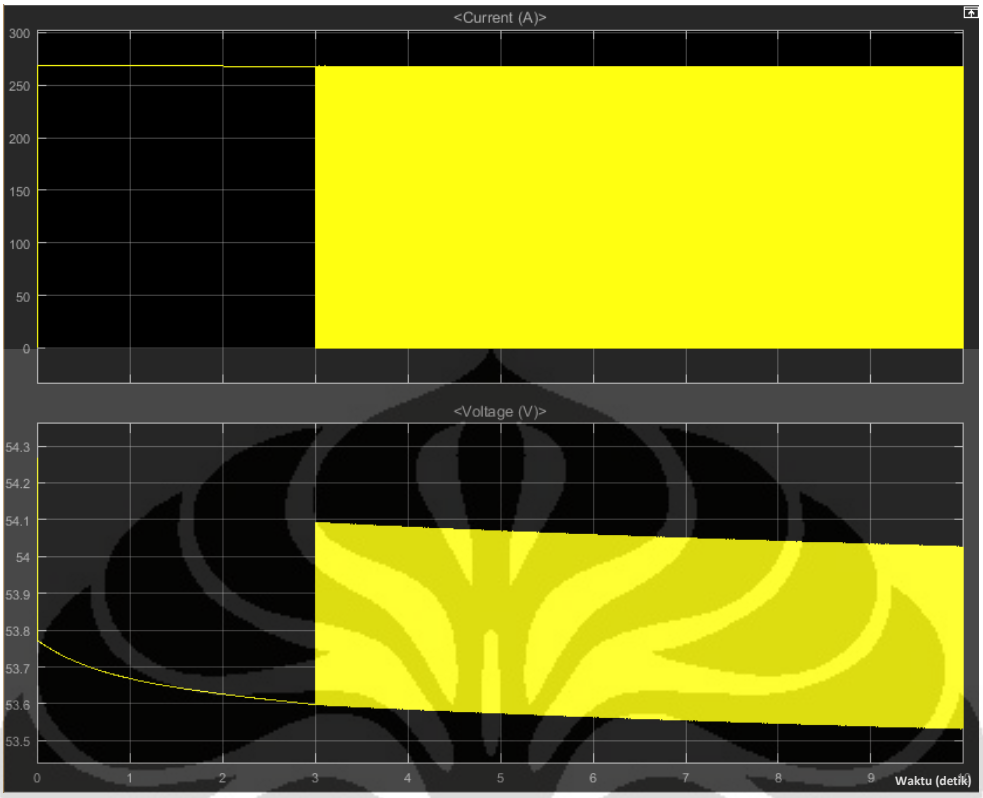
Gambar 4. 2 Grafik pulsa sinyal inverter (a) saklar 1 (b) saklar 2 (c) saklar 3 (d) saklar 4 (e) saklar 5 (f) saklar 6

Grafik menunjukkan masing-masing kondisi saklar S1, S2, S3, S4, S5, dan S6. Kondisi HIGH menunjukkan bahwa saklar tersebut aktif bekerja, sedangkan kondisi LOW menunjukkan bahwa saklar tersebut sedang berada pada kondisi non-aktif. Pada satu fase dengan beda fase sebesar 60^{o} menunjukkan bahwa terdapat dua buah saklar yang aktif pada fase yang sama.

4.1.3 Grafik Arus dan Tegangan Baterai

Tegangan dan arus merupakan parameter yang saya perhatikan dalam metode pembangkitan energi pada pengereman regeneratif. Pada simulasi pengereman regeneratif, tegangan dan arus secara spesifik saya ambil dari segi baterai. Hal tersebut tidak lain untuk menunjukkan bahwa motor dapat diubah menjadi generator pada pengoperasian pengereman regeneratif dan mengisi baterai selama rentang waktu tersebut. Pada grafik hasil simulasi (gambar 4.3) saya memperoleh informasi bahwa grafik menurun secara eksponensial selama rentang waktu 10 detik.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



Gambar 4. 3 Grafik hasil simulasi arus dan tegangan baterai Litium Ion

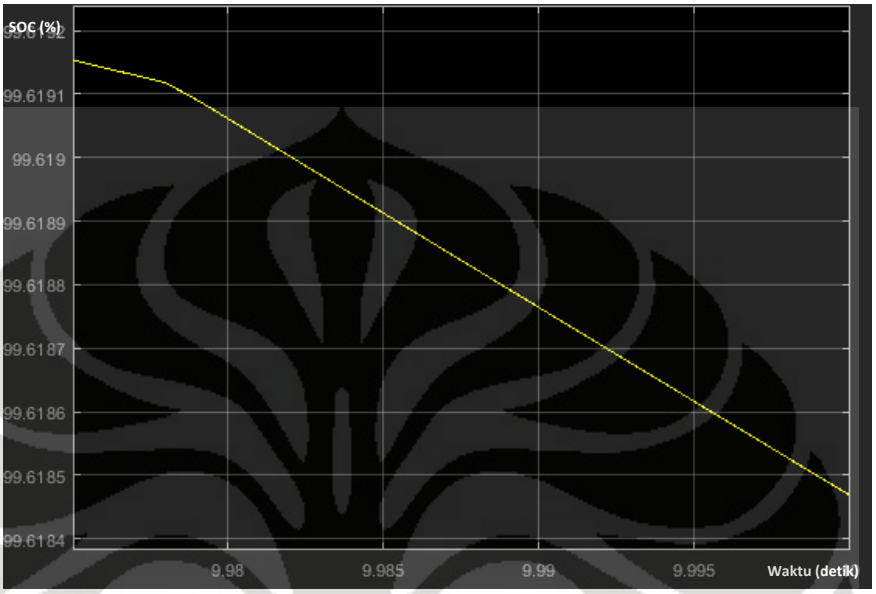
Pencapaian nilai arus yang sangat tinggi karena baterai dengan kapasitas 10Ah harus bekerja pada waktu simulasi 10 detik. Dengan waktu simulasi yang singkat maka perlu ditarik arus berukuran sangat besar untuk dapat menghabiskan 10Ah hanya dalam waktu 10 detik. Nilai arus dan tegangan berbanding terbalik. Selama arus mencapai posisi tertinggi maka tegangan akan turun. Kemudian pada detik ke-3, terjadi nilai arus dan tegangan yang berfluktuasi. Hal tersebut dikarenakan motor mulai bekerja dengan nilai masukan berupa kecepatan rotasi sebesar 58 rad per detik. Terjadi nilai fluktuasi yang sangat tinggi disebabkan oleh adanya proses pengsaklaran pada rangkaian pembalik. Hal tersebut mempengaruhi kondisi peluahan baterai.

4.1.4 Grafik State of Charge (SoC)

Setiap baterai memiliki Kondisi Pengisian (*State of Charge* atau SoC) yang berbeda-beda satu sama lain. Baterai yang digunakan dalam penelitian ini ialah baterai Litium-Ion. Baterai Litium-Ion memiliki nilai SoC yang cukup baik. Pada kenyataannya, pengukuran SoC cukup sulit dilakukan karena diperlakukan alat uji khusus sehingga hal tersebut masuk ke dalam batasan pengujian saya. Saya melakukan karakteristik baterai SoC menggunakan pengujian secara simulasi yaitu dengan menggunakan simulasi

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

SIMULINK. Nilai SoC ditampilkan dalam bentuk persentase yang menunjukkan kondisi batasan penggunaan baterai. Grafik di bawah ini menunjukkan bahwa nilai SoC menurun secara linear. Hal tersebut menunjukkan bahwa baterai memiliki proses pelepasan yang baik.

