

TUGAS AKHIR - TF 234801

**RANCANG BANGUN SISTEM *REGENERATIVE BRAKING*
PADA *SCOOTER* LISTRIK FITS BERBASIS *CONSTANT*
*CURRENT CONTROL***

ABIYU NAUFAL RIZQULLAH

NRP. 5009201142

Dosen Pembimbing

Dr. Suyanto, S.T., M.T.

NIP 197111131995121002

Program Studi S1 Teknik Fisika

Departemen Teknik Fisika

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



Tugas Akhir - TF 234801

RANCANG BANGUN SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA SCOOTER LISTRIK FITS BERBASIS *CONSTANT CURRENT CONTROL*

ABIYYU NAUFAL RIZQULLAH
NRP 5009201142

Dosen Pembimbing

Dr. Suyanto, S.T., M.T.

NIP 197111131995121002

Program Studi S1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 234801

***DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON FITS
ELECTRIC SCOOTER BASED ON CONSTANT CURRENT
CONTROL***

ABIYU NAUFAL RIZQULLAH
NRP 5009201142

Advisor

Dr. Suyanto, S.T, M.T
NIP 197111131995121002

Study Program Bachelor of Engineering Physics
Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama Mahasiswa / NRP : Abiyyu Naufal Rizqullah / 5009201142

Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika

Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Suyanto, S.T., M.T. / 197111131995121002

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**RANCANG BANGUN SISTEM REGENERATIVE BRAKING PADA SCOOTER LISTRIK FITS BERBASIS CONSTANT CURRENT CONTROL**” adalah hasil karya saya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 22 Juli 2024

Mahasiswa,

A handwritten signature in black ink is written over a yellow 1000 Rupiah meter stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'METERAI TEMPEL' and the serial number '91E67ALX278119719'.

(Abiyyu Naufal Rizqullah)

NRP. 5009201142

Halaman ini sengaja dikosongkan

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Abiyyu Naufal Rizqullah / 5009201142

Department : Engineering Physics

Advisor / NIP : Dr. Suyanto, S.T., M.T. / 197111131995121002

hereby declare that the Final Project with the title of ‘DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON FITS ELECTRIC SCOOTER BASED ON CONSTANT CURRENT CONTROL’ is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 22nd of July, 2024

Student



(Abiyyu Naufal Rizqullah)

NRP. 5009201142

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**RANCANG BANGUN SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA *SCOOTER*
LISTRIK FITS BERBASIS *CONSTANT CURRENT CONTROL***

Oleh:

Abiyyu Naufal Rizqullah

NRP. 5009201142

Surabaya,
Mengetahui,
Pembimbing

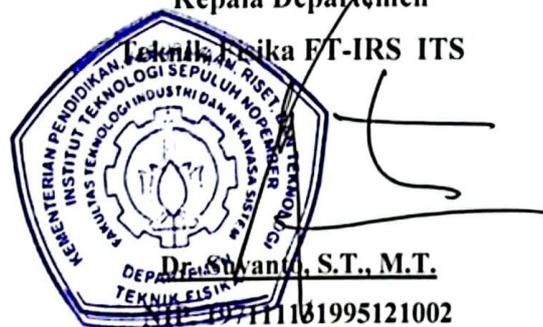
Dr. Suwanto, S.T., M.T.

NIP. 197111131995121002

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FT-IRS ITS



Dr. Suwanto, S.T., M.T.

NIP. 197111131995121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA *SCOOTER* LISTRIK FITS BERBASIS *CONSTANT CURRENT CONTROL*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Sarjana Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **Abiyyu Naufal Rizqullah**

NRP. 5009201142

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T.	Pembimbing	()
2. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc.	Ketua Penguji	()
3. Prof. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.	Penguji	()
4. Andi Rahmadiansah, S.T. M.T.	Penguji	()

SURABAYA

Juli, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON FITS ELECTRIC SCOOTER BASED ON CONSTANT CURRENT CONTROL

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Engineering Physics
Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By:

ABIYYU NAUFAL RIZQULLAH

NRP. 5009201142

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T.	Advisor	()
2. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc.	Chief Examiner	()
3. Prof. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.	Examiner	()
4. Andi Rahmadiansah, S.T. M.T.	Examiner	()

SURABAYA

July, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN SISTEM *REGENERATIVE BRAKING* PADA *SCOOTER* LISTRIK FITS BERBASIS *CONSTANT CURRENT CONTROL*

Nama Mahasiswa / NRP : **Abiyyu Naufal Rizqullah / 5009201142**
Departemen : **Teknik Fisika FTIRS – ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Suyanto, S.T, M.T.**

Abstrak

Dikembangkannya Hybrid Electrical Energy Storage System (HESS) dengan superkapasitor, menawarkan karakteristik *power density* yang besar dan *cycle life* lebih besar daripada baterai. Karakteristik tersebut dibutuhkan untuk konversi energi ketika proses pengereman pada kendaraan listrik berlangsung agar energi dapat dipanen dengan cepat dan dalam jumlah yang besar untuk meningkatkan *range*. Pada penelitian ini dikembangkan sistem *regenerative braking* dengan menggunakan kendali *constant current* yang menentukan besar *duty cycle* pada *scooter* listrik FITS dengan propulsi motor *Brushless Direct Current* (BLDC). Sistem dikembangkan dengan merancang *hardware Power Converter* berbasis kendali *constant current* melalui proses simulasi dan pengujian. Model kendali *constant current* dikembangkan untuk dapat menjaga arus pengisian sesuai dengan besar arus target. Besar arus dapat dijaga dengan menentukan besar *duty cycle* dari *converter* berdasarkan hasil pembacaan *Back Electromotive Force* (BEMF) dan tegangan supercapacitor. Sistem telah mampu menjaga besar arus sesuai dengan setpoint ketika proses pengereman berlangsung. Hasil simulasi dan pengujian cukup identik, dimana berdasarkan perubahan besar energi, tegangan, dan *State of Charge* (SOC) dari superkapasitor, sistem *regenerative braking* dengan kendali *constant current* target arus 30A memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan target arus 20A, dimana dengan penggunaan setting arus 20A nilai energi, tegangan dan SOC superkapasitor berturut-turut adalah sebesar 150,39 Joule; 51,6 V; dan 76,7%. Sedangkan untuk penggunaan *setting* arus target 30A, nilai energi, tegangan dan SOC superkapasitor berturut-turut adalah sebesar 260,83 Joule; 52,6 V; dan 78%.

Kata Kunci: *Constant current, duty cycle, regenerative braking, superkapasitor*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON FITS ELECTRIC SCOOTER BASED ON CONSTANT CURRENT CONTROL

Student Name /NRP : **Abiyyu Naufal Rizqullah / 5009201142**
Department : **Engineering Physics INDSYS - ITS**
Advisor : **Dr. Suyanto, S.T, M.T.**

Abstract

The development of a Hybrid Electrical Energy Storage System (HESS) using supercapacitor, offers larger power density and greater cycle life than batteries. These characteristics are needed for energy conversion when electric vehicle posses braking process to harvest energy quickly in large quantities to increase vehicle range. In this research, regenerative braking system was developed using constant current control which controlled the duty cycle of FITS electric scooter with Brushless Direct Current (BLDC) motor propulsion. The system was developed by designing Power Converter hardware based on constant current control through simulation and testing process. Constant current control model was developed to maintain the charging current based on targeted current in setpoint. The current can be maintained by determining the duty cycle of the converter based on the Back Electromotive Force (BEMF) values and supercapacitor voltage. The system has been able to maintain current level according to the setpoint during the braking process. The simulation and test results are quite identical. The system using targeted current of 30A has better performance compared to the system while using targeted current of 20A, with the energy, voltage, and *State of Charge* (SOC) changes of the supercapacitor, respectively are 150,9 Joule; 51,6 V; dan 76,7%. While using targeted current of 30A, the values of energy, voltage, and SOC changes of the supercapasitor are 262 Joule; 52,5 V; dan 78%.

Keywords: *Constant current, duty cycle, regenerative braking, supercapasitor*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih Lagi Maha Penyayang, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT. Atas rahmat dan hidayahnya sehingga laporan tugas akhir ini yang berjudul “Rancang Bangun Sistem *Regenerative Braking* pada *Scooter* Listrik FITS Berbasis *Constant Current Control*” dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan ini, penulis banyak dibantu oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala departemen Teknik Fisika ITS sekaligus pembimbing tugas akhir ini atas waktu dan bimbingan konsultasi yang telah diberikan.
2. DRPM ITS selaku pemberi dukungan berupa skema pendanaan ADB-HETI.
3. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
4. Kedua orang tua penulis yang telah memberikan dukungan penuh dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Royan Ubaidillah selaku *partner* pengerjaan Tugas Akhir.
6. Teman-teman Nogogeni ITS Team yang senantiasa memberikan dukungan, bantuan dan semangat.
7. Teman-teman BPE E35 selaku teman seperjuangan yang memberikan dukungan, bantuan, dan semangat dalam kehidupan perkuliahan.
8. Teman-teman angkatan 2020 Teknik Fisika – ITS yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir.
9. Dhea Tirta Ananta yang selalu memberikan dukungan dan perhatian.

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

Surabaya, 24 Juli 2024

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
LEMBAR PENGESAHAN.....	xi
APPROVAL SHEET.....	xiii
Abstrak	xv
Abstract.....	xvii
KATA PENGANTAR.....	xix
DAFTAR ISI	xxi
DAFTAR GAMBAR.....	xxiii
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Review Penelitian Sebelumnya	7
2.2 Dasar Teori.....	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2 Studi Literatur dan Observasi Lapangan.....	26
3.3 Desain Rancang Bangun	27
3.4 Desain Algoritma Kendali <i>Constant Current</i> dan <i>Duty Cycle</i>	37
3.5 Simulasi Desain dan Algoritma Sistem <i>Regenerative Braking</i> berbasis <i>constant current</i> dan <i>duty cycle</i>	42
3.6 Desain Board Sistem <i>Regenerative Braking</i>	43
3.7 Evaluasi Desain Board Berdasarkan Standard IPC-2221.....	44
3.8 Implementasi Sistem	45
3.9 Pengujian Sistem	47
3.10 Analisis Performansi Sistem <i>Regenerative Braking</i>	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49

4.1	Hasil Simulasi Desain Sistem <i>Regenerative Braking</i> Berbasis <i>Constant Current Control</i> dan <i>Duty Cycle Control</i>	49
4.2	Hasil Desain Board dan Evaluasi Board.....	52
4.3	Hasil Implementasi Sistem	57
4.4	Hasil Pengujian	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		77
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Saran	77
DAFTAR PUSTAKA		79
LAMPIRAN.....		81
BIODATA PENULIS		89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian Dasar Sistem Regenerative Braking	16
Gambar 2.2 Rangkaian <i>Precharge Circuit</i>	16
Gambar 2.3 Rangkaian Boost Converter	18
Gambar 2.4 Rangkaian <i>Voltage Divider</i>	23
Gambar 2.5 Rangkaian Current Sense Shunt Resistor dengan Op-Amp	24
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian Penerapan Sistem Regenerative Braking pada Scooter Listrik FITS Berbasis Constant Current Control dan Duty Cycle Control	25
Gambar 3.2 Blocksheet Schematic Regenerative Braking pada Scooter Listrik FITS Berbasis Constant Current Control dan Duty Cycle Control	28
Gambar 3.3 Rangkaian <i>Converter</i> dari setiap Fasa Motor BLDC	28
Gambar 3.4 (a) Rangkaian Pengukur Arus dan (b) Pengukur Tegangan pada umumnya	29
Gambar 3.5 Konstruksi <i>hand throttle</i>	30
Gambar 3.6 Rangkaian Input, Output dan Komunikasi Mikrokontroler STM32F4 pada Sistem Regenerative Braking	31
Gambar 3.7 (a) Rangkaian Pull-up Resistor dan (b) Rangkaian Pull-down Resistor	34
Gambar 3.8 Rangkaian MOSFET Paralel	34
Gambar 3.9 Rangkaian umum MOSFET driver IR2011S	35
Gambar 3. 10 Rangkaian MOSFET <i>driver</i> yang didesain	36
Gambar 3.11 Rangkaian Pengukur Arus dan Tegangan Pada Sistem Regenerative Braking	37
Gambar 3.12 Rangkaian Converter	38
Gambar 3.13 Rangkaian ekivalensi ketika MOSFET pada Fasa U Converter bekerja	38
Gambar 3.14 Rangkaian ekivalensi Sistem Regenerative Braking ketika bekerja	40
Gambar 3.15 Flowchart Kendali <i>Constant Current</i>	41
Gambar 3.16 Diagram Blok Sistem Kendali Constant Current	43
Gambar 3.17 Desain Board Sistem Regenerative Braking (a) <i>Board low power</i> , (b) <i>Board high power</i>	44
Gambar 3.18 Desain 3D <i>board full assembly</i> dengan komponen	46
Gambar 3.19 Skema Pengujian Sistem	48
Gambar 4.2 Bagan Simulasi Menggunakan Matlab Simulink	49

Gambar 4. 3	Plot Arus Pengisian dan Tegangan Supercapacitor terhadap waktu Hasil Simulasi dengan Menggunakan Setpoint 20A	49
Gambar 4.4	Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu hasil simulasi setpoint 20A	50
Gambar 4.5	Plot Arus Pengisian dan Tegangan Supercapacitor terhadap waktu Hasil Simulasi dengan Menggunakan Setpoint 30A	51
Gambar 4.6	Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu Hasil Simulasi setpoint 30A	51
Gambar 4.7	Desain Board untuk Jalur Sinyal (Low Power) (a.) Desain Jalur, (b.) Desain board 3D	53
Gambar 4.8	Desain Board untuk Jalur Fasa dan Jalur Supply (High Power) (a.) Desain Jalur, (b.) Desain board 3D	54
Gambar 4.9	Hasil Inspeksi Evaluasi Board berdasarkan Standar IPC-221	55
Gambar 4.10	Hasil Board jadi untuk Jalur Sinyal (<i>Low Power</i>)	56
Gambar 4.11	Hasil Board jadi untuk Jalur Fasa dan Jalur Supply (High Power)	57
Gambar 4.12	Hasil <i>Assembly</i> Board tampak (a) atas, (b) samping	58
Gambar 4.13	Rangkaian Supercapasitor	59
Gambar 4.14	Skema Pengujian Sistem	61
Gambar 4.15	Plot Arus Pengisian dan Tegangan Supercapacitor terhadap waktu Eksperimen dengan Menggunakan Setpoint 20A	62
Gambar 4.16	Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu Eksperimen dengan Menggunakan Setpoint 20A	63
Gambar 4.17	Plot <i>BEMF</i> dan Tegangan Supercapasitor terhadap waktu hasil eksperimen menggunakan arus target 20A (a) <i>timeframe</i> 0-0,5s (b) <i>timeframe</i> 0,4-1,4s....	64
Gambar 4.18	Plot Kecepatan Motor dan Arus pengisian pada superkapasitor untuk (a) <i>timeframe</i> 0-0.5s (b) <i>timeframe</i> 0,4-1,37s	65
Gambar 4. 19	Plot Arus dan Kecepatan motor terhadap waktu Hasil eksperimen dengan menggunakan Setpoint 20A (a) <i>timeframe</i> 0-0,5s (b) 0,5s-1,4s.....	65
Gambar 4.20	Plot Tegangan dan energi terhadap waktu dengan setting arus 20A untuk (a) <i>timeframe</i> 0-0,4s (b) <i>timeframe</i> 0,4s-1,4s.....	66
Gambar 4.21	Plot arus pengisian dan tegangan supercapacitor terhadap waktu eksperimen dengan menggunakan setpoint 30a (a) <i>timeframe</i> 0-0,4s, (b) <i>timeframe</i> 0,4s-1,35s	67

Gambar 4.22	Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu Eksperimen dengan Menggunakan Setpoint 30A	67
Gambar 4.23	Plot <i>Back EMF</i> dan tegangan superkapasitor terhadap waktu untuk Penggunaan Arus Target 30A (a) <i>timeframe</i> 0-0,4s (b) <i>timeframe</i> 0,4s-1,357s	68
Gambar 4.24	Plot Arus dan kecepatan motor untuk penggunaan arus target 30A (a) <i>timeframe</i> 0-0,4s (b) <i>timeframe</i> 0,4s-1,358s	68
Gambar 4.25	Plot Arus pengisian ke superkapasitor dan gaya pengereman terhadap waktu hasil ngujian dengan target arus 30A	70
Gambar 4.26	Plot Kecepatan Motor dan Gaya Pengereman untuk Penggunaan Arus Target 30A	71
Gambar 4.27	Plot tegangan dan energi pengisian terhadap waktu dengan setting arus 30A (a) <i>timeframe</i> 0-0,4s (b) <i>timeframe</i> 0,4s-1,35s	71
Gambar 4. 28	Perbandingan Besar Arus Pengisian oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 20A.....	73
Gambar 4.29	Perbandingan Besar Tegangan Supercapacitor oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 20A.....	73
Gambar 4.30	Perbandingan Besar Arus Pengisian oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 30A.....	73
Gambar 4.31	Perbandingan Besar Tegangan Supercapacitor oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 30A.....	74

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Review Penelitian Sebelumnya	7
Tabel 2.2 Perbandingan Karakteristik Baterai Berdasarkan Bahan Penyusunnya	11
Tabel 2.3 Algoritma <i>Six Step Commutation</i> ketika Sistem Regenerative Braking Bekerja (Nugroho, 2019)	15
Tabel 2.4 Parameter dan Hasil Penelitian oleh sistem <i>regenerative braking</i> dengan <i>constant curren</i> oleh Chaofeng Pan	22
Tabel 2.5 Parameter dan Hasil Penelitian oleh sistem regenerative braking dengan <i>constant voltage</i> oleh Kiddee	22
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Scooter</i> Listrik FITS	26
Tabel 3.2 Spesifikasi STM32F405 (Sumber : Datasheet STM32F405)	30
Tabel 3.3 Spesifikasi MOSFET IRFS4321 (Sumber: Datasheet MOSFET IRFS)	33
Tabel 3.4 Spesifikasi IR2011S (Sumber: Datasheet IR2011S)	36
Tabel 3.5 Konfigurasi pin input dan output dari mikrokontroler STM32F4	46
Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Kalibrasi Pengukuran dengan Menggunakan Sensor dan dengan Menggunakan Alat	60
Tabel 4.2 Hasil Performansi Sistem <i>Regenerative Braking</i>	75
Tabel 4.3 Hasil Eksperimen oleh Chaofeng Pan, 2020	75
Tabel 4.4 Parameter Eksperimen oleh Chaofeng Pan, 2020.....	76

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Asap transportasi merupakan salah satu penyumbang emisi penggunaan bahan bakar terbesar di dunia, dimana sisa pembakaran dari transportasi menyumbang polusi timbal sebesar 75% dari total polusi. Tingkat polusi tersebut tentu dapat mempengaruhi tingkat kejernihan udara karena semakin banyak polutan. Penggunaan kendaraan listrik disinyalir dapat mengurangi emisi penggunaan bahan bakar transportasi secara langsung (Hussain M, 2023). Selain tidak menghasilkan gas buang dalam kerjanya, kendaraan listrik memiliki komponen berputar yang cukup sedikit, sehingga suplai energi dapat dikonversi dengan lebih efisien dibandingkan kendaraan berbekal mesin pembakaran dalam yang memiliki gas buang dan komponen berputar dengan jumlah yang masif (Kamran T., 2023)

Kendaraan listrik biasa disuplai oleh baterai kering berbahan kimia, yang biasa disebut sebagai media penyimpanan energi (*energy storage system*). Baterai dipilih karena karakteristiknya yang baik ketika dikenai beban, dimana mampu menyuplai beban dengan durasi yang cukup lama daripada material penyimpan energi yang lain (Mark McKinnon, 2022). Namun, penggunaan baterai sebagai media penyimpanan energi memiliki beberapa kekurangan dalam penggunaannya. Salah satunya merupakan tingkat *power density* yang dimiliki baterai terbilang cukup rendah, dimana berkisar antara 500-3000W/L (Mark McKinnon, 2022) (Xie Shaobo, 2021). Besar *power density* tersebut dipengaruhi oleh kemampuan baterai dalam menyuplai arus sesuai dengan beban, atau yang biasa disebut sebagai *c-rate*. *C-rate* dari baterai dapat membatasi performa kendaraan listrik ketika bekerja dengan akselerasi yang tinggi, sehingga diperlukan *battery packs* yang berisi banyak baterai dihubungkan seri dan parallel untuk mencapai kebutuhan beban. Selain itu, baterai terlimitasi oleh siklus hidup baterai (*life cycle*) yang semakin menurun seiring baterai digunakan untuk suplai energi dan juga durasi pengisian energi pada baterai (Ramesh Kumar C., 2022). Suhu kerja dan suhu lingkungan baterai dapat mempengaruhi tingkat efisiensi pemakaian baterai, karena di dalamnya terjadi lonjakan resistansi ketika suhu meningkat. Sehingga, pemakaian baterai pada kendaraan listrik harus dibatasi agar dapat mengalirkan arus ke baterai dengan tunak tanpa menyentuh kapasitas maksimalnya agar dapat bekerja secara efisien tanpa adanya perubahan temperatur yang besar.

Melihat beberapa kelemahan dari baterai, dikembangkan sistem penyimpanan energi hybrid (HESS) berbasis kombinasi baterai dan supercapacitor ataupun ultracapacitor. Supercapacitor memiliki karakteristik waktu charge dan discharge yang cukup singkat dan juga c-rate yang besar, sehingga dapat dilakukan pengisian energi yang cepat dan dapat mensuplai energi pada beban dengan jumlah yang besar (Kiddee, et al., 2018). Umumnya pada sistem HESS, supercapacitor bekerja sebagai suplai energi sekunder yang memiliki power density yang tinggi. *Power density* yang tinggi tersebut menjadikan supercapacitor biasa digunakan untuk menyimpan energi dengan jumlah yang massif dan dilengkapi dengan pengisian yang cepat.

Dalam penerapannya, kendaraan listrik dalam roda transportasi skala *urban* (perkotaan) masih memiliki kelemahan, salah satunya merupakan jarak tempuh kendaraan yang tergolong rendah (rata-rata berkisar antara 40km-100km dalam sekali pengisian) (Xie Shaobo, 2021). Jarak tempuh yang terbatas tersebut dipengaruhi oleh kapasitas baterai dan juga efisiensi penggunaan sistem propulsi. Sebagaimana pada *scooter* FITS yang dikembangkan oleh PT. Strum ID dan PUI STP ITS, dengan menggunakan dual motor dan *battery pack* dengan tegangan nominal 67V berkapasitas 40Ah yang masih memiliki jarak tempuh kendaraan sejauh 55km untuk satu kali pengisian *battery pack*.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, dikembangkan sistem *regenerative braking* yang mampu mengisi energi pada sistem penyimpanan energi pada kendaraan ketika berdeselerasi. Sistem *regenerative braking* mampu mengkonversi perubahan energi kinetik ketika kendaraan berdeselerasi menjadi energi listrik dari putaran motor yang dikendalikan secara elektrik. Sistem ini terbukti mampu meningkatkan jarak tempuh kendaraan sebesar 8%-25% dari jarak tempuh awalnya (Hussain M, 2023). Secara praktik, penerapan sistem ini biasa diterapkan dengan penggunaan HESS pada kendaraan listrik untuk meningkatkan efisiensi penggunaan baterai sebagai suplai, dimana supercapacitor akan menyimpan energi hasil konversi sistem. Superkapasitor akan menyuplai kendaraan ketika kendaraan berakselerasi. Media superkapasitor tersebut dapat menyuplai energi dengan nominal yang besar dan cepat akibat *power density* atau tingkat pelepasan energi superkapasitor yang besar dan masif (Chaofeng Pan, 2020).

Berdasarkan algoritma kendalinya, sistem *regenerative braking* telah banyak dikembangkan. Nugroho (2018) dalam penelitiannya telah mengembangkan sistem *regenerative braking* dengan metode kendali berupa pengendalian *duty cycle* untuk mempertahankan nilai tegangan *output* pengisian tetap stabil. Didapatkan arus yang cukup

besar dan nilai tegangan output dari sistem pengendalian yang cukup stabil dengan nominal yang cenderung lebih besar daripada tegangan terminal superkapasitor berdasarkan nilai *duty cycle* yang dikendalikan, sehingga sistem mampu mengisi energi pada superkapasitor. Superkapasitor mampu diisi dengan cepat dan nominal energi yang besar, tetapi diperoleh fluktuasi arus yang cukup besar. Selain itu, sistem regenerative braking ini juga telah dikembangkan dengan metode kendali *constant current*. Pan (2019) menggagas sistem *regenerative braking* menggunakan kendali *constant current* dengan arus balik dari motor yang dijaga konstan. Arus konstan tersebut diperoleh dengan mengatur nilai *duty cycle* yang berubah setiap waktu. Sistem dengan metode kendali *constant current* ini mampu menghasilkan tingkat arus yang cukup stabil dan besar tegangan yang tidak terlalu fluktuatif. Kestabilan arus tersebut mampu meningkatkan proses pengisian energi pada HESS, dimana pengisian dari sistem *regenerative braking* pada sistem menjadi lebih stabil. Proses pengisian yang cenderung stabil tersebut mampu meningkatkan efisiensi konversi energi dengan nilai efisiensi paling baik sebesar 40% (Chaofeng Pan, 2020).

Mempertimbangkan kendali *duty cycle* yang mampu menghasilkan tegangan yang konstan dan kendali *constant current* yang mampu menghasilkan arus yang konstan sehingga pengisian energi dalam sistem penyimpanan stabil, dilakukan riset mengenai rancang bangun sistem *regenerative braking* dengan metode *constant current* dan *duty cycle* pada media penyimpanan HESS. Penelitian diharapkan mampu menemukan sistem *regenerative braking* yang paling efisien berdasarkan tingkat energi pemulihan yang paling besar berdasarkan algoritma kontrol yang dikembangkan ketika kendaraan berdeselerasi akibat sistem *regenerative braking* yang bekerja.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, terdapat beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

- a) Bagaimana rancang bangun sistem *regenerative braking* berbasis HESS dengan kendali *constant current* pada *scooter FITS*?
- b) Bagaimana performansi sistem *regenerative braking* berbasis HESS yang paling baik berdasarkan kendali *constant current* pada *scooter FITS*?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut:

- a) Rancang bangun sistem *regenerative braking* berbasis HESS dengan kendali *constant current* pada *scooter* FITS.
- b) Menganalisis performansi rancang bangun sistem *regenerative braking* berbasis HESS paling baik dengan kendali *constant current* pada *scooter* FITS.

1.4 Batasan Masalah

Berikut merupakan batasan masalah pada penelitian:

- a) Rancang bangun sistem *regenerative braking* yang dikembangkan berbasis HESS dengan perpaduan baterai dan superkapasitor.
- b) Rancang bangun sistem *regenerative braking* dikembangkan untuk diaplikasikan pada *scooter* FITS yang berada di *workshop* Nogogeni ITS Team.
- c) Rancang bangun sistem *regenerative braking* bersifat modular, tanpa mengubah rangkaian kendali (*3-phase inverter*) pada *scooter* FITS.
- d) *Battery pack* yang digunakan pada sistem memiliki nilai tegangan nominal sebesar 67V 30Ah, dengan *C-rating* sebesar 3C.
- e) Motor yang digunakan memiliki *rating* daya sebesar 1500W
- f) Hasil rancang bangun dikembangkan dengan basis *software* VESC oleh Benjamin Vedder
- g) Skematik dari *hardware* dikembangkan berdasarkan basis skematik *Electronic Speed Controller* oleh Benjamin Vedder dengan beberapa pengembangan dan perbedaan penggunaan komponen.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a) BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

- b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab II ini dibahas teori yang berkaitan dengan penelitian, meliputi tinjauan sistem penyimpanan energi, sistem *regenerative braking*, *converter*, sistem kendali *duty cycle*, sistem kendali *constant current*, *voltage divider* dan *current sense current resistor*.

c) BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab III berisi tentang diagram alir penelitian dan tahapan penelitian yang akan dilakukan.

d) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV berisi tentang hasil dan analisis dari penelitian yang telah dilakukan, meliputi hasil simulasi desain sistem *regenerative braking*, hasil desain *board* pengendali pada sistem, evaluasi *board*, hasil implementasi sistem, dan juga analisis hasil pengujian dalam penelitian.

e) BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V berisi tentang kesimpulan berdasarkan hasil yang telah diperoleh dalam penelitian dan juga saran terkait pengembangan dalam penelitian selanjutnya.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Review Penelitian Sebelumnya

Dilakukan *review* beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian untuk mengetahui kelemahan dan juga metode untuk pengembangan sistem dengan performansi yang lebih baik. *Review* beberapa penelitian terdahulu dikemas pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2. 1 Review Penelitian Sebelumnya

No	Profil Pustaka	Metode dan Temuan
1	<p>Judul: <i>Energy-Regenerative Braking Control of Electric Vehicles Using Three-Phase Brushless Direct-Current Motors</i></p> <p>Penulis: Bo Long, Shin Teak Lim, Ji Hyoung Ryu dan Kil To Chong</p> <p>Jurnal/Prosiding: Energies, 2018</p>	<p>Metode: Penelitian dilakukan dengan tiga tahap. Tahap pertama merupakan pemodelan sistem dan perancangan rangkaian <i>electrical regenerative brake</i>. Tahap kedua merupakan penerapan sistem <i>regenerative braking</i> dengan menggunakan algoritma TSM melalui simulasi. Simulasi dilakukan dengan bantuan <i>software simulink</i>. Tahap ketiga merupakan pengujian sistem <i>regenerative braking</i> secara eksperimen langsung. Mekanisme <i>terminal sliding mode</i> dibuat bersama dengan <i>buck -boost converter</i> yang dapat menaikkan tegangan tanpa digunakannya arus yang cukup besar.</p> <p>Temuan: Berdasarkan hasil eksperimen dengan menggunakan BLDCM sebagai controller yang menentukan nilai <i>duty cycle</i> ketika sistem bekerja, nilai arus balik dari motor menuju baterai cenderung mengalami kestabilan. Hal ini dapat terjadi akibat nilai <i>duty cycle</i> yang berubah setiap waktu tergantung dari tingkat dan kondisi <i>disturbance</i>. <i>Duty cycle</i> yang berubah tersebut akan menentukan besar arus dan tegangan yang dapat disuplai menuju baterai setiap waktu dengan stabil</p>
2	<p>Judul: <i>Efficiency Improvement of Regenerative Energy for an EV</i></p>	<p>Metode: Penelitian dilakukan dengan memodelkan sistem <i>regenerative braking</i> sesuai dengan spesifikasi motor, kapasitas baterai dan berat kendaraan yang ditinjau untuk mengetahui kecepatan dan torsi yang dihasilkan. Sistem dimodelkan dengan parameter <i>disturbance</i> dari luar berupa persamaan slip</p>

kendaraan dan *rolling resistance*. Selanjutnya, metode pengereman dimodelkan dengan membagi mekanisme pengereman menjadi 2 model (*split brake system*), yakni pengereman secara mekanis dan pengereman secara elektrik melalui sistem *regenerative braking*. Metode kontrol dibuat dengan membatasi torsi pengereman dari sistem *regenerative braking* ketika pedal *throttle* dilepas. Model kemudian disimulasikan dengan *software* simulink untuk mengetahui besar torsi yang dihasilkan dari pengereman mekanis maupun elektrik yang telah dibatasi. Setelah ditemukan perbandingan torsi yang dihasilkan dari kedua mekanisme pengereman, performansi sistem *regenerative braking* yang menggunakan pengereman secara mekanis dan elektrik dibandingkan dengan melakukan eksperimen secara langsung. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan kendaraan listrik model iMiEV.

No	Profil Pustaka	Metode dan Temuan
2	<p>Penulis: Takuya Yabe, Kan Akatsu, Nobunori Okui, Tetsuya Niikuni dan Terunao Kawai.</p> <p>Jurnal/Prosiding: World Electric Vehicle Journal, 2018.</p>	<p>Temuan: Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan pembatasan torsi pengereman <i>regenerative braking</i> untuk diketahui energi yang dihasilkan dari sistem. Dengan metode <i>regenerative braking</i> konvensional tanpa limitasi, didapatkan energi pengisian sebesar 721 kW, sedangkan dengan limitasi dan pembagian mekanisme pengereman, didapatkan energi pengisian sebesar 840 kW. Terjadi peningkatan sebesar 18% dari metode konvensional. Hal ini terjadi karena kestabilan sistem yang mampu mengalirkan arus balik pengisian tanpa fluktuasi yang besar.</p>
3	<p>Judul: <i>Regenerative Braking with Duty Cycle Settings for Brushless DC Motor</i></p> <p>Penulis: Ignatius Wahyu Adi Nugroho, Slamet Riyadi.</p> <p>Jurnal/Prosiding:</p>	<p>Metode: Penelitian dilakukan dengan eksperimen langsung menggunakan rangkaian <i>boost converter</i> yang dibentuk dari 3 MOSFET dari sisi <i>low</i> setiap fasa yang dikontrol dengan microcontroller dsPIC30F4012 sebagai pemberi sinyal <i>duty cycle</i>. Rangkaian MOSFET dapat bertindak sebagai <i>boost converter</i> ketika diberi nilai input <i>duty cycle</i> yang sesuai dengan perhitungan. Setiap MOSFET akan bekerja untuk mengalirkan sinyal tegangan dan arus</p>

IEEE International Conference on Electrical Engineering and Informatics 2019.

dari putaran motor ketika sistem *regenerative braking* aktif. Rasio *duty cycle* yang diinputkan pada MOSFET akan dijadikan variasi dan besar arus yang dihasilkan setiap variasi *duty cycle* akan dianalisis dan dievaluasi sebagai hasil output dari sistem *regenerative braking*

Temuan:

Semakin besar nilai *duty cycle*, arus negatif yang dihasilkan oleh sistem akan meningkat, dengan putaran motor yang semakin menurun. Arus dapat meningkat secara fluktuatif dan dapat mengisi baterai. Performa sistem *regenerative braking* dengan kendali *duty cycle* dapat berjalan dengan fluktuasi nilai arus yang besar tetapi tegangan yang dihasilkan cukup stabil dan bernilai cukup besar dari tegangan terminal sistem pengisian.

