TUGAS AKHIR – EE 184801

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PEMBANGKIT MANDIRI MENGGUNAKAN GENERATOR BLDC BERBASIS *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CONVERTER* DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT*

Almizan Aryanto
NRP 07111640000113

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – EE 184801
DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PEMBANGKIT MANDIRI MENGGUNAKAN GENERATOR BLDC BERBASIS *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CONVERTER* DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT*

Almizan Aryanto
NRP 07111640000113

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

FINAL PROJECT – EE 184801
DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MINI POWER PLANT WITH *CONSTANT CURRENT* METHOD *BIDIRECTIONAL BUCK BOOST CONVERTER*-BASED BLDC GENERATOR

Almizan Aryanto
NRP 07111640000113

Supervisors
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical and Intelligent Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PEMBANGKIT MINI MENGGUNAKAN BLDC GENERATOR BERBASIS *BIDIRECTIONAL BUCK BOOST CONVERTER* DENGAN METODE *CONSTANT COURRENT***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2020

Almizan Aryanto
07111640000113

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PEMBANGKIT MINI MENGGUNAKAN BLDC GENERATOR BERBASIS BIDIRECTIONAL BUCK BOOST CONVERTER DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
NIP. 1980 06 03 2006 04 1003

SURABAYA
JULI, 2020

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PEMBANGKIT MINI MENGGUNAKAN BLDC GENERATOR BERBASIS BIDIRECTIONAL BUCK BOOST CONVERTER DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D
NIP. 1965 10 12 1990 03 1003

SURABAYA
JULI, 2020

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PEMBANGKIT MINI MENGGUNAKAN BLDC GENERATOR BERBASIS BIDIRECTIONAL BUCK BOOST CONVERTER DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT*

Almizan Aryanto
07111640000113

Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Dosen Pembimbing 2 : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Saat ini, pembangkit listrik mandiri menjadi sebuah kebutuhan melihat semakin banyak permintaan listrik yang tidak diimbangi dengan pasokan listrik yang ada. Tidak dapat dipungkiri bahwa tempat terpencil bahkan perkotaan juga membutuhkan pembangkit listrik mandiri yang mudah diaplikasikan. Penggunaan generator BLDC sebagai pembangkit listrik mandiri menjadi sebuah pilihan karena dari segi konstruksi yang tidak memerlukan perawatan khusus, mudah dibawa kemanapun serta harga yang cukup murah. Disamping itu, penggunaan dan pemilihan jenis baterai sangat diperlukan untuk sistem pembangkit listrik mini sebagai *energy storage*. Namun, diperlukan sistem kontrol tegangan untuk meningkatkan efisiensi dari generator BLDC dan memperpanjang usia baterai. Oleh karena itu, dibutuhkan implementasi metode *rectification* yang berfungsi menyearahkan tegangan 3 fasa menjadi tegangan DC. Dibutuhkan juga *Bidirectional Buck Boost Converter* yang dapat menaik/turunkan tegangan untuk charging baterai yang optimal dengan metode *constant current* sekaligus mengalirkan daya menuju beban DC.

Kata kunci: Baterai, Konverter *Bidirectional Buck Boost*, Rectifier, Generator BLDC.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa. Karena atas limpahan rahmat, nikmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul "**Desain dan Implementasi Sistem Pembangkit Mini Menggunakan Generator BLDC berbasis *Bidirectional Buck Boost Converter* Dengan Metode *Constant Current*".** Penulisan buku peniletian ini dilakukan dengan penuh kesungguhan agar penelitian ini di masa yang akan datang. Penulis menyadari bahwa penelitian yang telah dilakukan masih jauh dari kata sempurna. Penulis juga mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna perbaikan di masa yang akan datang.

Penulisan buku penelitian ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bimbingan. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua yang selalu memberikan doa dan motivasi kepada penulis selama penyusunan penelitian
2. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D dan Bapak Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan sebaik mungkin
3. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang selalu memberikan dukungan dan semangat.
4. Teman-teman e56 yang telah berjuang bersama semenjak awal masuk perkuliahan.
5. Dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas doa dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis selama ini. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan buku penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberika manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2020

Almizan Aryanto

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR iii

ABSTRAK 4

KATA PENGANTAR 6

DAFTAR ISI 8

DAFTAR GAMBAR 12

DAFTAR TABEL 14

BAB I PENDAHULUAN 16

1.1 Latar Belakang 16

1.2 Perumusan Masalah 17

1.3 Tujuan Tugas Akhir 17

1.4 Batasan Masalah 17

1.5 Metodologi 18

1.6 Sistematika Penulisan 20

1.7 Relevansi 20

BAB 2 PENGISIAN BATERAI *LITHIUM POLYMER* BERBASIS KONVERTER *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST* MENGGUNAKAN GENERATOR BLDC DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT* 22

2.1 Baterai Lithium Polymer (*LiPo)* 22

2.2 Generator BLDC 24

2.3 Konverter Bidirectional Buck Boost 25

2.3.1 Analisis Mode *Buck* 26

2.3.2 Analisa Mode *Boost* 30

2.3.3 Penurunan Parameter Komponen 34

2.4 Metode Constant Current 35

BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI 38

3.1 Perancangan Sistem 38
3.1.1 Sistem Generator 38
3.1.2 Sistem Konverter 39
3.2 Prosedur Pengujian 40
3.3 Prosedur Pengisian Baterai 41
3.4 Prosedur Pengosongan Baterai 42
3.5 Spesifikasi Sistem Generator 42
3.5.1 Generator BLDC 42
3.5.2 Baterai 43
3.5.3 Rangkaian Penyearah 43
3.6 Spesifikasi Baterai 44
3.7 Desain Konverter Bidirectional Buck Boost 44
3.7.1 Penentuan Nilai Resistansi Beban 45
3.7.2 Penentuan Nilai Duty Cycle 46
3.7.3 Penentuan Nilai Induktor 46
3.7.4 Penentuan Nilai Kapasitor 47
3.7.5 Penentuan MOSFET 48
3.8 Simulasi Sistem Generator 49
3.9 Simulasi Konverter pada Kondisi Tunak 50
3.9.1 Simulasi Pensaklaran 50
3.9.2 Simulasi Arus Induktor 51
3.9.3 Simulasi Tegangan Kapasitor 52
3.9.4 Simulasi Tegangan *Input* dan *Output* 53
3.9.5 Simulasi Daya Output 54
3.10 Simulasi Konverter pada Kondisi Dinamis 54
3.11 Implementasi Konverter 56

BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA 58
4.1 Peralatan Pengujian Konverter 58
4.2 Pengujian Sistem Generator..... 58
4.3 Pengujian Sensor 59
4.3.1 Pengujian Sensor Arus..... 59
4.3.2 Pengujian Sensor Tegangan..... 60
4.4 Pengujian Konverter Bidirectional Buck-Boost 62
4.4.1 Pengujian Pensaklaran 62
4.4.2 Pengujian Arus Induktor L_m 64
4.4.3 Pengujian Efisiensi 65
4.5 Pengujian Metode *Constant Current* 68
4.6 Pengujian Baterai..... 70
4.6.1 Pengujian Pengisian Baterai 70
4.6.2 Pengujian Pengosongan Baterai..... 71
BAB 5 PENUTUP 74
5.1 Kesimpulan..... 74
5.2 Saran..... 74
DAFTAR PUSTAKA 76
LAMPIRAN 78
BIODATA PENULIS 86

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lithium Polymer Battery Charging Stage 23
Gambar 2.2 Induced back emf signal of Generator BLDC 25
Gambar 2.3 Bidirectional Buck Boost Converter Topology 26
Gambar 2.4 Buck Mode Analysis 27
Gambar 2.5 First Half Period Buck Mode 28
Gambar 2.6 Second Half Period Buck Mode 29
Gambar 2.7 Boost Mode Analysis 31
Gambar 2.8 First Half Period Boost Mode 32
Gambar 2.9 Second Half Period Boost Mode 33
Gambar 2.10 Constant current method scheme..... 36
Gambar 3.1 Overall system scheme 40
Gambar 3.2 Flowchart of battery charging procedure..... 41
Gambar 3.3 Flowchart of battery discharge procedure 42
Gambar 3.4 Rectifier circuit topology..... 44
Gambar 3.5 Simulation of Rectifier 49
Gambar 3.6 Waveform of input voltage and output voltage 49
Gambar 3.7 Converter simulation in steady mode 50
Gambar 3.8 V_{GS} and V_{DS} voltage waveform..... 51
Gambar 3.9 V_{GS} and inductor current Waveform..... 52
Gambar 3.10 V_{CL} dan V_{CH} capacitor voltage waveforms..... 53
Gambar 3.11 Input and output voltage waveforms 53
Gambar 3.12 Output voltage and current waveforms 54
Gambar 3.13 Converter simulation in dynamic mode..... 54
Gambar 3.14 Converter waveform with constant current mode ... 55
Gambar 3.15 Setpoint and sensor current waveforms..... 55
Gambar 3.16 Bidirectional buck boost converter implementation 57
Gambar 4.1 Generator system testing 59
Gambar 4.2 Current sensor graph 60
Gambar 4.3 V_{GS} and V_{DS} waveforms in MOSFET 1 63
Gambar 4.4 V_{GS} and V_{DS} waveforms in MOSFET 2 63
Gambar 4.5 V_{GS} and IL_m waveforms in buck mode 64
Gambar 4.6 V_{GS} and IL_m waveforms in boost mode 65
Gambar 4.7 Converter efficiency test results in buck mode 67
Gambar 4.8 Converter efficiency test results in boost mode..... 67
Gambar 4.9 Graph of constant current test results in buck mode...68

Gambar 4.10 Graph of constant current test results in boost mode69
Gambar 4.11 Constant current test results with various load 69
Gambar 4.12 Graph of battery charging test results..... 71
Gambar 4.13 Graph of battery discharging test results 72

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC SunnySky X2212 1250 KV ... 43
Tabel 3.2 Spesifikasi Baterai Sistem Generator 43
Tabel 3.3 Spesifikasi Baterai Uji 44
Tabel 3.4 Spesifikasi Desain Konverter 45
Tabel 3.5 Spesifikasi Inti Induktor 46
Tabel 3.6 Spesifikasi MOSFET IRFP4227 48
Tabel 3.7 Spesifikasi Konverter *Bidirectional Buck-Boost* 56
Tabel 4.1 Pengujian sensor arus 60
Tabel 4.2 Pengujian Sensor Tegangan 1 61
Tabel 4.3 Pengujian Sensor Tegangan 2 61
Tabel 4.4 Hasil pengujian efisiensi konverter pada mode *buck* 66
Tabel 4.5 Data Pengujian Pengisian Baterai 70
Tabel 4.6 Data Pengujian Pengosongan Baterai 71

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, penggunaan listrik semakin meningkat seiring berjalannya waktu. Tidak dapat dipungkiri bahwa pembangkit listrik mandiri juga sangat diperlukan. Tidak hanya di tempat terpencil, tapi juga di perkotaan, terutama untuk sistem transportasi. Permasalahan utama dari pembangkit listrik mandiri ini ada pada generator yang akan digunakan. Generator harus dapat menghasilkan densitas daya yang maksimal dan mudah dibawa kemanapun [1].

Dari beberapa macam generator, generator BLDC adalah yang paling cocok untuk diaplikasikan. Generator BLDC memiliki berat yang ringan, desain yang kokoh dan tidak memerlukan pemeliharaan yang rutin karena tidak menggunakan sikat arang untuk menjalankan fungsinya [1].

Untuk sistem pembangkit mandiri, baterai merupakan komponen penting yang tak dapat dipisahkan. Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Baterai dengan jenis LiPo dipilih karena memiliki keunggulan, yaitu konstruksi yang kuat dan portable, mudah diaplikasikan dan tidak mudah mengalami kebocoran elektrolit. Di samping itu, ada beberapa kelemahan dari baterai jenis ini, yaitu harganya yang mahal, umur baterai yang relatif pendek dan menyimpan daya yang lebih sedikit daripada baterai jenis Lithium-Ion.