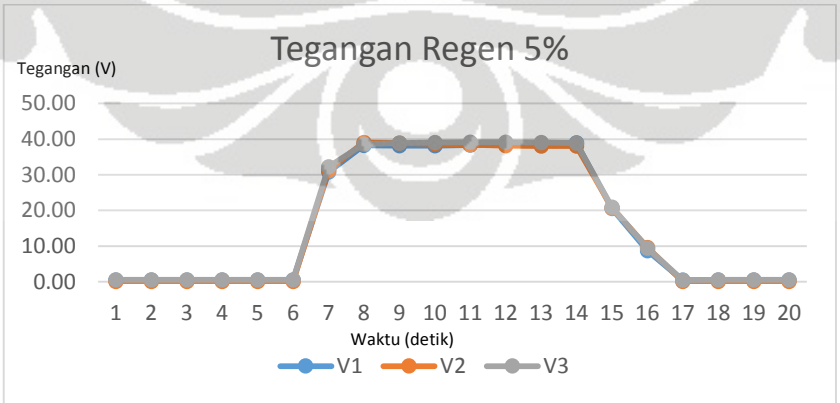


Gambar 4. 4 Grafik hasil simulasi SOC Litium Ion

4.2 Pengujian Pengereman Regeneratif pada KARLING

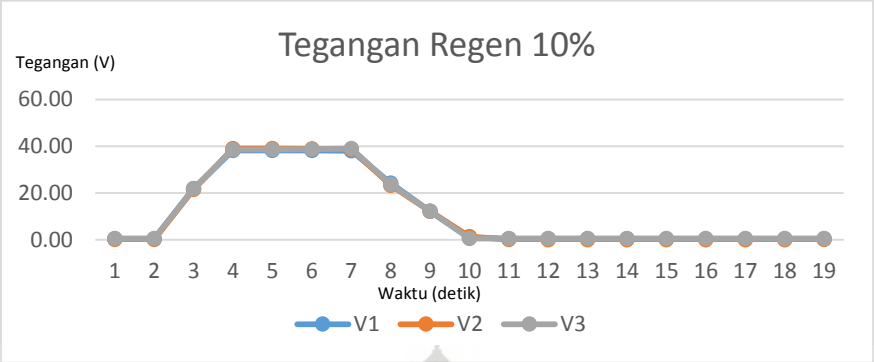
4.2.1 Pengukuran Tegangan Fasa

Peneliti melakukan pengujian tegangan fasa dengan menggunakan Alat Analisis Kualitas Daya (*Power Quality Analyzer* atau PQA). Berdasarkan hasil pengujian tanpa beban diperoleh grafik tegangan fasa seperti pada gambar 4.5 hingga gambar 4.8.

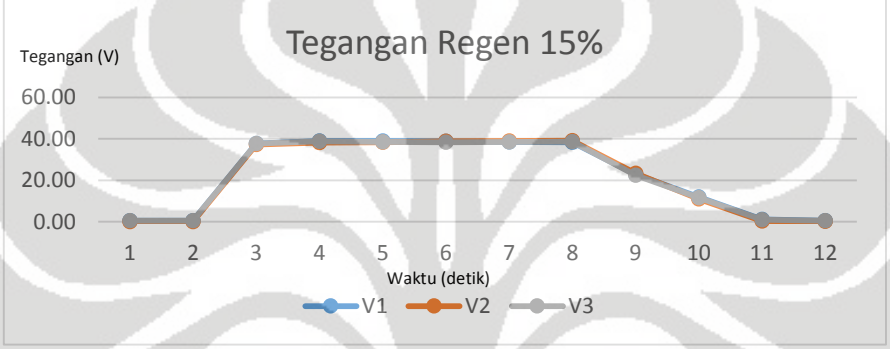


Gambar 4. 5 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 5%

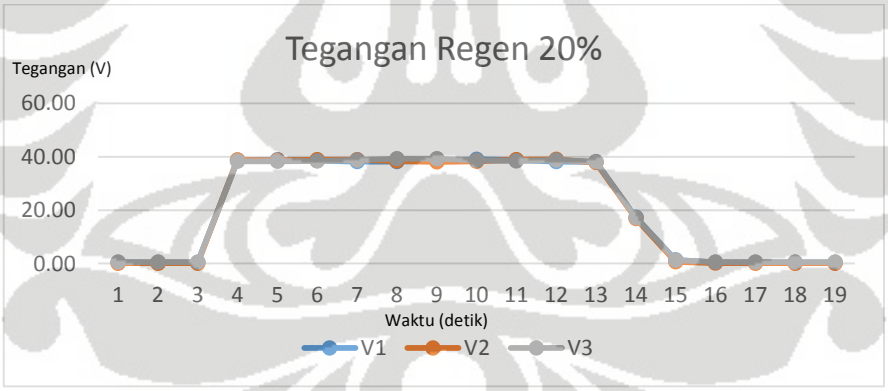
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



Gambar 4. 6 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 10%



Gambar 4. 7 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 15%



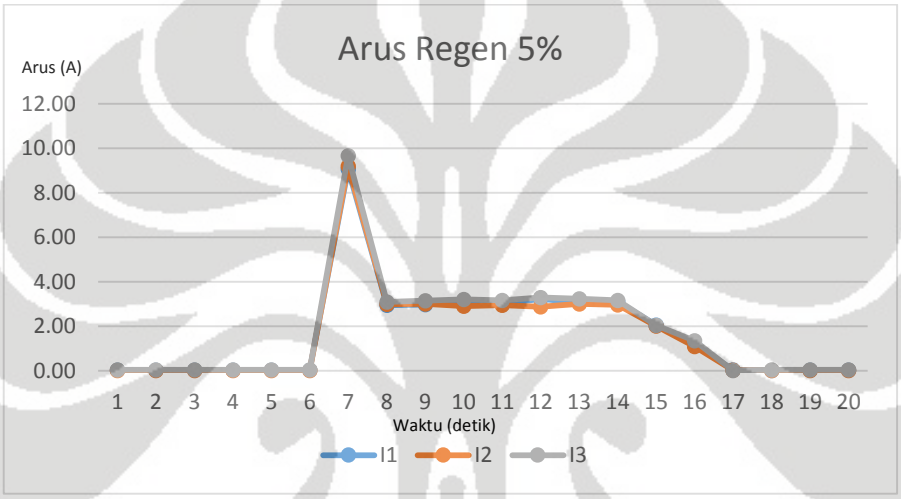
Gambar 4. 8 Grafik tegangan fasa pengereman regeneratif 15%

Saya melakukan pengujian dengan melakukan pengaturan persentase pengereman regeneratif yang bervariasi dari 5%, 10%, 15%, dan 20%. Pada grafik ditunjukkan bahwa untuk melakukan pengereman dibutuhkan waktu yang tetap yaitu selama tiga detik. Selama pengereman terjadi, grafik menunjukkan bahwa adanya penurunan tegangan fasa. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya penurunan kinerja motor selama pengereman berlangsung.

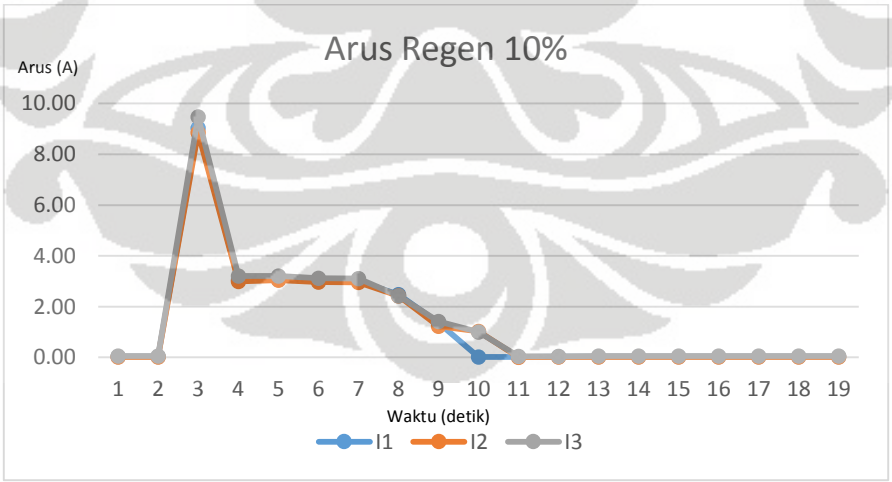
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

4.2.2 Pengukuran Arus Fasa

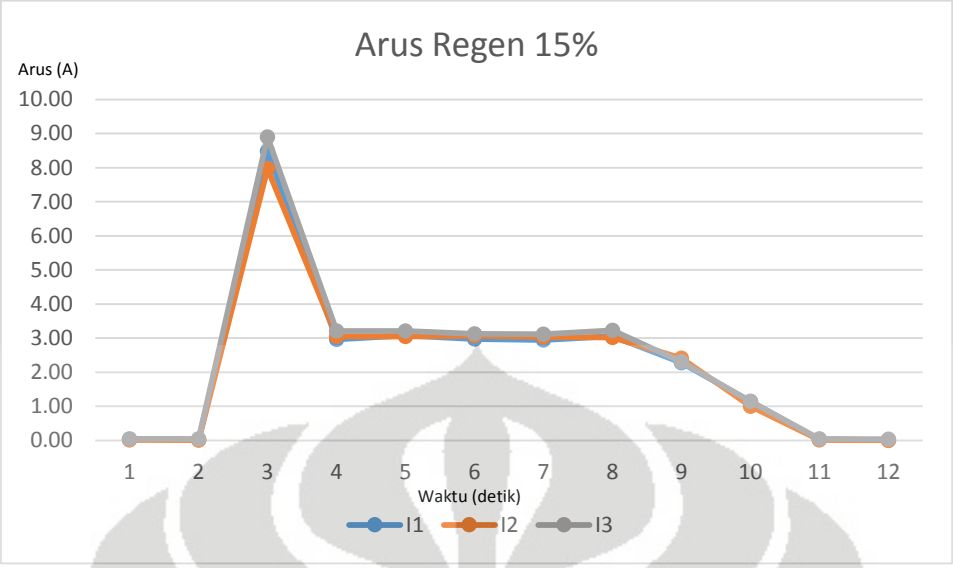
Saya melakukan pengujian arus fasa bersamaan dengan pengujian tegangan fasa dengan alat ukur yang sama. Grafik tegangan fasa menunjukkan adanya penurunan tegangan selama proses pengereman regeneratif. Begitupula pada grafik arus fasa pun mengalami penurunan selama proses pengereman regeneratif. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengereman regeneratif melakukan pengereman secara elektris sehingga menurunkan performa kerja motor. Grafik berikut menunjukkan penurunan performa motor ditandai dengan penurunan nilai arus pada rentang waktu tiga detik.