4 **Judul:**
An HSC/Battery Energy Storage System-Based Regenerative Braking System Control Mechanism for Battery Electric Vehicles

Penulis:
Kunagone Kiddeea, Wiwat Keyoonwong, dan Werachet Khan-Ngern.

Jurnal/Prosiding:
IEEJ Trans, 2018.

Metode:
Penelitian dilakukan dengan simulasi sistem *drivetrain* dan pengereman serta eksperimen langsung menggunakan rangkaian *boost converter* yang dibentuk dari 6 MOSFET setiap fasa yang dikontrol berdasarkan sinyal *duty cycle*. Rangkaian MOSFET dapat bertindak sebagai *boost converter* ketika diberi nilai input *duty cycle* yang sesuai dengan perhitungan. Rangkaian *boost converter* diaplikasikan pada sistem HESS dari baterai dan HSC. Setiap *switching* dan besar torsi pengereman dari sistem ditentukan berdasarkan algoritma ANN yang ditentukan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan parameter motor induksi dan berdasarkan pemodelan matematis dari setiap komponen. Hasil simulasi berupa jarak pemakaian kendaraan dan *cycle* pemakaian dari sistem penyimpanan energi kemudian dibandingkan dengan eksperimen langsung.

Temuan:

Hasil simulasi menunjukkan bahwasanya pada kendali normal, jarak tempuh kendaraan berada di angka 105.96 km dengan pemakaian 13 *cycle* baterai, sedangkan dengan penerapan sistem *regenerative braking* pada baterai langsung, jarak tempuh kendaraan menjadi 126.33km dengan pemakaian 15,5 *cycle* baterai. Apabila digunakan sistem *regenerative braking* pada sistem penyimpanan

HESS, diperoleh jarak tempuh kendaraan menjadi 175,24km dengan pemakaian 21,5 cycle baterai.

-
- 5 **Judul:**
Constant Current Control for Regenerative Braking of Passive Series Hybrid Power System
- Penulis:**
Chaofeng Pan, Jian Wang, Wei Dai, Liao Chen, dan Long Chen.
- Jurnal/Prosiding:**
International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020.
- Metode:**
Penelitian dilakukan dengan melakukan analisis gaya pengereman dan torsi yang dihasilkan dari 2 jenis pengereman pada sepeda listrik (pengereman mekanis dan regenerative braking). Hasil analisis kemudian dijadikan strategi untuk menentukan strategi pengendalian sistem regenerative braking yang digunakan, dimana besar torsi pengereman *regenerative braking* hampir sama dengan pengereman secara mekanis. Strategi pengendalian ini dibuat dengan mengendalikan besarnya arus keluaran motor sesuai dengan besarnya arus yang diinginkan ketika sistem bekerja menggunakan rasio *duty cycle* yang berubah setiap waktu. Besar arus tersebut dapat menghasilkan torsi pengereman yang besarnya hampir sama dengan besar torsi pengereman secara mekanis. Dilakukan validasi penelitian melalui pengujian secara simulasi dan juga pengujian secara eksperimental langsung.
- Temuan:**
Nilai arus yang dihasilkan dari sistem *regenerative braking* dengan kendali *constant current* cenderung sesuai dengan arus yang dikendalikan. Tegangan yang dihasilkan juga cenderung stabil di angka 35V. Seperti halnya ketika digunakan arus kendali (*setpoint*) sebesar 70A pada sistem, terjadi deselerasi dari kecepatan motor sebesar 350RPM ke 0RPM selama 6.1s dengan arus balik rata-rata sebesar -68A, dimana pengereman secara mekanis pada kecepatan dan torsi pengereman yang sama memiliki deselerasi selama 7s. Ketika digunakan arus yang lebih kecil, lama waktu deselerasi meningkat karena nilai torsi yang menjadi semakin kecil.
-

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Penyimpanan Energi Elektrik (*Electrical Energy Storage*)

Dalam pengembangan mobil listrik, telah dikembangkan sistem penyimpanan energi berupa electrical energy storage (ESS) yang dapat menyimpan energi listrik menjadi energi elektrokimia. Sistem ESS dikembangkan dengan menggunakan satu jenis teknologi penyimpanan baterai. Sistem penyimpanan ini digunakan dengan basis penggunaannya yang dapat diandalkan, harganya yang tergolong lebih murah, dan kemudahannya untuk proses *charging* ketika dilakukan pengisian dan *discharge* ketika energi dikeluarkan (Kim dan Chang, 2014). Sistem ini kebanyakan disusun oleh baterai kering yang disusun dengan kombinasi seri-paralel sesuai kebutuhan. Baterai kering dipilih untuk ESS karena tingkat *self-discharge* yang cenderung sangat kecil dan ketahanannya dengan siklus penggunaan yang besar (Evans dkk, 2012).

Berdasarkan komponen mayoritas dan komposisi penyusunnya, baterai terbagi menjadi 5 kelompok besar, yakni baterai timbal (Lead-Acid battery), baterai Li-Ion, baterai NiMH, baterai NiCd, dan juga baterai Metal Air. Setiap jenis baterai tersebut memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing berdasarkan power density, efisiensi, siklus, dan juga *self-discharge* sebagaimana dimuat pada **Tabel 2.2**. Sebagaimana dimuat pada tabel tersebut, setiap jenis baterai memiliki siklus hidup yang besar, dimana lebih dari 500 siklus. Setiap jenis baterai dengan karakteristik tertentu dikembangkan untuk berbagai jenis aplikasi, seperti halnya baterai timbal untuk aki kendaraan karena harganya yang cenderung dapat dijangkau serta siklusnya yang cenderung besar, dan baterai Li-Ion yang memiliki power density dan energy density yang besar diaplikasikan pada mobil listrik ataupun dunia digital (Kim dan Chang, 2014).

Tabel 2. 2 Perbandingan Karakteristik Baterai Berdasarkan Bahan Penyusunnya

Jenis Baterai pada ESS	<i>Power Density</i> (W/kg)	Biaya (\$/kWh)	Efisiensi Siklus (%)	Siklus Hidup	Tingkat <i>Self-discharge</i>
Baterai Timbal	180	30-40	70-90	500-800	0,1-0,3%
Baterai Li-Ion	1800	150-250	80-90	1200	0,1-0,3%
Baterai NiMH	250-1000	30-80	66	500-1000	2%
Baterai NiCd	150	40-60	70-90	1500	0,2-0,6%
Baterai <i>Metal-air</i>	-	450-650	<50	100+	<0.1%

2.2.2 Hybrid Electrical Energy Storage (HESS)

Selain ESS yang digunakan pada pengembangan kendaraan listrik, dikembangkan teknologi penyimpanan energi berupa Hybrid Electrical Energy Storage (HESS) dengan tujuan untuk menanggulangi kekurangan penggunaan baterai pada sistem ESS (Kim dan Chang, 2014). Sistem HESS dikembangkan dengan kombinasi penggunaan dua jenis teknologi ESS untuk mendapatkan sistem penyimpanan energi yang lebih ideal dengan mengombinasikan kelebihan dari masing-masing komponen penyusunnya. Teknologi kombinasi ESS yang sering digunakan adalah baterai dan superkapasitor. Baterai digunakan berdasarkan tingkat *energy density* yang besar dengan nilai resistansi diri yang kecil. Sehingga mampu menyimpan energi dengan jangka waktu yang lama. Superkapasitor digunakan karena karakteristik *power density* yang besar dan juga siklus hidup yang jauh mengungguli baterai, dengan lebih dari 100.000 siklus. Tingkat *power density* superkapasitor yang besar mampu membuat performansinya untuk mengalirkan energi dengan jumlah yang masif dalam waktu yang singkat (Chaofeng, 2022). Sehingga, dengan melihat besarnya *power density* pada superkapasitor, sistem HESS sering digunakan dalam aplikasi sistem *regenerative braking* mengingat besar arus yang sangat fluktuatif. Besar arus yang fluktuatif tersebut mampu mengalirkan energi dengan jumlah masif, sehingga superkapasitor dapat menyimpan energi yang sangat besar dengan waktu yang singkat.

HESS sering digunakan dalam bidang otomotif untuk mendukung peluasan jarak tempuh kendaraan ketika melaju. Hal ini mengharuskan diketahuinya tingkat sisa energi yang tersimpan setiap waktu. Tingkat sisa energi dari sistem HESS dapat diketahui berdasarkan nilai parameter *state of charge* (SOC) dari sistem penyimpanan. Besar SOC tersebut dipengaruhi oleh tingkat penggunaan sistem, dengan perhitungan rasio antara sisa energi yang ada ($Q(t)$) dan kapasitas senergi maksimalnya, dimana secara matematis dituliskan sebagai persamaan 2.1.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} = \frac{V(t)}{V_{max}} \quad (2.1)$$

dimana,

$SOC(t)$ = *State of Charge* Superkapasitor pada waktu (t)

$Q(t)$ = Muatan superkapasitor pada waktu (t) (F)

Q_{max} = Muatan penuh superkapasitor (F)

$V(t)$ = Tegangan superkapasitor pada waktu (t) (V)

V_{max} = Tegangan penuh superkapasitor (V)

Dalam penerapannya, pengukuran kapasitas dari HESS sangat tidak praktis dan membutuhkan instrumen pengukuran yang kompleks dengan massa yang cukup berat. Berdasarkan hal tersebut, dikembangkan metode pengukuran SOC dengan mengukur *Open Circuit Voltage* (OCV) pada sistem penyimpanan energi. Metode pengukuran OCV dilakukan dengan mengukur beda potensial pada dua terminal sistem penyimpanan energi. Namun, tingkat SOC yang dapat diukur dengan metode OCV adalah SOC dari komponen penyimpanan energi dengan karakteristik tegangan nominal yang linear dengan kapasitasnya, atau komponen dengan karakteristik tegangan yang berkurang secara linear dengan waktu *discharge* sesuai dengan persamaan 2.2. Karenanya, SOC dari sistem HESS dengan penggunaan supercapacitor dapat diukur dengan metode OCV.

$$V_c = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.2)$$

dimana,

V_c = Tegangan kapasitor transien (V)

V_0 = Tegangan awal kapasitor (V)

R = Hambatan internal superkapasitor (Ω)

C = Kapasitansi superkapasitor (F)

2.2.3 Sistem *Regenerative Braking*

Dalam sistem pengereman yang bertujuan untuk menghentikan benda yang bergerak, terjadi perubahan energi kinetik menjadi bentuk energi yang lain. Perubahan energi kinetik tersebut terjadi karena adanya gesekan untuk menghentikan gerakan. Namun, terdapat sejumlah energi yang terbuang ketika sistem pengereman bekerja. Energi yang terbuang tersebut sebagian besar diubah menjadi energi panas ketika sistem pengereman bekerja (Kumar dkk., 2023).

Berdasarkan pemanfaatan energinya, dikembangkan sistem *non-regenerative braking* dan sistem *regenerative braking*. Sistem *non-regenerative braking* bekerja dengan memanfaatkan gesekan kampas rem dengan *disc brake* atau *drum brake* yang dipasang satu poros dengan *shaft* roda. Sistem pengereman dengan penggunaan *disc brake* dijalankan oleh sistem hidrolis yang menggunakan fluida untuk mendorong piston yang dapat menggerakkan kampas rem untuk menggesek *disc brake* ketika pengereman terjadi. Sistem pengereman dengan *drum brake* bekerja dengan kombinasi seling dari pedal rem yang akan menggerakkan *drum* dengan gesekan pada poros roda. Kedua sistem tersebut dikatakan *non-generative* karena tidak ada pemanfaatan energi ketika gesekan pada sistem pengereman berlangsung (Long, 2014).

Berbeda halnya dengan sistem *non-regenerative braking*, sistem *regenerative braking* bekerja dengan melakukan pengereman dan memanen energi ketika sistem bekerja. Sistem pengereman *regenerative braking* bekerja dengan menggunakan sistem mekanik ataupun sistem elektrik untuk mengurangi kecepatan kendaraan ketika bergerak sampai dengan berhenti. Sistem *regenerative braking* dengan mekanisme sistem mekanis akan menyimpan energi ketika pengereman terjadi pada komponen *flywheel* berupa energi kinetik dengan perantara sistem *clutch*. Mekanisme tersebut biasa disebut sebagai *Kinetic Energy Recovery Systems* (KERS) yang dapat menyimpan energi kinetik dan menggunakannya kembali untuk membantu kendaraan ketika berakselerasi (Hardianto dkk., 2018).

Sistem *regenerative braking* dengan mekanisme elektrik dapat ditemukan pada kendaraan bertenagakan motor listrik ataupun kendaraan dengan penggunaan sistem *hybrid* yang memanfaatkan tenaga dari mesin pembakaran dalam dan juga motor listrik. Pada kendaraan dengan sistem *hybrid*, sistem *regenerative braking* bekerja dengan memanfaatkan gerakan poros output dari *engine* pembakaran dalam yang dapat menggerakkan motor ketika terjadi pengereman untuk mengisi ESS. ESS dapat terisi ketika motor yang menjadi generator 3 fasa dengan tenaga dari poros *engine* menghasilkan energi listrik. Besar energi pengisian ESS oleh sistem *regenerative braking* dapat dipengaruhi oleh tingkat *Back Electromotive Force* (BEMF) yang dapat menghasilkan tegangan keluaran dari setiap fasa motor dan juga besar arus yang dihasilkan dari BEMF ketika sistem bekerja, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.3. Sistem ini bekerja dengan mengintegrasikan *board controller* yang semula menjadi *3-phase inverter* motor untuk membantu *engine* agar kendaraan dapat berakselerasi menjadi *power converter* agar motor dapat menjadi generator untuk memanen energi dan menghentikan kendaraan (Wen & Tien, 2018). *Power Converter* pada sistem *regenerative braking* akan mengintegrasikan 2 fasa dari motor menjadi 2 beda potensial yang dapat mengisi sistem penyimpanan. *Power converter* ini dapat mengintegrasikan fasa dari motor dengan memanfaatkan lilitan dalam motor yang bersifat induktif untuk dapat menyimpan energi dalam sementara waktu. Energi yang disimpan untuk sementara waktu tersebut akan disalurkan oleh MOSFET menuju jalur terminal positif dan negatif dari sistem penyimpanan energi dengan algoritma *switching six-step commutation* yang ditampilkan pada **Tabel 2.3**. Setiap *hall sensor* akan mendeteksi letak rotor dari motor, yang akan dijadikan sinyal untuk *trigger* dari setiap MOSFET. Apabila *hall sensor* mendeteksi rotor berada pada sisi *high U* dan sisi *low W*, maka sinyal H_a akan mentrigger MOSFET untuk menyambungkan fase U ke kutub positif dari sistem penyimpanan energi dan sinyal H_c akan mentrigger

Tabel 2.3 Algoritma *Six Step Commutation* ketika Sistem Regenerative Braking Bekerja (Nugroho, 2019)

Sinyal <i>Hall Sensor</i>			<i>Switch State</i> dari MOSFET					
H _a	H _b	H _c	T ₁	T ₃	T ₅	T ₂	T ₆	T ₄
0	0	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0	0	0	1
1	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	1	0

MOSFET T₆ untuk menyambungkan fase W ke kutub negatif dari sistem penyimpanan energi. Sehingga, arus dapat mengalir dari motor menuju terminal sistem penyimpanan energi dengan disearahkan terlebih dahulu oleh *body diode* pada MOSFET. Besar arus yang mengalir tersebut cenderung berfluktuatif seiring dengan berubahnya nilai PWM ketika rangkaian *boost converter* bekerja (Long dkk., 2014).

$$\Delta E_{ESS} = \int_{t_1}^{t_2} V_{ESS}(t)I_{ESS}(t) - R(I_{ESS}(t))^2 dt \quad (2.3)$$

dimana,

E_{ESS} = Energi Penyimpanan (J)

V_{ESS} = Tegangan ESS(V)

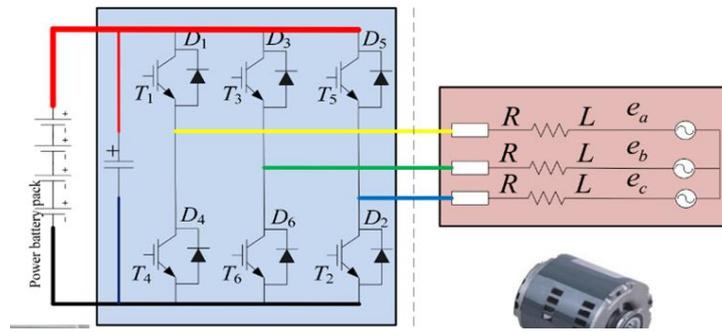
I_{ESS} = Arus pengisian sistem *regenerative braking* menuju ESS (A)

R = Hambatan internal ESS (Ω)

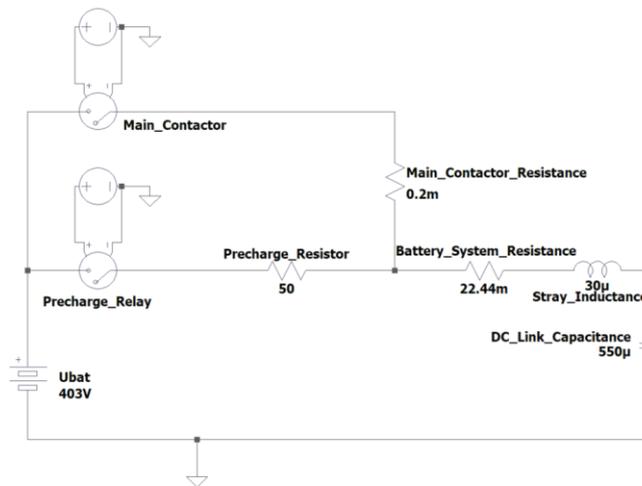
t₁ = waktu awal pengereman (s)

t₂ = waktu akhir pengereman (s)

Energi yang dipulihkan oleh sistem *regenerative braking* dengan mekanisme elektrik dapat disimpan oleh ESS ataupun HESS. Sistem *regenerative braking* yang disimpan pada ESS akan menyimpan energi hasil pemulihan pada baterai, sedangkan pada sistem HESS, energi akan disimpan pada komponen penyimpan energi dengan *power density* yang besar agar dapat terisi dengan cepat. Pada sistem *regenerative braking* dengan HESS, biasa digunakan kombinasi baterai untuk suplai energi yang digunakan untuk menggerakkan motor dan superkapasitor untuk penyimpanan energi ketika sistem *regenerative braking* bekerja (Kidde dkk., 2018). Karena sifat superkapasitor memiliki kapasitas yang besar, akan timbul



Gambar 2.1 Rangkaian Dasar Sistem Regenerative Braking (Kamran T., 2023)



Gambar 2.2 Rangkaian *Precharge Circuit* (Hamilton, 2017)

beban kapasitif yang besar pula. Beban yang besar tersebut akan menimbulkan *inrush current* yang cukup besar ketika superkapasitor digunakan sebagai sumber energi ketika berakselerasi. Besarnya *inrush current* tersebut dapat mengganggu kinerja dari sistem kelistrikan secara keseluruhan, atau bahkan merusak komponen di dalamnya karena arus besar yang mengalir di luar batas amannya (Ezgec, 2019). Sehingga integrasi sistem *regenerative braking* menggunakan HESS harus dilengkapi dengan rangkaian *precharge* yang dapat mengatasi adanya *inrush current* sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Karena superkapasitor memiliki *power density* yang berbeda dari baterai dan sifat superkapasitor yang memiliki besar tegangan yang selaras dengan kapasitasnya, nilai kapasitas dan SOC dari sistem dapat ditentukan dengan OCV. Besar energi yang dihasilkan oleh penggunaan sistem *regenerative braking* dengan superkapasitor sebagai elemen penyimpanan energi ketika sistem dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.4. Sebagai sistem penyimpanan energi HESS, kapasitas superkapasitor harus diperhitungkan agar dapat menampung energi hasil proses pengereman. Sehingga, besar kapasitansi dari superkapasitor harus ditentukan berdasarkan besar energi

pengereman yang dapat diketahui berdasarkan tingkat perubahan energi kinetik sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.5.

$$\Delta E_{HESS} = \frac{1}{2}CV_2^2 - \frac{1}{2}CV_1^2 \quad (2.4)$$

dimana,

ΔE_{HESS} = Besar energi penyimpanan

C = Kapasitas Superkapasitor (F)

V_1 = Tegangan Superkapasitor sebelum sistem *regenerative braking* bekerja (V)

V_2 = Tegangan Superkapasitor setelah sistem *regenerative braking* bekerja (V)

$$E_k = \frac{1}{2}m(v_2 - v_1)^2$$

$$E_{cap} = E_k = \frac{1}{2}m(v_2 - v_1)^2 \quad (2.5)$$

dimana,

E_{cap} = Besar energi yang dapat disimpan superkapasitor (J)

E_k = Besar perubahan energi kinetic ketika terjadi pengereman (J)

m = massa kendaraan (m)

v_2 = kecepatan kendaraan akhir (m/s)

v_1 = kecepatan kendaraan awal (m/s)

Performa dari sistem *regenerative braking* dapat ditentukan berdasarkan tingkat respon yang dibutuhkan oleh sistem untuk menghentikan kendaraan dan juga tingkat efisiensi dari sistem ketika memulihkan energi. Respon dari sistem untuk menghentikan kendaraan dapat diamati, sedangkan efisiensi sistem ketika bekerja dapat diketahui dengan membandingkan besar energi hasil pemulihan dan perubahan energi kinetik ketika kendaraan bergerak pada kecepatan tertentu sampai dengan berhenti. Secara matematis, tingkat efisiensi tersebut dapat dihitung berdasarkan formulasi pada persamaan 2.6.

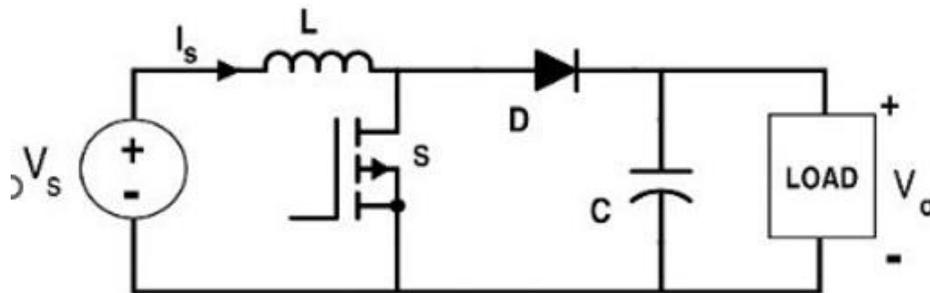
$$\eta = \frac{\Delta E_{ESS}}{E_k} = \frac{\frac{1}{2}CV_2^2 - \frac{1}{2}CV_1^2}{\frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)} \quad (2.6)$$

dimana,

η = tingkat efisiensi

ΔE_{ESS} = perubahan energi setelah terjadi pengisian (J)

E_k = perubahan energi kinetik ketika terjadi pengereman (J)



Gambar 2.3 Rangkaian Boost Converter

(Sumber:www.allaboutcircuits.com)

2.2.4 Boost DC Converter

Sebagai pengisi energi sistem penyimpanan, sistem *regenerative braking* harus mampu menghasilkan tegangan output yang selalu lebih besar dari tegangan nominal dari terminal ESS. Karena hal tersebut, dibutuhkan penggunaan *power converter* yang dapat memanipulasi besar tegangan dari putaran pada fasa motor. Untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut, digunakan rangkaian *boost converter* yang dapat menaikkan tegangan dari input tegangan keluaran dari BEMF ketika sistem *regenerative braking* bekerja. Hasil tegangan keluaran dari *boost converter* dapat dikendalikan dengan modulasi rasio *duty cycle* menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) dari frekuensi *switching* rangkaian. Rasio *duty cycle* menunjukkan perbandingan waktu ketika sinyal pada kondisi *high* atau pada kondisi “ON” untuk satu periode waktu tertentu. Nilai rasio tersebut dapat diatur berdasarkan lebar pulsa sinyal *HIGH* atau sinyal pada kondisi “ON” atau “1” selama satu periode tertentu. Besar satu periode sinyal dapat diatur berdasarkan nilai frekuensi yang digunakan pada rangkaian, dimana besarnya dapat diatur sesuai dengan frekuensi yang dibutuhkan oleh rangkaian.

Rangkaian *boost converter* secara sederhana ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Tegangan V_s sebagai sumber atau yang berasal dari dua kutub fasa motor akan menyuplai rangkaian. Arus I_s yang mengalir dari sumber akan menuju induktor, yang kemudian akan menyimpan energi terlebih dahulu dalam bentuk medan magnet. Energi yang disimpan sementara tersebut dapat dilepaskan dengan cepat dengan fluktuasi arus yang cukup besar karena beban induktif yang dihasilkan oleh induktor. Ketika MOSFET S diberi sinyal hasil modulasi PWM untuk menghasilkan rasio *duty cycle* pada frekuensi tertentu, arus akan mengalir pada rangkaian yang akan disearahkan oleh diode D dengan cepat dari energi yang sebelumnya disimpan dalam induktor. Besar tegangan yang dihasilkan setelah MOSFET diberi trigger PWM bergantung pada besar rasio *duty cycle*. Nilai *duty cycle* dapat mengubah tegangan input menjadi lebih besar berdasarkan hasil perhitungan besar tegangan pada induktor dalam

kondisi transiennya. Dengan menganggap bahwa diode ideal sehingga tidak ada drop tegangan yang signifikan, ketika MOSFET S dalam kondisi On, maka pada rangkaian dalam gambar 2.3 dapat menghasilkan persamaan 2.6 sampai dengan persamaan 2.12.

Loop i: KVL

$$-V_S + V_L + V_O = 0 \quad (2.6)$$

dengan $V_L = L \frac{di}{dt}$ dan $\Delta i = \frac{V_S}{L} t_{on}$, sehingga

$$V_O = V_S - V_L \quad (2.7)$$

$$V_O = V_S - V_S \frac{t_{on}}{dt} \quad (2.8)$$

$$V_O = V_S \left(1 - \frac{t_{on}}{t_{on} - t_{off}} \right) \quad (2.9)$$

$$V_O = V_S \left(\frac{t_{off}}{t_{on} - t_{off}} \right) \quad (2.10)$$

$$V_O = V_S \left(\frac{1}{1-D} \right) \quad (2.11)$$

sehingga,

$$D = \frac{(V_O - V_S)}{V_O} \quad (2.12)$$

dimana,

D = rasio *duty cycle*

V_S = Tegangan Sumber (V)

V_O = Tegangan yang dibutuhkan beban (V)

Agar sistem dapat lebih stabil dalam mengisi energi, dikembangkan berbagai algoritma pengendalian dalam sistem *regenerative braking*, seperti halnya pengendalian secara *close loop* dengan mengatur nilai *duty cycle* untuk mempertahankan arus pengisian tetap stabil sesuai dengan besar arus yang diinginkan. Metode ini biasa disebut sebagai metode *constant current control*, dimana dapat menghasilkan energi pengisian yang cenderung stabil dan dapat meningkatkan jarak tempuh kendaraan sampai dengan 26% (Chaofeng Pan, 2020). Agar besar arus dapat dikendalikan, sistem *regenerative braking* dengan metode *constant current control* harus mengetahui besar BEMF dari motor melalui tegangan setiap fasa untuk menentukan rasio *duty cycle*.

Selain itu, metode pengendalian dengan pengaturan *duty cycle* pada sistem *regenerative braking* adalah pengendalian *duty cycle* untuk mempertahankan tegangan tetap di atas tingkat

SOC dari sistem penyimpanan energi. Metode ini telah terbukti mampu menghasilkan tingkat besar BEMF yang lebih stabil dengan arus pengisian ke sistem penyimpanan energi yang lebih besar (Nugroho, 2019). Tingkat *duty cycle* dari sistem dapat membuat rangkaian *boost converter* untuk menjaga tegangan keluaran BEMF tetap menjadi lebih besar daripada tegangan dari terminal sistem pengisian, sehingga arus dapat mengalir menuju sistem penyimpanan dengan nominal yang lebih besar (Kivanc & Ustun, 2021).

2.2.5 Sistem Kendali *Duty Cycle*

Penerapan sistem *regenerative braking* dapat menjadi lebih optimal dengan mengintegrasikan sistem kendali dengan algoritma tertentu untuk menjaga besar energi pengisian selama sistem bekerja tetap stabil (Ignatius Wisnu Adi Nugroho, 2019). Salah satu jenis algoritma kendali yang dapat digunakan adalah kendali *duty cycle*. Algoritma ini dapat mengendalikan besar tegangan *output* yang dihasilkan sistem agar selalu menjadi lebih besar dari tegangan dari sistem penyimpanan energi. Sistem *regenerative braking* dengan kendali *duty cycle* memanfaatkan lilitan dari setiap fasa motor yang bersifat induktif untuk menjadi *boost converter*. Sistem bekerja dengan mekanisme *switching* MOSFET pada sisi LOW dari setiap fasa motor, dimana MOSFET pada sisi *HIGH* akan dalam kondisi OFF agar arus dapat mengalir dari fasa motor menuju ke sistem penyimpanan energi yang semula memberi suplai ke motor. Algoritma *duty cycle* dibuat untuk menjaga nilai rasio *duty cycle* agar nilai tegangan output dari rangkaian *power converter* pada sistem *regenerative braking* konstan. Kendali dengan algoritma ini akan memberi sinyal PWM pada kaki *gate* MOSFET secara bergantian agar tetap menjadi *boost converter* ataupun *buck-boost converter*. Kedua jenis *converter* dirancang agar nilai BEMF yang dihasilkan oleh putaran motor dapat menjadi lebih konstan. MOSFET bekerja secara bergantian berdasarkan input trigger dari *hall sensor* yang mengirimkan sinyal ke mikrokontroler. Mikrokontroler akan mengirimkan sinyal ke *gate* MOSFET yang linear dengan pembacaan *hall sensor*. Sinyal yang dikirimkan berupa modulasi lebar pulsa dalam satu frekuensi sinyal atau *pulse width modulation* (PWM). PWM tersebut linear dengan rasio *duty cycle* sesuai dengan perhitungan. Nilai rasio *duty cycle* diatur oleh mikrokontroler agar rangkaian dari sistem *regenerative braking* dapat menjadi *drive converter* dimana secara perhitungan dituliskan pada persamaan 2.12 untuk tetap mempertahankan besarnya tegangan keluaran BEMF yang lebih besar dari tegangan terminal dari sistem penyimpanan energi.

2.2.6 Sistem Kendali Constant Current

Sistem kendali *constant current* akan mengusahakan agar besar arus balik ketika pengereman terjadi tetap konstan sesuai dengan *setpoint*. Secara garis besar, sistem kendali ini juga menggunakan algoritma *switching* yang sama dengan algoritma sistem *regenerative braking* ketika bekerja. Sehingga, tetap digunakan rangkaian *boost converter* yang menggunakan komponen MOSFET pada rangkaiannya untuk bekerja dengan modulasi lebar sinyal untuk menghasilkan rasio *duty cycle* tertentu. Namun, agar dapat menghasilkan arus keluaran sistem yang konstan ketika motor berdeselerasi, rasio *duty cycle* harus mampu berubah pada setiap waktu berdasarkan selisih nilai BEMF dari motor dan tegangan superkapasitor. Besar BEMF dapat diketahui berdasarkan nilai besar tegangan antara 2 fasa motor yang akan dikendalikan ketika berputar. Besar BEMF dan besar tegangan superkapasitor tersebut akan dijadikan basis perhitungan untuk menentukan besar *duty cycle* yang akan dimodulasi ke kaki *gate* MOSFET sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.13. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Chaofeng Pan tahun 2020 yang menerapkan algoritma *constant current* dengan nilai perubahan *duty cycle* untuk menjaga arus tetap konstan sesuai dengan arus target yang diinginkan dan dibandingkan dengan penelitian oleh Kidde tahun 2018 dengan menerapkan algoritma untuk menjaga nilai tegangan keluaran *converter* konstan lebih besar daripada tegangan HSC (*Hybrid Supercapacitor*), energi pengisian sistem oleh Chaofeng Pan bernilai lebih besar dibandingkan sistem yang digagas oleh Kidde. Sebagaimana dimuat pada **Tabel 2.4** dan **Tabel 2.5**, dengan spesifikasi sistem yang cukup identik, waktu pengereman dan pengisian energi oleh sistem yang digagas Kidde memiliki durasi yang lebih lama, tetapi memiliki besar *rate* konversi energi yang lebih kecil dibandingkan dengan sistem yang digagas oleh Chaofeng Pan, sehingga berdasarkan nilai besar energi dan *rate* konversi energi dari kedua sistem yang diaplikasikan pada objek dengan spesifikasi yang hampir sama, penggunaan sistem dengan algoritma *constant current* memiliki performansi yang lebih baik.

$$D = \frac{I_{cont}R}{V_e - U_c} \quad (2.13)$$

dimana,

D = rasio *duty cycle*

I_{cont} = besar arus yang diinginkan (A)

R = besar resistansi motor (Ω)

V_e = Tegangan BEMF dari motor (V)

U_c = Tegangan Superkapasitor (V)

Tabel 2.4 Parameter dan Hasil Penelitian oleh sistem *regenerative braking* dengan *constant current* oleh Chaofeng Pan

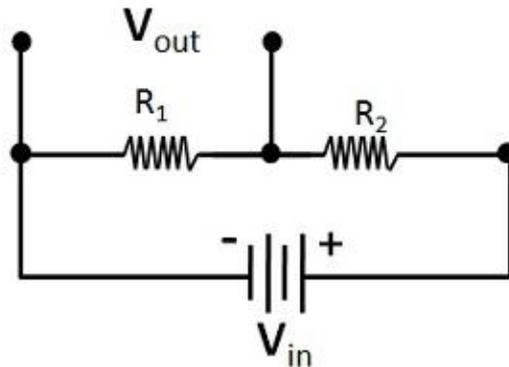
Spesifikasi	Nilai Spesifikasi	Parameter Hasil	Nilai parameter terbaik
Total massa mobil (kg)	800	V_1 (V)	9,831
Jari-jari roda (m)	0,247	V_2 (V)	12,76
Rasio <i>gear</i> final	6,515	t (s)	6,235
Daya motor (W)	5000	C (F)	165
Kecepatan motor (RPM)	4000	E (J)	5459
Arus Nominal (A)	115	E_k (J)	23720
		<i>energy conversion rate</i>	23%

Tabel 2.5 Parameter dan Hasil Penelitian oleh sistem *regenerative braking* dengan *constant voltage* oleh Kiddee

Spesifikasi	Nilai Spesifikasi	Parameter Hasil	Nilai parameter terbaik
Total massa mobil (kg)	1105	V_1 (V)	38,4
Jari-jari roda (m)	0,25	V_2 (V)	39,37
Rasio <i>gear</i> final	5,5	t (s)	15
Daya motor (W)	5000	C (F)	157
Kecepatan motor (RPM)	3800	E (J)	5120
Arus Nominal (A)	120	E_k (J)	24780
		<i>energy conversion rate</i>	20,66%

2.2.7 Voltage Divider

Voltage divider atau pembagi tegangan merupakan suatu rangkaian yang tersusun dari 2 resistor seri yang dipasangkan parallel dengan rangkaian utama untuk mengukur besar tegangan pada rangkaian utama. Rangkaian *voltage divider* terdiri dari tahanan dengan resistansi yang besar dan tahanan dengan resistansi yang kecil. Rangkaian ini bekerja dengan prinsip hukum Kirchoff, dimana tegangan yang terukur akan dapat diketahui berdasarkan persamaan pada persamaan 2.14. Tegangan V_{out} yang terukur akan menjadi lebih kecil, dan *range* nilainya dapat disesuaikan dengan besar tegangan kerja dari sistem pengendali untuk pembacaan sensor.