Karena kontruksi generator BLDC memakai magnet permanen, tegangan yang dihasilkan adalah tiga fasa dan masih banyak mengandung harmonisa akibat induksi back EMF. Tegangan yang terbentuk oleh generator BLDC adalah sinusoidal trapesium. Diperlukan active rectifier untuk menyearahkan agar dapat digunakan untuk charging baterai.

Sebelum digunakan charging baterai, tegangan harus disesuaikan nilainya terlebih dahulu dengan konverter. Konverter yang dipilih adalah Bidirectional DC-DC Converter dengan topologi Buck Boost. Konverter ini memungkinkan transfer daya antara dua sumber DC, di kedua arah. Karena dapat membalikkan arah aliran arus dan daya, sembari menjaga polaritas di kedua sumber DC agar tidak berubah nilai, Bidirectional DC/DC Converter dapat digunakan untuk transfer daya antara baterai dengan beban yang dipasang.

Dengan metode Constant Current bertujuan untuk mempercepat waktu pengisian tanpa merusak sel pada baterai dan membangun sistem pengisian cepat menggunakan metode pengisian arus konstan. Dalam proses pengisian baterai perlu diperhatikan tahap –tahap selama pengisiannya agar dapat memperpanjang usia baterai yakni dengan menjaga konstan arus pada saat pengisian baterai (Constant Current). Baterai yang digunakan juga mempengaruhi sistem yang dibuat agar dapat mempercepat dan mengefisienkan waktu pengisian tanpa merusak baterai.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Pembahasan skema pengendalian tegangan yang dihasilkan generator BLDC
2. Perancangan sistem pengendalian tegangan generator BLDC
3. Perancangan sistem konverter Bidirectional DC/DC Converter dengan topologi Buck Boost
4. Perancangan metode Constant Current untuk charging baterai dengan tegangan masukan yang bervariasi

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Merancang desain kontrol tegangan untuk *charging* baterai dengan generator BLDC sebagai sumber tegangan.
2. Membuat desain dan implementasi DC-DC Bidirectional Buck Boost Converter dengan metode Constant Current untuk aplikasi pengujian charging baterai dengan arus konstan.
3. Membandingkan dan menganalisis hasil implementasi dengan hasil desain dan simulasi DC-DC Bidirectional Buck Boost Converter untuk aplikasi pengujian charging baterai dengan arus konstan

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Implementasi dan pengujian alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat di pasaran dan peralatan uji Laboratorium Konversi Energi Listrik.
2. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam mode tunak (*steady state*)

3. Topologi konverter yang digunakan adalah *Bidirectional Buck Boost Converter* dengan pengisian baterai tanpa menggunakan metode *balancer* atau *equalizer*.
4. Baterai yang digunakan adalah jenis baterai *Lithium Polymer* 3S berkapasitas 2200 mAh.
5. Penelitian ini tidak mempertimbangkan kondisi baterai seperti *State of Charge, State of Health. Depth of Discharge,* dan mengasumsi bahwa baterai yang digunakan dalam keadaan baru.
6. Penelitian ini tidak mempertimbangkan perhitungan mekanis motor, daya yang dihasilkan, torsi dan tegangan yang dihasilkan oleh generator BLDC.
7. Topologi penyearah yang digunakan adalah *three phase uncontrolled rectifier.*

1.5 Metodologi

Penelitian ini akan dilakukan dalam beberapa langkah yaitu sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Literatur yang dipelajari meliputi karakteristik baterai *lithium polymer,* karakteristik motor BLDC sebagai generator, konsep topologi penyearah yang digunakan sebagai sumber tegangan DC, konsep kerja dari konverter *bidirectional buck boost*, metode *constant current* untuk pengisian baterai yang kemudian digunakan sebagai referensi dalam melakukan penelitian ini.

Memahami latar belakang masalah pengisian baterai *Lithium* Polymer dengan generator BLDC. Memahami karakteristik dari motor BLDC sebagai generator. Memahami konsep kerja dari metode *constant current* untuk pengisian baterai. Memahami karakteristik dari MOSFET sebagai saklar penyalaan konverter. Serta memahami prinsip kerja dan penurunan parameter-parameter rangkaian konverter *bidirectional buck-boost.*

2. Desain dan Simulasi

Pada tahap ini didapatkan parameter komponen yang diperlukan untuk menghasilkan desain bidirectional buck boost converter berdasarkan literatur yang telah dipelajari. Desain konverter akan disimulasikan menggunakan Power Simulator 9.1.1 dan membandingkan hasil dari simulasi dengan desain yang telah dibuat. Kemudian dilakukan simulasi metode *constant current* untuk

mendapatkan nilai arus konstan pada konverter untuk pengisian baterai.

3. Implementasi Alat

Pada tahap ini melakukan implementasi rangkaian dari simulasi yang telah dilakukan. Langkah pertama merancang konstruksi generator BLDC yang akan digunakan Langkah kedua merancang rangkaian kontrol generator BLDC dan rangkaian penyearah, merancang rangkaian konverter termasuk rangkaian power *(Bidirectional Buck Boost Converter)* dan kontrol (*Driver* MOSFET dan mikrokontroller) menggunakan software Eagle. Selanjutnya adalah membangun desain alat yang telah dirancang serta merancang program untuk kontrol pensakelaran pada konverter, dan sistem *close loop* menggunakan metode *constant current* pada mikrokontroler Arduino.

4. Pengujian Alat

Pada tahap ini dilakukan pengujian pengisian baterai *LiPo* yang telah diimplementasikan menggunakan topologi Bidirectional Buck Boost Converter. Pengujian dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengujian tegangan yang dihasilkan oleh generator BLDC menggunakan osiloskop, pengujian tegangan yang telah disearahkan, pengujian sinyal pensakelaran, pengujian sensor arus ACS712, pengujian pembagi tegangan dengan *multiturn*, pengujian tegangan masukan dan keluaran, pengujian efisiensi konverter dan pengujian respon dinamis konverter. Selanjutnya dilakukan pengujian kontrol *close loop* berupa pengujian *constant current*. Kemudian dilakukan pengujian untuk pengisian baterai *LiPo* 3S 2200 mAh untuk mendapatkan kurva pengisian baterai dengan menggunakan metode *constant current*.