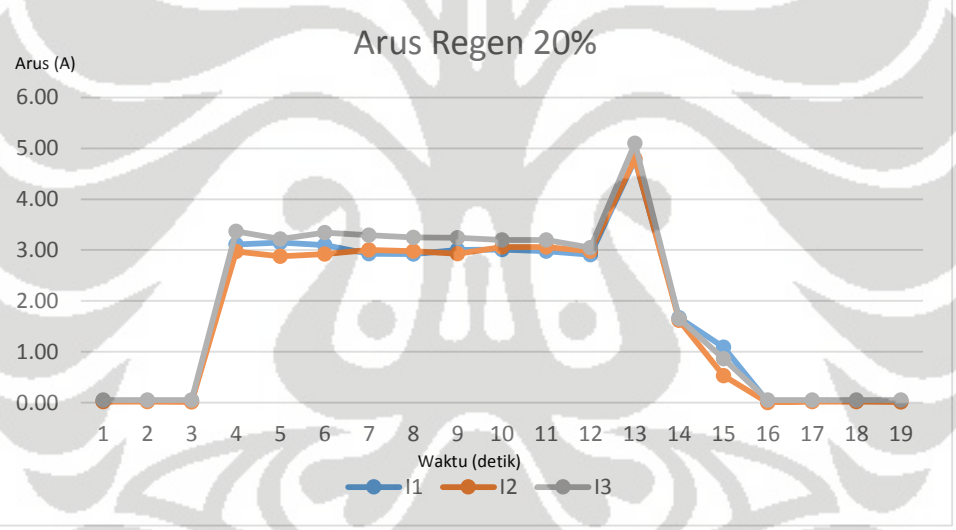
Gambar 4. 9 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 5%



Gambar 4. 10 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 10%



Gambar 4. 11 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 15%



Gambar 4. 12 Grafik arus fasa pengereman regeneratif 20%

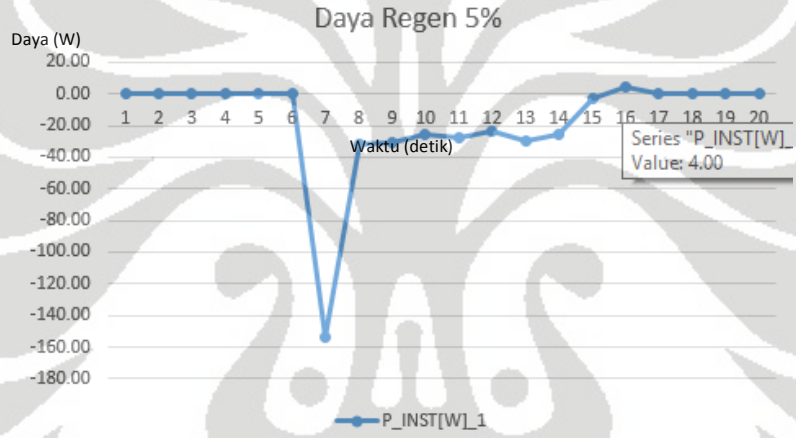
Grafik menunjukkan bahwa persentase pengaturan pengereman regeneratif pada kontroler berpengaruh pada lonjakan arus yang terjadi pada fase pengasutan. Kemudian selama proses pengereman regeneratif tidak terlalu mempengaruhi nilai arus maupun tegangan pada masing-masing fasa. Sehingga dapat diasumsikan bahwa persentase pengereman regeneratif tidak mempengaruhi dari segi motor pada saat kondisi tanpa beban.

4.2.3 Pengukuran Daya Motor BLDC

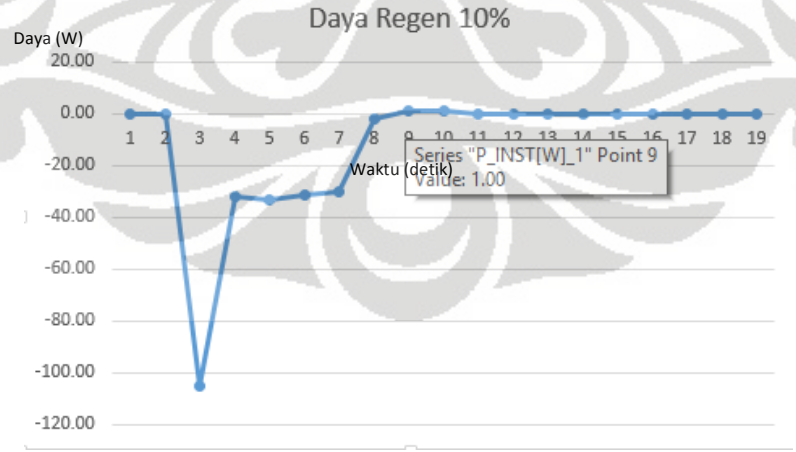
Pada pengereman regeneratif, motor berfungsi sebagai alternator. Motor dapat menjadi motor penggerak sebagaimana untuk menggerakan KARLING maupun menjadi

generator selama proses pengereman regeneratif. Ketika menjadi generator maka motor akan menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan untuk mengisi baterai. Sehingga baterai akan kembali terisi dan dapat memperpanjang waktu penggunaan baterai tersebut. Karena sebagaimana kita ketahui bahwa baterai memiliki kapasitas yang terbatas dikarenakan membuat baterai berkapasitas besar dapat membutuhkan wadah yang besar serta kerangka kendaraan yang kuat sebagai konsekuensi dari dimensi dan massa baterai tersebut.

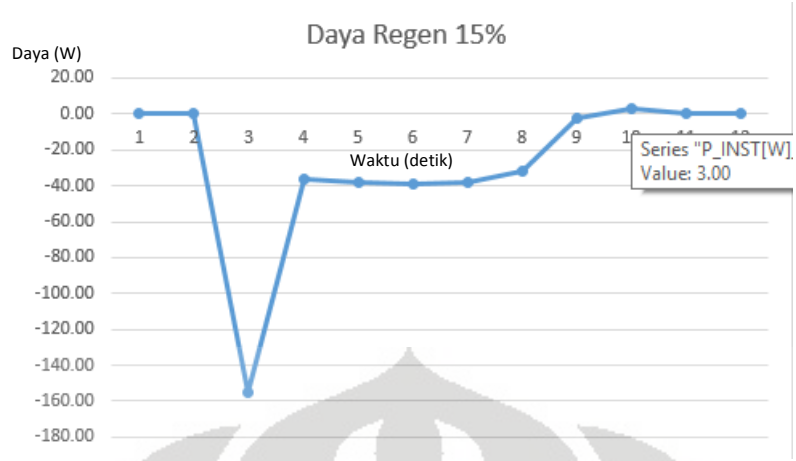
Grafik berikut menunjukkan fenomena yang terjadi selama pengereman regeneratif, yaitu nilai daya atau energi per detik yang terukur bernilai positif. Hal tersebut menunjukkan adanya aliran daya yang berlawanan dari baterai ke motor menjadi dari motor ke baterai selama proses pengereman regeneratif.