Gambar 2.4 Rangkaian *Voltage Divider*
(Sumber : www.circuitdigest.com)

dimana,

V_{in} = Tegangan dari Rangkaian yang akan diukur (V)

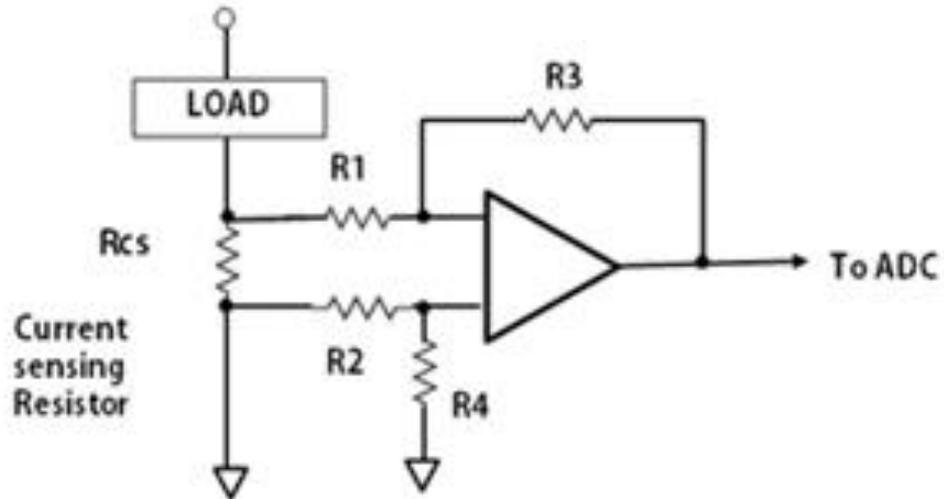
V_{out} = Tegangan output menuju sistem kendali (V)

R_1 = Hambatan 1 (Ω)

R_2 = Hambatan 2 (Ω)

2.2.8 Current Sense Shunt Resistor

Dalam pengembangan sistem pengendalian *regenerative braking*, agar mampu mengukur besar arus balik ketika sistem bekerja, digunakan *current sense shunt resistor* yang dipasang secara seri pada satu jalur rangkaian yang ingin diukur arusnya. *Current sense shunt resistor* akan mengukur arus dengan memanfaatkan pembacaan *drop* tegangan yang terjadi. Drop tegangan tersebut akan menjadi besar arus sesuai perhitungan pada persamaan 2.14. Karena dirangkai seri dengan rangkaian yang akan diukur arusnya, besar resistansi *current sense resistor* harus bernilai sangat kecil agar tidak mengganggu kinerja rangkaian (Rectifier, 2019). Karena nilai resistansi yang kecil tersebut, sinyal dari sensor yang membaca drop tegangan juga akan bernilai kecil. Kecilnya tegangan yang terbaca tersebut mengharuskan rangkaian *current sense shunt resistor* yang digunakan untuk mengukur arus dilengkapi dengan op-amp. Digunakannya op-amp tersebut agar sinyal tegangan mampu menjadi lebih besar, sehingga kontroler dari sistem *regenerative braking* dapat dengan lebih mudah membaca besarnya drop tegangan dari *shunt resistor*. Pada pengukuran arus dalam penggunaan aplikasi *controller* ataupun *converter* yang menggunakan kendali *duty cycle*, perlu digunakan komponen op-amp yang memiliki spesifikasi *PWM rejection*. Spesifikasi tersebut dibutuhkan untuk menghindari *noise* akibat sinyal PWM yang cenderung cepat dan fluktuatif.



Current sensing circuit example in DC power source (load side)

Gambar 2.5 Rangkaian Current Sense Shunt Resistor dengan Op-Amp
(Sumber : www.susumu.co.jp)

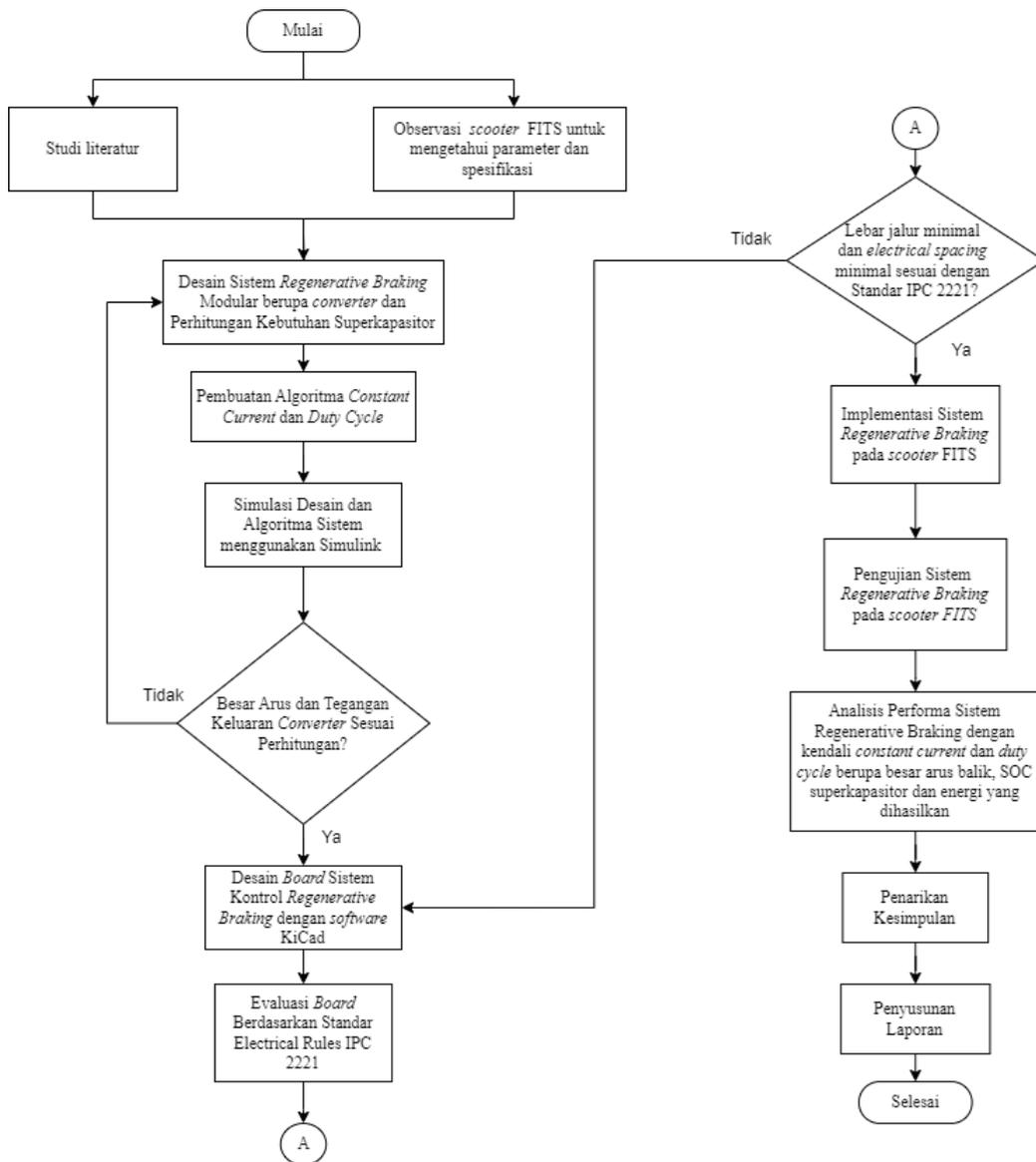
Secara skematik, rangkaian perpaduan *current sense shunt resistor* dengan op-amp ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

$$V_{drop} = I (R_{shunt}) \quad (2.14)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara garis besar, peta jalan penelitian digambarkan pada diagram alir pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian Penerapan Sistem Regenerative Braking pada Scooter Listrik FITS Berbasis Constant Current Control dan Duty Cycle Control

3.2 Studi Literatur dan Observasi Lapangan

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep kontrol, teknik manufaktur dan karakteristik storage system yang terkait dengan penelitian. Dilakukan pencarian berbagai referensi dari buku, artikel pada jurnal yang relevan dengan topik Regenerative Braking System Berbasis Hybrid Electrical Energy Storage System dengan basis constant current control dan constant duty cycle control. Diperlukan pemahaman yang baik mengenai fenomena, parameter, komponen dan berbagai variabel yang dikembangkan dalam algoritma kontrol pada sistem untuk dapat melakukan simulasi, implementasi sistem berupa manufaktur sistem sampai dengan implementasi pada scooter elektrik FITS sampai dengan menganalisa eksperimen berdasarkan hasil implementasi. Didapatkan bahwasanya algoritma constant current control sebagaimana dikembangkan oleh Chen pada 2022 telah dapat menghasilkan nilai arus yang cukup stabil dengan nilai response time, rise time dan overshoot yang cukup kecil.

Tabel 3.1 Spesifikasi *Scooter* Listrik FITS

Motor Penggerak	Dual BLDC Hub Motor
Daya Output Motor	1,5 kW (3kW total)
Transmisi	On Wheel
Mode Berkendara	Eco
Baterai	Li-Ion 60V 30Ah
Kecepatan Maksimum	65 km/h
Besar Arus Motor (Nominal)	20A-30A
Akselerasi (0-60 Km/h)	15 detik
Jarak Tempuh (km)	40
Arus Nominal (A)	30
Panjang, Lebar, Tinggi (cm)	148, 60, 100
<i>Wheel Base</i> (cm)	120
Berat total (kg)	70
Hambatan Fasa UV, VW, dan UW (Ω)	1,86; 1,87; 1,89
Induktansi lilitan fasa UV, VW, UW (μ H)	241; 245,2; 238,9

Observasi lapangan dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai roadmap penelitian, teknologi yang sedang dikembangkan dan juga identifikasi plant motor listrik yang akan diteliti. Observasi dilakukan di Pusat Unggulan IPTEK – Studi Kontrol Otomotif (PUI-SKO) ITS dan Workshop Nogogeni ITS Team untuk mengidentifikasi plant scooter elektrik FITS berpropulsi dual motor dengan daya nominal sebesar 1,5KW dan bertenagakan battery pack 60V 30Ah. Spesifikasi lengkap plant didapatkan sebagaimana dimuat pada **Tabel 3.1**. Data spesifikasi yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar untuk perhitungan dan perancangan sistem dalam penentuan komponen serta rangkaian elektronika untuk kendali sistem.

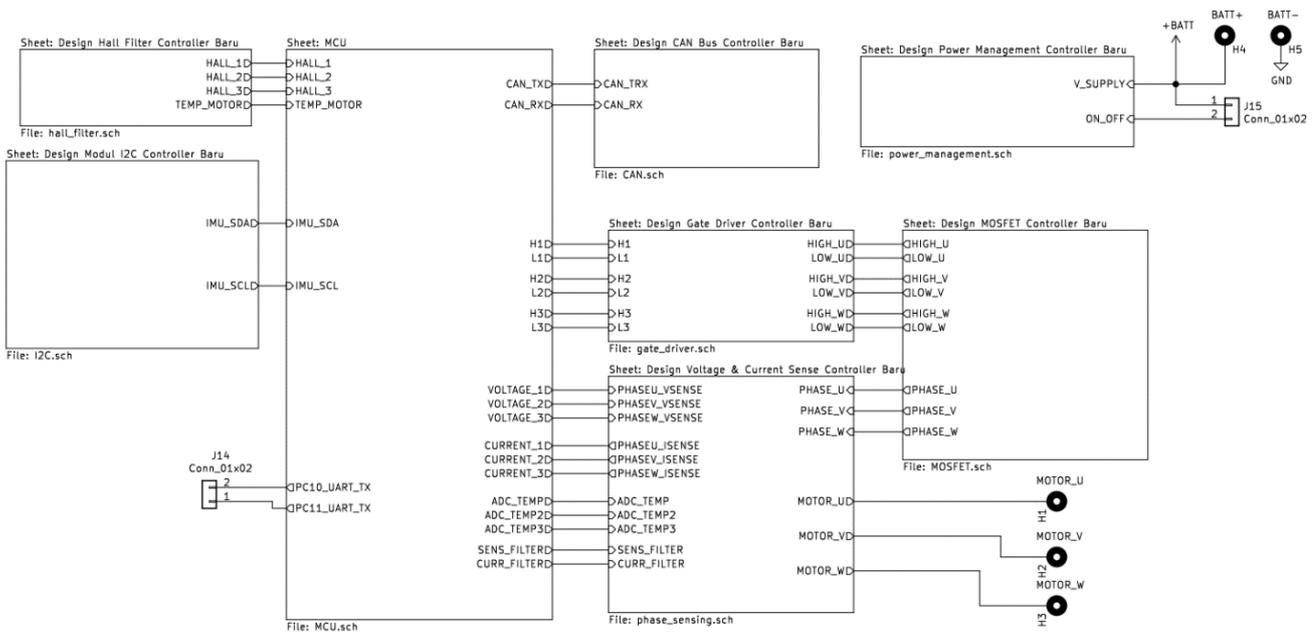
3.3 Desain Rancang Bangun

Berdasarkan hasil observasi lapangan berupa data spesifikasi *scooter* elektrik FITS, dilakukan proses kalkulasi dan perancangan Sistem Regenerative Braking pada Scooter Listrik FITS Berbasis Constant Current Control dan Duty Cycle Control. Proses rancang bangun dijelaskan pada beberapa tahap sebagai berikut.

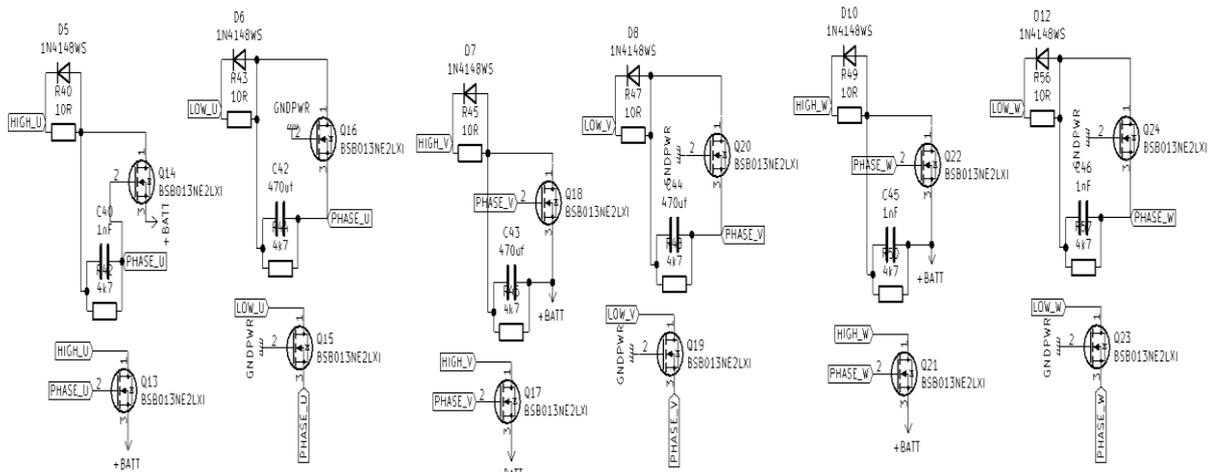
3.3.1 Perancangan Sistem Modular *Regenerative Braking*

Scooter elektrik FITS telah menggunakan sistem kendali pabrikan Nanjing Fardriver 72260, sehingga agar tidak merubah arsitektur sistem kendali dengan kompleks, dirancang sistem *regenerative braking* secara modular. Di dalam sistem kendali Nanjing, terdapat sistem *3-phase inverter* yang telah dilengkapi oleh *contactless current sensor* berupa *hall sensor*. Terdapatnya sensor tersebut menandakan bahwa kontroler Nanjing yang digunakan menggunakan algoritma *closed loop Field Oriented Control* dalam menggerakkan motor. Berdasarkan penelitian oleh Chaofeng Pan pada tahun 2022, agar algoritma *Field Oriented Control* dapat berjalan dengan maksimal, digunakan skema sistem *regenerative* berbasis algoritma *constant current* yang dapat menjaga arus keluaran dari *converter* tetap konstan sesuai dengan *entry* besar arus yang diharapkan dan pengisian dapat berjalan dengan stabil. Skema sistem yang digunakan dirancang sebagaimana dimuat pada **Gambar 3.2**. Sistem *regenerative braking* yang dirancang bekerja dengan mengkonversi *Back Electromotive Force* yang dihasilkan oleh 3 fasa motor, yakni Fase U, Fase V, dan Fase W dari motor sebagaimana terdapat pada blocksheet MOSFET pada **Gambar 3.2**. Ketiga fase tersebut dapat menghasilkan BEMF ketika motor berputar *reverse* yang terjadi ketika MOSFET dan juga *body diode* pada setiap fasa bekerja dengan kendali dari mikrokontroler yang terdapat pada *blocksheet* MCU. BEMF akan menghasilkan tegangan balik berupa tegangan AC dengan arus

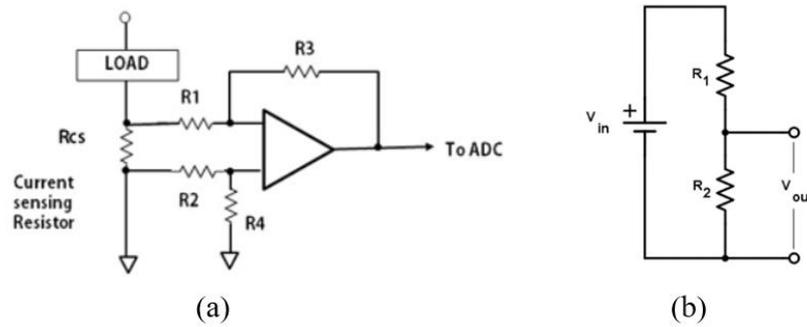
balik yang fluktuatif ketika putaran motor dalam kondisi *reverse*. Sehingga, body diode pada MOSFET akan menyearahkan arus hasil BEMF terlebih dahulu agar arus dapat mengalir searah (*direct current*). MOSFET dan *body diode* tersebut terdapat pada *blocksheet* MOSFET, yang merupakan rangkaian *converter* dimana secara skematik yang digambarkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.2 Blocksheet Schematic Regenerative Braking pada Scooter Listrik FITS Berbasis Constant Current Control dan Duty Cycle Control



Gambar 3.3 Rangkaian *Converter* dari setiap Fasa Motor BLDC



Gambar 3.4 (a) Rangkaian Pengukur Arus dan (b) Pengukur Tegangan pada umumnya

Rangkaian *converter* bertindak sebagai regulator arus yang *adjustable*, sehingga dapat mengatur besar energi yang disimpan pada sistem penyimpanan HESS. Besar energi yang disimpan tersebut dapat diatur berdasarkan besar arus yang dihasilkan berdasarkan kendali algoritma *constant current* dan *duty cycle*. Arus yang dihasilkan tersebut dapat diatur besarnya dengan menginputkan besar arus yang dikendalikan pada algoritma *constant current*. Nilai besar arus tersebut dapat dikendalikan berdasarkan karakteristik arus *drain* (I_D) terhadap tegangan *gate-source* (V_{GS}) pada kaki MOSFET. Kendali *constant current* akan mengendalikan arus I_D agar tetap konstan sesuai dengan besar yang diharapkan, dengan keluaran rasio PWM (*Pulse-Width Modulation*) untuk mengatur frekuensi kaki MOSFET pada kondisi ON. Dalam algoritma *constant current*, diperlukan pembacaan besar arus pada setiap fasa untuk mengukur dan mengendalikan besar arus, sehingga diperlukan komponen sensor pengukur arus. Pada pengembangan algoritma untuk kendali *duty cycle*, diperlukan pembacaan tegangan pada setiap fasa dan juga tegangan *output* yang disambungkan pada sistem penyimpanan, sehingga diperlukan sensor pengukur tegangan. Sensor pengukur arus pada sistem *regenerative braking* berupa *current-sense shunt resistor* yang dihubungkan seri pada rangkaian yang akan diukur. *Current-sense* resistor tersebut akan menghasilkan tegangan drop dari rangkaian, dimana tegangan drop tersebut merupakan nilai besar arus pada rangkaian. Digunakan *voltage divider* untuk mengukur besar tegangan pada setiap fasa dari motor dan juga tegangan output pada sistem HESS. Rangkaian *current sense resistor* dan *voltage divider* ditunjukkan pada **Gambar 3.4 (a)** dan **Gambar 3.4 (b)**.

Sistem *regenerative braking* akan bekerja ketika *hand throttle* dari *scooter* dilepas. *Hand throttle* pada *scooter* mampu membaca tingkat bukaan throttle untuk mengendalikan kecepatan motor sesuai dengan derajat bukaan *throttle*. Tingkat bukaan tersebut dibaca dengan menggunakan *hall sensor* yang tertanam dalam *hand throttle*. Konstruksi *hand throttle* dapat dilihat pada **Gambar 3.5**. *Output* pembacaan dari *hand throttle* akan berupa

sinyal analog, yang akan diproses oleh mikrokontroler menggunakan Analog to Digital Converter (ADC).

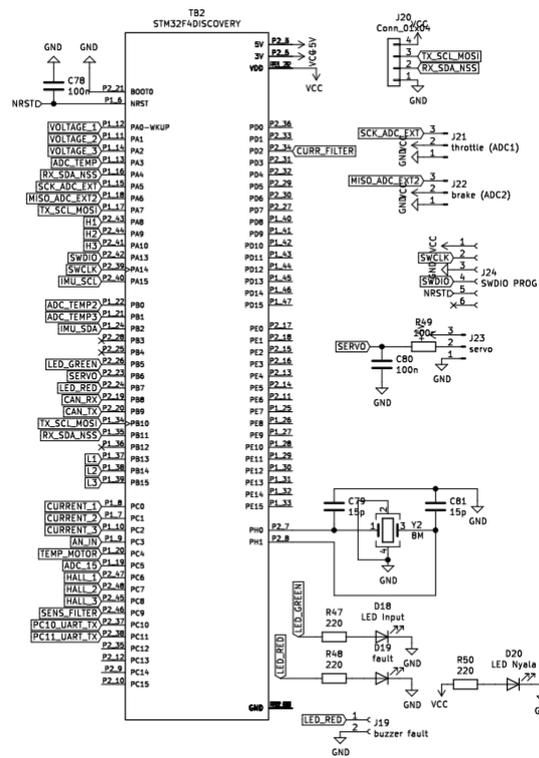
Hasil pengukuran arus dan juga tegangan oleh sensor akan berupa sinyal analog yang akan diproses oleh sistem kendali pada sistem *regenerative braking*. Sistem kendali yang digunakan dikembangkan dengan penggunaan komponen mikrokontroler STM32F405 dengan frekuensi pembacaan yang tinggi berspesifikasi 32bit dan spesifikasi lengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 3.2**. Spesifikasi 32bit tersebut telah menjadikan mikrokontroler STM32F405 mampu membaca sinyal secara cukup presisi, sehingga cukup untuk membaca sinyal keluaran pengukuran arus oleh kombinasi *current sense shunt resistor* dan op-amp.

Tabel 3. 2 Spesifikasi STM32F405 (Sumber : Datasheet STM32F405)

Core CPU	ARM 32-bit Cortex -M4 CPU
Tegangan operasi	3,33V
Tegangan input (di sarankan)	3,38V
Tegangan input (limit)	3,46V
Digital pin I/O	24 buah 32 bit
Analog pin I/O	24 buah 12 bit
Arus DC per pin I/O	22 mA
Memori Flash	1MB
SRAM	196 KB
Kecepatan	168 Mhz



Gambar 3.5 Konstruksi *hand throttle*



Gambar 3. 6 Rangkaian Input, Output dan Komunikasi Mikrokontroler STM32F4 pada Sistem Regenerative Braking

Sistem kendali dengan mikrokontroler dirancang agar mampu membaca dan memonitoring sistem *regenerative braking* secara *real-time* untuk keperluan analisis dan juga perolehan data. Pada sistem, digunakan sistem komunikasi UART dan juga CAN untuk keperluan datalogging. Secara keseluruhan, rangkaian input pembacaan sensor, output PWM untuk mengendalikan MOSFET, dan juga komunikasi pada sistem kendali digambarkan pada **Gambar 3.6**.

Tingkat besar arus target yang dikendalikan akan dibandingkan untuk mengetahui tingkat pengisian energi paling besar dengan menganalisa tingkat perubahan SOC pada supercapacitor yang dihasilkan ketika sistem *regenerative braking* bekerja. Tingkat perubahan SOC tersebut dapat diketahui dengan mengukur besar tegangan dari terminal superkapasitor.

3.3.2 Perhitungan Superkapasitor

Dalam penerapan HESS, superkapasitor merupakan sumber energi utama yang dapat digunakan ketika sistem *regenerative braking* bekerja. Superkapasitor dalam sistem HESS harus memiliki kapasistas yang cukup untuk menyimpan energi konversi dari sistem *regenerative braking* yang dihasilkan. Sehingga, diperlukan kalkulasi untuk menentukan besar kapasitansi *supercapacitor* dan juga tegangan nominalnya agar dapat digunakan sebagai

sistem penyimpanan energi. Sebagaimana penelitian yang dilakukan oleh Chaofeng Pen pada tahun 2021, *sizing* supercapacitor harus dilakukan untuk mengetahui energi yang dapat disimpan oleh supercapacitor dari perubahan energi kinetik yang terjadi ketika pengereman. Berdasarkan spesifikasi dari *scooter* FITS, dapat diperoleh perhitungan perubahan energi kinetik ketika terjadi pengereman dari kecepatan 30 km/h (18,05 m/s) pada *scooter* ketika dikenai beban totalnya. Perhitungan perubahan energi kinetik tersebut dapat dilakukan sebagaimana persamaan 3.1.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_k = \frac{1}{2}(100)(18,05)^2$$

$$E_k = 16,29kJ$$

$$E_{cap} = E_k = 16,29kJ \quad (3.1)$$

Sehingga, superkapasitor harus mampu menyimpan energi sebesar 16,29kJ tersebut. Berdasarkan tipe supercapacitor maxwell 500F 2,7V yang beredar di pasaran, dapat dilakukan perhitungan kapasitas dan tegangan supercapacitor untuk perancangan sistem HESS dengan total energi penyimpanan sebesar 16,29kJ. Dengan menggunakan tegangan nominal 64V dari sistem HESS, maka dapat disusun 24 supercapacitor secara seri untuk dapat mendapatkan tegangan nominal tersebut. Nilai kapasitansi total dan energi penyimpanan dari rangkaian supercapacitor dapat diketahui sebagaimana dilakukan perhitungan pada persamaan 3.2. Berdasarkan perhitungan tersebut, didapatkan energi penyimpanan supercapacitor sebesar 43,74 kJ, dimana telah melampaui energi penyimpanan maksimal ketika terjadi pengereman sebesar 16,29kJ.

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_{24}}$$

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{24}{500}F$$

$$C_{total} = 20,83F$$

$$E_{cap} = \frac{1}{2}CV^2$$

$$E_{cap} = \frac{1}{2}(20,83)(64)^2$$

$$E_{cap} = E_k = 16,29kJ \quad (3.2)$$

3.3.3 Desain Sistem Regenerative Braking

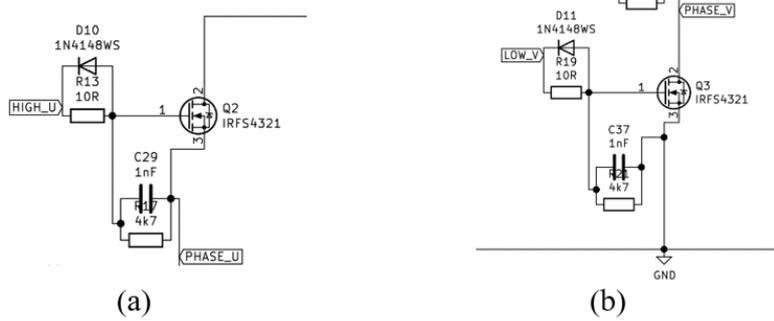
Sebagaimana digambarkan pada **Gambar 3.2**, skematik dari setiap rangkaian terintegrasi satu sama lain pada mikrokontroler STM32F405 sebagai *controller* sistem *regenerative braking*. Terdapat desain rangkaian pada setiap *blocksheet*, dimana setiap rangkaian memiliki fungsi masing-masing. *Blocksheet* MOSFET berisi rangkaian *converter* yang merupakan *power transfer* dari fasa motor ke sumber energi, *blocksheet phase_sensing* berisi rangkaian pengukur arus dan tegangan pada setiap fasa motor dan sumber energi, *blocksheet gate_driver* berisi rangkaian pengendali MOSFET dengan komponen MOSFET *driver*, *blocksheet* I2C dan CAN berisi rangkaian untuk komunikasi. Setiap *blocksheet* berisi komponen spesifik dengan penggunaan dan kalkulasi frekuensi yang sesuai.

3.3.4 Rangkaian Power Converter

Rangkaian *power converter* terdapat pada *blocksheet* MOSFET, yang terdiri dari rangkaian fasa dari setiap fasa dan baterai yang dihubungkan dengan MOSFET, sebagaimana digambarkan pada **Gambar 3.3**. Rangkaian tersebut merupakan rangkaian dengan spesifikasi *high power*, yang sesuai dengan spesifikasi dari hasil observasi lapangan, akan dialiri arus nominal sebesar 30A dengan *peak burst* sebesar 60A dan tegangan sekitar 60-64V DC. Sehingga, pada rangkaian *converter* ini, digunakan MOSFET sebagai *switching* dengan spesifikasi minimal arus I_D sebesar 3x arus *peak burst*nya, yakni sebesar 180A dan juga tegangan Drain-to-Source (V_{DS}) yang lebih besar dari 64V. Dengan spesifikasi minimal tersebut, dipilih MOSFET IRFS4321 yang dapat dijangkau di pasaran. Spesifikasi lengkap dari komponen MOSFET tersebut dimuat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3 Spesifikasi MOSFET IRFS4321 (Sumber: Datasheet MOSFET IRFS)

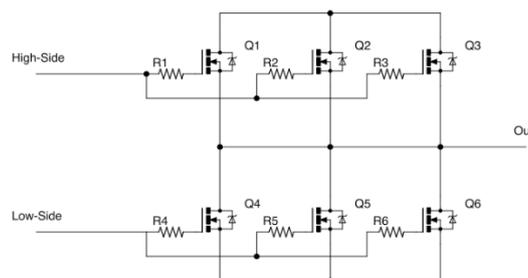
V_{DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	190 V
I_D	Continuous Drain Current	86 A
I_{DM}	Pulsed Drain Current	343 A
P_D	Power Dissipation	350 W
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 30 V
$R_{DS(ON)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	14,7 m Ω
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	5 V
T_J, T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175 $^{\circ}$ C
Q_g	Total Gate Charge	Typ 71 nC



Gambar 3.7 (a) Rangkaian Pull-up Resistor dan (b) Rangkaian Pull-down Resistor

Penggunaan MOSFET pada rangkaian *high power* membutuhkan penggunaan rangkaian *pull-up* resistor pada sisi *HIGH* dan juga *pull-down* resistor pada sisi *LOW* untuk menghindari adanya sinyal *floating* ketika MOSFET berada pada kondisi *standby*. Sehingga digunakan perpaduan resistor sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.7 (a)** untuk *pull-up resistor* dan **Gambar 3.7 (b)** untuk *pull-down resistor*. Pada penggunaan rangkaian *pull-up resistor* dan *pull-down resistor* tersebut, dilengkapi dengan diode 1N4148S dengan spesifikasi arus maksimal 3A untuk menghindari adanya arus balik menuju MOSFET *driver* akibat *switching* kaki *gate* dari MOSFET.

Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi sistem *regenerative braking* ketika bekerja adalah tingkat efisiensi komponen yang digunakan. Tingkat efisiensi dari komponen dapat diketahui berdasarkan besar disipasi daya yang dihasilkan komponen ketika bekerja (*on*). Resistansi diri setiap komponen mempengaruhi besar disipasi daya tersebut, sehingga besar resistansi diri dari komponen dapat mempengaruhi tingkat efisiensi sistem *regenerative braking* yang dikembangkan. Dalam penggunaan MOSFET untuk rangkaian *converter*, selain meningkatkan besar arus maksimal yang dapat mengalir dari kaki *drain* dan *source* untuk mendapatkan *power* yang lebih besar, penggunaan MOSFET yang dirangkai parallel dapat memperkecil nilai R_{DS} yang dibutuhkan untuk bekerja (Infineon, 2021). Sehingga, digunakan rangkaian *parallel MOSFET* sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.8** untuk memperbesar tingkat efisiensi penggunaan sistem *regenerative braking*.