5. Analisis Data

Tahap ini dilakukan pengolahan data yang telah didapatkan selama pengujian menggunakan Microsoft Excel. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan tabel data dan **Gambar**an data yang lebih baik berupa grafik efisiensi konverter, pengisian baterai dan tegangan akhir baterai. Selanjutnya adalah melakukan analisis data dengan membandingkan data dari hasil simulasi dengan hasil pengujian.

6. Kesimpulan

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh dari simulasi, perhitungan dan pengujian implementasi konverter *bidirectional buck-boost.*

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB 1 : Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belaang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi penelitian ini.

BAB 2 : Pengisian Baterai *Lithium Polymer* Berbasis Konverter *Bidirectional Buck-Boost* Menggunakan Generator BLDC dengan Metode *Constant Current*

Bab ini membahas teori tentang karakteristik BLDC sebagai generator, analisis rangkaian penyearah yang digunakan, analisis parameter-parameter baterai Lithium Polymer, analisis mode tunak konverter *bidirectional buck-boost*. Di dalam analisis mode tunak terdapat penjelasan cara kerja konverter dan penurunan rumus parameter komponen.

BAB 3 : Desain, Simulasi dan Implementasi

Bab ini berisi megenai perancangan sistem, perancangan desain dan parameter komponen sistem, simulasi konverter saat kondisi tunak dan dinamis, serta implementasi.

BAB 4 : Pengujian dan Analisis Data

Bab ini berisi mengenai pengujian dan analisis data terhadap konverter *bidirectional buck-boost* meggunakan peralatan yang terdapat di laboratorium Konversi Energi, dilanjutkan dengan pengujian metode *constant current*

BAB 5 : Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari analisa data yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk penelitian selanjutnya

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain :

1. Dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan konverter *bidirectional buck-boost.*
2. Dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan sistem pembangkit mandiri berbasis generator BLDC.
3. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan pengujian pengisian baterai dengan metode *constant current.*
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil masalah serupa untuk penelitian

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 2
PENGISIAN BATERAI *LITHIUM POLYMER* BERBASIS KONVERTER *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST* MENGGUNAKAN GENERATOR BLDC DENGAN METODE *CONSTANT CURRENT*

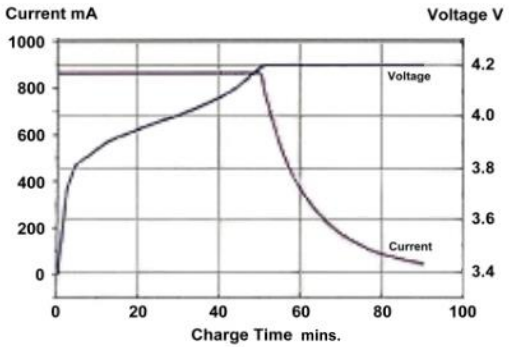
2.1 Baterai Lithium Polymer (*LiPo)*

Baterai atau akkumulator merupakan sebuah peralatan elektronika yang dapat menyimpan energi listrik arus searah (dc) dengan menggunakan proses elektrokimia dalam bentuk senyawa kimia dari sel elektrokimia yang terkandung di dalam baterai tersebut. Terdapat dua jenis baterai berdasarkan pada proses yang terjadi, yaitu *primary battery* merupakan baterai yang hanya dapat dipakai sekali dan *secondary battery* merupakan baterai yang dapat digunakan beberapa kali dengan cara diisi ulang. Contoh dari baterai primer adalah baterai alkali. Sedangkan contoh dari baterai sekunder adalah baterai *lithium ion* (Li-ion), baterai *lithium polymer* (LiPo), baterai *lead acid* (Accu) dan baterai *nickel-metal-hydride* (NiMH) [2].

Baterai *lithium polymer* (LiPo) menggunakan dua elektroda sebagai katoda (elektroda positif) dan anoda (elektroda negatif) dan elektrolit polimer yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis sebagai konduktor. Lapisan polimer ini disusun berlapis-lapis di antara anoda dan katoda sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran ion. Baterai LiPo tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran sesuai dengan kebutuhan.[2] Keunggulan dari baterai ini antara lain: memiliki bentuk yang ringan dan dapat dibentuk berbagai bentuk atau ukuran, kapasitas daya yang lebih besar, serta *discharge rate* energi yang lebih tinggi. Namun, disamping itu terdapat beberapa kelemahan dari baterai ini yaitu : usia pemakaian yang pendek, bila struktur baterai rusak dapat menimbulkan kebakaran, serta memerlukan perawatan khusus untuk pengisian, pengosongan serta penyimpanan baterai [3].

Baterai LiPo memiliki standar tegangan nominal pada tiap sel nya. Tegangan nominal merupakan standar tegangan tetap yang berada di dalam tiap sel baterai, bernilai 3.7 V yang harus diisi penuh ke 4.2 V pada tiap sel nya. Seperti telah disinggung di atas bahwa kelebihan baterai ini adalah tersedia dalam beberapa bentuk dan ukuran. Sel baterai LiPo dapat dihubungkan seri atau paralel dengan sel lain sesuai dengan kebutuhan. Dapat dilihat bahwa pada Gambar 2.1

dibawah merupakan kurva karakteristik pengisian dari baterai LiPo. Ketika melakukan pengisian, tegangan akan semakin meningkat sedangkan arus akan dibatasi, namun ketika telah mencapai tegangan maksimal baterai (4.2 V), tegangan harus konstan dan arus perlu dikurangi. Hal ini perlu dipertimbangkan untuk merancang sebuah sistem pengisian baterai.



Gambar 2.1 Lithium Polymer Battery Charging Stage

Kapasitas dari baterai LiPo menggunakan satuan *miliamp hours* (mAh). Dapat juga dikatakan seberapa banyak arus yang dapat dikuras ketika baterai dalam keadaan *discharge* selama 1 jam. Semakin besar nilai mAh, semakin lama beterai tersebut akan habis. Namun, hal ini juga akan mengakibatkan ukuran fisik dari baterai tersebut menjadi semakin besar [3].