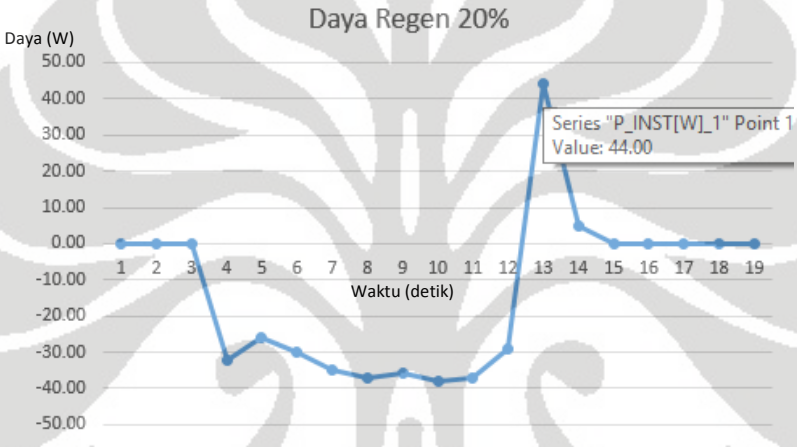
Gambar 4. 13 Grafik daya pengereman regeneratif 5%



Gambar 4. 14 Grafik daya pengereman regeneratif 10%



Gambar 4. 15 Grafik daya pengereman regeneratif 15%



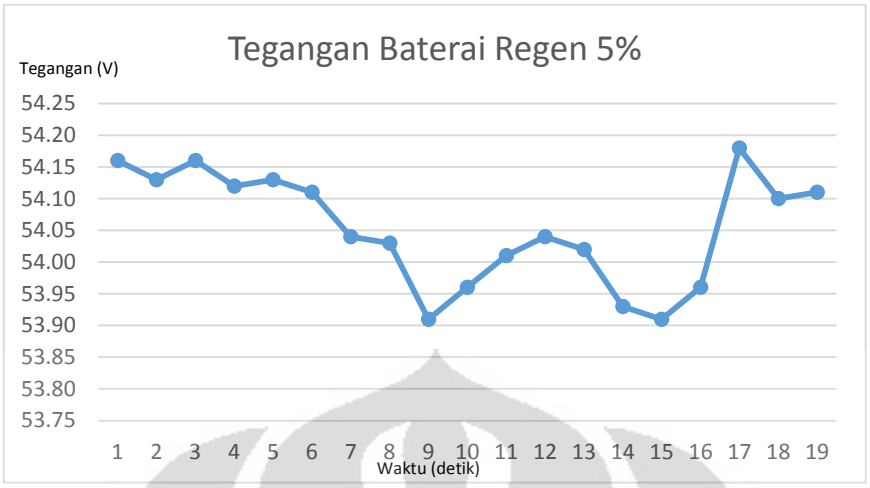
Gambar 4. 16 Grafik daya pengereman regeneratif 20%

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan oleh grafik diatas menunjukkan bahwa pengaturan nilai persentase pengereman regeneratif berpengaruh pada nilai daya yang dihasilkan selama proses regeneratif berlangsung. Semakin tinggi nilai persentase yang digunakan maka nilai daya yang dihasilkan selama proses pengereman regeneratif akan semakin besar.

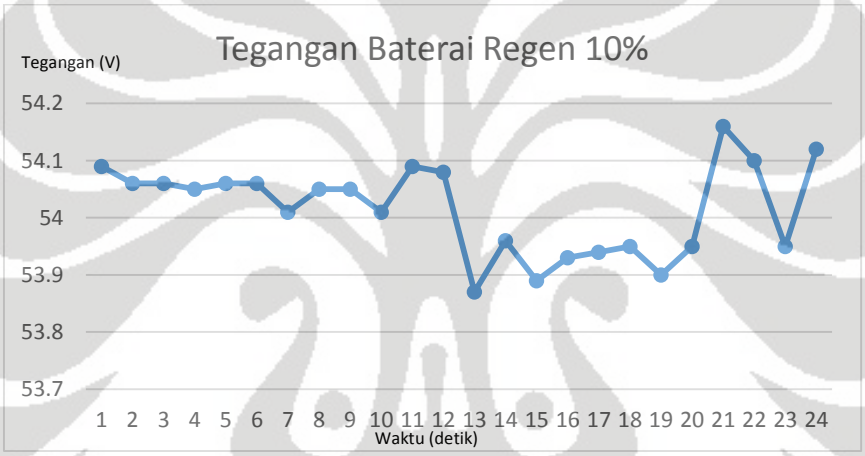
4.2.4 Pengukuran Tegangan Baterai

Setelah dilakukan pengukuran dari sisi motor maka selanjutnya dilakukan pengukuran dari sisi sumber dan dalam kasus ini ialah baterai. Selama pengereman regeneratif terjadi pengisian baterai. Hal tersebut terjadi karena motor berfungsi sebagai generator yang dapat menghasilkan energi. Berikut adalah grafik pengukuran tegangan menggunakan AccuEnergy Acudc 24.0.

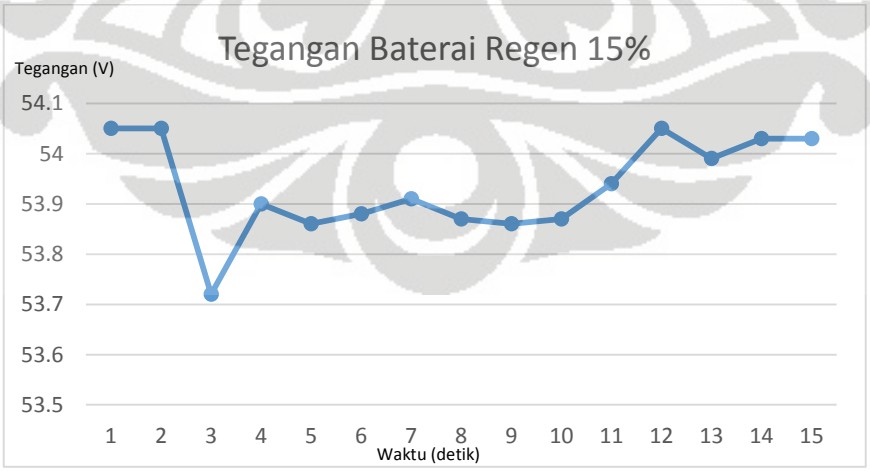
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



Gambar 4. 17 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 5%

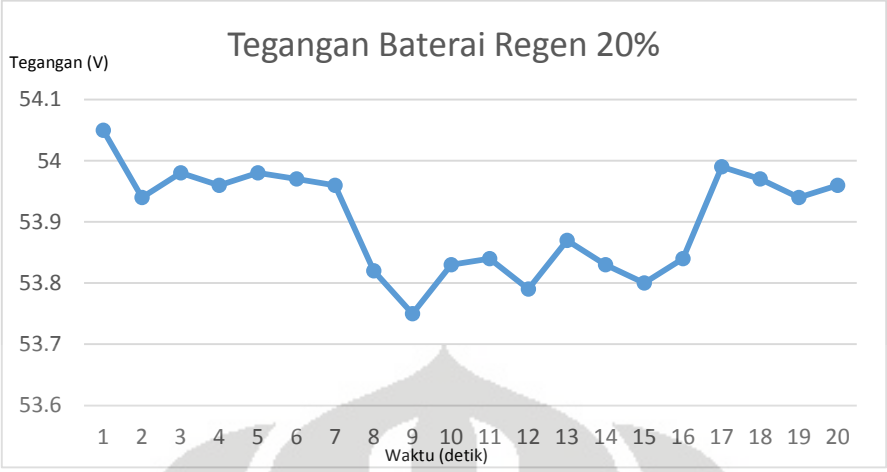


Gambar 4. 18 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 10%



Gambar 4. 19 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 15%

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



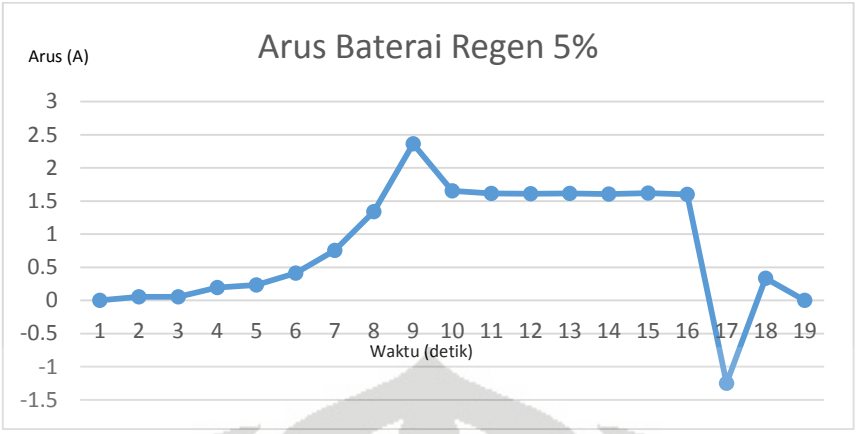
Gambar 4. 20 Grafik tegangan baterai pengereman regeneratif 20%

Berdasarkan informasi yang diperoleh dari grafik tersebut, diketahui bahwa pengereman regeneratif mempengaruhi kondisi tegangan dari baterai. Baterai yang semula terpakai sehingga mengalami penurunan tegangan kemudian setelah pengereman regeneratif tegangan baterai kembali menjadi seperti kondisi awal. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya pengisian kembali baterai akibat dari pengereman regeneratif.