Gambar 3.8 Rangkaian MOSFET Paralel

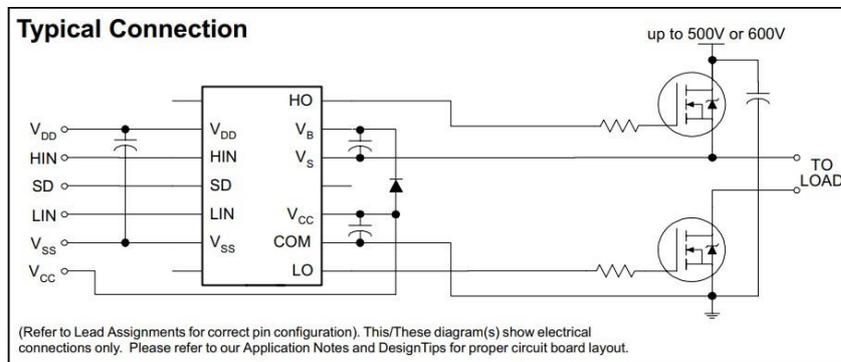
Rangkaian *converter* pada sisi sumber energi yang dilambangkan dengan node +BATT dan GND dilengkapi dengan kapasitor yang berfungsi sebagai filter. Filter berupa kapasitor digunakan untuk mengurangi tingkat *voltage ripple* yang ditimbulkan oleh fluktuasi arus ketika terjadi pengisian energi dari fasa motor menuju sumber energi. Besar kapasitansi kapasitor sebagai filter ditentukan dengan persamaan 3.3. Perhitungan menunjukkan bahwa dibutuhkan kapasitor dengan besar kapasitansi yang harus lebih besar dari $798\mu F$ dan rating tegangan lebih besar dari 64V, sehingga digunakan 3 kapasitor dengan besar kapasitansi $330\mu F$ yang dirangkai diparalel dengan tegangan nominal 100V untuk memenuhi kebutuhan filter.

$$C_{filter} > \frac{1 \times 60A}{8 \times 31300 \times 0,3} \quad (3.3)$$

$$C_{filter} > 798\mu F$$

3.3.5 Rangkaian Gate Driver

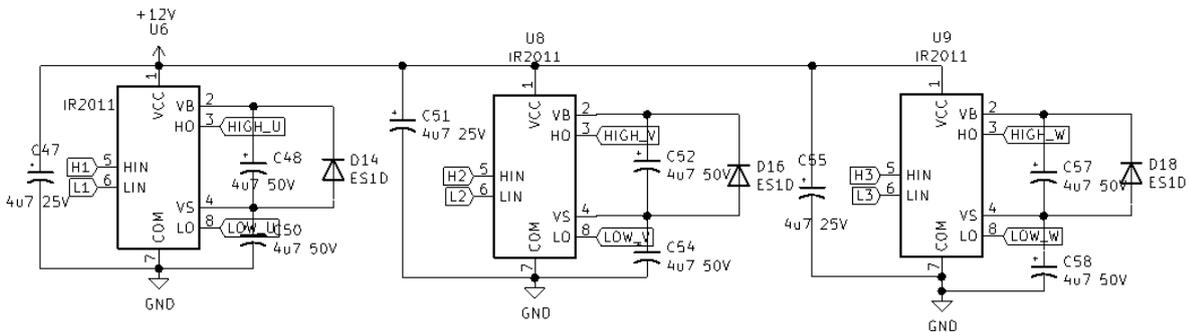
Tegangan input-output maksimal dari mikrokontroler STM32F405 yang digunakan pada sistem kendali adalah sekitar 3,34V dengan arus sekitar 0,5A, sedangkan MOSFET bekerja dengan tegangan *threshold* sebesar 5V. Berdasarkan hal tersebut, digunakan MOSFET *driver* untuk men-*trigger* sinyal pada MOSFET dari sinyal kendali. Berdasarkan rangkaian *converter* dan untuk simplifikasi rangkaian secara keseluruhan, digunakan MOSFET *driver* yang dapat men-*trigger* sinyal *HIGH* pada sisi *HIGH* rangkaian *converter* dan sinyal *LOW* pada sisi *LOW* rangkaian *converter*. Untuk kemudahan kendali dan tingkat frekuensi yang tinggi, dipilih MOSFET *driver* IR2011S dalam rangkaian untuk mengendalikan sinyal *HIGH* dan *LOW* setiap MOSFET pada setiap fasa motor, dengan rangkaian umum sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.9**, dengan spesifikasi lengkap sebagaimana dimuat pada **Tabel 3.4**.



Gambar 3.9 Rangkaian umum MOSFET driver IR2011S

Tabel 3. 4 Spesifikasi IR2011S (Sumber:Datasheet IR2011S)

Simbol	Definisi	Minimal	Maksimal	Unit
V_B	High side floating supply voltage	-0.3	525	V
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$	
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S - 0.3$	$V_S + 0.3$	
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25	
V_{LO}	Low side output voltage	- 0.3	$V_{CC} + 0.3$	
V_{DD}	Logic supply voltage	- 0.3	$V_{SS} + 25$	
V_{SS}	Logic supply offset voltage	$V_{CC} - 25$	$V_{CC} + 0.3$	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	$V_{SS} - 0.3$	$V_{DD} + 0.3$	
t_{on}	Turn-on propagation delay	(Typ) 120	150	nS
t_{off}	Turn-off propagation delay	(Typ) 94	125	
t_{sd}	Shutdown propagation delay	(Typ) 110	140	

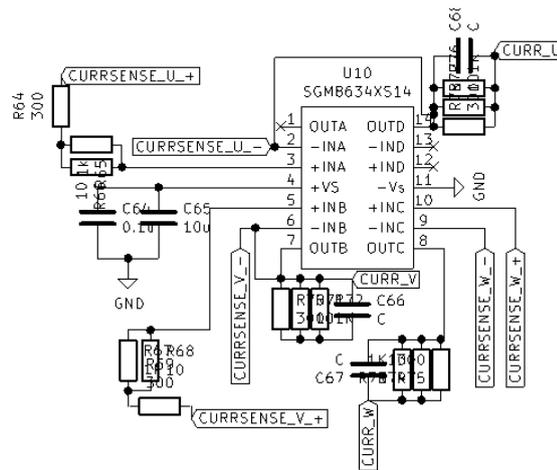


Gambar 3. 10 Rangkaian MOSFET *driver* yang didesain

Rangkaian penggunaan MOSFET *driver* dimuat pada **Gambar 3.10**. Rangkaian tersebut menggunakan input sinyal dari mikrokontroler berupa H1, H2, H3 untuk sisi *HIGH* pada fasa U, V, W pada motor serta L1, L2, dan L3 untuk sisi *LOW*. Sinyal tersebut akan diolah oleh *driver* untuk menghasilkan *output HIGH* ataupun *LOW* berupa tegangan. Sesuai dengan rangkaian umum yang tertera pada *datasheet driver*, digunakan komponen filter dan diode pada setiap MOSFET *driver*.

3.3.6 Rangkaian Pengukur Arus dan Tegangan

Pada *blocksheet phase-sensing*, terdapat rangkaian pengukur arus dan pengukur tegangan tiap fasa dan sumber energi. Digunakan *current-sense shunt* resistor dengan resistansi $0,001\Omega$ yang dirangkai seri pada setiap fasa untuk mengukur besar arus tiap fasa.



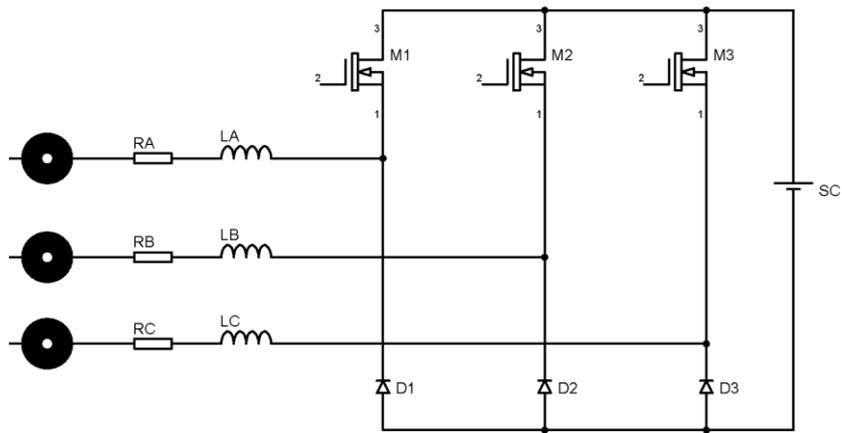
Gambar 3.11 Rangkaian Pengukur Arus dan Tegangan Pada Sistem Regenerative Braking

Drop tegangan pada resistor tersebut akan dijadikan sinyal untuk mengukur besar arus, sebagaimana hukum Ohm yang mengindikasikan bahwa arus akan senilai dengan tegangan yang dibagi dengan besar resistansi *current sense shunt resistor*. Besar drop tegangan tersebut tentu akan bernilai sangat kecil, sehingga diperlukan op-amp untuk memperbesar sinyal tegangan sebelum dibaca langsung oleh mikrokontroler. Besar amplifikasi op-amp dan *range* dari amplifikasi menjadi parameter untuk pemilihan op-amp. Digunakan op-amp SGM8634XS14 untuk mengolah sinyal tegangan drop dari *current sense shunt resistor* setiap fasa untuk mengukur besar arus setiap fasa, karena tingkat amplifikasinya yang *adjustable* dan kemampuannya yang mampu mengatasi sinyal fluktuasi dan *noise* akibat dibentuknya sinyal PWM dengan frekuensi yang besar serta penggunaan 4 channel input outputnya yang cukup sederhana dalam satu buah komponen.

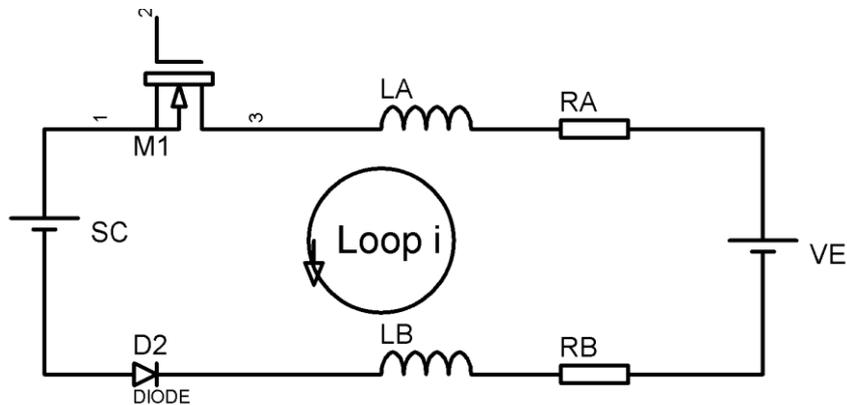
Tegangan pada setiap fasa dan sumber energi akan diukur oleh penggunaan *voltage divider* yang berisi 2 komponen resistor yang dirangkai secara seri. Drop tegangan pada resistor dengan nilai yang lebih kecil akan dijadikan sinyal untuk mengukur besar tegangan. Rangkaian pengukur arus dan tegangan pada sistem ditunjukkan pada **Gambar 3.11**. Hasil pembacaan arus akan terbaca oleh mikrokontroler sebagai sinyal CURR_U, CURR_V, dan CURR_W. Hasil pembacaan tegangan akan terbaca oleh mikrokontroler sebagai sinyal VOLTAGE_1, VOLTAGE_2, VOLTAGE_3 sebagai tegangan setiap fasa dan AN_IN sebagai tegangan superkapasitor bank.

3.4 Desain Algoritma Kendali *Constant Current* dan *Duty Cycle*

Kendali *constant current* dikembangkan dengan menurunkan rangkaian ekuivalensi dari motor dan *converter* pada **Gambar 3.12** menjadi **Gambar 3.13** ketika sistem *regenerative*



Gambar 3.12 Rangkaian Converter



Gambar 3.13 Rangkaian ekivalensi ketika MOSFET pada Fasa U Converter bekerja

braking bekerja. Kendali dibuat dengan memodelkan sistem *regenerative braking*, merancang metode kendali algoritma, dan menerjemahkan algoritma ke bahasa pemrograman C yang dijadikan sebagai *firmware* dari mikrokontroler.

3.4.1 Pemodelan Sistem Regenerative Braking

Sistem *regenerative braking* yang dikembangkan akan bekerja dengan menyearahkan arus dan tegangan oleh *converter* dari setiap dua fasa secara bergantian. Seperti halnya dimuat pada **Gambar 3.12** yang menggambarkan ketika kontroler sistem regenerative braking akan memberikan sinyal PWM high pada rentang tertentu pada MOSFET M1, arus akan melewati kaki drain ke source, sehingga terdapat BEMF antara titik ea dan titik eb yang akan bertindak sebagai ground sesuai dengan six-step commutation. Pada kondisi tersebut, body diode pada MOSFET akan menyearahkan arus yang ditimbulkan oleh BEMF dari titik eb ke ea, agar tidak ada arus yang akan kembali ke motor, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.13**. Dengan mengaplikasikan Loop berdasarkan Kirchoff Voltage Law, maka berdasarkan rangkaian pada Gambar 3.13 dapat dituliskan sebagai berikut.

Loop i: KVL

$$U_c + V_{RD} + V_{LB} + V_{RB} - V_e + V_{RA} + V_{LA} + V_{RM1} + V_{(RSC)} = 0$$

$$U_c + R_D(i(t)) + L_e \left(\frac{d(i_{Le(t)})}{dt} \right) + R_B(i_{RB(t)}) - V_e + R_A(i_{RA(t)}) + L_A \left(\frac{d(i_{LA(t)})}{dt} \right) + R_{M1}(i_{RM(t)}) + R_{SC}(i_{RSC(t)}) = 0,$$

Dengan $i(t) = i_{Le(t)} = i_{RB(t)} = i_{RA(t)} = i_{LA(t)} = i_{RM(t)} = i_{RSC(t)} = C \frac{dU_c}{dt}$, sehingga dapat diperoleh:

$$U_c + R_D \left(C \frac{dU_c}{dt} \right) + L_e \left(\frac{d \left(C \frac{dU_c}{dt} \right)}{dt} \right) + R_B \left(C \frac{dU_c}{dt} \right) - V_e + R_A \left(C \frac{dU_c}{dt} \right) + L_A \left(\frac{d \left(C \frac{dU_c}{dt} \right)}{dt} \right) + R_{M1} \left(C \frac{dU_c}{dt} \right) + R_{SC} \left(C \frac{dU_c}{dt} \right) = 0$$

$$U_c + R_D C \left(\frac{dU_c}{dt} \right) + L_e C \left(\frac{d^2 U_c}{dt^2} \right) + R_B C \left(\frac{dU_c}{dt} \right) - V_e + R_A C \left(\frac{dU_c}{dt} \right) + L_A C \left(\frac{d^2 U_c}{dt^2} \right) + R_{M1} C \left(\frac{dU_c}{dt} \right) + R_{SC} C \left(\frac{dU_c}{dt} \right) = 0,$$

Dengan $R_T = R_A + R_B + R_D + R_{M1} + R_{SC}$ dan $L_T = L_e + L_A$,

dimana:

R_T = hambatan total (Ω)

R_A = hambatan pada Fasa Motor U (Ω)

R_B = hambatan pada Fasa Motor V (Ω)

R_D = hambatan internal diode (Ω)

R_{M1} = hambatan internal MOSFET ketika bekerja (R_{DS}) (Ω)

R_{SC} = hambatan internal supercapacitor (Ω)

L_T = induktansi total (H)

L_e = induktansi motor pada fase V (H)

L_a = induktansi motor pada fase U (H)

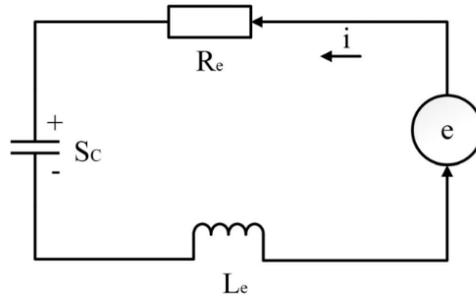
U_c = tegangan superkapasitor (V)

C = kapasitansi Supercapacitor (F)

V_e = tegangan BEMF (V)

Sehingga, dapat diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$U_c + R_T C \left(\frac{dU_c}{dt} \right) + L_T C \left(\frac{d^2 U_c}{dt^2} \right) = V_e,$$



Gambar 3.14 Rangkaian ekivalensi Sistem Regenerative Braking ketika bekerja

Secara ekuivalen, dapat dibentuk rangkaian sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.14**. Sistem bekerja dengan penggunaan sinyal PWM berupa rasio *duty cycle* pada kaki MOSFET M1, sehingga nilai tegangan supercapacitor dapat dituliskan menjadi:

$$U = V_e(D)$$

$$U = V_e \left(\frac{t_{on}}{T} \right) \tag{3.4}$$

dimana,

U=tegangan supercapacitor (V)

t_{on} =lama waktu kaki *gate* diberi sinyal oleh mikrokontroller (s)

T= total periode ketika kaki date bekerja (s)

Metode serupa juga akan dilakukan pada sistem untuk fase lainnya sampai dicapai 6 kali komutasi (*six step commutation*), berdasarkan pembacaan dari sinyal *hall sensor*. Sehingga, MOSFET pada setiap fase LOW dan HIGH akan bekerja secara bergantian sampai dengan putaran motor berhenti.

3.4.2 Desain Algoritma *Constant Current* berdasarkan Pemodelan Sistem

Pada algoritma *constant current* ini, besar arus pengereman dikendalikan untuk tetap konstan dengan menentukan nilai *duty cycle* yang dapat berubah pada setiap waktu berdasarkan selisih nilai BEMF dari motor dan tegangan supercapacitor. Besar BEMF dapat diketahui berdasarkan nilai besar tegangan antara 2 fasa motor ketika berputar. Besar BEMF dan arus tersebut akan dijadikan basis perhitungan untuk menentukan besar *duty cycle* yang akan dikirimkan ke kaki *gate* dari MOSFET. Berdasarkan persamaan yang dihasilkan dari pemodelan pada persamaan 3.4, didapatkan persamaan 3.5 untuk kendali besar *duty cycle*. Algoritma penentuan *duty cycle* tersebut digambarkan pada *flowchart* sebagaimana dimuat pada **Gambar 3.15**.

$$D = \frac{I_{cont}R}{V_e - U_c} \tag{3.5}$$

dengan,

D = besar *duty cycle*

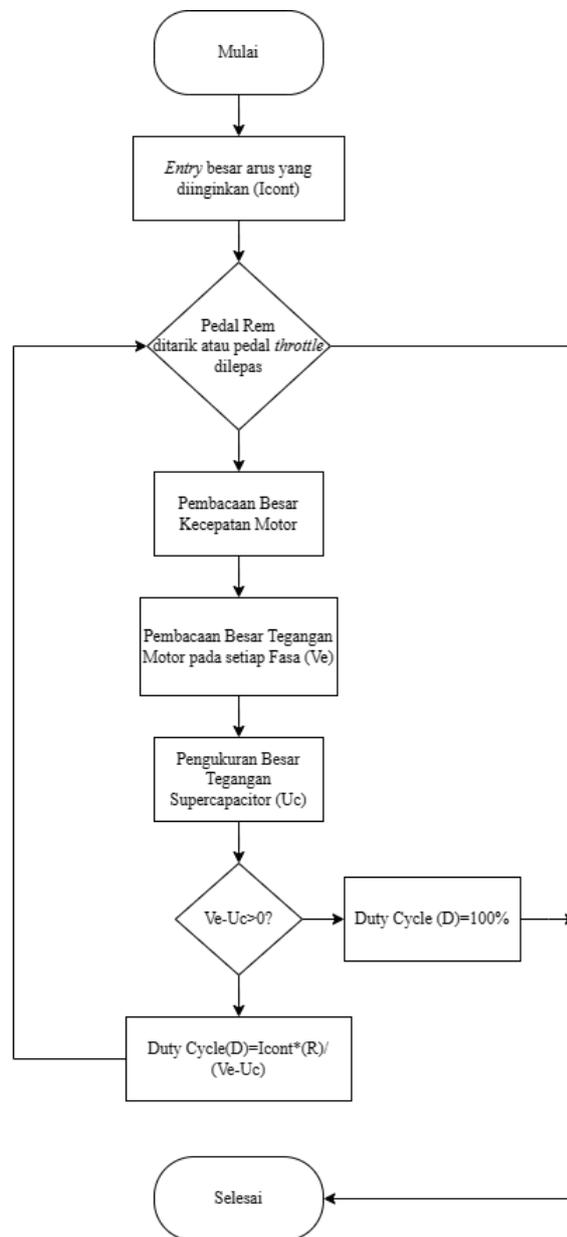
I_{cont} = target arus (A)

R = Besar resistansi (Ω)

V_e = BEMF (V)

U_c = Tegangan Supercapacitor (V)

Sistem *regenerative braking* akan bekerja ketika pedal rem ditekan atau pedal *throttle* dilepas. Kontroler kemudian akan membaca sinyal ketika pedal rem ditarik ataupun pedal *throttle* dilepas berdasarkan nilai tegangan keluaran potensiometer. Pembacaan Tegangan motor kemudian diukur untuk menentukan besar BEMF dan besarnya akan dibandingkan dengan pembacaan tegangan supercapacitor. Apabila selisih dari besar BEMF dan tegangan



Gambar 3.15 Flowchart Kendali *Constant Current*

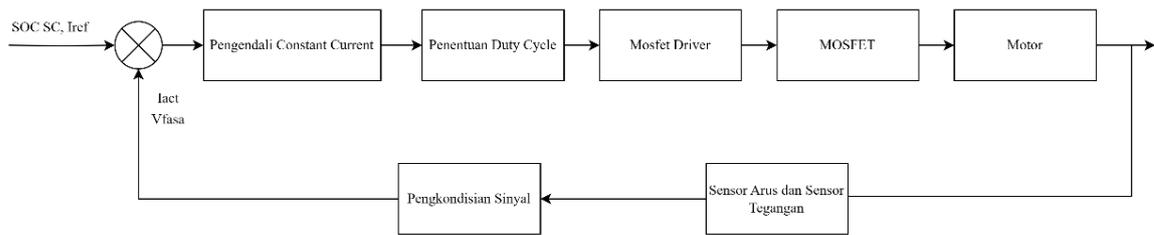
supercapacitor bernilai positif, sistem akan menentukan besar *duty cycle* untuk mendendalikan arus agar tetap konstan berdasarkan persamaan 3.5. Nilai *duty cycle* ini akan bernilai kecil di awal karena selisih BEMF dan tegangan supercapacitor yang besar. Nilai *D* akan meningkat sesuai dengan nilai BEMF yang akan menurun untuk tetap menjaga arus tetap konstan. Besar *duty cycle* tersebut akan berubah sampai dengan motor berhenti, ataupun ketika pedal rem dilepas. Berdasarkan hal tersebut, sistem akan bekerja dengan lebih maksimal ketika putaran motor tinggi.

3.4.3 Desain *Firmware* Tiap Algoritma

Agar dapat diaplikasikan pada sistem, kedua algoritma yang telah dibuat akan diterjemahkan menjadi Bahasa pemrograman C++. Digunakan *software* VisualCode untuk menerjemahkan algoritma menjadi Bahasa pemrograman C++ sampai dengan proses *compile code* untuk menghasilkan file berformat bin agar dapat dibaca oleh mikrokontroller. File berformat bin tersebut kemudian akan diupload pada sistem mikrokontroller STM32F405 yang dikomunikasikan menggunakan *hardware* ST-LINK V2 Programmer dengan akses *software* STMCUBE.

3.5 Simulasi Desain dan Algoritma Sistem *Regenerative Braking* berbasis *constant current* dan *duty cycle*

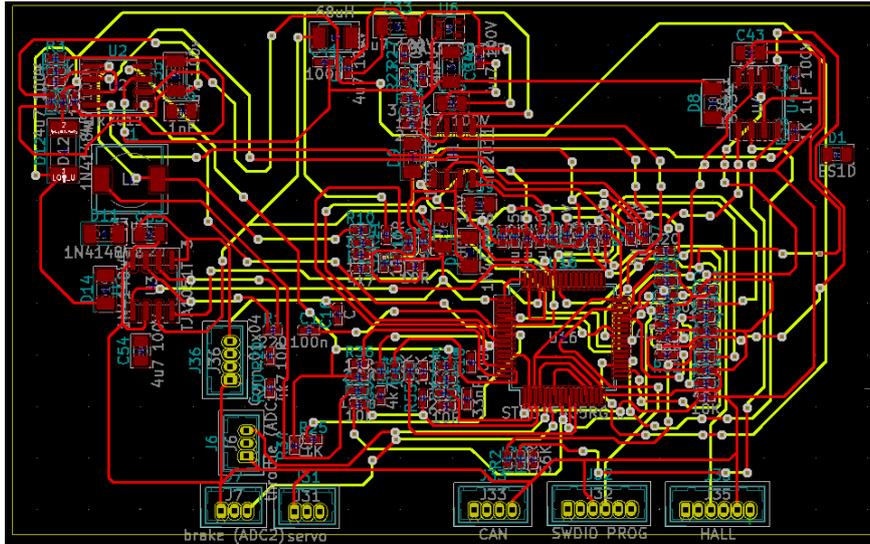
Setelah desain dan algoritma sistem dibuat, dilakukan simulasi sistem menggunakan Simulink dengan memodelkan rangkaian sistem *regenerative braking* dan motor berdasarkan parameter yang telah didapatkan sebagaimana dimuat pada **Tabel 3.1**. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *base* kecepatan motor dari 30 km/h atau setara dengan 260RPM untuk motor *on-wheel* dengan rasio 1:1 sampai dengan motor berhenti bergerak. Nilai arus I_{cont} yang dikendalikan divariasikan dengan nilai 20A dan 30A pada kendali *constant current*. Variasi nilai 20A dan 30A dipilih sebagaimana rata-rata penggunaan arus dari motor yang berkisar antara 20-30A. Variasi kedua arus target tersebut juga digunakan untuk melihat performansi sistem dengan batas arus yang tidak jauh dari batas energi yang dapat disimpan pada superkapasitor, dengan tujuan agar dapat mengisi energi pada superkapasitor dengan cepat. Hasil simulasi pada *scope* akan perubahan tegangan supercapacitor, dan juga besar perubahan arus setiap waktu yang ditampilkan dalam bentuk grafik yang ditampilkan pada sub-bab 4.1.



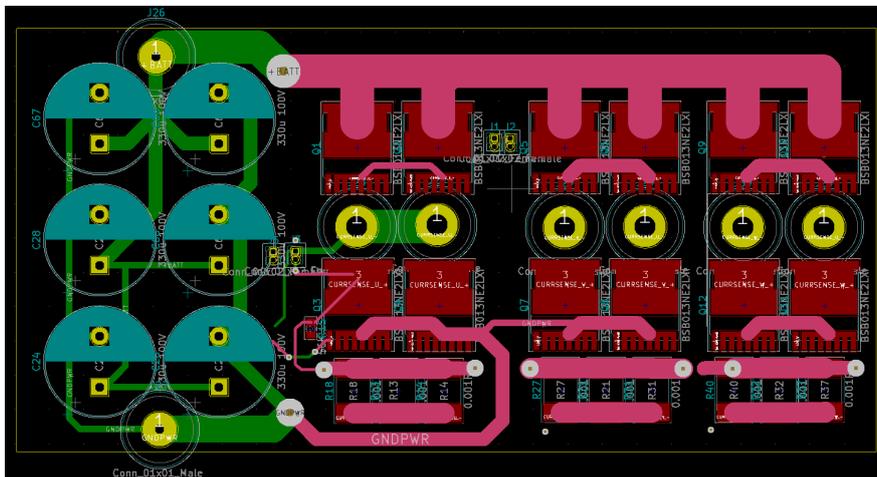
Gambar 3.16 Diagram Blok Sistem Kendali Constant Current

3.6 Desain Board Sistem *Regenerative Braking*

Berdasarkan skematik pada setiap *blocksheet*, *board* dari sistem didesain menggunakan *software* KiCad. *Board* didesain dengan menggunakan 4 layer dengan proteksi *coating* untuk menghindari adanya debu yang masuk pada celah *vias* yang menghubungkan setiap *layer*. Desain *board* sistem 4 *layer* dirancang dengan fungsi spesifik yang berbeda dari setiap *layer*. *Layer board* pertama pada berfungsi sebagai rangkaian *high power* yang berisikan rangkaian *output* dari sistem berupa terminal superkapasitor. *Layer* kedua dari *board* digunakan sebagai *input* dari sistem berupa terminal rangkaian fasa dari motor. *Layer* pertama dan kedua berisikan komponen berupa MOSFET dan diode *high power* sebagai penghubung *power transfer* dan motor, *current sense resistor* sebagai sensor arus, *voltage divider resistor* sebagai pengukur tegangan, dan juga plat berbahan aluminium dan mangan. Rangkaian dirancang dengan lebar jalur dan jarak antar jalur sesuai dengan *standard* IPC-2221 untuk besar arus maksimal sebesar maksimal 100A dan tegangan sebesar 72V. Rangkaian *output* dari terminal superkapasitor pada *layer* pertama dan rangkaian fasa pada *layer* kedua dipisahkan agar tidak terjadi interferensi dari medan magnet yang timbul karena arus tinggi yang ditransmisikan oleh motor ataupun superkapasitor. Timbulnya interferensi tersebut dapat menyebabkan sinyal disturbansi yang dapat mempengaruhi kendali dari mikrokontroler. *Layer* ketiga berisi rangkaian rangkaian sinyal dan kontrol dengan penempatan komponen mikrokontroler, Op-amp, *limiter hall sensor*, pin pembacaan *hall sensor*, pin *connector* ADC dari pembacaan *throttle*, pin *connector* ADC dari pembacaan *brake*, dan juga pin komunikasi berupa UART, I2C serta SWDIO sebagai *uploader firmware* ke mikrokontroler. *Layer* keempat digunakan sebagai rangkaian sisi negatif dari sinyal. Keseluruhan *layer* pada *board* ditunjukkan pada **Gambar 3.17**, dengan *layer* pertama, kedua, ketiga dan keempat berturut-turut digambarkan dengan jalur berwarna hijau, merah muda, merah tua dan kuning.



(a)



(b)

Gambar 3.17 Desain Board Sistem Regenerative Braking (a) *Board low power*, (b) *Board high power*

3.7 Evaluasi Desain Board Berdasarkan Standard IPC-2221

Desain *board* dari sistem akan dievaluasi berdasarkan standard IPC-2221 untuk menghindari adanya jalur rangkaian yang putus ataupun terjadinya *short circuit* akibat bertemunya titik dari bagian jalur berpotensi tinggi dan jalur berpotensi rendah. Evaluasi juga dilakukan untuk menghindari jarak antarjalur yang terlalu sempit agar tidak terjadi kebocoran arus antar konduktor dan juga untuk memperkecil jarak bebas antarjalur (*clearance*) untuk memaksimalkan luasan dari *board*. Pada setiap *layer board*, digunakan nilai lebar rangkaian dan *clearance* yang berbeda, sesuai dengan besar arus dan tegangan yang digunakan pada setiap *layer*. Layer pertama dan kedua tergolong *high power*, dimana digunakan arus maksimal 60A dan tegangan maksimal 72V. Sehingga mengacu pada standar IPC-221

sebagaimana dituliskan pada persamaan 3.7, lebar jalur minimal untuk penggunaan arus 60A pada *board* yang dilapisi oleh *coating* dengan toleransi kenaikan suhu 150C dan panjang jalur maksimal 100mm adalah sebesar 58mm. Sedangkan untuk *clearance* dengan rating tegangan maksimal 72V pada *board* terlapisi *coating* polimer adalah sebesar 0,13mm. Pada desain *board* untuk *layer* pertama dan kedua, lebar jalur minimal adalah sebesar 59,2 mm dengan *clearance* minimal sebesar 13mm, sehingga lebar jalur minimal dan jarak antar jalur minimal telah memenuhi standar.

$$I = K(\Delta T)^{0,44}(WH)^{0,725} \quad (3.6)$$

dimana,

I=besar arus maksimal (A)

K= konstanta *board* (0,024 untuk jalur di dalam *board* dan 0,048 untuk jalur di atas *board*)

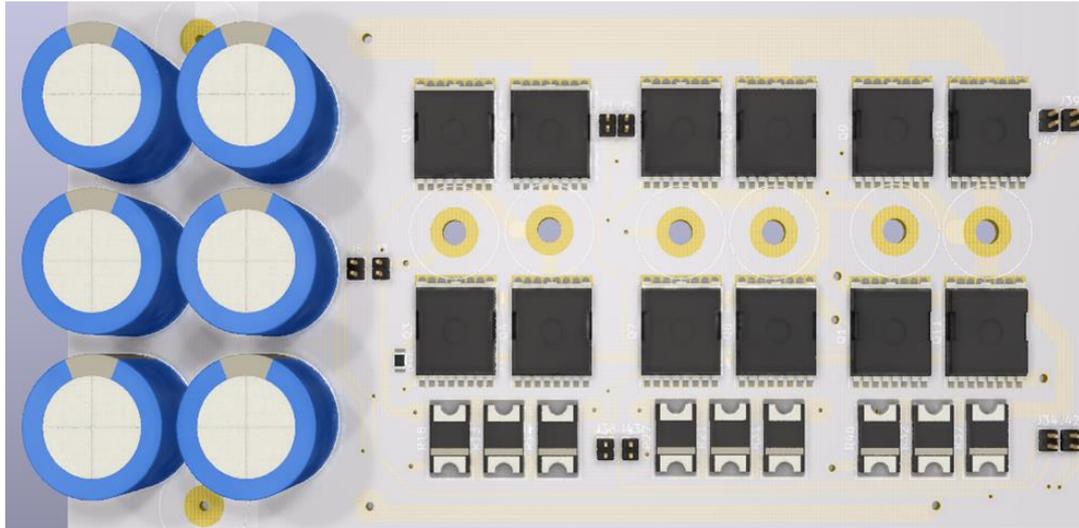
ΔT =Kenaikan suhu yang dapat diterima oleh material *board* (C)

W=Lebar jalur (mm)

H=tebal jalur (mm)

3.8 Implementasi Sistem

Untuk mengintegrasikan seluruh sistem yang telah dirancang untuk diimplementasikan, dilakukan integrasi *hardware* dan juga *firmware*. Integrasi *hardware* pertama kali dilakukan dengan *assembly* komponen pada *board* yang telah dicetak. *Assembly* setiap komponen dilakukan dengan bantuan solder uap dan juga *heater* uap untuk komponen *power transfer* yang memiliki kaki di tengah *body* komponen. *Assembly* komponen pada *board* ditunjukkan sebagaimana terdapat pada **Gambar 3.18**. *Assembly* supercapacitor bank sesuai perhitungan juga dilakukan secara parallel dengan *assembly* komponen pada *board*. Terminal *output* dari Superkapasitor bank dilengkapi dengan *socket Anderson* 120A untuk menghindari adanya *spark* ketika dipasang ke output dari *board* sistem *regenerative braking*. Untuk keperluan *safety* ketika terjadi lonjakan arus akibat kegagalan sistem, digunakan *fuse* dengan rating 150A pada superkapasitor *bank*. Supercapacitor *bank* kemudian dikoneksikan ke *board* melalui *socket Anderson* dan fasa dari motor dikoneksikan ke *board* melalui skun berbahan kuningan bawaan motor dengan terminal yang terdapat pada *board*. Output dari pedal rem, pedal *throttle* dan juga *hall sensor* dari motor dikoneksikan ke *board* dengan menggunakan *socket* standar otomotif.