C-rating merupakan nilai untuk mengetahui seberapa cepat baterai tersebut dikosongkan tanpa merusak baterai tersebut. Pada dasarnya merupakan hasil perkalian antara nilai C dengan kapasitas baterai. Hasil perhitungan tersebut merupakan beban maksimal yang dapat dipasang ke baterai secara terus-menerus. Bila lebih dari itu, maka baterai akan lebih cepat mengalami kerusakan [3].

Kondisi yang disarankan untuk pengisian baterai LiPo adalah nilai arus yang sama dengan 1C atau kapasitas baterai. Sebagai contoh, untuk baterai dengan kapasitas 3000 mAh maka nilai arus yang disarankan saat pengisian adalah 3 A, dan seterusnya. Sebaiknya tidak melebihi dari kapasitas baterai tersebut.

Selain itu, *balancing* atau *equalizing* tegangan tiap sel baterai LiPo juga sangat disarankan. Hal ini untuk memastikan bahwa tiap sel baterai mengosongkan kapasitasnya dengan jumlah yang sama, dan dapat memperpanjang usia baterai [3].

Baterai LiPo mengandung lithium dan logam alkali yang bila bereaksi dengan air akan terbakar. Ketika dipanaskan, lithium juga akan terbakar ketika bereaksi dengan oksigen. Pemakaian baterai yang ekstrim (baterai terguncang bahkan mengakibatkan penyok) dapat menimbulkan kelebihan atom oksigen dan lithium di dalam baterai. Hal ini dapat memicu terbentuknya senyawa lithium oksida (Li_2O) di dalam anoda dan katoda. Lithium oksida dapat memicu korosi atau karat dalam baterai, dan dapat meningkatkan resistansi internal pada baterai. Bila hal ini terjadi, maka dapat memicu panas berlebih ketika baterai sedang digunakan. Panas berlebih juga dapat menyebabkan baterai menggelembung [3].

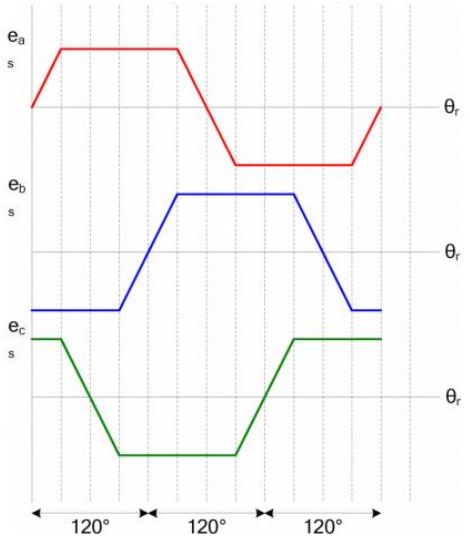
Untuk meningkatkan usia baterai, baterai tidak diperbolehkan disimpan dalam keadaan *full charge* terlalu lama yang dapat merusak baterai, mengingat senyawa elektrokimia yang ada di dalam baterai tidak stabil. Kondisi yang disarankan untuk penyimpanan baterai bila lama tidak digunakan adalah dengan mengatur tegangan tiap sel menjadi 3,8 V.

2.2 Generator BLDC

Generator BLDC merupakan salah satu jenis *permanent magnet generator* yang menggunakan magnet permanen didalamnya. Pada dasarnya merupakan motor BLDC yang dialih fungsikan menjadi generator. Generator BLDC juga dapat dikategorikan sebagai mesin sinkron multiphasa, dapat dioperasikan pada kecepatan dan frekuensi yang bervariasi daripada beroperasi di kecepatan sinkron. Di sisi lain, medan magnet dan putaran rotor memiliki kecepatan yang sama atau sinkron. Oleh sebab itu, generator BLDC cocok digunakan untuk aplikasi turbin angin [4]. Bahkan, generator BLDC memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin magnet permanen konvensional. Karena menggunakan magnet permanen, generator BLDC tidak memerlukan *brush* dan komutator untuk membangkitkan medan magnet. Disipasi panas akibat rugi-rugi belitan medan juga tidak diperhitungkan karena menggunakan magnet permanen. Untuk mengurangi rugi arus Eddy, stator dilaminasi sedemikian rupa[1].

Bagian utama generator BLDC meliputi bagian stator dan rotor. Pada generator BLDC memiliki tiga kumparan pada bagian stator, dan memiliki magnet permanen pada bagian rotor. Terdapat dua tipe kumparan stator yaitu *sinusoidal* dan *trapezoidal*. Kedua tipe tersebut dikategorikan berdasarkan bentik sinyal dari sinyal *back-emf (Back Electromotive Force).*bentuk dari sinyal *back-emf* ditentukan oleh perbedaan hubungan kumparan dan jarak dari celah udara [5].

Generator memproduksi sinyal *back-emf* tiga fasa, yang berbentuk seperti trapesium, dimana besarnya berbanding lurus dengan kecepatan. Sinyal *back-emf* merupakan tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan generator BLDC ketika generator BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan [5].

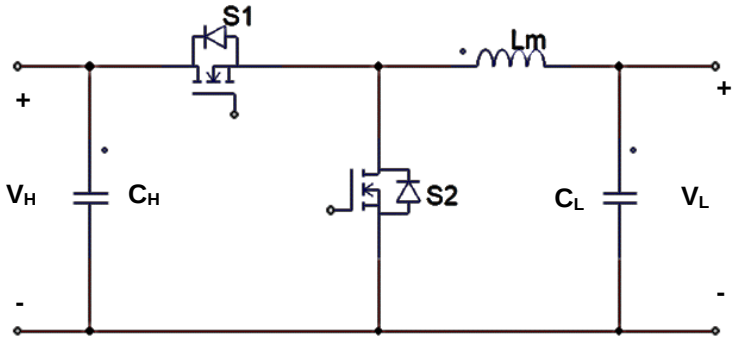


Gambar 2.2 Induced back emf signal of Generator BLDC

2.3 Konverter Bidirectional Buck Boost

Konverter bidirectional merupakan suatu perangkat konversi tegangan DC yang dapat menyalurkan daya dari dua arah secara bergantian. Konverter bidirectional mampu mengubah arah aliran tegangan di dua sisi, yang artinya dapat mengalirkan daya dari sisi