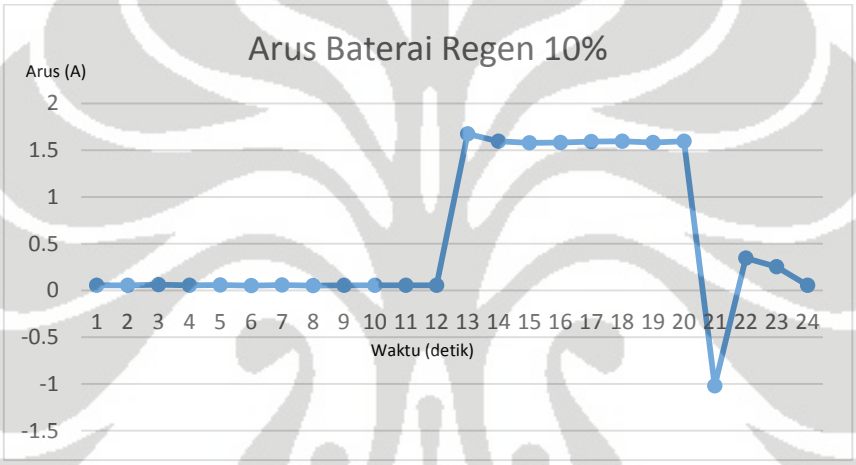
4.2.5 Pengukuran Arus Baterai

Selama pengereman regeneratif akan terjadi aliran arus yang arahnya berlawanan sehingga akan terbaca oleh alat ukur menjadi bernilai negatif. Dengan menggunakan alat ukur yang sama dengan pengukuran tegangan saya dapat memperoleh data tersebut. Pada pengasutan nilai arus yang mengalir dari baterai ke beban dalam hal ini motor menjadi sangat tinggi kemudian menurun secara signifikan hingga mencapai nilai negatif pada saat pengereman regeneratif. Hal tersebut dapat dilihat dari grafik berikut.

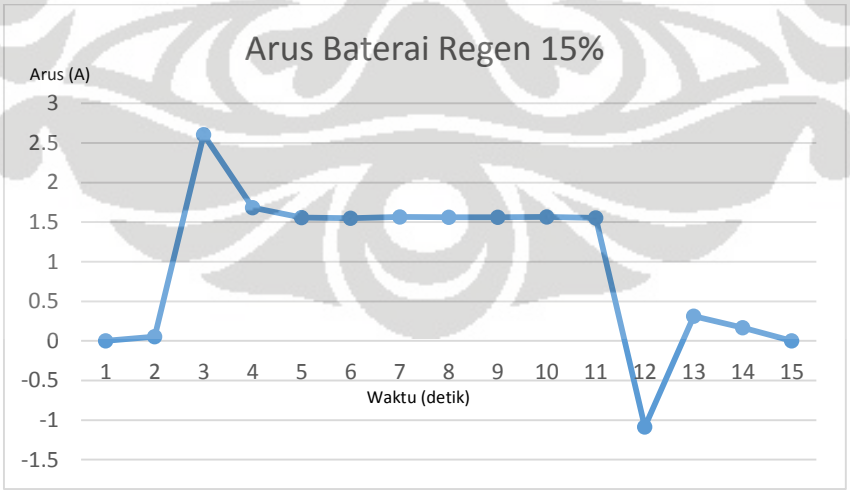
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



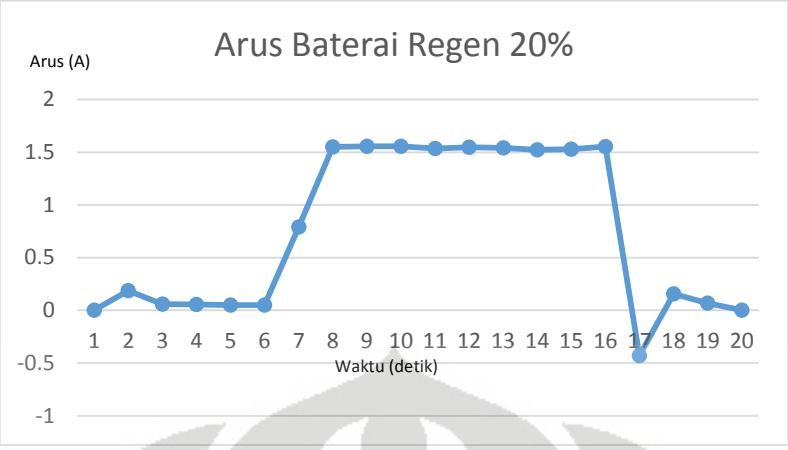
Gambar 4. 21 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 5%



Gambar 4. 22 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 10%



Gambar 4. 23 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 15%



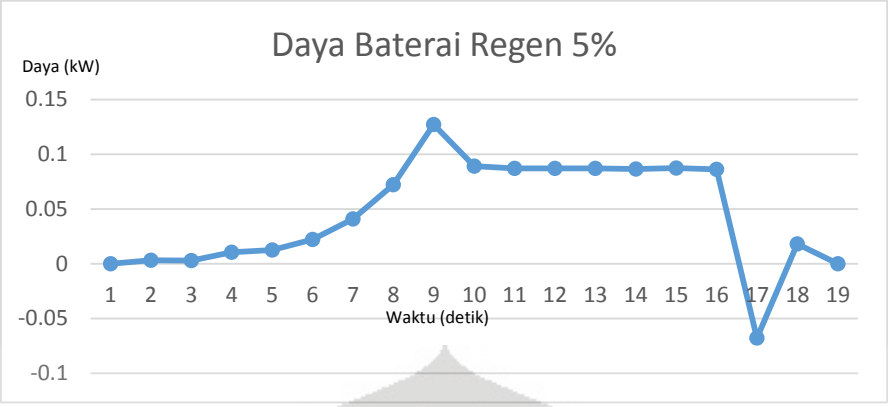
Gambar 4. 24 Grafik arus baterai pengereman regeneratif 20%

Variasi nilai persentase pengereman regeneratif mempengaruhi nilai arus yang terbaca oleh alat ukur dari motor ke baterai. Semestinya nilai arus akan semakin besar nilainya secara negatif seiring dengan semakin besar nilai persentase pengereman regeneratif yang diterapkan. Namun hal tersebut tidak sesuai dengan grafik pengukuran. Hal tersebut dikarenakan alat ukur hanya dapat membaca arus dengan waktu pendataan yang besar yaitu minimal 1 detik. Sedangkan proses pengereman regeneratif berlangsung sangat cepat dengan nilai fluktuasi arus yang berlangsung dalam waktu yang sangat singkat. Sehingga diperlukan alat ukur yang dapat mengukur dengan waktu pendataan yang sangat kecil hingga milidetik.

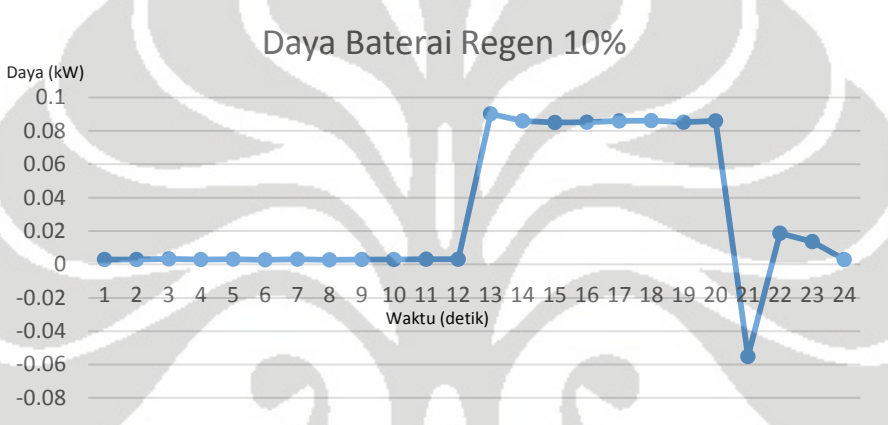
4.2.6 Pengukuran Daya Baterai

Berbanding terbalik dengan data hasil pengukuran daya dari sisi motor, pada pengukuran daya dari sisi baterai memiliki nilai negatif. Hal tersebut dikarenakan aliran daya berlawanan arahnya dan sebagai konsekuensi dari nilai arus yang negatif. Selama pengereman regeneratif, motor menyuplai baterai sehingga aliran daya atau energi per detik mengalir dari motor menuju baterai. Grafik berikut menunjukkan bahwa terbaca daya bernilai negatif selama pengereman regeneratif.