Gambar 3.18 Desain 3D *board full assembly* dengan komponen

Tabel 3. 5 Konfigurasi pin input dan output dari mikrokontroler STM32F4

Nama PIN	Fungsi
A1	Analog Input Tegangan Baterai
B1	PWM ke IR2110S (1) (31,3 kHz)
B9	PWM ke IR2110S (2) (31,3 kHz)
B8	PWM ke IR2110S (31,3kHz)
A1	Analog Input Tegangan Fasa motor U
A2	Analog Input Tegangan Superkapasitor Bank
A3	Analog Input Tegangan Fasa motor V
A4	Analog Input Tegangan Fasa motor W
A8	Analog Input Filter Sensor Arus
A5	Analog Input Sensor Arus
A6	Analog Input Pedal Gas
A7	Analog Input Pedal Rem
24	Indikator LED
26	Indikator LED

Setelah dilakukan *assembly hardware*, dilakukan integrasi *firmware* berisi algoritma kendali dengan mengatur *port* output dan *port* input pada pin mikrokontroler STM32F4. Pin diatur sebagaimana dituliskan pada **Tabel 3.5**. Algoritma akan dikonversikan agar diperoleh nilai *duty cycle* yang diatur pada pin output yang dapat menghasilkan sinyal PWM untuk setiap sinyal *gate* MOSFET sesuai dengan persamaan 3.5. Nilai kecepatan dari motor dapat diperoleh melalui pembacaan *hall sensor* dari motor yang dilengkapi dengan filter pentabil tegangan. Pembacaan *hall sensor* tersebut disalurkan pada pin input.

Setelah konfigurasi pin telah diatur, penerapan algoritma *constant current* dan juga algoritma *duty cycle* serta pengkondisian sinyal sensor akan diintegrasikan pada satu *file firmware*. Dilakukan proses pemrograman menggunakan Bahasa C untuk melakukan integrasi setiap *source code*. *Firmware* akan di-*compile* untuk dikomunikasikan dengan mikrokontroler.

Dilakukan proses kalibrasi dari pembacaan sensor tegangan dan arus berdasarkan sistem *regenerative braking* yang telah terintegrasi dengan *firmware* dan *hardware*. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan besar arus yang terbaca oleh pembacaan sensor arus yang dilengkapi filter pada mikrokontroler dan besar arus yang terbaca oleh *clampmeter*, sedangkan besar tegangan dikalibrasi dengan membandingkan pembacaan *voltage divider* yang telah diproses oleh mikrokontroler dan juga pembacaan *voltmeter*. Hasil dari pembacaan kedua sensor dan *clampmeter* serta *voltmeter* dijadikan basis untuk kembali mengkonfigurasi *firmware* untuk meningkatkan akurasi pembacaan.

Integrasi *firmware* dengan *hardware* dilengkapi dengan pemrograman untuk proses *datalogger*. *Datalogger* diatur untuk mampu memonitor dan menyimpan data tegangan dari supercapacitor dan juga fasa setiap motor, SOC superkapasitor, serta besar arus ketika proses pengereman sistem *regenerative braking* bekerja. Data tersebut berfungsi sebagai perolehan data untuk keperluan analisis dari sistem *regenerative braking*.

3.9 Pengujian Sistem

Setelah *hardware* dan *firmware* telah terintegrasi, dilakukan pengujian sistem dengan skema yang ditunjukkan pada **Gambar 3.19**. Pengujian dilakukan dengan *setting scooter FITS full load*, dengan massa total sebesar 100kg. Sistem diuji dengan menggunakan parameter kecepatan tunggal sebesar 30 km/h, dimana putaran motor sebesar 260 RPM, dengan variasi besar arus pada kendali *constant current* 20A dan 30A. Pengujian dilakukan pada *dyno test* yang terdapat pada *workshop* NOGOGENI ITS TEAM, dengan menggunakan

instrumen modul Bluetooth untuk akuisisi data. Akuisisi data juga dilakukan dari komunikasi UART pada board kendali sistem regenerative braking yang terkoneksi dengan USB pada port PC.

3.10 Analisis Performansi Sistem *Regenerative Braking*

Setelah dilakukan pengujian, tingkat besar energi yang dibangkitkan ketika sistem bekerja akan dibandingkan dengan besar energi pengereman yang diperlukan berdasarkan variasi kecepatan tertentu menuju kecepatan terendahnya. Energi yang dibangkitkan dapat diperoleh berdasarkan perkalian besar arus yang terukur dan perbedaan tegangan yang terukur setiap waktu. Besar arus dan tegangan setiap waktu dapat diketahui berdasarkan data pengukuran dari sensor yang terekam pada *datalogger* dari kontroler sistem *regenerative braking*. Performansi sistem yang telah dikembangkan akan dianalisa berdasarkan respon sistem ketika bekerja dan jangka waktu yang dibutuhkan sistem ketika mengisi energi pada superkapasitor *bank*. Selain itu, tingkat efisiensi sistem akan dianalisis dengan membandingkan besar energi pengisian dari proses pengereman secara elektrik ketika sistem *regenerative braking* digunakan dan perubahan besar energi kinetik ketika terjadi pengereman, dengan besar energi dari sistem *regenerative braking* dituliskan sebagai berikut.

$$E = \frac{1}{2}CV_2^2 - \frac{1}{2}CV_1^2 \quad (3.7)$$

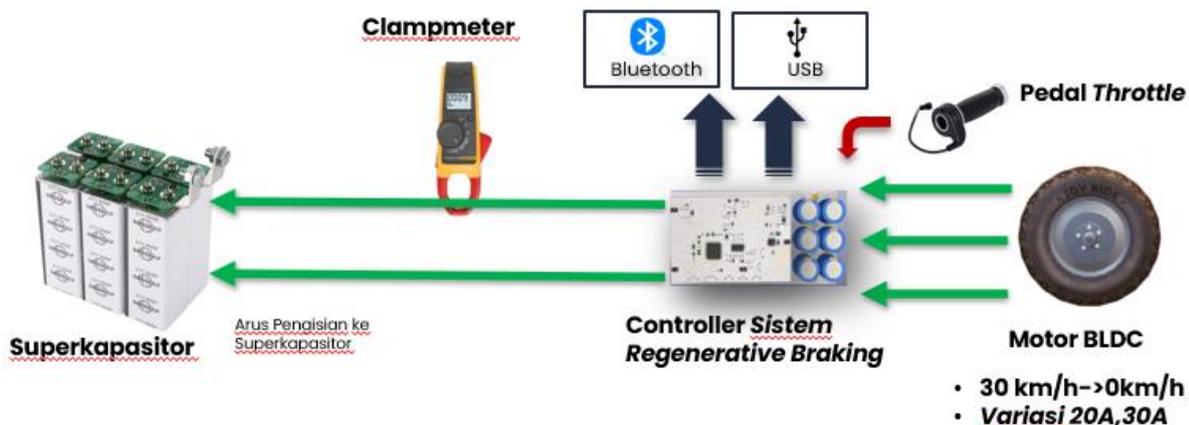
dengan,

E =Besar energi pengisian (J)

C =Kapasitansi Superkapasitor (F)

V_1 =Tegangan awal supercapacitor (V)

V_2 =Tegangan akhir supercapacitor (V)



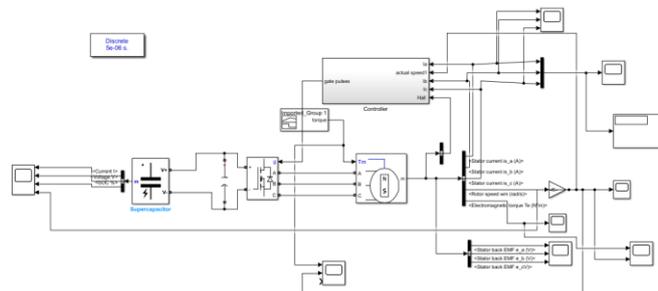
Gambar 3.19 Skema Pengujian Sistem

BAB IV

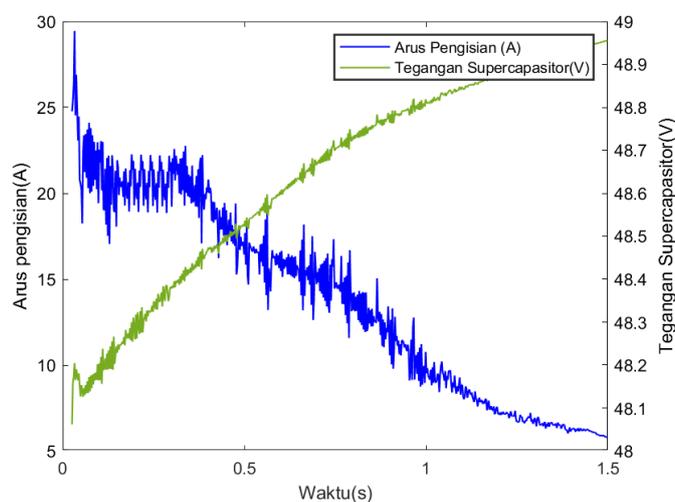
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Desain Sistem *Regenerative Braking* Berbasis *Constant Current Control*

Dengan menggunakan superkapasitor dengan spesifikasi tegangan nominal 64V 20,83F sebagaimana hasil perhitungan pada subbab 3.3.2 dan berdasarkan algoritma *constant current* yang digunakan oleh sistem RBS, dilakukan simulasi kerja sistem untuk mengetahui prediksi kinerja dan performansi sistem menggunakan software *Simulink*. Digunakan model motor BLDC dengan nilai parameter seperti pada **Tabel 3.1**. Tingkat arus balik dan juga energi hasil konversi yang dihasilkan oleh putaran balik motor berdasarkan kebutuhan beban sampai dengan kecepatan tertentu dapat diketahui dengan menggunakan simulasi dengan blok sistem akhir yang ditampilkan pada **Gambar 4.1**. Hasil simulasi menunjukkan bahwa telah dihasilkan arus balik ketika sistem bekerja dari kecepatan 30km/h yang berdeselerasi sampai *scooter* berhenti, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.2** sampai dengan **Gambar 4.5**.

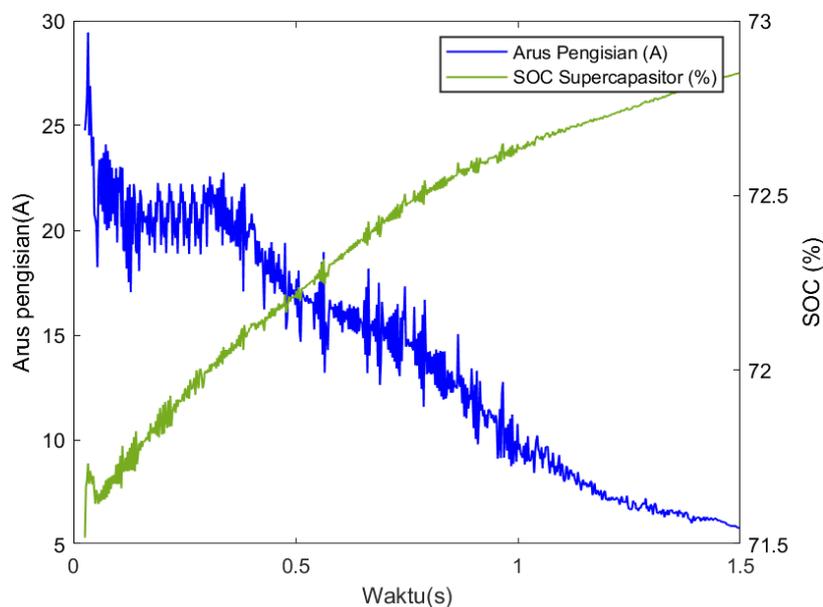


Gambar 4.1 Bagan Simulasi Menggunakan Matlab Simulink

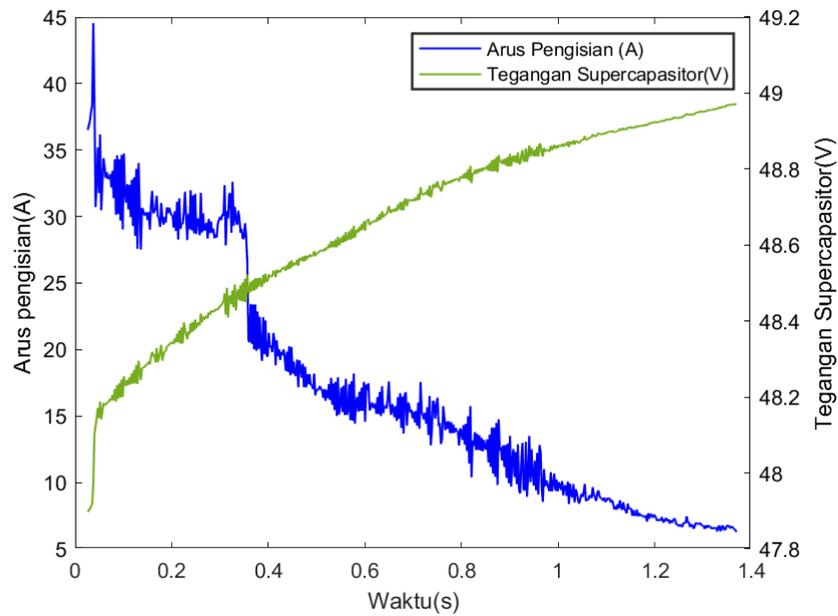


Gambar 4.2 Plot Arus Pengisian dan Tegangan Supercapacitor terhadap waktu Hasil Simulasi dengan Menggunakan Setpoint 20A

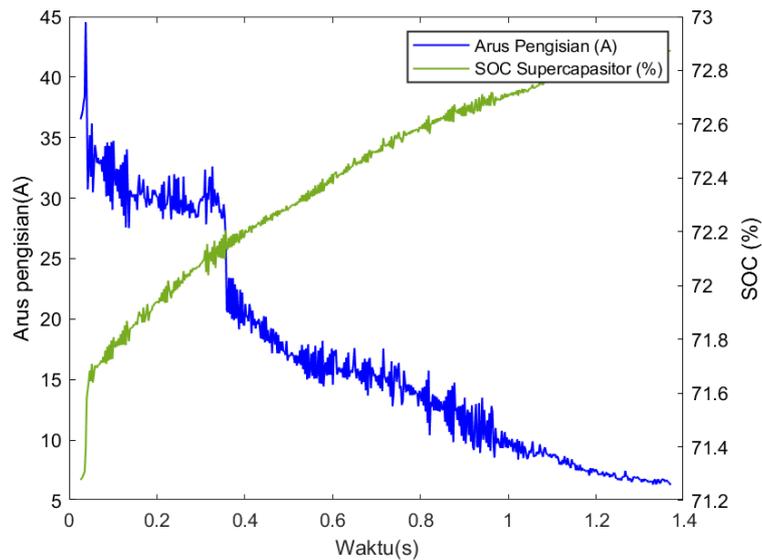
Simulasi dilakukan dengan memodelkan algoritma sistem untuk mengendalikan arus balik agar tetap konstan, berdasarkan tegangan BEMF yang terbaca setiap waktu untuk menentukan rasio *duty cycle* yang akan dikirimkan menjadi sinyal *gate* dari converter *dual bridge*. Dengan menggunakan algoritma sistem tersebut, pada **Gambar 4.2**, dapat dianalisis bahwasanya terdapat arus balik dengan besar arus telah mencapai nilai setpoint sebesar 20A. Namun, terdapat lonjakan arus yang cukup jauh dari nilai setpoint pada awal sistem bekerja, dengan nilai sebesar 34,2A. Hal ini dapat terjadi karena sifat *inrush current* dari supercapacitor yang cenderung cukup besar (Kiddee, et al., 2018). Adanya *inrush current* ini akan dijadikan basis untuk menentukan spesifikasi MOSFET dari modul *Regenerative Braking* berupa *rating* arus DS (I_{DS}). Nilai arus pada setengah durasi akhir tidak dapat dipertahankan dengan nilai setpoint, dimana terjadi penurunan arus pengisian dengan besar di bawah setpoint. Hal ini dapat diakibatkan oleh BEMF dari motor yang menurun dan nilai tegangan supercapacitor yang terus meningkat. Tegangan supercapacitor meningkat secara kontinyu, dimana mengindikasikan supercapacitor berhasil diisi dengan arus balik yang dihasilkan oleh kerja sistem (Chaofeng Pan, 2020). Dapat dilihat pada **Gambar 4.3**, dimana nilai *State of Charge* (SOC) meningkat secara kontinyu, dengan perubahan yang cukup signifikan dari angka 71% menjadi 72,8% dalam kurun waktu 1,5s.



Gambar 4.3 Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu hasil simulasi setpoint 20A



Gambar 4.4 Plot Arus Pengisian dan Tegangan Supercapacitor terhadap waktu Hasil Simulasi dengan Menggunakan Setpoint 30A



Gambar 4.5 Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu Hasil Simulasi setpoint 30A

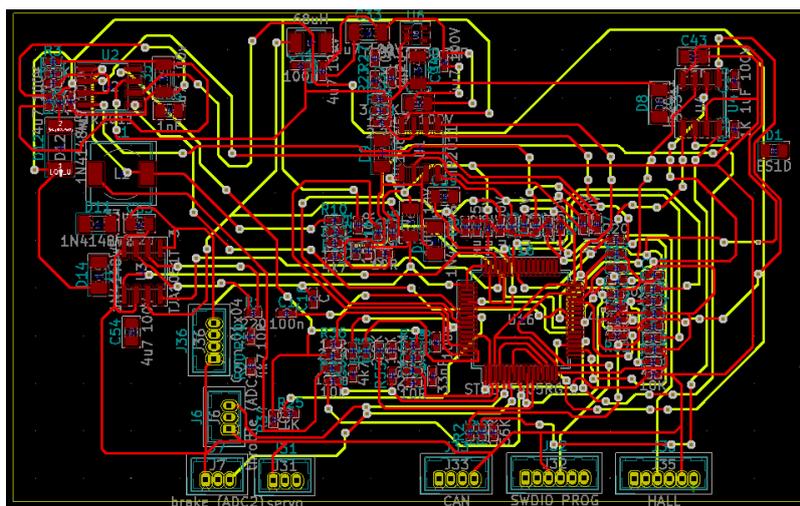
Pada penggunaan setpoint 30A, nilai arus pengisian dapat dipertahankan pada 0,4s pertama, sedangkan selanjutnya nilai arus pengisian menurun secara kontinyu. Tegangan supercapacitor yang cenderung naik dengan perubahan yang cukup signifikan dengan gradien yang cukup tajam, dimana mengindikasikan bahwa pengisian energi cenderung lebih besar dan cepat, dibandingkan dengan pengisian energi pada setpoint 20A. Hal tersebut juga

menjadikan RPM dari motor yang lebih cepat menurun, sehingga BEMF dari motor akan lebih cepat menurun (Kivanc & Ustun, 2021).

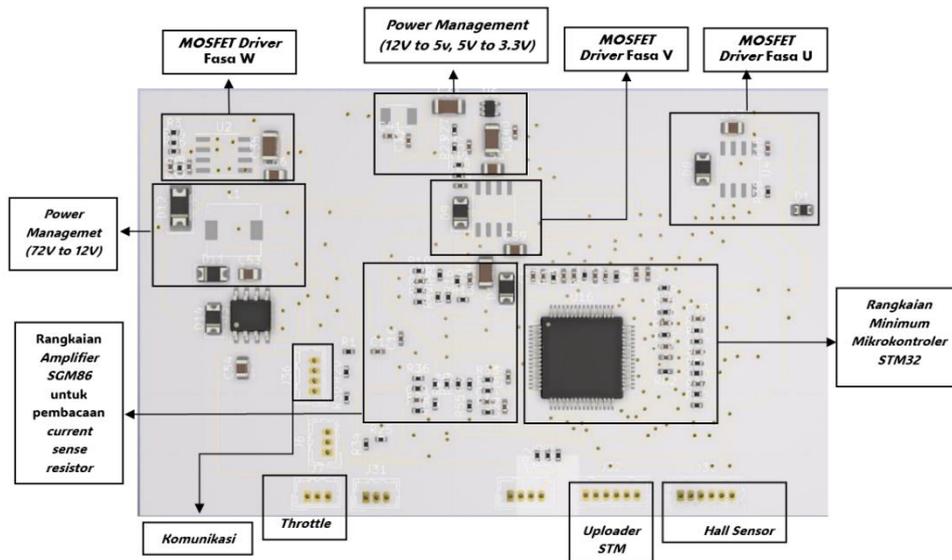
Dengan sampling waktu selama 80 ms, nilai arus pengisian yang terlihat telah mencapai setpoint, tetapi dalam durasi yang cukup pendek, yakni sekitar 1,5s untuk setting arus konstan sebesar 20A dan 1,37s untuk setting arus konstan sebesar 30A. Tingkat durasi tersebut berturut-turut dapat diamati pada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**. Nilai putaran motor 260 RPM digunakan sebagai basis simulasi karena motor mencapai 260 rpm untuk menggerakkan skuter listrik dengan kecepatan 30 km/h.

4.2 Hasil Desain Board dan Evaluasi Board

Board dikembangkan berdasarkan *blocksheet schematic* yang tertuang pada **Gambar 3.2**. Dengan mengaplikasikan skematik dan rangkaian minimum setiap komponen yang digunakan *datasheet*, dikembangkan desain jalur sinyal *high & low* pada layer atas dengan jalur merah dan sinyal *ground* atau *negative* dengan jalur kuning, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.6 (a)**. Kedua jalur tersebut berada pada satu *board* yang dapat dilihat pada **Gambar 4.6 (b)**. *Board* jalur sinyal tersebut dipisahkan dari *board high power*, untuk menghindari *ground loop* apabila terjadi *short circuit* dari rangkaian converter yang menghantarkan arus dengan nominal yang cukup besar. *Board* didesain dengan tebal hantaran 3.5mm dengan bagian atas *board* untuk jalur sinyal *high & low* (merah) dan bagian bawah untuk jalur sinyal *ground* (kuning), dengan lebar jalur minimal sebesar 10 mils atau 0.02 mm dan *electrical spacing* (jarak antar jalur) minimal sebesar 5 mils atau 0.01mm.



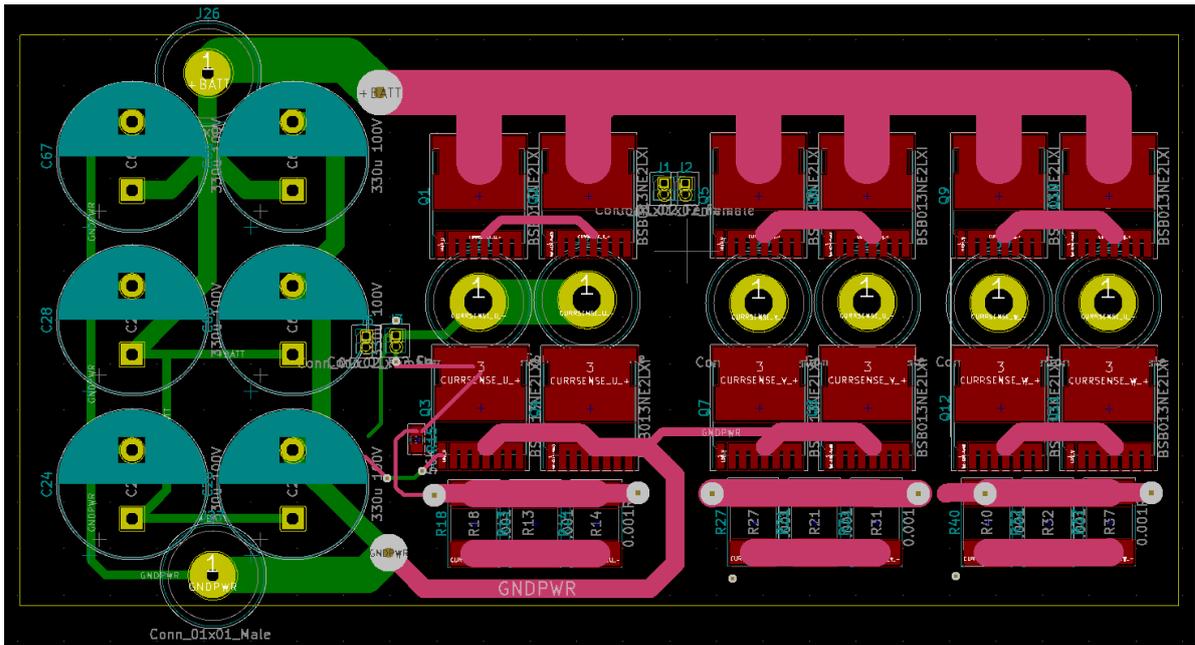
(a)



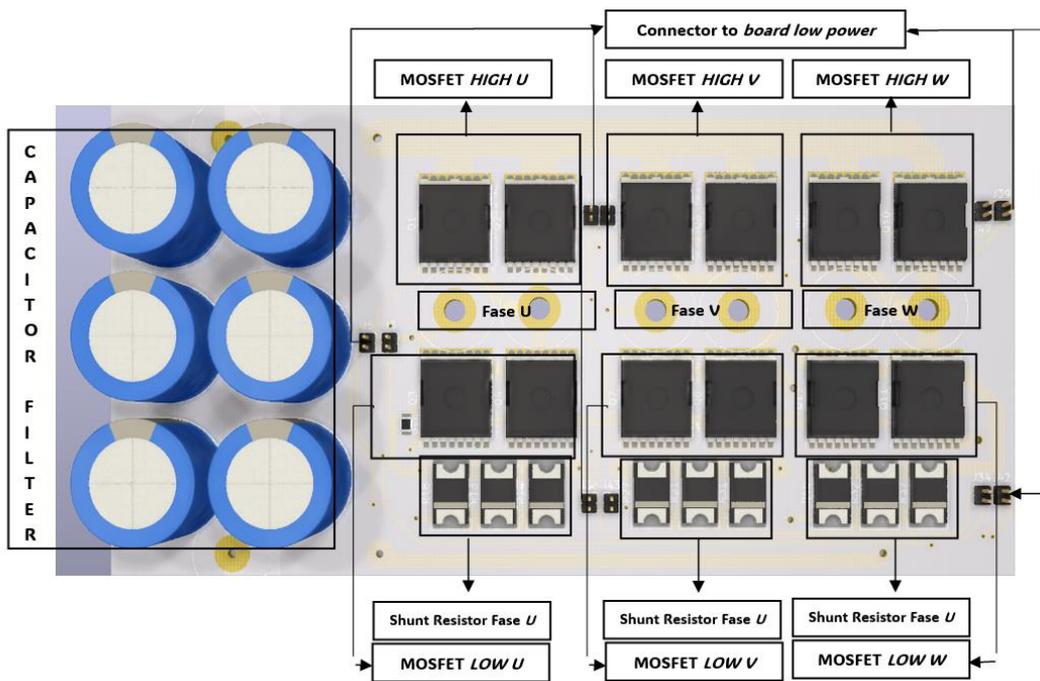
(b)

Gambar 4.6 Desain Board untuk Jalur Sinyal (Low Power) (a.) Desain Jalur, (b.) Desain board 3D

Lebar jalur dan *electrical spacing* tersebut dikonfigurasi berdasarkan standar IPC 2221 untuk dapat menghantarkan arus maksimal sebesar 2A dan mengaplikasikan tegangan maksimal sebesar 15V. *Board* ini berisi rangkaian *power management*, akuisi data dari pembacaan besar arus dan tegangan dari rangkaian sensor pada *board high*, rangkaian *minimum reference* dari mikrokontroler, rangkaian untuk komunikasi dan juga rangkaian untuk *uploader*. Rangkaian *power management* berfungsi untuk mengkonversikan tegangan besar dari *supply* sebesar 60-72V menjadi 3 besaran tegangan, yakni tegangan dengan nominal +12V, +5V dan +3.3V. Tegangan 12V digunakan sebagai *supply* dari MOSFET *driver* dan amplifier dari *current sense resistor*. Tegangan +5V digunakan sebagai *supply* dari *hall sensor* motor, sensor suhu, LED, dan juga modul komunikasi *Bluetooth*. Tegangan +3.3V digunakan sebagai *supply* dari mikrokontroler dan *throttle* serta sensor suhu, juga sebagai tegangan referensi untuk pengukuran tegangan dan BEMF. Rangkaian *power management* ini dilengkapi dengan induktor dan kapasitor sebagai filter untuk mengurangi *noise* berupa *ripple* yang dihasilkan oleh regulator tegangan sesuai dengan rangkaian yang tertera pada *datasheet* modul. Rangkaian akuisisi data dari sensor terdiri dari pembacaan sinyal dari keluaran rangkaian *voltage divider* pada *board high power*, rangkaian output dari amplifier yang memproses sinyal dari drop tegangan yang ditimbulkan oleh *current sense resistor* dimana terangkai seri dengan fasa dan *supply* untuk pengukuran arus, rangkaian pembacaan sinyal dari *hall sensor* motor dan *hall sensor throttle*. *Board low power* ini juga terdiri oleh output sinyal untuk mengirimkan sinyal PWM dari mikrokontroler ke MOSFET *driver*.



(a)



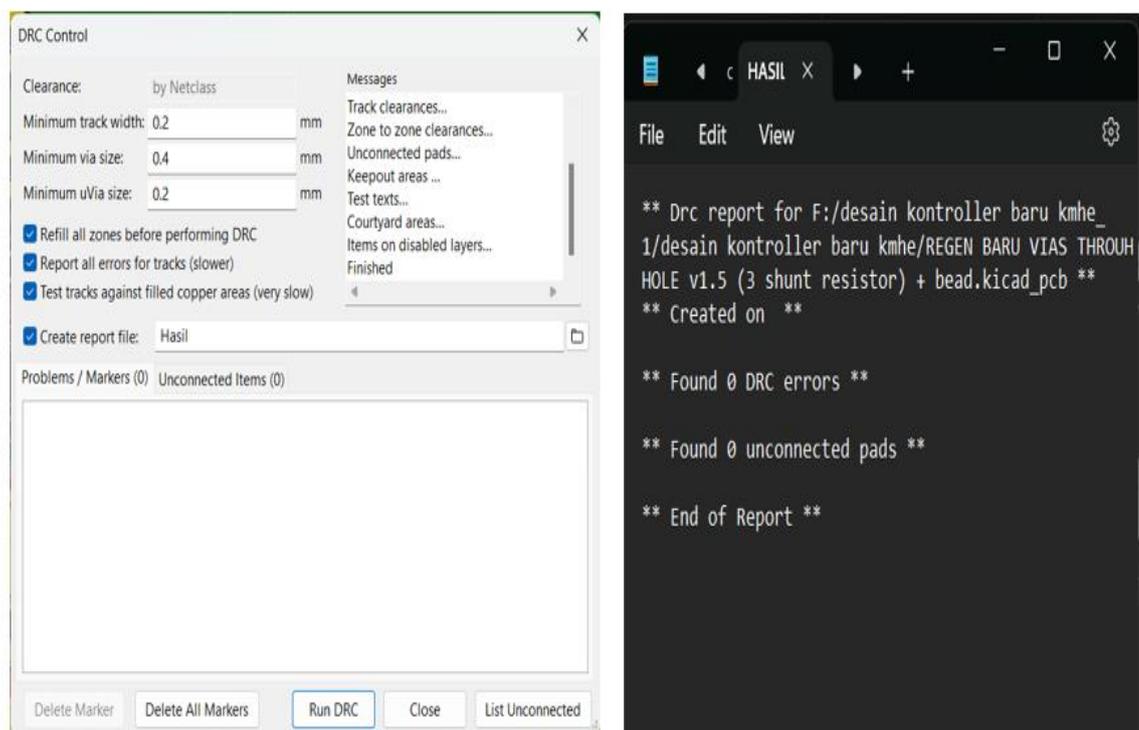
(b)

Gambar 4.7 Desain Board untuk Jalur Fasa dan Jalur Supply (High Power) (a.) Desain Jalur, (b.) Desain board 3D

Board high power dikembangkan dengan mengatur tebal *board* sebesar 5mm. *Board* didesain dengan memisahkan jalur 3 fasa dari motor yang menjadi input dari converter dimana rangkaian terdiri dari 2 MOSFET parallel diseri dengan *current sense resistor* yang dihubungkan dengan jalur *power source* sebagai output yang menuju superkapasitor. *Board*

didesain dengan jalur berwarna ungu sebagai jalur 3 fasa dari motor dan jalur berwarna hijau untuk jalur *power source*. Digunakan lebar jalur minimal 120 mils atau 3,5 mm dengan *electrical spacing* (jarak antar jalur) sebesar 25 mils atau 0,6mm. *Board high power* dikonfigurasi agar dapat menghantarkan arus sebesar 3x30A, sebagai batas toleransi arus ketika terjadi lonjakan arus dari motor ketika sistem bekerja, dengan tegangan maksimal sebesar 100V. Pada jalur fasa dekat dengan kaki drain ataupun *source* dari MOSFET, digunakan blok jalur dengan tebal minimal 3mm untuk mengatasi lonjakan arus ketika sistem bekerja. Sebagai penghubung antara *board high power* dan *low power*, digunakan connector JST sebagai penghantar sinyal perintah ataupun akuisi sinyal pembacaan sensor dari *board high power* ke *board high low power* ataupun sebaliknya.