kanan ke kiri maupun sebaliknya, sambil menjaga polaritas pada kedua sisi tersebut. Konverter *Bidirectional Buck Boost* merupakan salah satu jenis konverter yang sering digunakan karena memiliki kelebihan mudah diterapkan dan memiliki ripple arus rendah sehingga dapat digunakan agar mendapatkan efisiensi yang tinggi dan memperpanjang lifetime baterai. Umumnya konverter ini sering digunakan pada *renewable energy system, fuell cell energy system, hybrid electric vehicle* (HEV) dan *uninterruptible power supplies* (UPS) [6]. Berikut merupakan topologi konverter *bidirectional buck boost* yang diusulkan dalam pengerjaan penelitian ini.

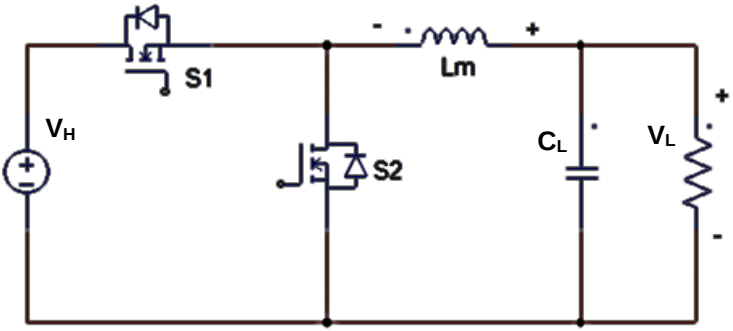


Gambar 2.3 Bidirectional Buck Boost Converter Topology

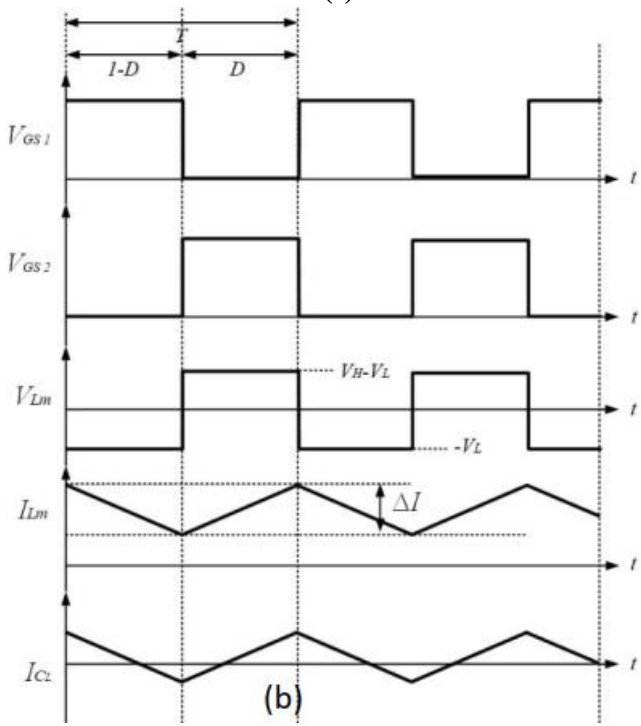
Konverter yang digunakan dalam penelitian adalah konverter dengan menggunakan mode *Continuous Current Mode* (CCM), dimana arus yang mengalir pada induktor tidak akan pernah bernilai nol.

2.3.1 Analisis Mode *Buck*

Pada mode ini, sisi tegangan tinggi (V_H) menjadi *input*, sedangkan sisi tegangan rendah (V_L) menjadi *output*. Rangkaian ekivalen dan bentuk gelombang pada mode ini ditunjukkan pada Gambar 2.4, sehingga memungkinkan aliran energi dari sisi tegangan tinggi ke tegangan rendah. Pada mode ini, saat S1 konduksi maka akan terjadi pengisian arus induktor ditandai dengan arus induktor yang mulai naik. Selanjutnya saat S1 terbuka dan S2 konduksi maka akan terjadi pengosongan arus induktor yang ditandai dengan penurunan arus induktor. Durasi dari S1 konduksi atau terbuka ditentukan oleh besarnya *duty cycle*.



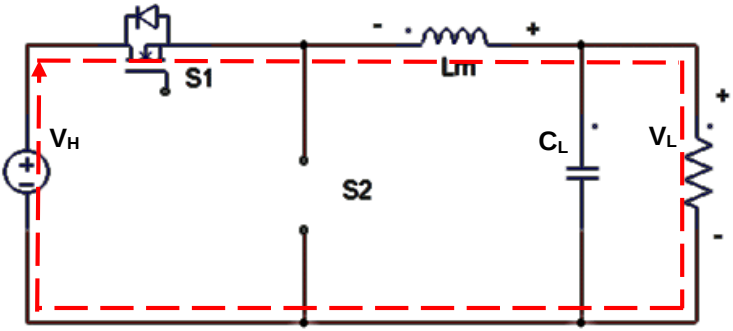
(a)



Gambar 2.4 Buck Mode Analysis (a) Equivalent Circuit (b) Switch Waveform

Analisa Setengah Periode Pertama

Saat S1 *switch on* dan S2 *switch off*, maka rangkaian ekivalen yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.5 First Half Period Buck Mode

Pada kondisi ini, tegangan pada induktor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_{Lm} = V_H - V_L = L\frac{di_{Lm}}{dt} \tag{2.1}$$

Selain itu, induktor akan mengalami pengisian energi (*charging*) dan laju perubahan arus pada induktor akan meningkat secara linier. Kondisi ini dapat dituliskan menjadi :

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} = \frac{V_H - V_L}{Lm} \tag{2.2}$$