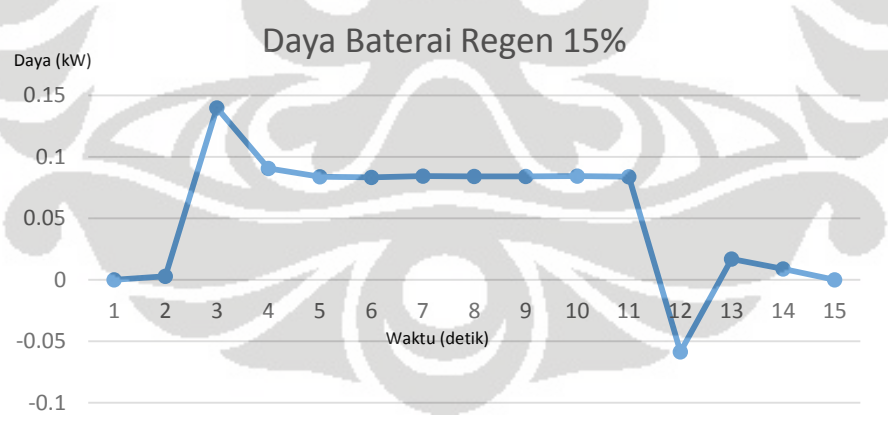
Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018



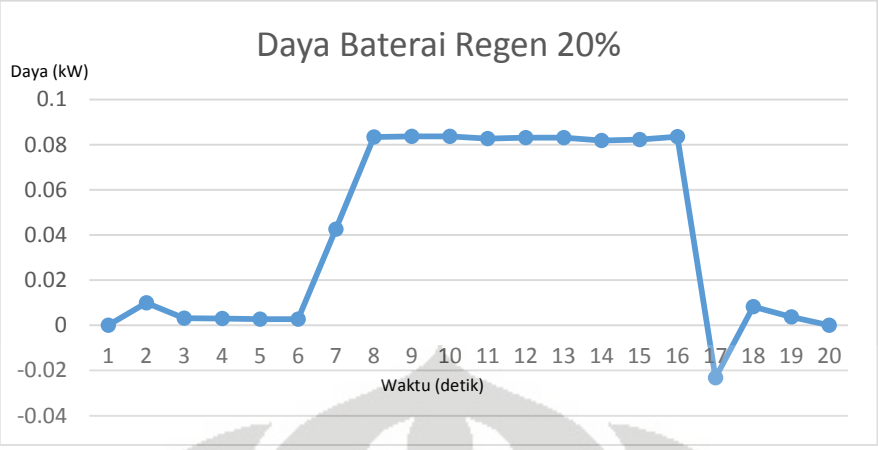
Gambar 4. 25 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 5%



Gambar 4. 26 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 10%



Gambar 4. 27 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 15%



Gambar 4. 28 Grafik daya baterai pengereman regeneratif 20%

Nilai grafik dalam kilowatt sehingga daya terbesar yang dihasilkan dari pengereman regeneratif sebesar 55 Watt yaitu pada nilai persentase pengereman regeneratif sebesar 10%. Secara teori semakin besar nilai persentase pengereman regeneratif seharusnya berbanding lurus dengan nilai energi yang dihasilkan. Namun hal tersebut tidak berhasil ditunjukkan oleh data hasil pengukuran. Karena alat ukur yang digunakan memiliki keterbatasan dalam waktu pendataan. Selain itu terdapat selisih dari nilai pengukuran daya dari sisi motor dan dari sisi baterai karena adanya rugi-rugi pada rangkaian. Namun nilai tersebut tidak begitu besar. Sehingga nilai pembangkitan energi yang dapat diperoleh selama pengereman regeneratif mencapai 60,109%.

4.3 Analisis Konversi Energi Pengereman Regeneratif

Konsep pengereman regeneratif pada kendaraan listrik sebenarnya berangkat dari upaya memanfaatkan energi yang terbuang pada saat pengereman secara mekanis. Pengereman secara mekanis atau disebut juga pengereman konvensional memanfaatkan gaya gesek untuk menghentikan laju kendaraan. Sebagai konsekuensinya energi panas justru dihasilkan selama pengereman. Oleh karena untuk memanfaatkan energi tersebut tidak terbuang secara sia-sia dikembangkanlah konsep pengereman regeneratif yaitu upaya pengereman secara elektrikal. Pengereman secara elektrikal memungkinkan dilakukan pengereman dengan suatu metode pengkodean sehingga dapat membalik aliran energi dari motor. Motor yang semula bekerja sebagai motor penggerak dimanfaatkan menjadi generator untuk menghasilkan listrik. Sebagai konsekuensinya motor tersebut akan mengalami perlambatan akibat dari timbulnya torsi mekanik yang lebih besar dari pada nilai *back*-EMF. Sehingga selama pengereman regeneratif berlangsung motor dapat

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

bertindak sebagai generator dan menghasilkan energi listrik yang berasal dari energi mekanik dari perputaran motor.

4.3.1 Analisis Kemampuan Konversi Pengereman Regeneratif terhadap Tegangan Baterai

Pengujian pengereman regeneratif berhasil memperoleh data yang menunjukkan bahwa terjadi konversi energi mekanik menjadi elektrik. Kemudian peneliti menguji apakah adanya perubahan pada kapasitas baterai yang ditunjukkan dengan mengukur tegangan baterai sebelum dan sesudah pengereman regeneratif.

4.3.1.1 Beban Nol

Pengujian beban nol memiliki waktu pengereman regeneratif lebih singkat dibandingkan dengan pengujian beban penuh. Namun daya total yang dihasilkan lebih sedikit. Sehingga peningkatan kapasitas baterai jika dibandingkan dengan kondisi awal tidak begitu signifikan. Tabel di bawah ini hasilnya mengacu pada Lampiran 1.

Tabel 4. 1 Kondisi baterai sebelum dan sesudah pengereman regeneratif beban nol

	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (kiloWatt)
Sebelum	53,96	1,6	0,08633
Sesudah	54,18	-1,251	-0,0678

$$\Delta V_{\%} = \frac{V_{sesudah} - V_{sebelum}}{V_{sebelum}} x100\% \quad (4-1)$$

$$\Delta V_{\%} = \frac{54,18-53,96}{53,96} x100\% = 0,407\% \quad (4-2)$$

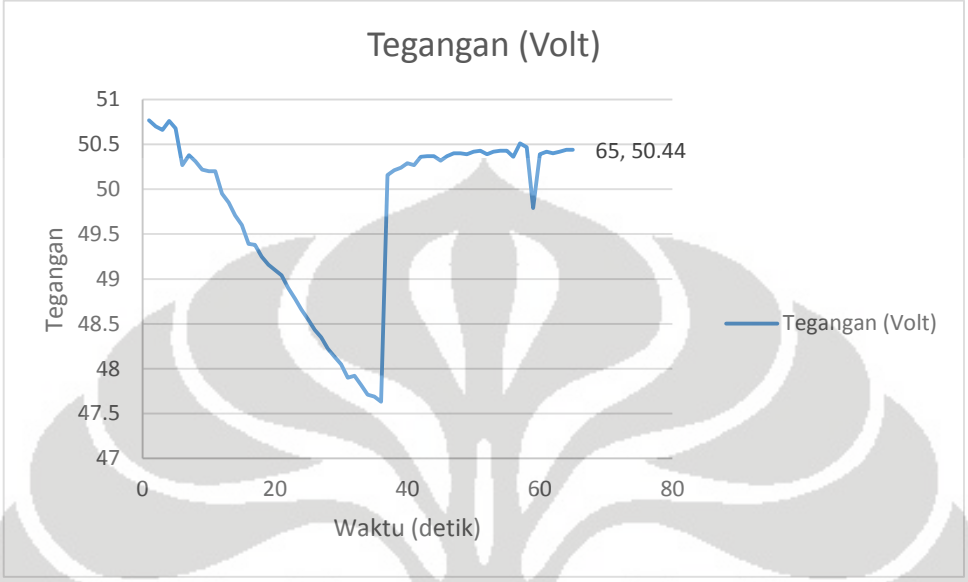
Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 4 – 2, diperoleh nilai peningkatan kapasitas tegangan baterai sebesar 0,407%.

4.3.1.2 Beban Penuh

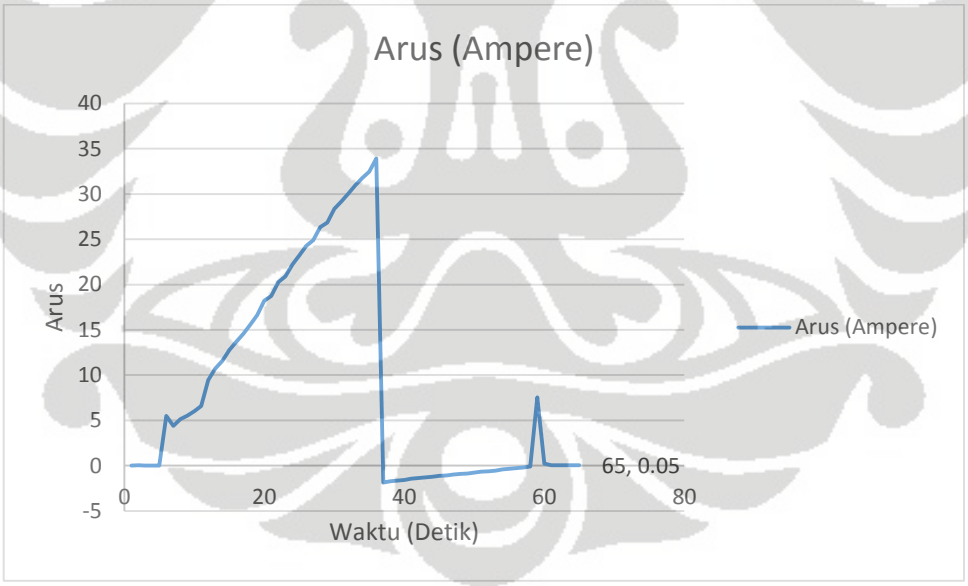
Pengujian beban penuh memiliki waktu pengereman regeneratif yang lebih lama yaitu sekitar 21 detik. Hal tersebut terjadi dikarenakan dibutuhkan total daya yang lebih besar untuk menghentikan kendaraan dengan beban massa yang jauh lebih besar. Sesuai dengan prinsip hukum Newton yaitu benda bermassa lebih besar membutuhkan gaya yang lebih besar untuk merubah kondisi awalnya. Selanjutnya apabila gaya total untuk menghentikan kendaraan dikalikan dengan jarak tempuh kendaraan selama 21 detik tersebut akan menghasilkan nilai energi yang lebih besar. Selanjutnya apabila