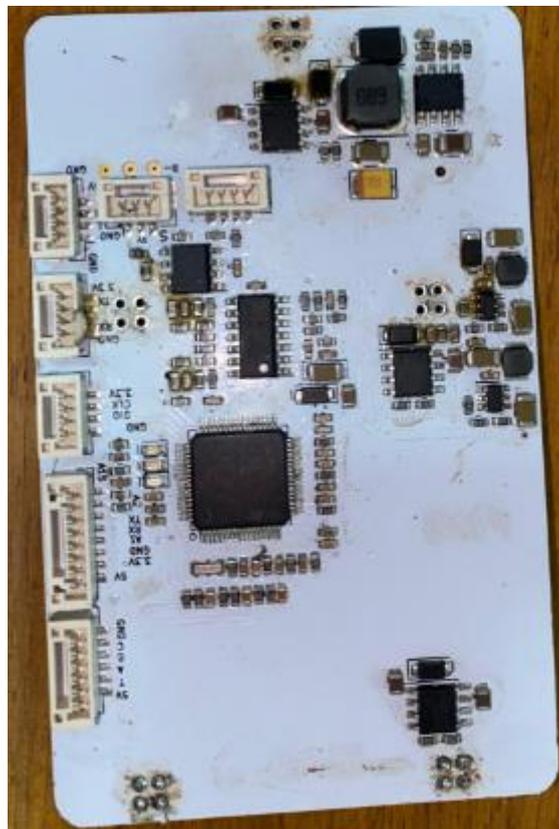
Untuk mengetahui konfigurasi jalur yang digunakan telah sesuai dengan standar IPC 2221 agar sistem dapat menghantarkan arus dan tegangan sesuai dengan kelasnya, digunakan bantuan *electrical rules check* (ERC) pada software KiCad untuk inspeksi jalur. Hasil inspeksi jalur tertuang pada **Gambar 4.8**, dimana inspeksi dilakukan berdasarkan *net class* atau penggunaan kelas setiap jalur. Hasil inspeksi menunjukkan bahwasaya desain *board* telah memenuhi standar IPC 2221, dengan tidak adanya *problem*, *error* ataupun *marker* dari hasil *report* inspeksi jalur. Hal ini mengindikasikan bahwa desain yang dikembangkan telah memenuhi standar, dimana *board low power* mampu diberi tegangan 3.3V-72V dan dialiri



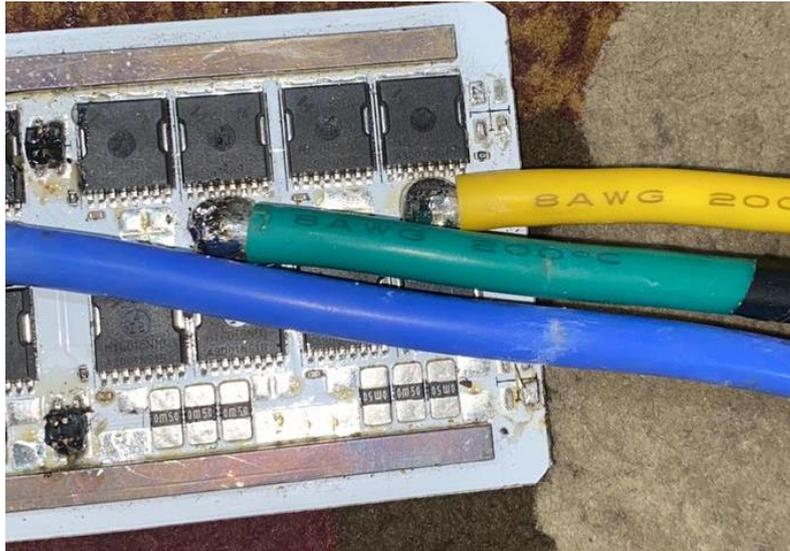
Gambar 4.8 Hasil Inspeksi Evaluasi Board berdasarkan Standar IPC-221

arus sebesar 0,3-2A sesuai dengan *rating* dan penggunaannya. Begitu halnya untuk *board high power*, dimana sesuai standar *board* telah mampu diberi tegangn 64-72V dengan dialiri arus sebesar 120A. *Board* juga dinilai mampu menahan perubahan panas sampai dengan 80C. Hasil inspeksi ini menunjukkan bahwasanya desain dari *board* dapat dimanufaktur dan diassembly dengan komponen sesuai dengan datasheet.

Hasil manufaktur dan *assembly board low power* dan juga *board high power* dapat dilihat pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10**. *Soldering pad* pada *board high power* dijadikan pad untuk menghubungkan *board* dengan kabel AWG8 yang selanjutnya digunakan untuk menghubungkan supercapacitor bank dan juga 3 kabel fasa motor. *Connector JST* dihubungkan dengan media *connector pad* pada *board high power* dan soldering pad berbahan tembaga di bagian atas *board low power*.



Gambar 4.9 Hasil Board jadi untuk Jalur Sinyal (*Low Power*)



Gambar 4.10 Hasil Board jadi untuk Jalur Fasa dan Jalur Supply (High Power)

4.3 Hasil Implementasi Sistem

Berdasarkan hasil *board* yang telah dicetak, hasil *board* yang disassembly dapat dilihat pada **Gambar 4.11**. *Heatsink* dipasangkan pada sisi *high power* untuk dapat menyerap disipasi daya berupa peningkatan panas (*heat*) ke luar dengan lebih cepat. Hal ini dilakukan agar MOSFET tetap berada pada kondisi temperature kerja idealnya dan mengantisipasi terjadinya *short-circuit* karena kondisi *overheat* pada kaki *Drain* dari MOSFET yang rentan karena durasi *switching* yang cepat dan penggunaan arus yang cukup besar.

Modul yang telah disassembly kemudian diuji dengan menggunakan putaran motor tanpa beban untuk mevalidasi bacaan sensor. Pengujian dilakukan dengan menggunakan clampmeter Kyoritsu 2003A dengan resolusi 0,1A dan 0,1V ketelitian 1.0% yang telah teruji



(a)

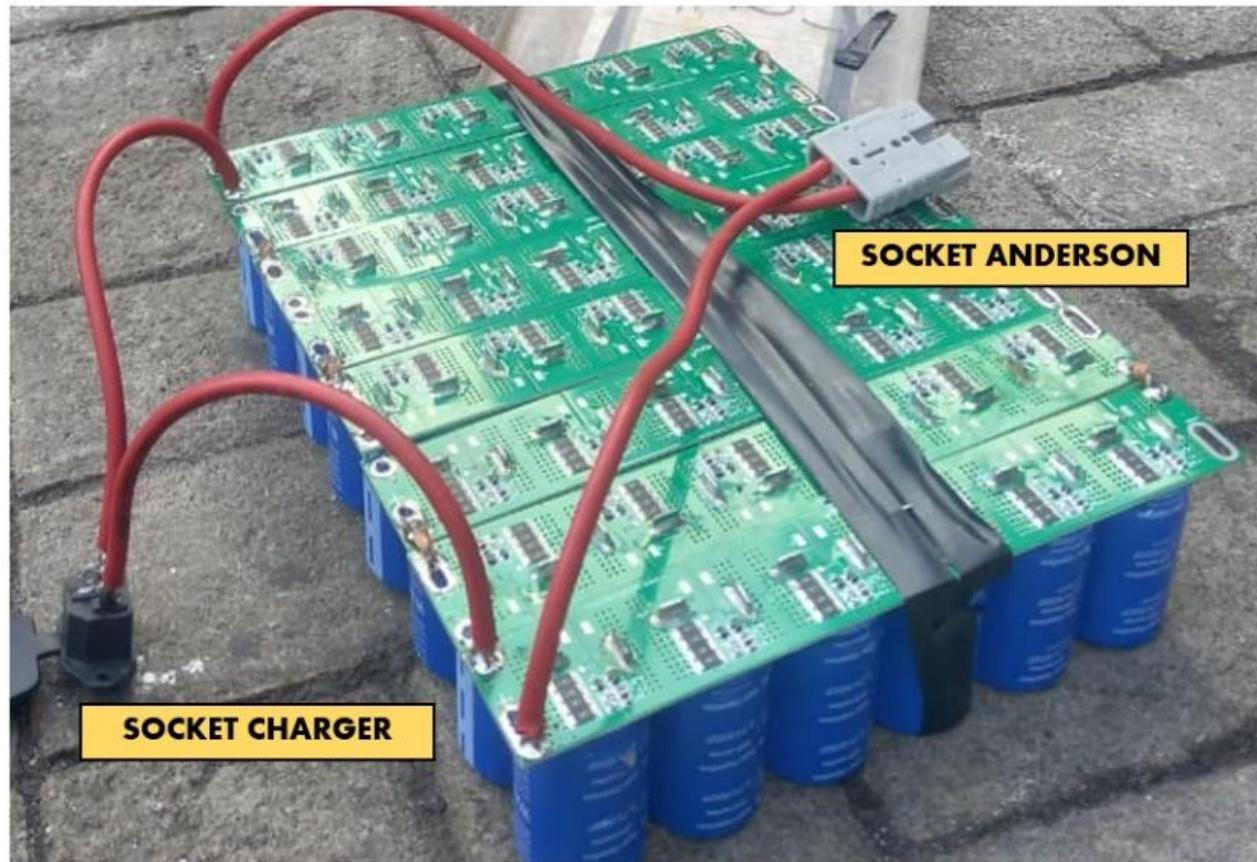


(b)

Gambar 4.11 Hasil *Assembly Board* tampak (a) atas, (b) samping

standar IEC61010 untuk pengukuran arus dan tegangan. Untuk pengujian pembacaan RPM dari motor, digunakan tachometer DT-2234C+ dengan resolusi 0.1 RPM ketelitian 0.05%. Hasil perbandingan pembacaan sensor arus, tegangan dan kecepatan dari modul ditampilkan pada **Tabel 4.1**. Hasil tersebut menunjukkan bahwa hanya terdapat kesalahan pembacaan paling besar adalah 3,87%. Nilai tersebut masih berada di dalam ambang batas 10% untuk akurasi pengujian, sehingga penggunaan sensor pada pada modul layak digunakan sebagai pengukuran pada *datalogger* untuk pengujian sistem.

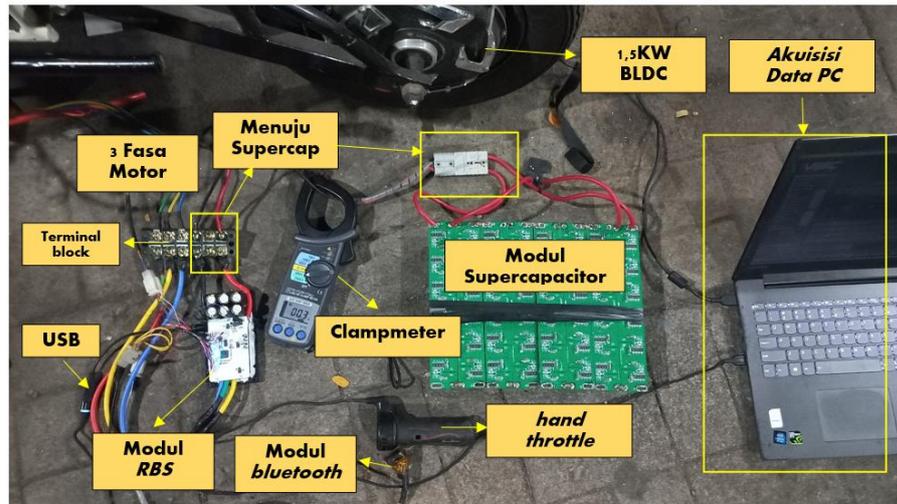
Berdasarkan perhitungan pada subbab 3.3.2, dibutuhkan modul superkapasitor dengan spesifikasi tegangan nominal 64V 20,83 F. Modul supercapacitor yang tersedia di pasaran adalah modul superkapasitor dengan spesifikasi 2,7V 500F, sehingga diperlukan 24 modul superkapasitor dengan spesifikasi tersebut yang dirangkai secara seri. Modul superkapasitor seri tersebut disassembly dengan dilakukan spot welding pada setiap sambungan seri. Modul supercapacitor dijadikan supercapacitor *bank* dengan satu terminal positif dan satu terminal negatif. Kedua terminal dihubungkan oleh kabel AWG8 dengan *socket* Anderson 90A dan juga satu terminal yang dilengkapi dengan *socket charger* untuk keperluan pengisian supercapacitor seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.12**.



Gambar 4.12 Rangkaian Superkapasitor

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Kalibrasi Pengukuran dengan Menggunakan Sensor dan dengan Menggunakan Alat

No	Pembacaan Sensor (RPM)	Pembacaan Alat Ukur (RPM)	ERROR (%)	Pembacaan Sensor Arus (A)	Pembacaan Alat Ukur Arus (A)	ERROR (%)	Pembacaan Sensor Tegangan (V)	Pembacaan Alat Ukur Tegangan (V)	ERROR (%)
1	120	121	0,83	5,92	6,1	3,04	7,72	7,9	2,33
2	195	201	3,08	7,16	7,3	1,96	8,96	9,1	1,56
3	203	205	0,99	7,41	7,5	1,21	9,21	9,3	0,98
4	270	272	0,74	8,94	8,9	0,45	10,74	10,7	0,37
5	292	294	0,68	9,94	10,1	1,61	11,74	11,9	1,36
6	333	331	0,60	11,94	12	0,50	14,04	14,1	0,43
7	393	390	0,76	15,96	16,1	0,88	18,06	18,2	0,78
8	423	420	0,71	22,41	22,7	1,29	24,51	24,8	1,18
9	453	445	1,77	25,62	25,8	0,70	31,62	31,8	0,57
10	520	511	1,73	32,56	32,76	0,61	36,7	36,2	1,36
11	513	510	0,58	38,56	38,2	0,93	45,77	44	3,87
12	573	569	0,70	42,33	42,2	0,31	48,57	47,5	2,20



Gambar 4.13 Skema Pengujian Sistem

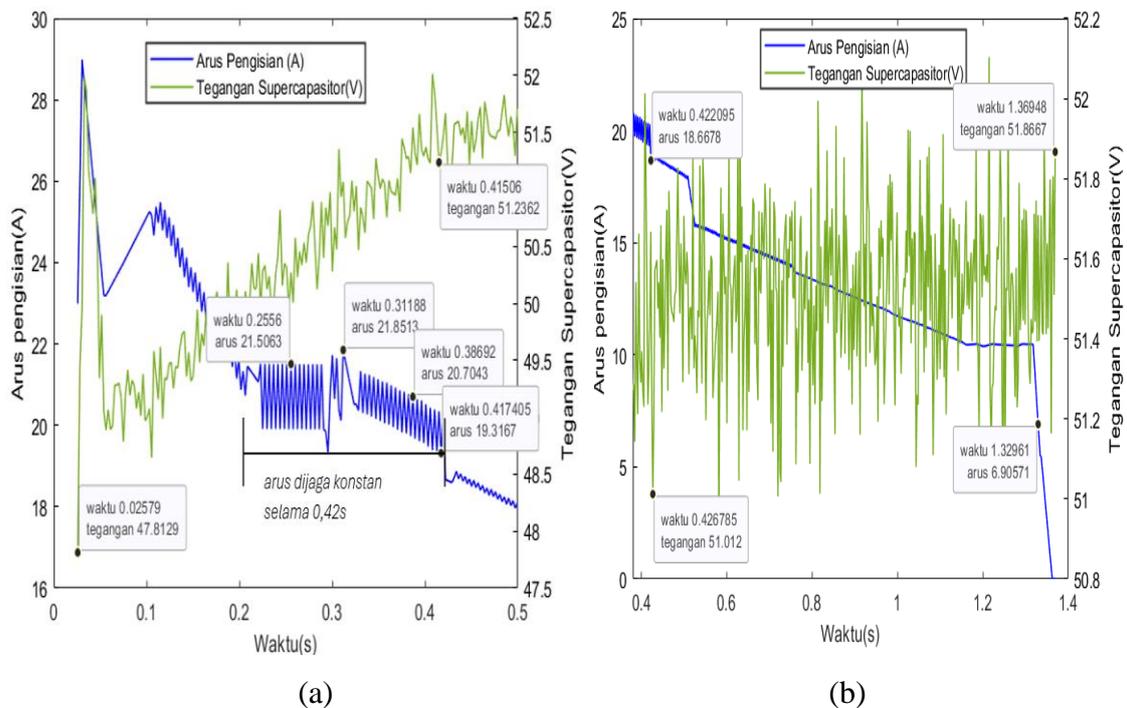
Modul *Board* yang telah diassembly dan juga rangkaian supercapasitor diimplementasikan pada skuter listrik FITS untuk dilakukan pengujian. Pada *board* dipasang modul *bluetooth* untuk komunikasi data dari *firmware* ke *software* atau sebaliknya dan juga akuisi data untuk keperluan logging, yang dapat dipantau secara *wireless* dan juga dipasang usb untuk akuisisi data secara *realtime* dengan *realtime plot*. Akuisisi data dilakukan dengan fitur *datalogger* dari software. Pengujian dilakukan dengan memasang *clampmeter* untuk mevalidasi bacaan arus dan tegangan dari sensor arus dan juga sensor tegangan pada modul. Susunan pengujian sistem dapat dilihat pada **Gambar 4.13**

4.4 Hasil Pengujian

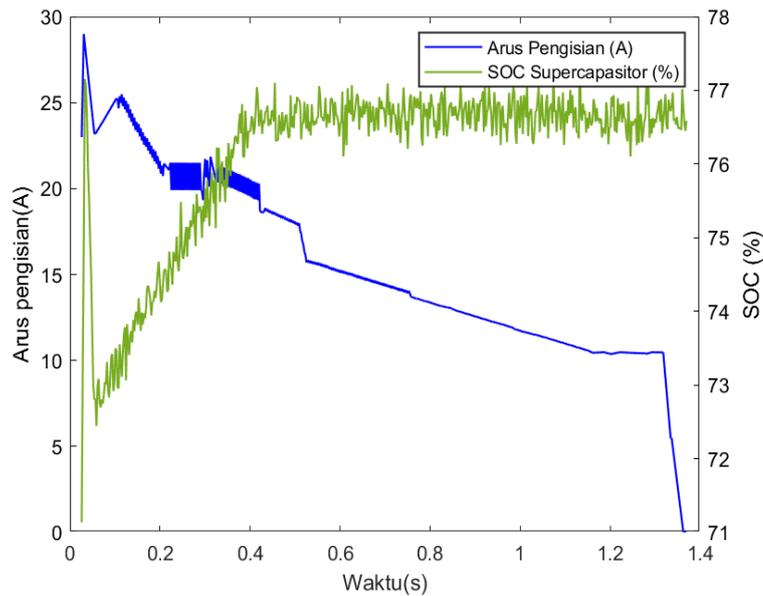
Untuk menganalisa lebih lanjut dan mevalidasi hasil simulasi menggunakan desain dan rangkaian sesuai perhitungan, dilakukan pengujian pada plant secara langsung untuk mengetahui respon sistem terhadap model plant secara eksperimental. Pengujian dilakukan dengan skema sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.13** pada skuter listrik FITS yang berspesifikasi sebagaimana tertuliskan pada **Tabel 3.1**, dimana modul RBS disambungkan dengan modul supercapacitor. Di dalam modul RBS tersebut telah terdapat rangkaian untuk akuisisi sinyal pada skuter mulai dari kecepatan, besar BEMF, besar arus dan juga tegangan yang dijadikan basis untuk mengendalikan besar arus ketika sistem bekerja. Modul RBS berisi rangkaian bridge rectifier yang terdapat pada sisi high power bersama dengan MOSFET yang berfungsi untuk mengkonversi kelistrikan 3 fasa dari putaran motor menjadi listrik DC yang selanjutnya digunakan untuk mengisi energi pada superkapasitor. Proses konversi energi tersebut memanfaatkan BEMF yang timbul oleh putaran motor 1,5kW ketika skuter melakukan deselerasi.

Pengujian dilakukan dengan menganalisis sistem ketika skuter berdeselerasi. Deselerasi skuter terjadi ketika sistem regenerative braking bekerja, dengan melepas hand throttle yang mengendalikan kecepatan motor. Hand throttle dilepas ketika kecepatan skuter telah mencapai 30 km/h, atau ketika kecepatan motor mencapai 260RPM, sampai dengan proses deselerasi selesai. Nilai arus balik pengisian pada supercapacitor akan diukur dan diakuisi dengan timeframe log 80ms oleh kontroler dalam modul dan diukur pula oleh clampmeter untuk mevalidasi adanya arus balik yang terhantar. Tegangan dan tingkat SOC dari sistem juga diukur dan disimpan oleh modul untuk dianalisis. Hasil pengujian sistem ditampilkan sebagai grafik pada **Gambar 4.14** sampai dengan **Gambar 4.27**. Grafik pada seluruh gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat arus balik ketika sistem berdeselerasi dari kecepatan 30 km/h sampai dengan kecepatan terendahnya sebagaimana oleh hasil simulasi.

Pada penggunaan target arus sebesar 20A, arus pengisian cenderung dapat dijaga sesuai dengan setpoint sampai dengan 0,4 detik pertama. Pada durasi tersebut, tegangan supercapacitor berubah dari nilai tegangan 48V menjadi 51,8V karena terisinya supercapacitor oleh lonjakan arus balik yang cukup besar dari putaran motor sebesar 28A. Namun, setelah tegangan supercapacitor terisi dengan cepat tersebut, tegangan supercapacitor cenderung berada pada angka 51,5V, dimana SOC dari supercapacitor menjadi 76,7% dari semula 71,2%. Perubahan yang cepat tersebut mengindikasikan bahwa terjadi



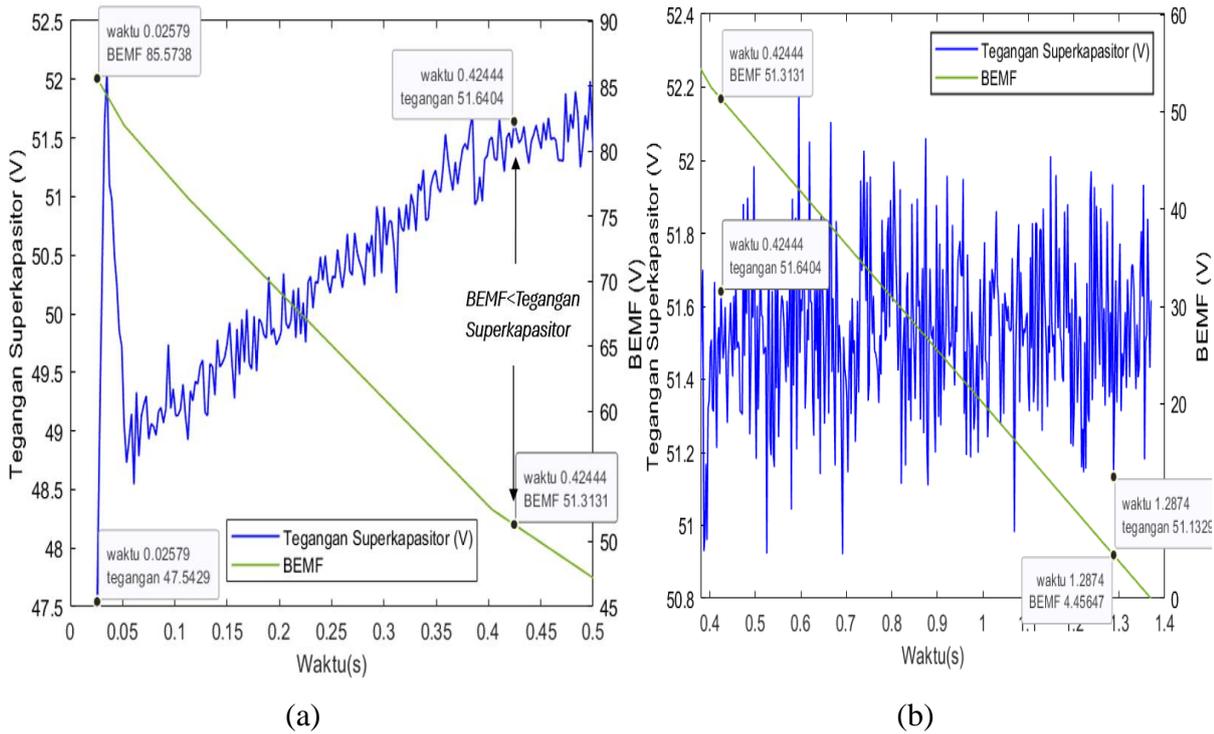
Gambar 4.14 Plot Arus Pengisian dan Tegangan Supercapacitor terhadap waktu Eksperimen dengan Menggunakan Setpoint 20A



Gambar 4.15 Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu Eksperimen dengan Menggunakan Setpoint 20A

proses pengisian energi pada supercapacitor dengan durasi yang cukup cepat. Seiring dengan bertambahnya SOC dan tegangan dari supercapacitor, besar arus pengisian tidak dapat dipertahankan pada nilai arus target yang diinginkan. Sebagaimana dijelaskan oleh Chaofeng Pan pada penelitiannya pada tahun 2020 (Chaofeng Pan, 2020), hal ini terjadi karena melonjaknya tegangan superkapasitor dan nilai *Back Electromotive Force* (BEMF) yang menurun seiring dengan menurunnya putaran motor. Menurunnya tingkat RPM tersebut menyebabkan menurunnya BEMF, sehingga besar arus pengisian tidak dapat dipertahankan oleh algoritma sesuai dengan arus target.

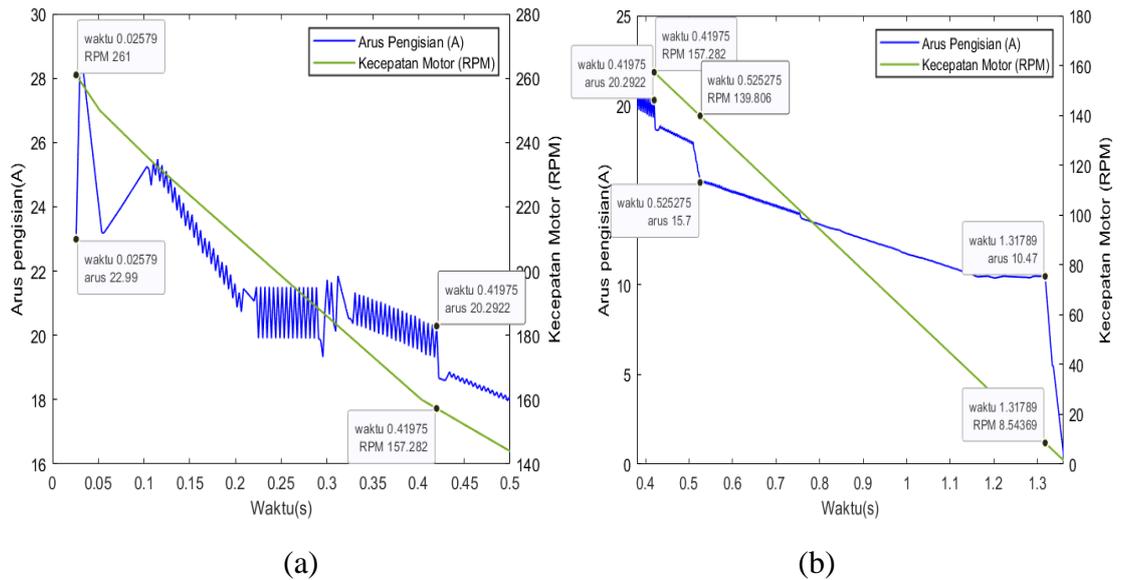
Algoritma *constant current* menggunakan variabel BEMF untuk menentukan *duty cycle* agar dapat menjaga arus dengan konstan sebagaimana tercantum pada **persamaan 3.5**, sehingga besar BEMF sangat mempengaruhi besar arus yang dikontrol. Sehingga ketika RPM dari motor akan menurun dengan drastis, nilai BEMF akan juga turun dengan drastis, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.16**. Algoritma *constant current* akan menentukan nilai *duty cycle* sesuai dengan besar BEMF, dan ketika BEMF tidak lebih besar daripada nilai tegangan terminal superkapasitor, arus tidak dapat dikendalikan, sesuai dengan *flow* kendali sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 3.15**. Terindikasi bahwa setelah *timeframe* 0,42s, nilai BEMF bernilai 51,3V, dimana tegangan superkapasitor telah bernilai 51,5V. Sehingga setelah *timeframe* 0,4s, arus akan turun drastis karena sistem telah tidak mampu mengendalikan.



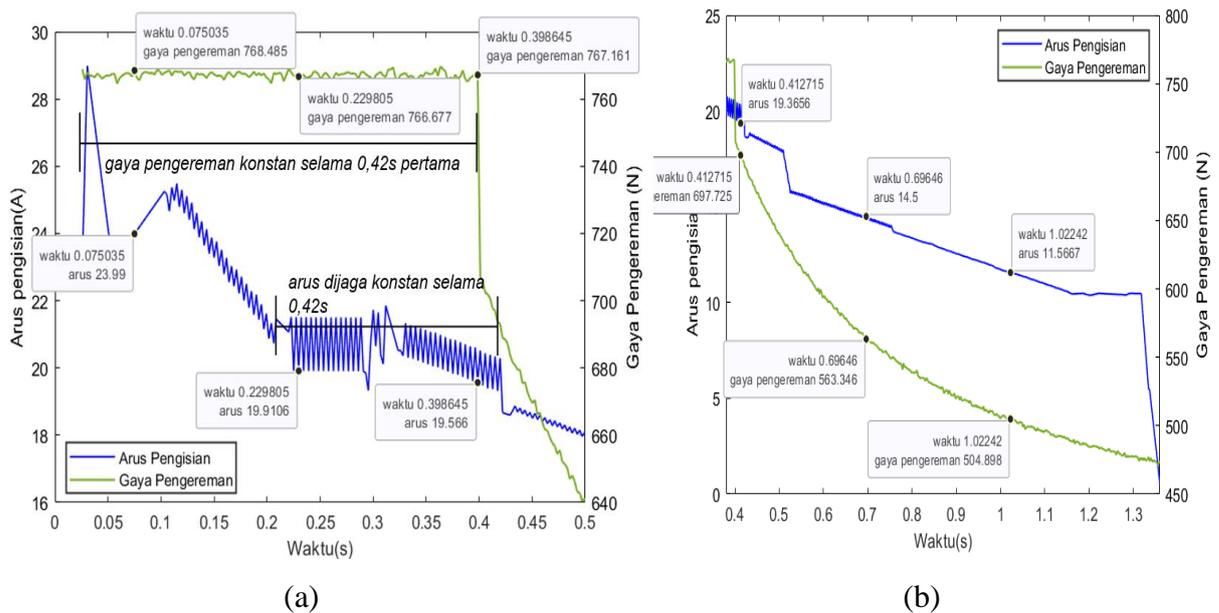
Gambar 4.16 Plot *BEMF* dan Tegangan Superkapasitor terhadap waktu hasil eksperimen menggunakan arus target 20A (a) *timeframe* 0-0,5s (b) *timeframe* 0,4-1,4s

Setelah *timeframe* 0,42s, besar *BEMF* menurun dengan perubahan yang lebih lambat dibandingkan dengan perubahan besar *BEMF* sebelum *timeframe* 0,42s. Hal ini dapat terjadi akibat nilai RPM yang menurun dengan durasi yang lebih lambat setelah *timeframe* 0,42s sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.17**. Kecepatan motor mengalami penurunan dari 263 RPM menjadi 157 RPM ketika besar arus dijaga konstan sesuai dengan target selama 0,42s. Setelah *timeframe* 0,42s, kecepatan motor berubah dari 157 RPM menjadi 0 RPM dalam kurun waktu 0,944s, dimana kecepatan motor akan terus menurun dengan nilai perlambatan yang lebih kecil dibandingkan dengan perubahan kecepatan motor sebelum *timeframe* 0,42s.

Nilai perlambatan yang lebih kecil setelah *timeframe* 0,42s diakibatkan oleh gaya pengereman yang lebih kecil dibandingkan dengan *timeframe* sebelum 0,42s. Tenaga pengereman dari sistem *regenerative braking* yang dipengaruhi oleh nilai besar arus pengisian, dimana semakin besar arus pengisian akan menghasilkan gaya pengerema yang lebih besar (Chaofeng Pan, 2020). Sehingga, terdapat kolerasi antara gaya pengereman dengan besar arus pengisian. Sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.18**, kecepatan putaran motor berada di 160 RPM setelah *timeframe* 0,42s, dengan besar gaya pengereman konstan berada di angka 767 N dan menurun secara eksponensial setelah *timeframe* 0,42s.