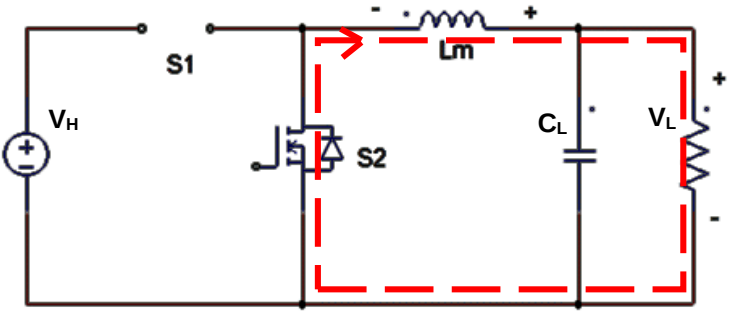
Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus pertama dapat dituliskan menjadi :

$$\Delta i_{Lm}(on) = \frac{V_H - V_L}{Lm} DT \tag{2.3}$$

Analisa Setengah Periode Kedua

Pada kondisi ini, S1 *switch off* dan S2 *switch on*. Sehingga rangkaian ekivalen yang didapatkan ditunjukkan pada Gambar 2.9. Dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan (KVL) maka tegangan induktor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_{Lm} = -V_L = L_m\frac{di_{Lm}}{dt} \tag{2.4}$$



Gambar 2.6 Second Half Period Buck Mode

Pada kondisi ini, induktor mengalami pengosongan energi dan menyebabkan arus induktor menurun secara linier. Kondisi ini juga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = -\frac{V_L}{Lm} \tag{2.5}$$

Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus kedua dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta i_{Lm}(off) = \frac{-V_L}{Lm}(1-D)T \tag{2.6}$$

Dengan mengasumsikan konverter beroperasi dalam keadaan *steady state*, maka laju perubahan arus induktor dalam satu siklus penuh adalah bernilai sama dengan nol. Sehingga persamaan matematis dari kondisi ini dapat dituliskan menjadi :

$$\Delta i_{Lm}(on) + \Delta i_{Lm}(off) = 0 \tag{2.7}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan 2.3 dan 2.6 pada persamaan 2.7 maka didapatkan :

$$\frac{V_H - V_L}{Lm} DT - \frac{V_L}{Lm}(1-D)T = 0$$

$$V_L = V_H D \tag{2.8}$$

Dari persamaan 2.24, dapat diketahui bahwa rasio tegangan pada mode operasi *buck* berbanding lurus dengan nilai *duty cycle* pada *switch* S1.

Penentuan nilai kapasitor saat mode *buck*, dapat ditentukan dari perubahan muatan kapasitor saat proses pengisian dan pengosongan.

Arus kapasitor akan bernilai positif saat kapasitor sedang ada pada proses *charging*. Sehingga didapat persamaan *ripple* tegangan pada kapasitor C_L sebagai berikut :

$$\Delta V_L = \frac{\Delta i_{Lm}}{8 \times f \times C_L} \tag{2.9}$$

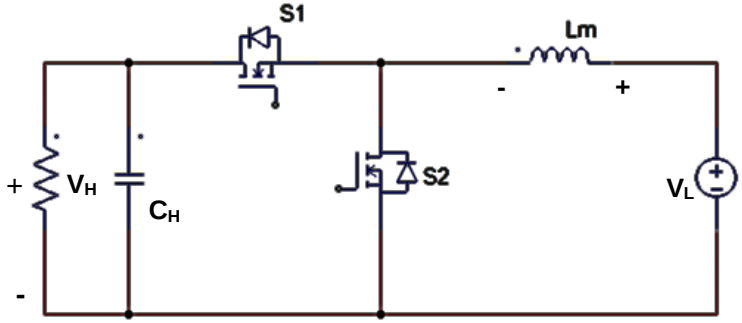
Dengan mensubtitusikan persamaan 2.9 pada persamaan 2.6, didapatkan nilai kapasitor C_L sebagai berikut :

$$\Delta V_L = \frac{V_L(1-D)}{8 \times f^2 \times L_m \times C_L} \tag{2.11}$$

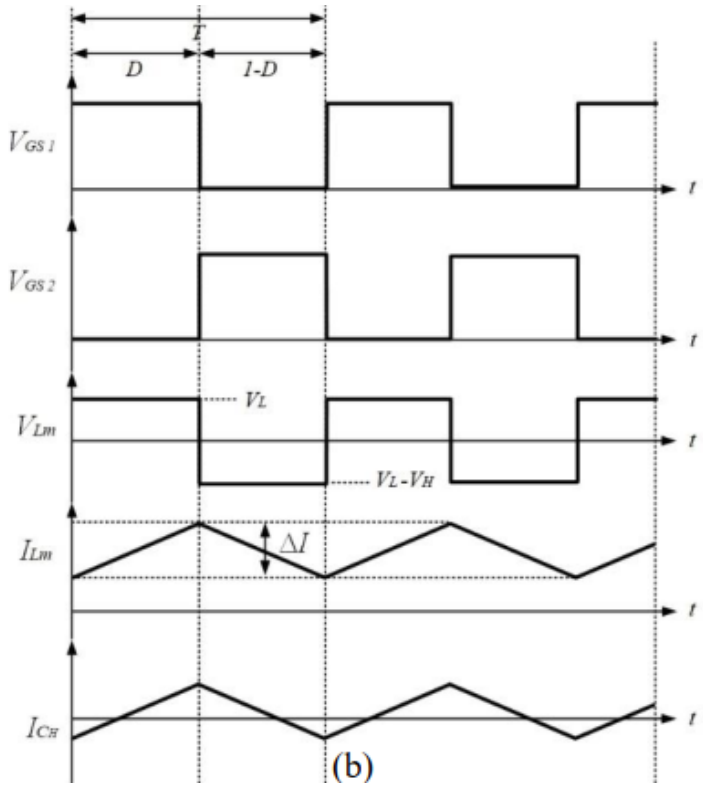
$$C_L = \frac{(1-D)}{8 \times f^2 \times L_m \times (\Delta V_L / V_L)} \tag{2.12}$$

2.3.2 Analisa Mode *Boost*

Pada mode ini, sisi tegangan rendah (V_L) menjadi *input*, sedangkan sisi tegangan tinggi (V_H) menjadi *output*. Rangkaian ekivalen dan bentuk gelombang pada mode ini ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pada mode ini, saat S1 tertutup maka akan terjadi pengisian arus induktor ditandai dengan arus induktor yang mulai naik. Selanjutnya saat S1 terbuka maka akan terjadi pengosongan arus induktor yang ditandai dengan penurunan arus induktor. Durasi dari S1 tertutup atau terbuka ditentukan oleh besarnya *duty cycle*.