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

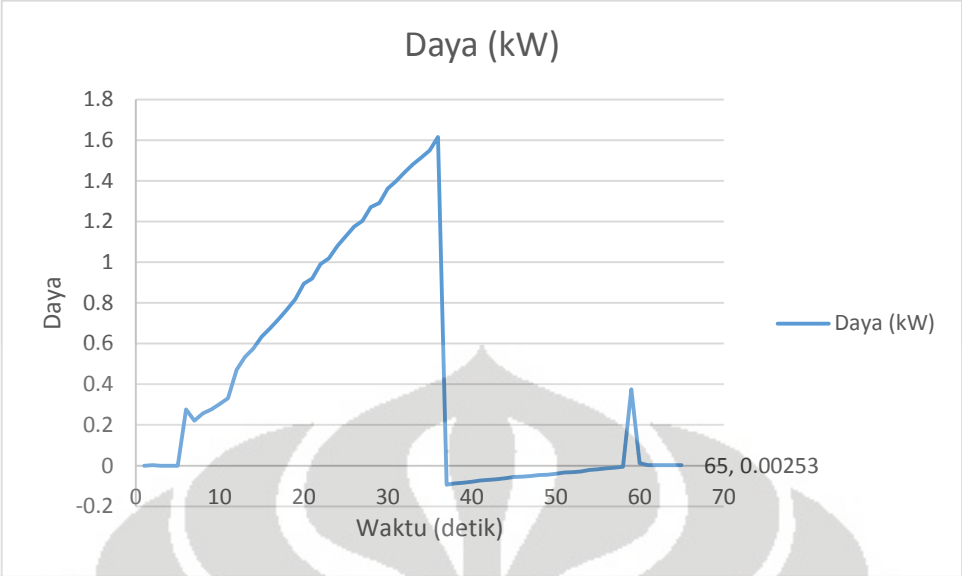
dikonversikan kedalam energi litrik menghasilkan nilai peningkatan kapasitas tegangan baterai yang lebih besar. Grafik pada Gambar 4.29 hingga Gambar 4.31 mengacu pada Lampiran 2.



Gambar 4. 29 Grafik tegangan beban penuh.



Gambar 4. 30 Grafik arus beban penuh



Gambar 4. 31 Grafik daya beban penuh

Berdasarkan data pada lampiran 2, diketahui bahwa selama pengereman regeneratif terjadi peningkatan tegangan baterai. Hal tersebut membuktikan bahwa terjadi pengisian selama proses pengereman regeneratif. Pada lampiran 2 pula ditunjukkan bahwa kondisi arus selama pengereman regeneratif bernilai negatif. Hal tersebut mengindikasikan adanya arus balik dari motor ke baterai. Adanya arus balik tersebut menunjukkan proses pengisian baterai. Daya yang dihasilkan selama proses pengereman regeneratif merupakan hasil perkalian antara nilai arus dan tegangan.

Tabel 4. 2 Kondisi baterai sebelum dan sesudah pengereman regeneratif beban penuh

	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (kiloWatt)
Sebelum	47,63	33,91	1,61521
Sesudah	50,47	-0,107	-0,00538

$$\Delta V_{\%} = \frac{50{,}47 - 47{,}63}{47{,}63} x100\% = 5{,}96\% \qquad (4-3)$$

Berdasarkan perhitungan 4 – 3 diperoleh nilai penambahan tegangan baterai sebesar 5,96%.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penjabaran dalam penulisan skripsi ini dapat diperoleh kesimpulan yang menyatakan bahwa Metode Pengereman Regeneratif dapat dimaanfaatkan pada kendaraan berukuran *ultra-compact* seperti KARLING Namun diperlukan perlakuan tambahan sebagai berikut untuk meningkatkan performanya, diantaranya :

1) Sinyal sensor Hall diperlukan untuk menjadwalkan saklar pada pembalik tiga fasa jembatan penuh.
2) Nilai pembangkitan energi yang dapat diperoleh selama pengereman regeneratif mencapai 60,109%.
3) Waktu pengereman regeneratif tanpa beban lebih cepat dibandingkan ketika beban penuh.
4) Nilai peningkatan kapasitas tegangan baterai selama pengujian tanpa beban sebesar 0,407%.
5) Nilai penambahan tegangan baterai selama pengujian beban penuh sebesar 5,96%.

5.2 Saran dan Rekomendasi

1) Dalam mengurangi galat pada perbandingan data perhitungan dan data percobaan diperlukan simulasi beban secara mekanik yang lebih komprehensif.
2) Simulasi pengereman regeneratif menggunakan SIMULINK perlu dikaji lebih mendalam agar dapat menghasilkan grafik keluaran arus, tegangan, dan SOC yang lebih baik.
3) Rangka mobil perlu didesain berdasarkan prinsip-prinsip aerodinamika sehingga tidak menghasilkan gaya gesek dengan udara yang tinggi yang dapat memperberat kerja motor.
4) Alat ukur yang digunakan seharusnya memiliki waktu pendataan yang sangat kecil sehingga dapat secara presisi melihat perubahan nilai arus, tegangan, dan daya selama proses pengereman regeneratif.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

5) Pengujian di laboratorium membutuhkan alat ukur yang dapat mendeteksi sinyal dan frekuensi sinyal dari kontroler atau setidaknya osiloskop yang memiliki ketahanan arus yang tinggi.
6) Diperlukan tempat pengujian motor yang kuat dikarenakan torsi awal tarikan motor sangat besar.
7) Pengujian sebaiknya dilakukan di medan yang lebih beragam sehingga dapat memperoleh data karakteristik pengisian baterai dengan memanfaatkan pengereman regeneratif.
8) Pengujian rangka perlu dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik dari rangka yang dapat mempengaruhi hasil elektrikal.

Studi performansi ..., Nadya Noorfatima, FT UI, 2018

DAFTAR ACUAN

[1] Khisty, C. J; Lall, B.K. (2005). *Dasar-dasar Rekayasa Transportasi Jilid Ketiga.* Jakarta : Penerbit Erlangga.

[2] Chapman, S. J. (2012). *Electric Machine Fundamentals 5th Ed.* New York: McGraw-Hill.

[3] Gieras, J. F. (2010). *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications.* USA : CRC Press.

[4] Hanselman, D. (2003). *Brushless Permanent Magnet Motor Design Second Edition*. Ohio : Magna Physics Publishing.

[5] Kenjo, T., & Nagamori S. (2003). *Brushless Motor Advance Theory and Modern Applications*. Tokyo: Sogo Electronic Press.

[6] Kenjo, T., & Nagamori S. (1985). *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors.* New York : Oxford University Press Inc.

[7] Miller, T., & Hendershot, J. (1994). *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. New York: Oxford University Press Inc.

[8] Edwards, J. (2004). *Course in Electromagnetics Year 1*. University of Sussex.

[9] Ratcliffe, M.T.; Gamage,K.A. *BLDC Motor Power Control Techniques Appraisal : Novel current control technique*. Energy and Electrical Drives. 2013.

[10] Yoong, M.K., *et al*. *Studies of Regenerative Breaking in Electric Vehicle*. Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. 2010.

[11] Li, Liang., *et al. Analysis of Downshift's Improvement to Energy Efficiency of an Electric Vehicle During Regenerative Braking*. Applied Energy. 2016.

[12] Qiu, Chengqun. ; Wang, Guolin. *New Evaluation Methodology of Regenerative Braking Contribution to Energy Efficiency Improvement of Electric Vehicles*. Energy Conversion and Management. 2016.

[13] M, Akhila.; P, Prof. Ratnan. *Brushless DC Motor Drive with Regenerative Braking using Adaptive Neuro based Fuzzy Inference System*. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques. 2016.