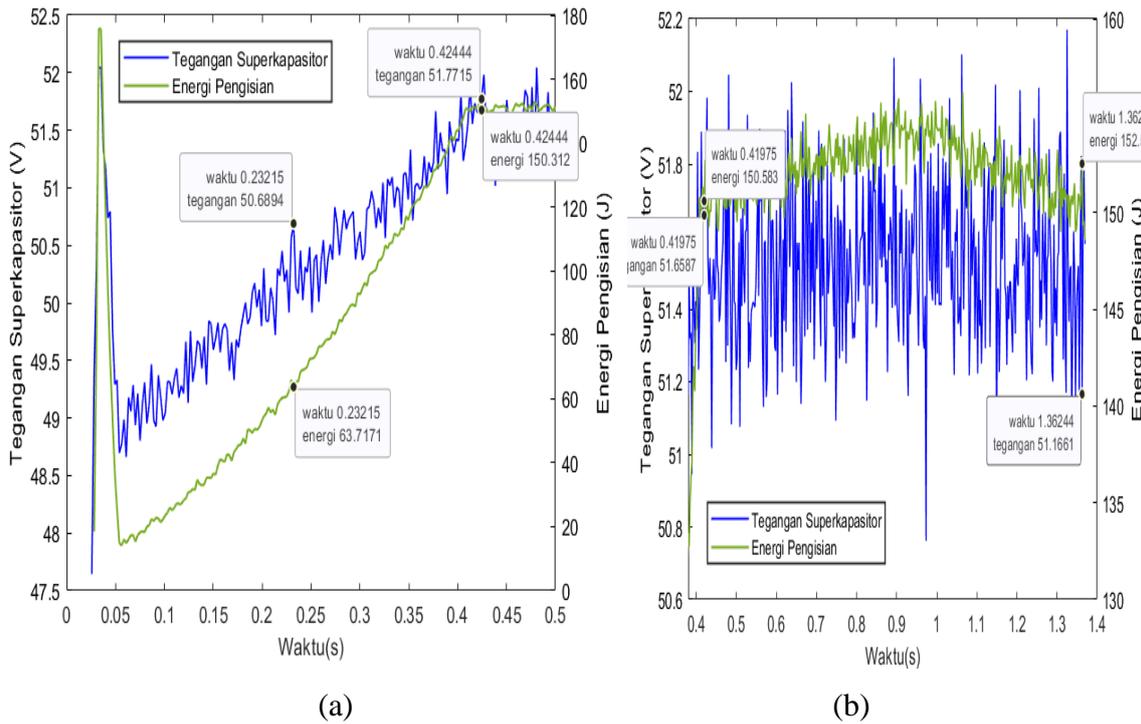


Gambar 4.17 Plot Kecepatan Motor dan Arus pengisian pada superkapasitor untuk (a) *timeframe* 0-0.5s (b) *timeframe* 0,4-1,37s



Gambar 4. 18 Plot Arus dan Kecepatan motor terhadap waktu Hasil eksperimen dengan menggunakan Setpoint 20A (a) *timeframe* 0-0,5s (b) 0,5s-1,4s

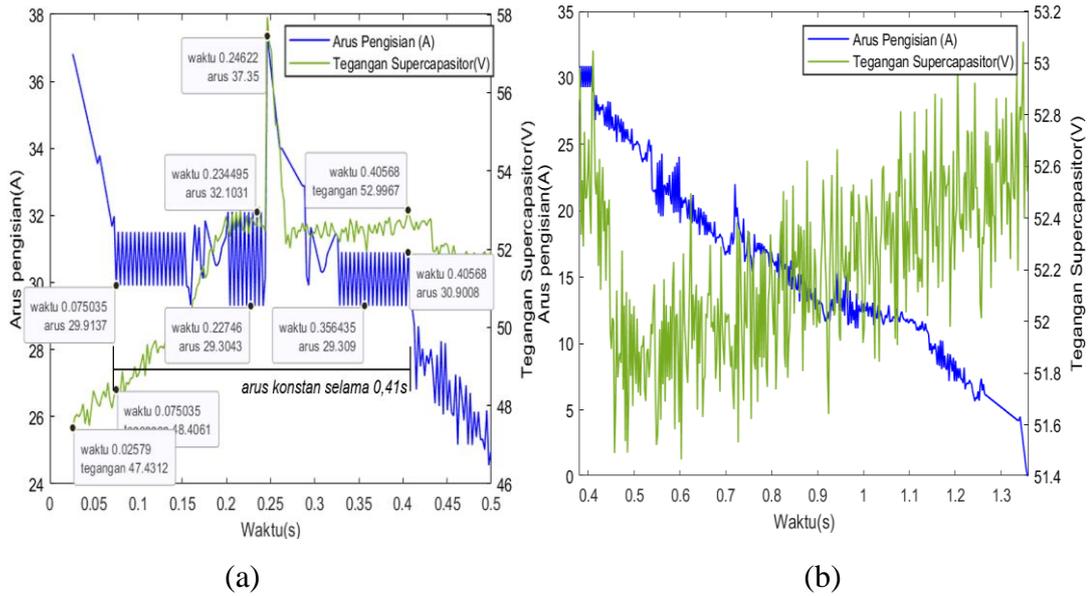
Menurunnya gaya pengereman tersebut menyebabkan penurunan kecepatan motor yang lebih lambat, sehingga gradien dari plot setelah *timeframe* 0,4s menjadi lebih kecil dibandingkan dengan sebelum *timeframe* 0,4 s yang menurun tajam seperti digambarkan pada plot **Gambar 4.17**. Terhantarnya arus pengisian menuju superkapasitor ketika sistem bekerja dapat digunakan untuk menyimpan energi. Energi penyimpanan ini dapat diketahui besarnya menggunakan persamaan 3.7, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.19** untuk kinerja sistem dengan penggunaan target besar arus 20A.



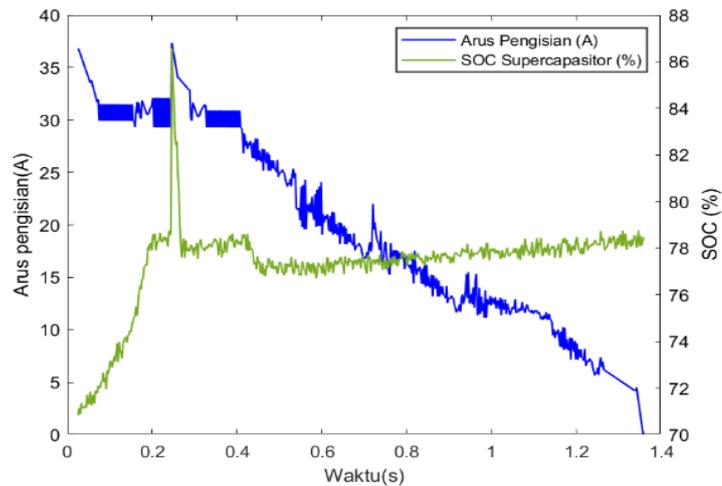
Gambar 4.19 Plot Tegangan dan energi terhadap waktu dengan setting arus 20A untuk (a) *timeframe* 0-0,4s (b) *timeframe* 0,4s-1,4s

Terjadi perubahan tegangan superkapasitor yang cukup signifikan dari 47,8 V menjadi 51,5 V untuk 0,42 detik pertama, dengan besar perubahan energi pengisian sampai dengan 150,3 Joule. Namun, setelah *timeframe* 0,42s, energi pengisian hanya menjadi 150,57 Joule. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan tidak ada kenaikan tegangan yang signifikan setelah *timeframe* 0,42s. Tidak adanya kenaikan tegangan yang signifikan tersebut diakibatkan oleh arus pengisian yang dihasilkan oleh sistem (Kivanc & Ustun, 2021). Peningkatan tegangan yang tidak signifikan selama *timeframe* 0,4s-1,4s tersebut dipengaruhi oleh arus yang tidak dapat dijaga konstan sebagaimana perubahan energi yang kecil seiring dengan menurunnya putaran motor sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.14 (b)**.

Respon sistem ketika bekerja dengan penggunaan target arus sebesar 30A ditampilkan pada **Gambar 4.20**, dimana durasi pengisian dapat dijaga oleh sistem dengan durasi yang lebih singkat dibandingkan dengan penggunaan arus target 20A. Sebagaimana termuat pada **Gambar 4.20 (a)**, arus pengisian terjaga sesuai dengan arus target sampai dengan *timeframe* 0,41s dari proses kerja sistem. Pada **Gambar 4.21**, terjaganya besar arus target pengisian tersebut menyebabkan perubahan tegangan dan SOC yang cukup signifikan dibandingkan dengan penggunaan setpoint sebesar 20A, dimana nilai tegangan dan SOC berubah menjadi telah 52,6V dan 78% untuk 30A, serta 51,6V dan 76,7% untuk 20A.



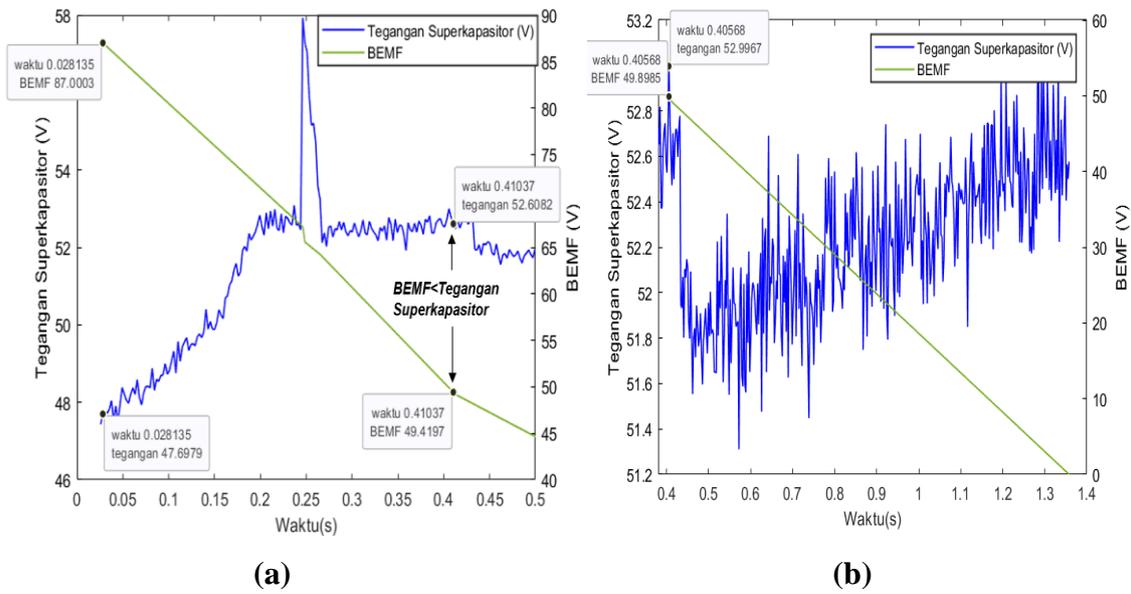
Gambar 4.20 Plot arus pengisian dan tegangan supercapacitor terhadap waktu eksperimen dengan menggunakan setpoint 30a (a) *timeframe* 0-0,5s, (b) *timeframe* 0,4s-1,35s



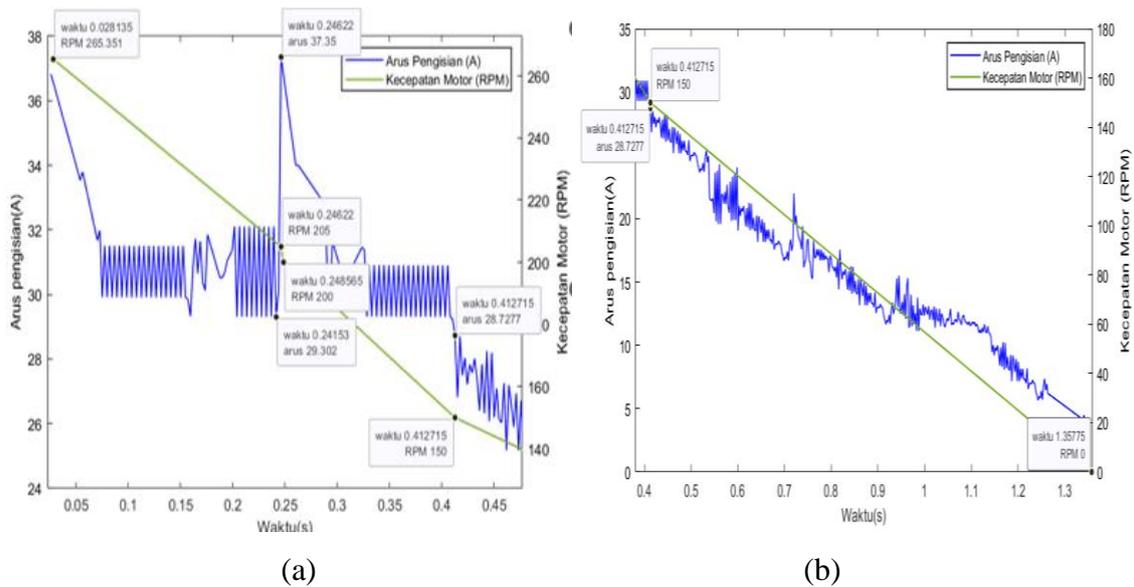
Gambar 4.21 Plot Arus Pengisian dan SOC Supercapacitor terhadap waktu Eksperimen dengan Menggunakan Setpoint 30A

Namun, durasi pengisian untuk target arus 30A lebih singkat dibandingkan dengan durasi pengisian dengan menggunakan target arus 20A, dimana durasi pengisian untuk penggunaan target arus 30A dan 20A berturut-turut adalah sebesar 1,358s dan 1,37s.

Sistem dapat mengendalikan arus konstan sesuai dengan besar arus target 30A sampai dengan *timeframe* ke 0,41s, sampai dengan nilai BEMF dari sistem yang tidak lagi melampaui nilai tegangan superkapasitor. Sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.23** (a), BEMF motor BLDC pada *timeframe* 0,41s bernilai 49,4197V dan nilai tegangan superkapasitor telah mencapai 52,9381V. Sehingga sesuai dengan algoritma *constant current* yang dikembangkan, arus tidak dapat dikendalikan.



Gambar 4.22 Plot Back EMF dan tegangan superkapasitor terhadap waktu untuk Penggunaan Arus Target 30A (a) *timeframe* 0-0,4s (b) *timeframe* 0,4s-1,357s



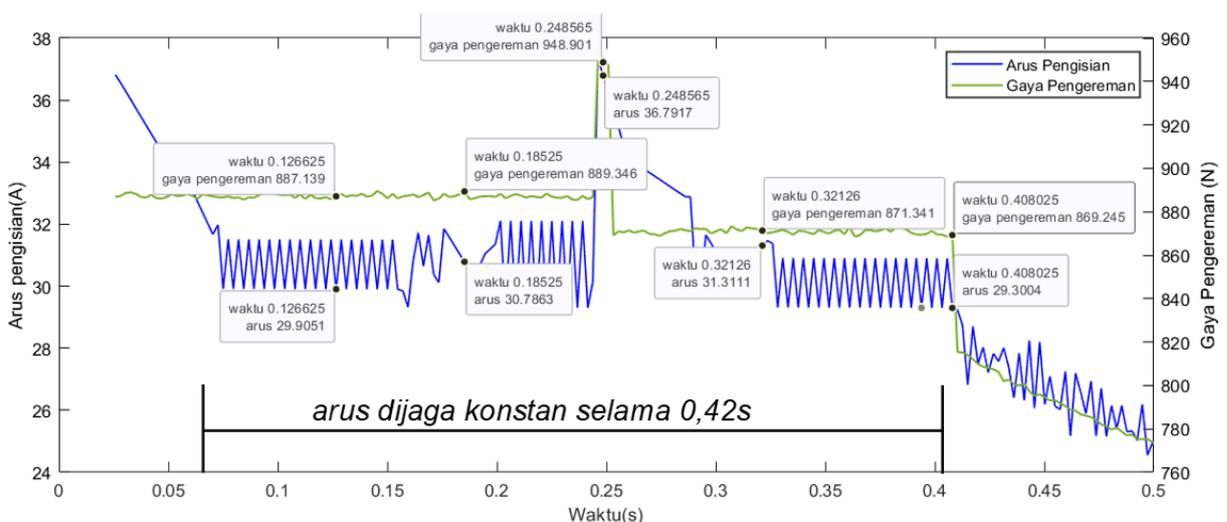
Gambar 4.23 Plot Arus dan kecepatan motor untuk penggunaan arus target 30A (a) *timeframe* 0-0,4s (b) *timeframe* 0,4s-1,358s

Pada **Gambar 4.22** (b), besar BEMF dari motor setelah *timeframe* 0,41s menurun dengan perubahan yang lebih kecil dibandingkan dengan sebelum *timeframe* 0,41s. Hal ini terjadi karena besar BEMF dari motor bergantung pada besar kecepatan motor (Huynh & Min-Fu, 2018). Sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.23** (a), ketika besar arus dijaga konstan sesuai dengan target selama 0,41s, terjadi penurunan kecepatan motor yang drastis dari 266 RPM menjadi 150 RPM. Namun, setelah *timeframe* 0,41s pada **Gambar 4.23** (b),

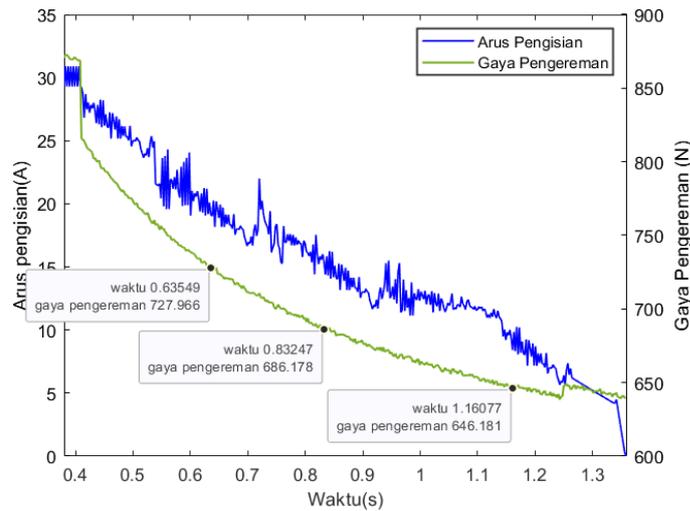
dimana arus pengisian tidak lagi dapat dijaga konstan sesuai dengan target arus, putaran motor mengalami penurunan dari 150 RPM menjadi 0 RPM dalam durasi 0,9s. Penurunan kecepatan motor tersebut memiliki nilai perlambatan yang lebih kecil dibandingkan dengan *timeframe* 0-0,41s yang menurun drastis.

Sesuai dengan penelitian oleh (Chaofeng Pan, 2020), nilai gaya pengereman dipengaruhi oleh besarnya arus, dimana ketika arus bernilai besar dan konstan, gaya pengereman akan bernilai besar dan konstan, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.23 (a)**. Penurunan putaran motor yang drastis pada *timeframe* 0-0,4s diakibatkan oleh terdapatnya besar gaya pengereman yang konstan dan besar. Namun, pada durasi *timeframe* tersebut, terjadi lonjakan arus sesaat pada *timeframe* 0,2s. Lonjakan arus tersebut diakibatkan oleh nilai hambatan $R_{DS\ on}$ dari MOSFET yang melonjak karena *ripple* yang dihasilkan oleh sistem dari imbas frekuensi *switching* yang tinggi pada kaki GATE MOSFET dengan beban kapasitif (Yingyao, Yang, Geng, Zhiyuan, & Jin; Ignatius Wisnu Adi Nugroho, 2019).

Frekuensi *switching* yang tinggi dengan beban kapasitif yang besar dari superkapasitor menyebabkan fenomena melonjaknya arus yang cukup besar, sehingga sistem sempat menghasilkan arus balik yang cukup besar. Lonjakan arus yang besar tersebut mengakibatkan meningkatnya gaya pengereman sampai dengan 948N seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.24(a)** dan penurunan kecepatan motor yang signifikan dari 205 RPM menjadi 197 RPM yang ditunjukkan pada **Gambar 4.23 (a)**.



(a)



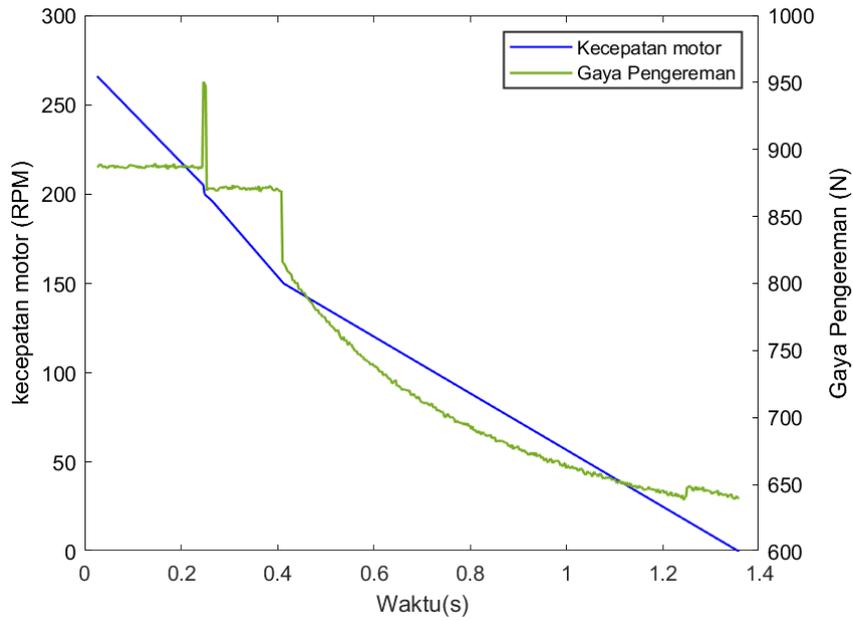
(b)

Gambar 4.24 Plot Arus pengisian ke superkapasitor dan gaya pengereman terhadap waktu hasil pengujian dengan target arus 30A (a) *timeframe* 0-0,5s (b) 0,5s-1,36s

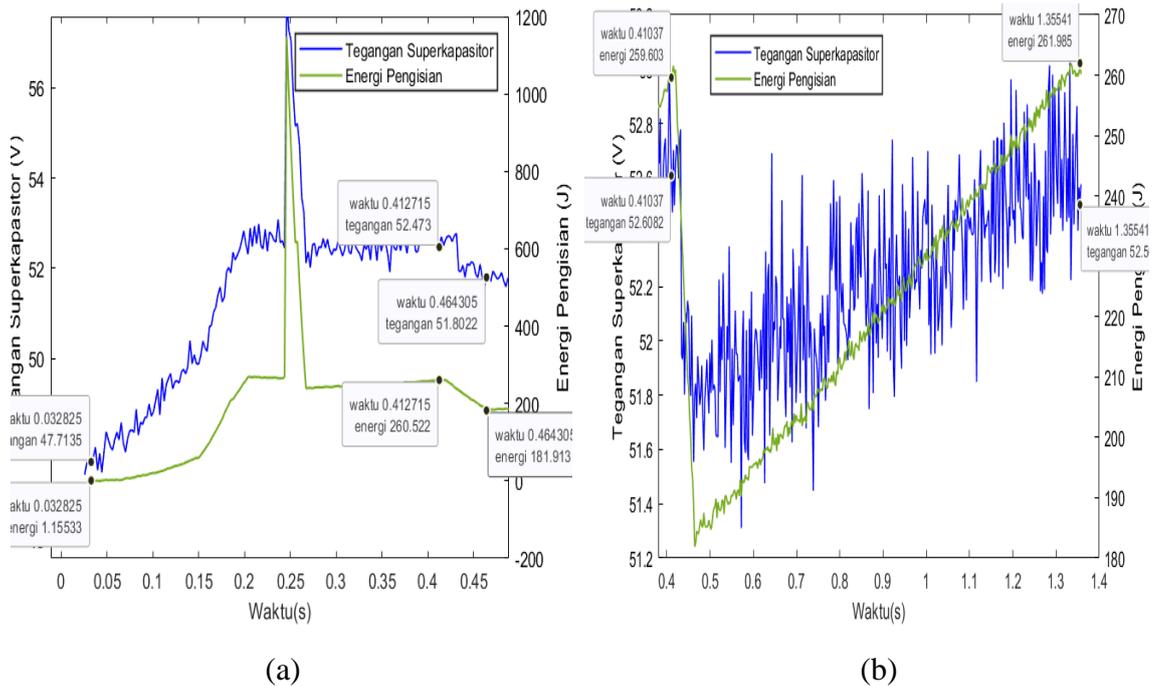
Penurunan kecepatan motor tersebut akan menyebabkan BEMF menjadi semakin kecil, sehingga durasi pengereman dan pengisian akan menjadi lebih singkat. **Gambar 4.24** (b) menunjukkan bahwa proses pengereman akan berhenti pada *timeframe* 1,3575s dengan gaya pengereman yang menurun diakibatkan oleh nilai arus yang menurun drastis karena *converter* hanya menyearahkan arus dari fasa menuju superkapasitor tanpa adanya kendali untuk mempertahankan arus.

Terjadi penurunan kecepatan motor yang lebih cepat ketika digunakan setting besar arus target 30A dibandingkan dengan penggunaan besar arus target 20A. Hal ini dikarenakan besar tenaga pengereman yang lebih besar ketika digunakan arus target 30A. Sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.25**, tenaga pengereman yang dihasilkan ketika digunakan arus target 30A lebih besar dibandingkan dengan penggunaan arus target 20A, dimana besar gaya pengereman yang dihasilkan oleh penggunaan arus target 30A dan 20A berturut turut adalah sebesar 880N dan 792N ketika arus dapat dijaga konstan. Namun, sama halnya dengan penggunaan besar arus target 20A, besar tenaga pengereman yang dihasilkan menjadi konstan ketika arus dapat dijaga konstan. Setelah arus tidak dapat dijaga konstan karena menurunnya BEMF seiring menurunnya putaran motor pada *timeframe* setelah 0,4s, tenaga pengereman menurun seiring dengan penurunan arus pengisian.

Sama halnya dengan penggunaan besar arus target 20A, energi pengisian ketika sistem bekerja berubah dengan drastis sampai dengan *timeframe* terakhir ketika arus dapat dijaga dengan konstan, atau sampai dengan *timeframe* 0,4s untuk penggunaan besar arus target 30A seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.26** (a), dimana energi pengisian mencapai 260J. Setelah



Gambar 4.25 Plot Kecepatan Motor dan Gaya Pengereman untuk Penggunaan Arus Target 30A



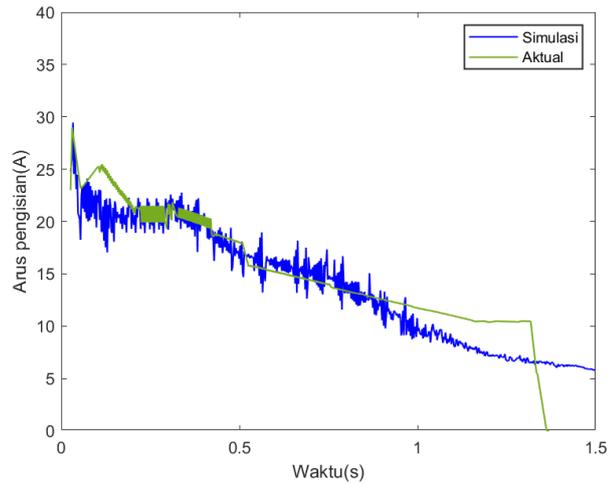
Gambar 4.26 Plot tegangan dan energi pengisian terhadap waktu dengan setting arus 30A

(a) *timeframe* 0-0,4s (b) *timeframe* 0,4s-1,35s

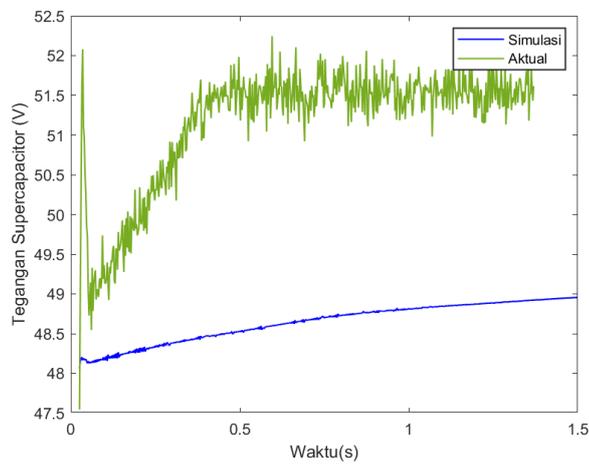
timeframe 0,4s, energi pengisian hanya meningkat menjadi 262J karena tidak adanya perubahan tegangan superkapasitor yang signifikan. Hal ini diakibatkan oleh kenaikan tegangan yang tidak signifikan setelah *timeframe* 0,4s sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 4.26** (b).

Dengan kapasitansi superkapasitor yang sama, energi pengisian untuk setting arus target 30A bernilai lebih besar dibandingkan dengan penggunaan setting arus target sebesar 20A, dengan besar energi pengisian berturut-turut adalah 150,9 Joule dan 262 Joule. Hal ini diakibatkan oleh tegangan superkapasitor akhir pada setting arus target 30A bernilai lebih besar daripada tegangan superkapasitor akhir yang dihasilkan pada setting arus target 20A, walaupun durasi pengisian energi pada setting arus target 30A lebih singkat. Tingkat konversi energi (η) dari sistem ketika menggunakan arus target 30A juga bernilai lebih besar daripada penggunaan arus target 20A, dengan tingkat konversi energi berturut-turut sebesar 10,71% dan 6,19% untuk setting arus target 30A dan setting arus 20A. Dengan tingkat konversi energi yang dihasilkan oleh kedua penggunaan arus target tersebut, dapat diartikan bahwa dengan penggunaan *setting* arus target sebesar 30A, terjadi pengisian energi yang lebih cepat dengan jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan *setting* arus target 20A.

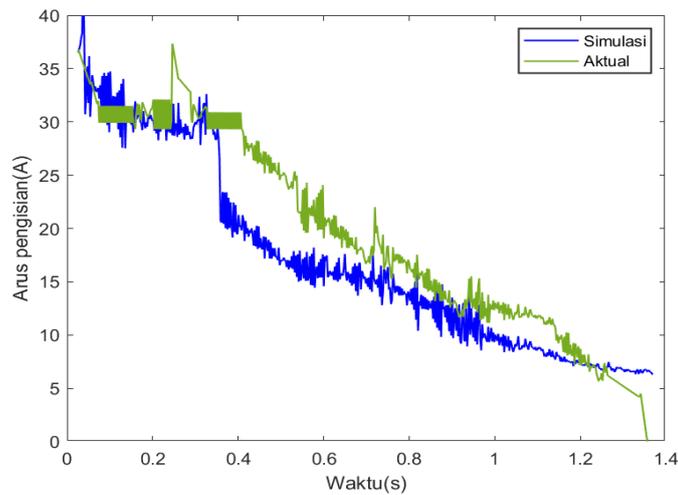
Pada timeframe yang sama, data menunjukkan bahwa hasil simulasi dan hasil pengujian sistem cenderung identik, seperti ditampilkan sebagai grafik pada **Gambar 4.27** sampai dengan **Gambar 4.30**. Namun, pada penggunaan *setting* arus target sebesar 30A pada **Gambar 4.29**, terindikasi bahwasanya terdapat perbedaan perubahan nilai tegangan supercapacitor dengan selisih nilai yang cukup signifikan dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal ini dapat diakibatkan oleh tingkat lonjakan arus pengisian dari supercapacitor dari hasil pengujian pada *timeframe* 0,2s. Tingkat lonjakan tersebut muncul akibat perubahan nilai hambatan $R_{DS\ ON}$ dari MOSFET yang menghantarkan arus yang besar dan durasi *switching* yang cepat (Infeneon, 2016). Meningkatnya nilai hambatan tersebut mengakibatkan melonjaknya arus dan temperatur (Kivanc & Ustun, 2021), dimana dapat mengakibatkan arus yang *switching* yang besar. Lonjakan arus tersebut tetap dialirkan oleh *converter* untuk pengisian energi ke superkapasitor. Sifat superkapasitor yang memiliki *power density* yang besar, menyebabkan superkapasitor memiliki kemampuan untuk menyerap energi dengan cepat dalam jumlah yang besar (Chaofeng Pan, 2020). Sehingga, nilai tegangan yang melambangkan SOC dari superkapasitor mengalami lonjakan yang besar. Selain besar energi yang disimpan, lonjakan tersebut juga mempengaruhi durasi pengisian dari supercapacitor, dimana putaran motor akan menjadi lebih cepat menurun, sehingga BEMF dari motor juga akan menurun. Penurunan BEMF tersebut akan menjadikan proses pengereman lebih cepat selesai sesuai dengan algoritma yang digunakan.