DAFTAR PUSTAKA

Jusuf, S. F. 1997. *Manajemen Proyek Pembuatan Prototipe Kendaraan Angkutan Listrik Kapasitas 6 Penumpang*. Jakarta : Universitas Indonesia.

Ebrahim, E. A. *Ant Colony Optimization Control of Brushless-DC Motor Driving a Hybrid Electric-Bike and Fed from Photovoltaic Generator*. Evolutionary Computation. 2016.

Hatwar, N. *et al*. *Design Approach for Eletric Bikes Using Battery and Super Capacitor for Performance Improvement*. Intelligent Transportation System. 2013.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Hasil Pengujian Menggunakan AcuDC240 Pengereman Regeneratif Beban Nol

Pengereman Regeneratif 5%

Waktu	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Kilowatt)
1:35:21 PM	54.16	0	0
1:35:22 PM	54.13	0.056	0.00303
1:35:23 PM	54.16	0.055	0.00295
1:35:25 PM	54.12	0.195	0.01057
1:35:26 PM	54.13	0.233	0.01262
1:35:27 PM	54.11	0.412	0.02227
1:35:28 PM	54.04	0.754	0.04075
1:35:29 PM	54.03	1.339	0.07233
1:35:30 PM	53.91	2.362	0.12733
1:35:31 PM	53.96	1.654	0.08923
1:35:32 PM	54.01	1.613	0.08711
1:35:33 PM	54.04	1.61	0.08701
1:35:34 PM	54.02	1.613	0.08713
1:35:35 PM	53.93	1.603	0.08643
1:35:36 PM	53.91	1.619	0.08728
1:35:37 PM	53.96	1.6	0.08633
1:35:38 PM	54.18	-1.251	-0.0678
1:35:39 PM	54.10	0.333	0.01802

Pengereman Regeneratif 10%

Waktu	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Kilowatt)
1:48:13 PM	54.09	0.053	0.00287
1:48:14 PM	54.06	0.055	0.00295
1:48:15 PM	54.06	0.062	0.00334
1:48:16 PM	54.05	0.053	0.00287
1:48:17 PM	54.06	0.057	0.00311
1:48:18 PM	54.06	0.052	0.00279
1:48:19 PM	54.01	0.057	0.0031
1:48:20 PM	54.05	0.052	0.00279
1:48:21 PM	54.05	0.053	0.00287
1:48:22 PM	54.01	0.053	0.00287
1:48:23 PM	54.09	0.056	0.00303
1:48:24 PM	54.08	0.056	0.00303
1:48:25 PM	53.87	1.674	0.09017
1:48:26 PM	53.96	1.594	0.08602
1:48:27 PM	53.89	1.578	0.08505
1:48:28 PM	53.93	1.581	0.08526
1:48:29 PM	53.94	1.593	0.08591
1:48:30 PM	53.95	1.597	0.08616
1:48:31 PM	53.9	1.581	0.08522
1:48:32 PM	53.95	1.594	0.086
1:48:33 PM	54.16	-1.019	-0.0552
1:48:34 PM	54.1	0.346	0.01873
1:48:35 PM	53.95	0.252	0.01359
1:48:36 PM	54.12	0.053	0.00287

Pengereman Regeneratif 15%

Waktu	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Kilowatt)
2:05:00 PM	54.05	0	0
2:05:01 PM	54.05	0.053	0.00287
2:05:03 PM	53.72	2.603	0.13981
2:05:04 PM	53.9	1.681	0.09062
2:05:05 PM	53.86	1.556	0.08382
2:05:07 PM	53.88	1.548	0.08339
2:05:09 PM	53.91	1.567	0.08446
2:05:10 PM	53.87	1.561	0.08408
2:05:11 PM	53.86	1.562	0.08414
2:05:12 PM	53.87	1.567	0.08439
2:05:13 PM	53.94	1.554	0.08379
2:05:14 PM	54.05	-1.085	-0.05862
2:05:15 PM	53.99	0.313	0.01689
2:05:16 PM	54.03	0.165	0.00891

Pengereman Regeneratif 20%

Waktu	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Kilowatt)
2:18:25 PM	54.05	0	0
2:18:26 PM	53.94	0.185	0.00999
2:18:27 PM	53.98	0.059	0.00318
2:18:28 PM	53.96	0.057	0.0031
2:18:29 PM	53.98	0.05	0.00271
2:18:30 PM	53.97	0.05	0.00271
2:18:31 PM	53.96	0.79	0.04264
2:18:32 PM	53.82	1.551	0.08346
2:18:33 PM	53.75	1.556	0.08366
2:18:34 PM	53.83	1.555	0.08371
2:18:35 PM	53.84	1.536	0.08271
2:18:36 PM	53.79	1.546	0.08317
2:18:37 PM	53.87	1.542	0.08306
2:18:38 PM	53.83	1.522	0.08191
2:18:39 PM	53.8	1.53	0.08233
2:18:40 PM	53.84	1.552	0.08357
2:18:41 PM	53.99	-0.43	-0.02322
2:18:42 PM	53.97	0.155	0.00835
2:18:43 PM	53.94	0.069	0.00373
2:18:44 PM	53.96	0	0

Lampiran 2 Data Hasil Pengujian Menggunakan AcuDC240 Pengereman Regeneratif Beban Penuh

Waktu	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Kilowatt)
1:07:25 PM	50.77	0	0
1:07:26 PM	50.7	0.05	0.00255
1:07:27 PM	50.66	0	0
1:07:28 PM	50.76	0	0
1:07:29 PM	50.68	0	0
1:07:30 PM	50.27	5.503	0.27663
1:07:31 PM	50.38	4.383	0.22083
1:07:32 PM	50.31	5.13	0.25812
1:07:33 PM	50.22	5.509	0.27667
1:07:34 PM	50.2	6.03	0.30269
1:07:35 PM	50.2	6.592	0.33088
1:07:37 PM	49.95	9.439	0.4715
1:07:38 PM	49.85	10.73	0.53504
1:07:39 PM	49.71	11.56	0.57474
1:07:40 PM	49.6	12.77	0.63314
1:07:41 PM	49.39	13.68	0.67578
1:07:42 PM	49.38	14.58	0.71976
1:07:43 PM	49.25	15.6	0.76822
1:07:44 PM	49.16	16.64	0.81778
1:07:45 PM	49.1	18.22	0.8944
1:07:46 PM	49.04	18.75	0.9194
1:07:47 PM	48.9	20.27	0.99103
1:07:48 PM	48.78	20.89	1.01882
1:07:49 PM	48.66	22.21	1.08094
1:07:50 PM	48.55	23.23	1.12769
1:07:51 PM	48.43	24.28	1.17567
1:07:52 PM	48.35	24.9	1.20367
1:07:53 PM	48.22	26.35	1.27083
1:07:54 PM	48.13	26.83	1.29137
1:07:55 PM	48.05	28.36	1.36255
1:07:56 PM	47.9	29.18	1.39791
1:07:57 PM	47.92	30.06	1.44052
1:07:58 PM	47.82	30.99	1.48201
1:07:59 PM	47.71	31.75	1.51514
1:08:00 PM	47.69	32.48	1.54901
1:08:01 PM	47.63	33.91	1.61521
1:08:02 PM	50.16	-1.864	-0.09349

Waktu	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Kilowatt)
1:08:03 PM	50.21	-1.724	-0.08658
1:08:04 PM	50.24	-1.669	-0.08387
1:08:05 PM	50.29	-1.579	-0.07942
1:08:06 PM	50.27	-1.457	-0.07326
1:08:07 PM	50.36	-1.382	-0.06959
1:08:08 PM	50.37	-1.315	-0.06625
1:08:09 PM	50.37	-1.233	-0.06208
1:08:10 PM	50.32	-1.109	-0.05582
1:08:11 PM	50.37	-1.09	-0.05492
1:08:12 PM	50.4	-0.997	-0.05028
1:08:13 PM	50.4	-0.906	-0.04567
1:08:14 PM	50.39	-0.873	-0.04398
1:08:15 PM	50.42	-0.783	-0.03946
1:08:16 PM	50.43	-0.681	-0.03435
1:08:17 PM	50.39	-0.646	-0.03257
1:08:18 PM	50.42	-0.574	-0.02893
1:08:19 PM	50.43	-0.424	-0.0214
1:08:20 PM	50.43	-0.343	-0.0173
1:08:21 PM	50.36	-0.263	-0.01326
1:08:22 PM	50.51	-0.204	-0.01029
1:08:23 PM	50.47	-0.107	-0.00538
1:08:24 PM	49.79	7.536	0.37525
1:08:25 PM	50.39	0.236	0.01189
1:08:26 PM	50.42	0.052	0.0026
1:08:27 PM	50.4	0.052	0.0026
1:08:28 PM	50.42	0.053	0.00268
1:08:29 PM	50.44	0.06	0.00304
1:08:30 PM	50.44	0.05	0.00253