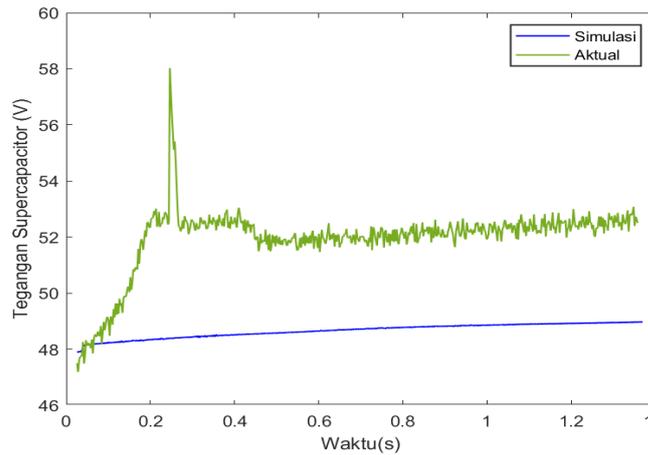
Gambar 4. 27 Perbandingan Besar Arus Pengisian oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 20A



Gambar 4.28 Perbandingan Besar Tegangan Supercapacitor oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 20A



Gambar 4.29 Perbandingan Besar Arus Pengisian oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 30A



Gambar 4.30 Perbandingan Besar Tegangan Supercapacitor oleh simulasi dan eksperimen pengujian terhadap waktu dengan setpoint 30A

Secara keseluruhan, sistem *regenerative braking* dengan kendali *constant current* dan *duty cycle* yang diimplementasikan telah mampu mengisi energi pada superkapasitor dengan *time frame* yang cepat dengan energi yang cukup besar. Pengisian energi dari proses pengereman memiliki durasi rata-rata 1,37 detik, dengan rata-rata arus dapat dijaga konstan selama 0,41s, atau selama 30% dari total waktu pengereman. Proses konversi energi dari proses pengereman oleh sistem menghasilkan energi pengisian sebesar 150,5 Joule untuk *setting* arus target 20A dan 262 Joule untuk *setting* arus target 30A, dengan rincian hasil yang tertulis pada **Tabel 4.2**. Dengan algoritma yang didesain dan implementasi sistem *regenerative braking* pada *scooter* listrik FITS, sistem telah berhasil mempertahankan arus pengisian sesuai dengan *setpoint* rata-rata selama 0,4 detik. Berdasarkan hal tersebut, apabila dibandingkan dengan referensi penelitian yang dikembangkan oleh Chaofeng Pan pada tahun 2020, sistem mampu mengkonversi energi dengan jumlah yang lebih kecil dengan durasi pengisian yang lebih singkat pula. Penelitian yang dikembangkan oleh Chaofeng Pan mampu mengisi sistem penyimpanan superkapasitor dengan nilai energi pengisian sampai dengan 5459 Joule untuk durasi pengisian sampai dengan 6,448 detik, dengan hasil lengkap yang dimuat pada **Tabel 4.3**. Karena nilai pengisian energi dari sistem yang digagas lebih kecil dengan durasi yang lebih kecil pula, tingkat konversi energi yang dihasilkan oleh sistem juga lebih kecil dibandingkan dengan penelitian oleh Chaofeng Pan tersebut, dimana tingkat konversi energi dari sistem adalah sebesar 10,71%, sedangkan tingkat konversi energi dari penelitian oleh Chaofeng Pan adalah sebesar 23%. Namun, patut dijadikan catatan bahwasanya motor yang digunakan pada penelitian Chaofeng Pan berada pada kondisi prima, dengan parameter penelitian secara lengkap dapat dilihat pada **Tabel 4.4**, dimana motor yang

Tabel 4.2 Hasil Performansi Sistem *Regenerative Braking*

Parameter	Setting 20A	Setting 30A
V_1 (V)	47,6	47,8
V_2 (V)	51,5	52,6
t (s)	1,37	1,358
C (F)	20,83	20,83
E (J)	150,9	262
E_k (J)	2437,8	2437,8
η	6,19%	10,71%

Tabel 4.3 Hasil Eksperimen oleh Chaofeng Pan, 2020

Parameter	Setting 50A	Setting 70A
V_1 (V)	9,775	9,831
V_2 (V)	12,6	12,76
t (s)	6,448	6,235
C (F)	165	165
E (J)	5236	5459
E_k (J)	24881	23720
η	21%	23%

digunakan memiliki nilai daya sebesar 5 kW dengan putaran motor jauh lebih besar daripada motor bawaan *scooter* yang digunakan untuk pengembangan sistem. Sistem menggunakan motor 1,5 kW, dimana putaran motor berada di 260 RPM pada kecepatan yang sama (30 km/h), sehingga motor yang digunakan memiliki nilai BEMF yang lebih kecil. Algoritma *constant current* yang didesain cukup efisien untuk putaran yang tinggi, sehingga sistem yang didesain masih belum dapat menghasilkan tingkat konversi energi sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Chaofeng Pan karena putaran motor yang lebih kecil. Penggunaan besar arus target dari sistem juga mempengaruhi besarnya energi hasil proses konversi, dimana Chaofeng Pan menggunakan basis besar arus target sebesar 50A dan 70A karena kapasitas superkapasitor yang mencukupi dan daya motor yang mampu untuk menghasilkan arus dengan nominal tersebut, sehingga dihasilkan energi pengisian yang jauh lebih besar pula. Selain itu, massa dari motor dan keseluruhan sistem yang digunakan oleh Chaofeng Pan lebih besar, sehingga memiliki kemampuan untuk menghasilkan energi pengisian yang lebih besar.

Tabel 4.4 Parameter Eksperimen oleh Chaofeng Pan, 2020

Parameter	Nilai Parameter
Total massa mobil (kg)	800
Jari-jari roda (m)	0,247
Rasio <i>gear</i> final	6,515
Daya motor (W)	5000
Kecepatan motor (RPM)	4000

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian mengenai RANCANG BANGUN SISTEM REGENERATIVE BRAKING PADA SCOOTER LISTRIK FITS BERBASIS CONSTANT CURRENT CONTROL yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- a) Rancang bangun sistem *regenerative braking* dengan kendali *constant current* dapat mengisi energi ke sistem penyimpanan superkapasitor dengan besar arus yang dapat dijaga konstan sesuai target rata-rata selama 0,41s dari 1,37s total durasi pengereman atau selama 30% dari durasi pengereman ketika sistem bekerja.
- b) Berdasarkan perubahan besar energi, tegangan, dan SOC dari superkapasitor, sistem *Regenerative Braking* dengan kendali *constant current* setting arus target 30A memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem dengan penggunaan setting arus target 20A. Dimana dengan penggunaan setting arus target 30A, nilai energi, tegangan dan SOC pada superkapasitor berturut-turut adalah sebesar 262J; 52,6V; dan 78%, sedangkan dengan penggunaan setting arus target 20A, nilai energi, tegangan dan SOC pada superkapasitor berturut-turut adalah sebesar 150,9 Joule; 51,5 V; dan 76,7%;

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian yang lebih baik, berikut merupakan saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya.

- a) Digunakannya MOSFET dengan frekuensi *switching* yang lebih tinggi, *rating* I_D yang lebih besar dan nilai $R_{DS\ ON}$ yang lebih kecil agar tidak terjadi lonjakan arus sesaat yang besar.
- b) Digunakannya MOSFET dengan temperatur kerja yang optimal pada *range* 16 °C - 78°C untuk menghindari kenaikan R_{DS} ketika bekerja pada penggunaan arus yang besar.
- c) Digunakannya instrumen untuk validasi pengambilan data berupa joulemeter yang lebih presisi dengan dilengkapi oleh *datalogger* untuk kemudahan dalam proses kalibrasi penggunaan sensor.
- d) Menggunakan penambahan fitur perhitungan posisi rotor dan BEMF dari motor agar pembacaan parameter dari motor lebih akurat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Chaofeng Pan, J. W. W. D. L. C. L. C., 2020. Constant current control for regenerative braking of passive series hybrid power system. *Int Trans Electr Energ Syst*, 2(12577), pp. 1-19.
- Gao, Y., 2001. Electronic Braking System of EV and HEV--Integration of Regenerative Braking, Automatic Braking Force Control and ABS. *42 Volt Technology and Advanced Vehicle Electrical Systems*.
- Hussain M, Y. R. F. T. M., 2023. The role of electric vehicles in decarbonizing India's road passenger toward carbon neutrality and clean air: A state-level analysis. *Energy*, pp. 1-14.
- Ignatius Wisnu Adi Nugroho, S. R., 2019. Regenerative Braking with Duty Cycle Settings for Brushless DC Motor. *ICEEI*, 2(1), pp. 12-25.
- Kamran T., S. N. A. A. M. G., 2023. A Comprehensive Review of Electric Vehicles in Energy Systems: Integration with Renewable Energy Sources, Charging Levels, Different Types, and Standards. *Energies*, 16(230), pp. 1-24.
- Kivanc, O. & Ustun, O., 2021. Investigation of Regenerative Braking Performance of Brushless Direct Current Machine Drive System. *Applied Sciences*, 11(1029), pp. 1-14.
- Mark McKinnon, A. B. A. S. J. R., 2022. Full-scale walk-in containerized lithium-ion. *Data in Brief*, Volume 45, pp. 1-15.
- Murali, T., 2017. Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor. *International Conference on Circuits Power and Computing Technology*.
- Nugroho, I., 2019. Regenerative Braking with Duty Cycle Settings for Brushless DC Motor. *IEEI*, 2(1272), pp. 12-25.
- Ramesh Kumar C., 2022. Effect of Regenerative Braking on the Life of Battery. *Energies*, Volume 22, pp. 1-24.
- Rectifier, I., 2013. *Datasheet IRFS4321*, New York: IRF.
- Rectifier, I., 2019. *Using The Current Sensing IR212X Gate Drive ICs*, New York: IRF.
- Xie Shaobo, 2021. Battery sizing for plug-in hybrid electric buses considering variable route lengths. *Energy*, Volume 273, pp. 1-15.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. Model dan Spesifikasi *Scooter* Listrik FITS



Gambar *Scooter* Listrik FITS

<u>BODY AND CHASSIS</u>		<u>PERFORMANCE</u>	
Class	Electric Scooter	Motor Type	BLDC hub 1000 watt ring dual
Chassis	Tubular	Range	40 km
Wheel Type	Radial On wheel motor	Rated Power	2 x 1000 watt
Tire Size	10"	Peak Power	2 x 2500 watt
Brake	Hydraulic	Torque	30 N.m
Suspension	Monooshock		
<u>DIMENSION AND WEIGHT</u>		<u>BATTERY AND CHARGER</u>	
Panjang	148cm	Batter Type	Lithium Ion
Lebar	60cm	Battery Voltage	60V 30Ah
Tinggi	100cm	Battery Capacity	1800 Wh
Wheelbase	120cm	Charging Time	4-5 jam
Weight	63,2kg		
<u>FEATURES</u>			
Regenerative braking			
Fitur High Brake			
Fitur mundur			
Fitur Keyless			

Spesifikasi Teknis FITS

B. Komponen elektrik *scooter* FITS

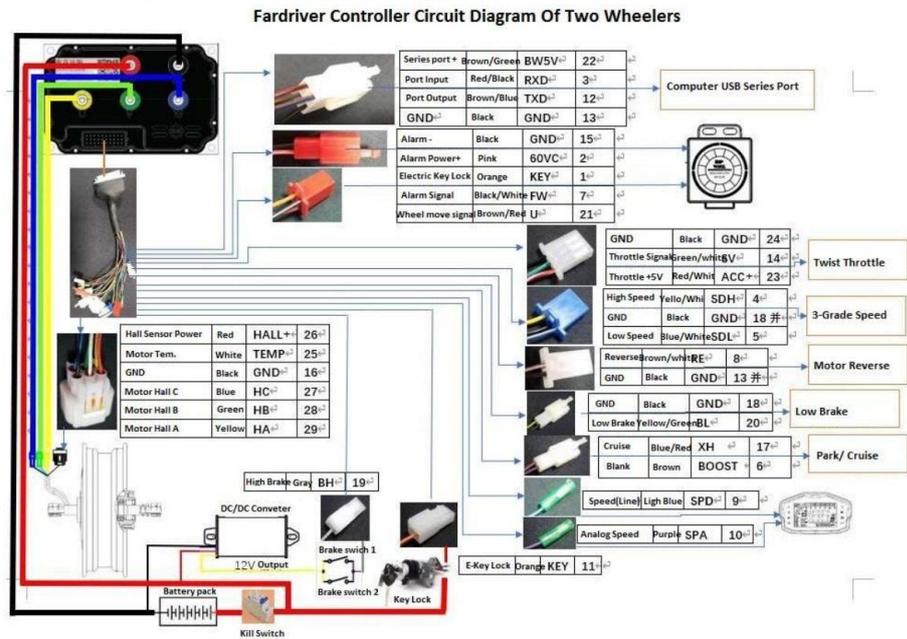


Gambar Controller BLDC Nanjing Fardriver 72260

Spesifikasi Controller:

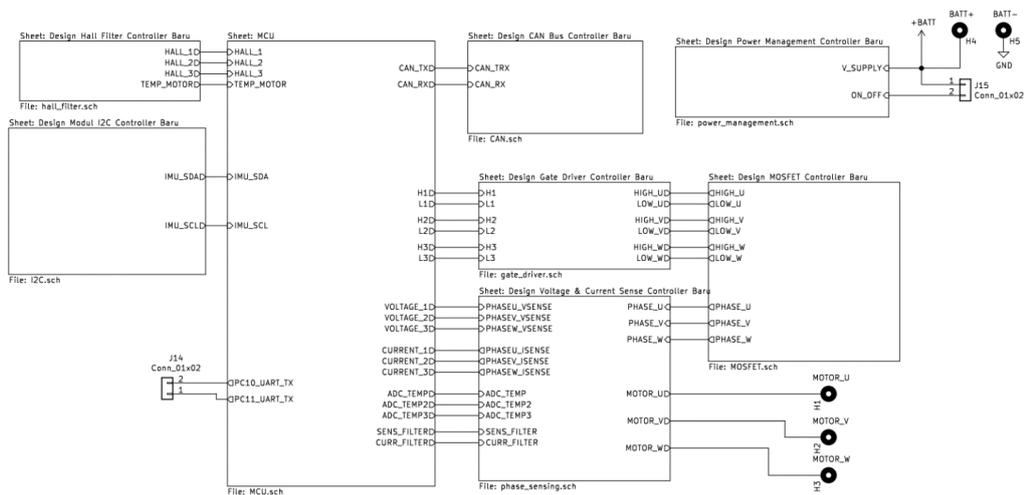
Nanjing Fardriver Controller

- 1 Model: ND72260
- 2 Working Communication: Hall Sensor
- 3 Available Rated Battery Voltage: 48V/60V/72V
- 4 Peak Battery Voltage: 88V
- 5 Available Motor Power: 800W - 2000W
- 6 Defaut Throttle Working Voltage: 0V - 5V
- 7 Peak DC Current Limit: 70-80A
- 8 Peak Phase Current: 240-260A
- 9 Mosfets Detail: 12 FET
- 10 Weight: 1.2kgs
- 11 Instaliing Size: 175mm * 105mm * 53mm
- 12 Controller Design: Sine Wave BLDC
- 13 Case Material: Aluminum
- 14 Support Programmable: PC & Phone
- 15 Suitable for electric bikes, scooters, motorcycles, tricycles, karts, car, ATVs

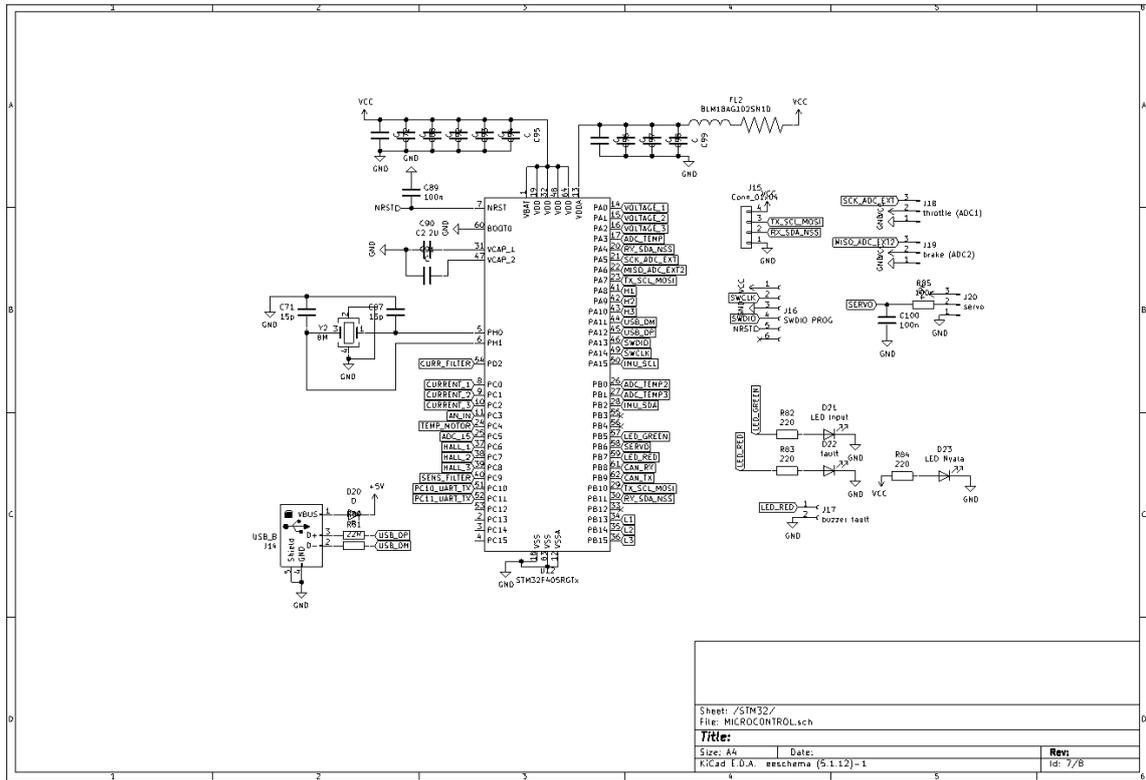


Gambar *Wiring* controller Nanjing Fardriver

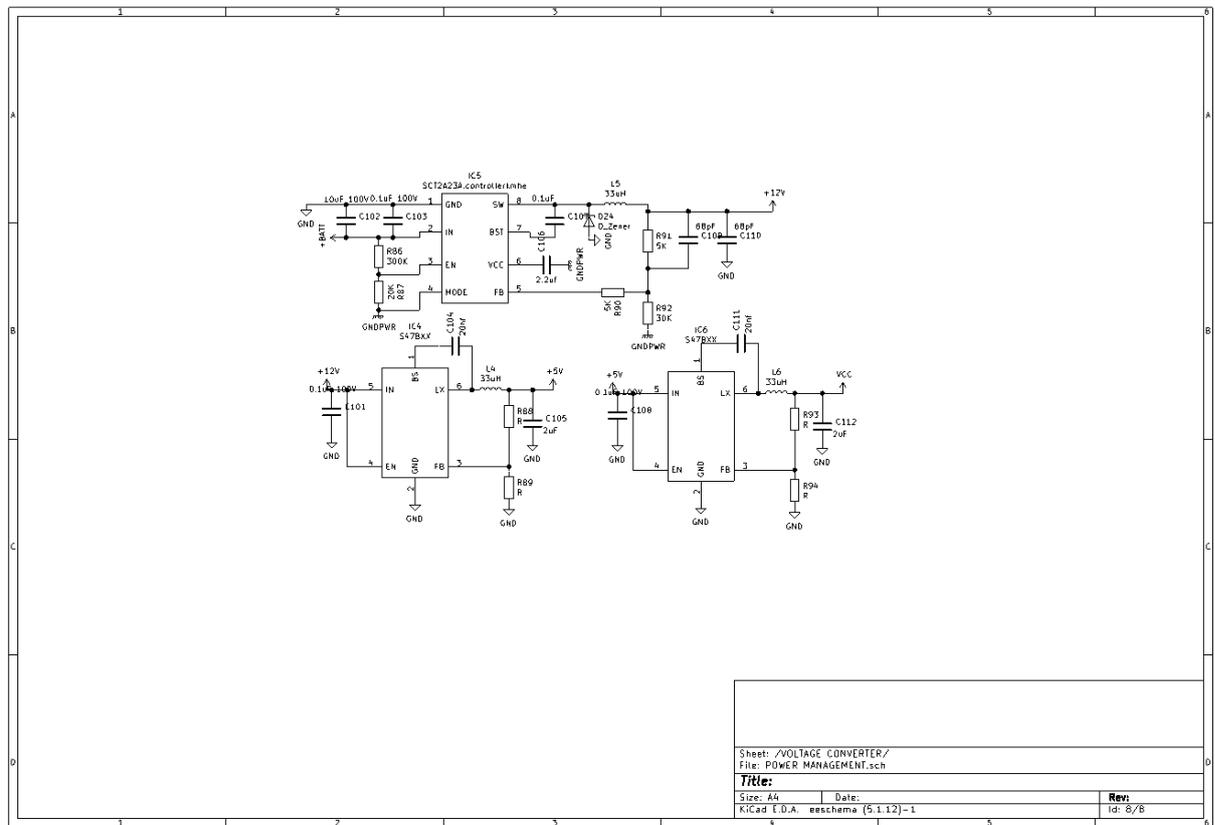
C. Schematic *Board* dari Rancang Bangun Sistem *Regenerative Braking* Berbasis *Constant Current Control* dan *Duty Cycle Control*



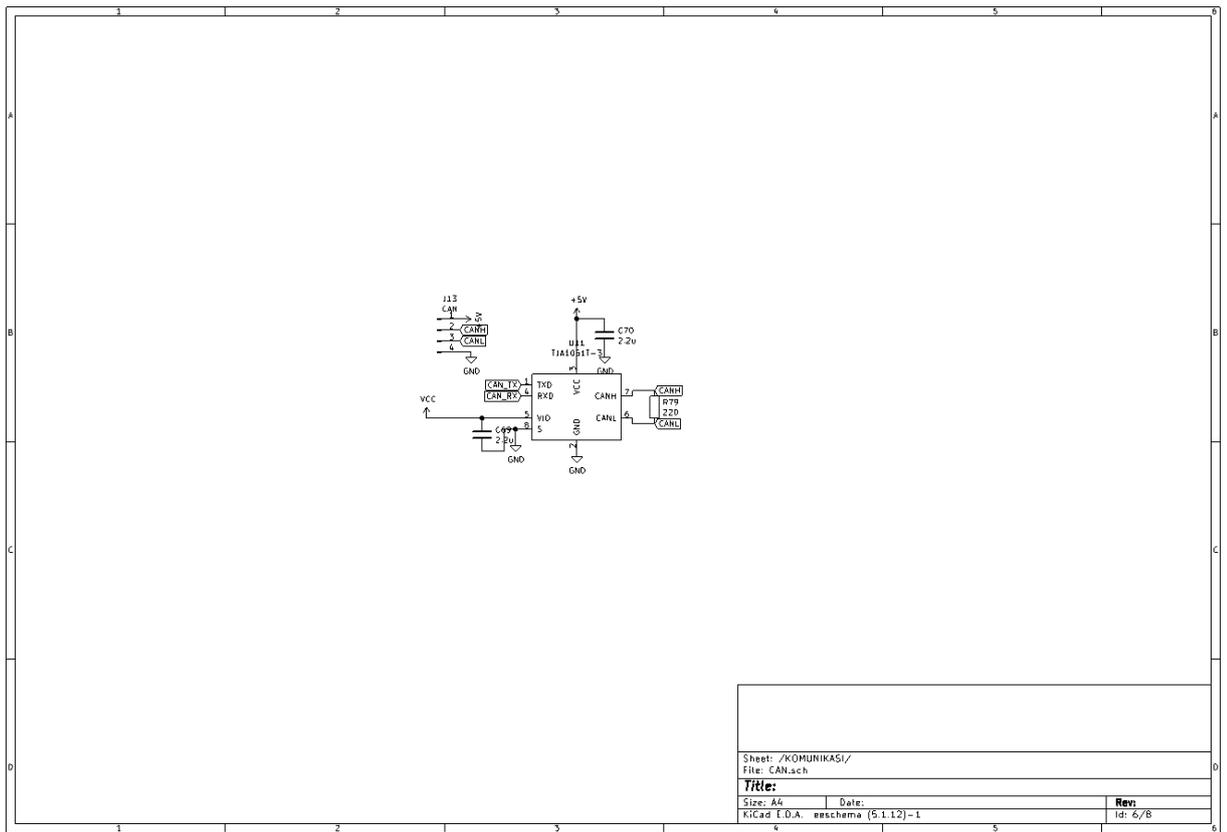
Main Schematic



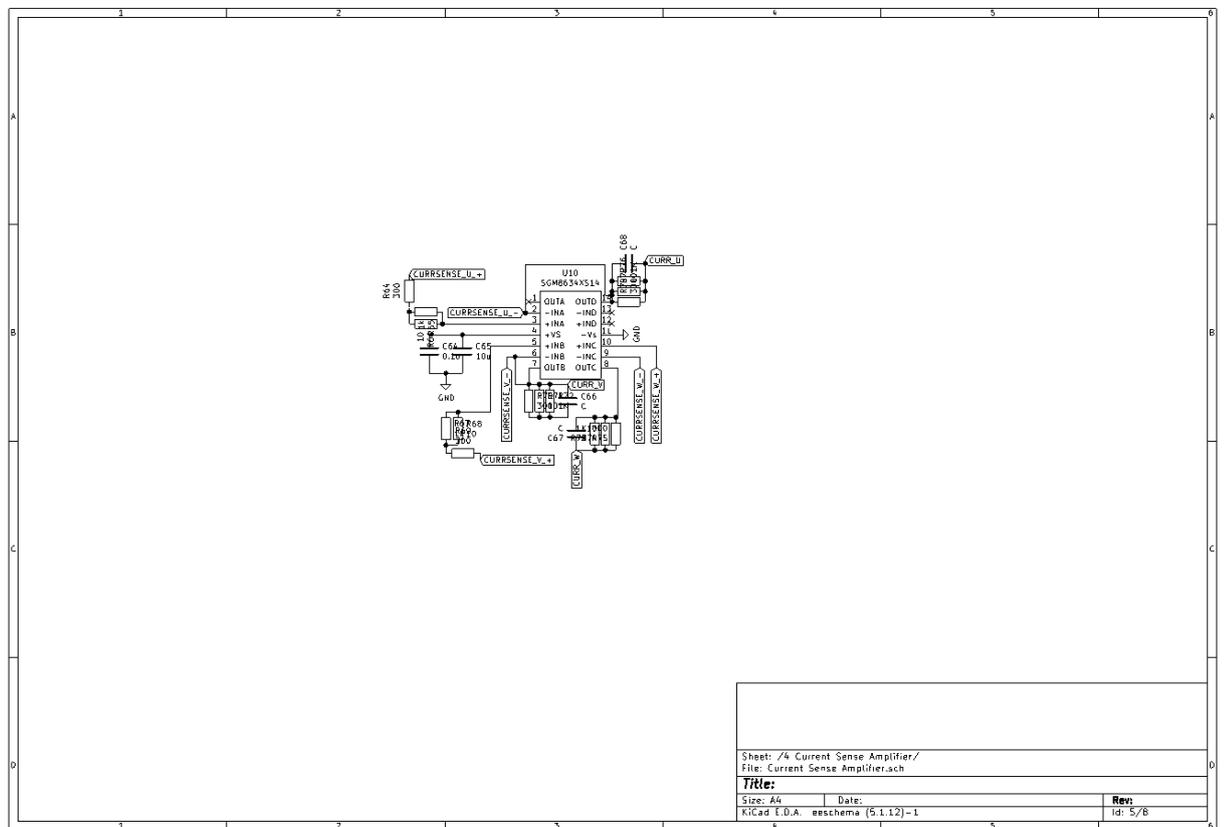
Schematic Mikrokontroler STM32F4



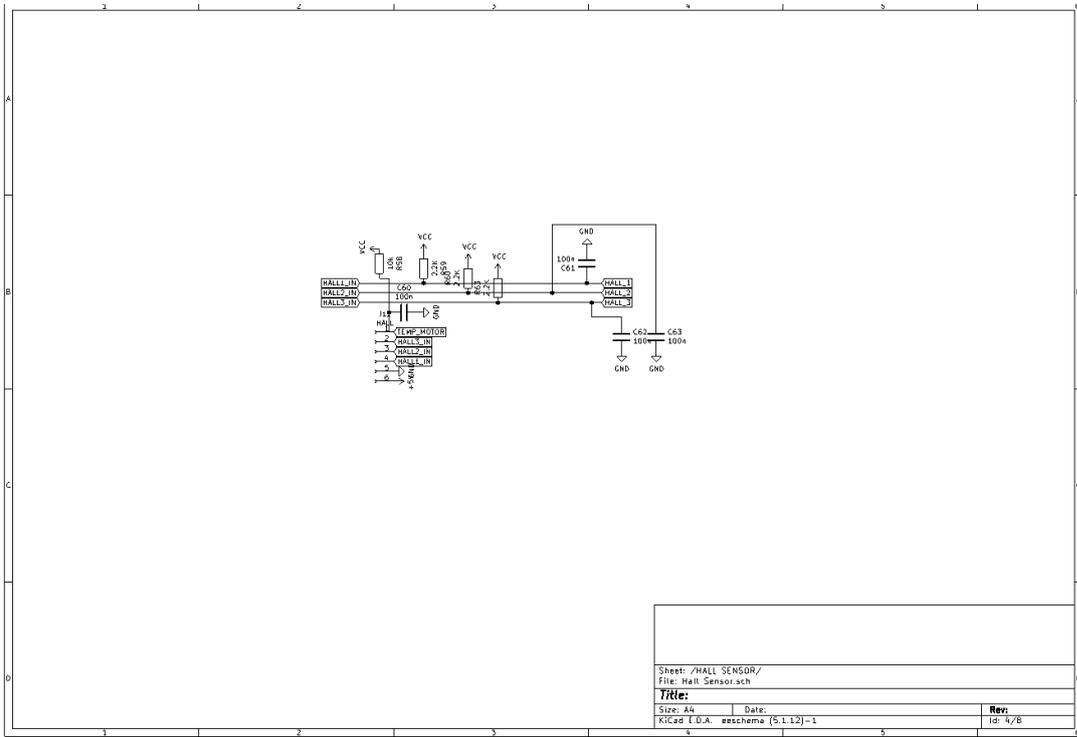
Schematic Power Management



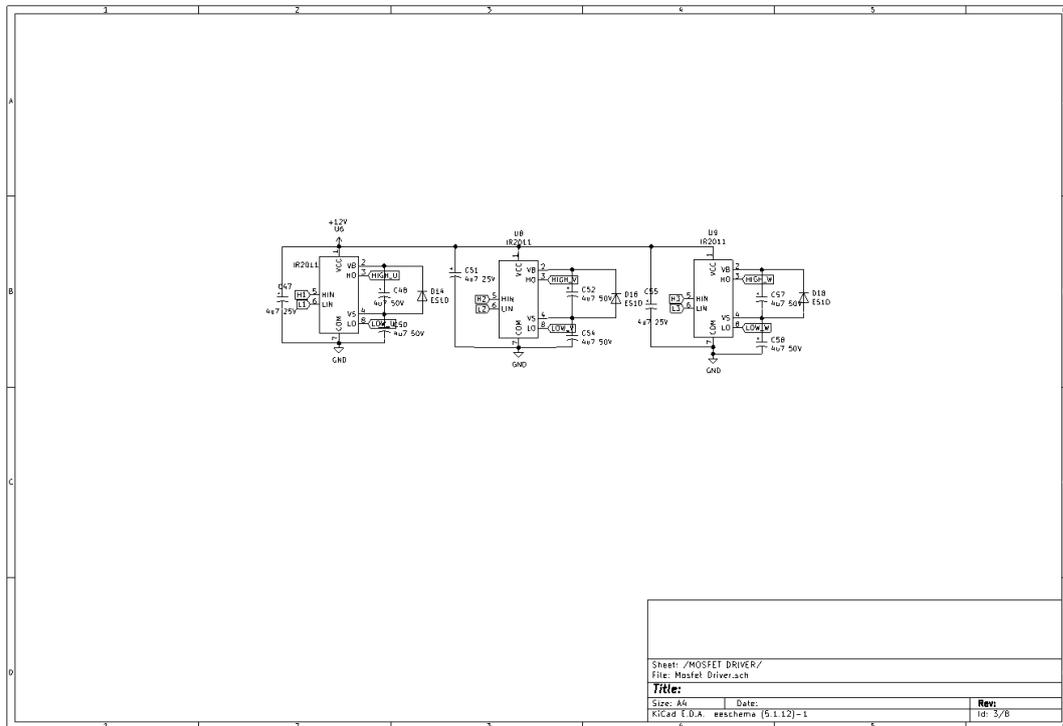
Schematic Komunikasi CAN



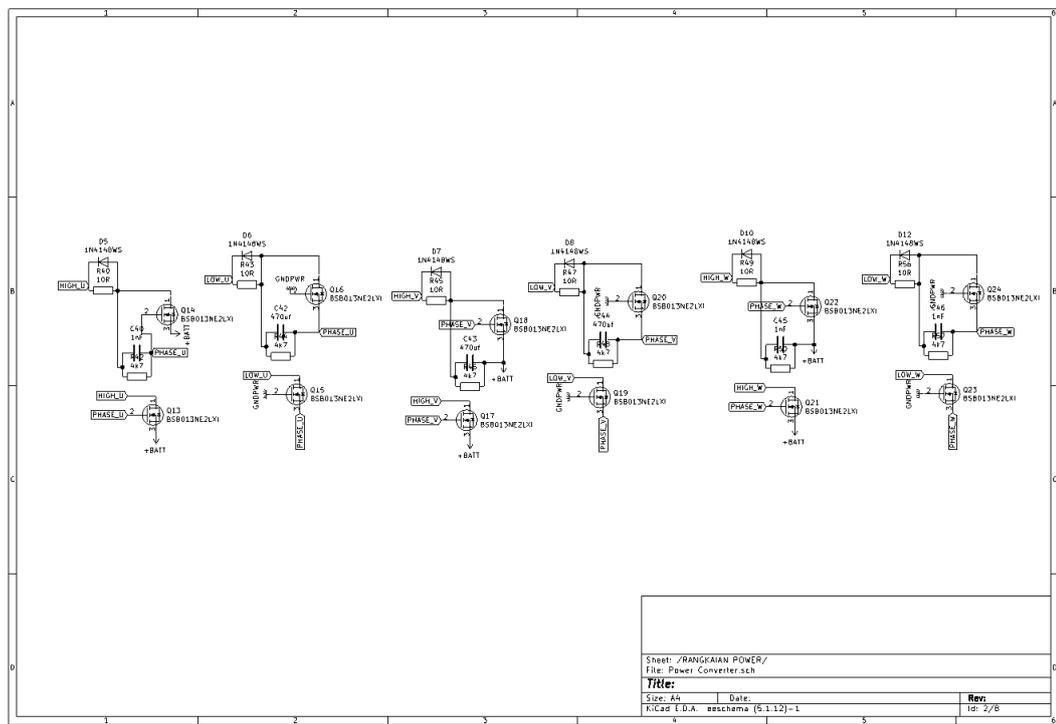
Schematic 4 channel Current Sense Amplifier SGM8634



Schematic Hall Sensor Filter



Schematic MOSFET Driver



Schematic Power Converter

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Abiyyu Naufal Rizqullah, lahir di Sidoarjo, 24 April 2001 yang merupakan anak dari pasangan Bapak Suhartono dan Ibu Rindawati. Penulis menempuh pendidikan di SDN Watutulis I, SMPN 2 Krian, SMAN 1 Krian dan S-1 Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (FTIRS-ITS). Selama menempuh kuliah, penulis mengambil bidang sistem tertanam dan siber fisik. Selain itu, penulis aktif di Nogogeni ITS Team, sebagai staff divisi *electrical and propulsion system* 2022/2023 dan sebagai kepala divisi selama periode 2023/2024. Penulis dapat dihubungi melalui email: abinaufal40@gmail.com.