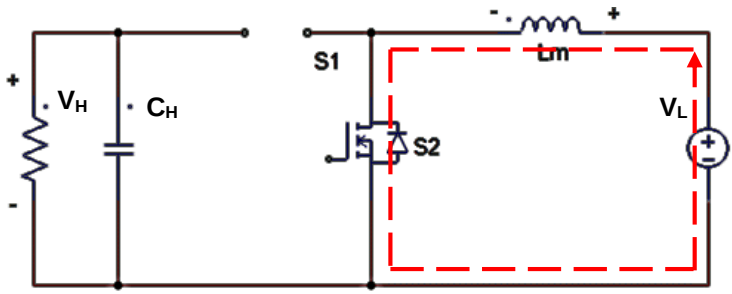
(a)



Gambar 2.7 Boost Mode Analysis (a) Equivalent Circuit (b) Switch Waveform

Analisa Setengah Periode Pertama

Ketika S2 *switch on* dan S1 *switch off*, maka rangkaian ekivalen akan menjadi seperti pada Gambar 2.5. Pada kondisi ini, induktor Lm dan sumber V_L terhubung paralel sehingga tegangan idnuktor V_{Lm} akan bernilai sama dengan V_L.



Gambar 2.8 First Half Period Boost Mode

Dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan (KVL) diperoleh persamaan tegangan pada induktor sebagai berikut :

$$-V_L + V_{Lm} = 0$$

$$V_L = V_{Lm} = L\frac{di_{Lm}}{dt} \tag{2.13}$$

Arus induktor akan meningkat secara linier, sehingga perubahan arus pada induktor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} \tag{2.14}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (2.6) dan (2.7) diperoleh persamaan :

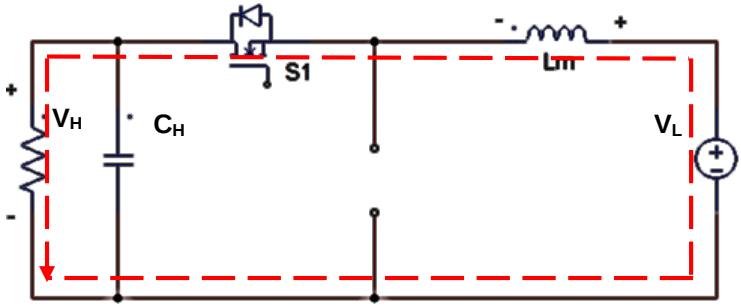
$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} = \frac{V_L}{Lm} \tag{2.15}$$

Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus pertama dapat dituliskan menjadi :

$$\Delta i_{Lm(on)} = \frac{V_L}{Lm}DT \tag{2.16}$$

Analisa Setengah Periode Kedua

Pada setengah periode selanjutnya, saat S1 *switch on* dan S2 *switch off*, maka rangkaian ekivalen ditunjukkan pada Gambar 2.6. Pada kondisi ini, laju perubahan arus pada induktor akan mengalami penurunan secara linier akibat dari pengosongan energi atau *discharging*.



Gambar 2.9 Second Half Period Boost Mode

Dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan (KVL) diperoleh persamaan tegangn pada induktor sebagai berikut :

$$V_{Lm} = V_L - V_H = L\frac{di_{Lm}}{dt} \tag{2.17}$$

Laju perubahan arus pada induktor dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = \frac{V_L - V_H}{Lm} \tag{2.18}$$

Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor untuk kondisi ini dapat dituliskan menjadi

$$\Delta i_{Lm}(off) = \frac{V_L - V_H}{Lm}(1-D)T \tag{2.19}$$

Dengan mengasumsikan konverter beroperasi dalam keadaan *steady state*, maka laju erubahan arus pada induktor dalam satu siklus penuh adalah bernilai sama dengan nol. Sehingga persamaan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta i_{Lm}(on) + \Delta i_{Lm}(off) = 0 \tag{2.20}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (2.9) dan (2.12) pada persamaan (2.13) maka didapatkan

$$\frac{V_L}{Lm}DT + \frac{V_L - V_H}{Lm}(1-D)T = 0$$

$$V_H = \frac{1}{1-D}V_L \tag{2.21}$$

Dari persamaan 2.21, dapat diketahui bahwa rasio tegangan pada mode operasi *boost* semakin besar bila nilai *duty cycle* pada *switch* S2 semakin besar.

Penentuan nilai kapasitor saat mode *boost*, dapat ditentukan dari perubahan muatan kapasitor saat proses pengisian dan pengosongan. Penentuan nilai kapasitor ketika mode *boost* didapat saat saklar S2 padam, sehingga didapat persamaan *ripple* tegangan pada kapasitor C_H sebagai berikut:

$$\Delta V_H = \frac{V_H \times D}{R_H \times f \times C_H} \tag{2.22}$$

Dengan menyederhanakan persamaan 2.22 maka didapat

$$C_H = \frac{D}{R_H \times f \times (\frac{\Delta V_H}{V_H})} \tag{2.23}$$

2.3.3 Penurunan Parameter Komponen

Konverter *Bidirectional Buck Boost* mempunyai parameter-parameter komponen yang perlu ditentukan nilainya. Parameter tersebut meliputi nilai induktor Lm, kapasitor C_L dan kapasitor C_H. Nilai pada induktor ditentukan oleh nilai riak arus ΔI_L dan frekuensi switching yang sudah ditetapkan. Perhitungan nilai induktor saaat kondisi konduksi dapat menggunakan persamaan 2.15 :

$$\frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_L}{L}$$

$$L = \frac{V_L \times D}{\Delta i_L \times f} \tag{2.24}$$

Unuk menentukan nilai oarameter dari kapasitor C_H dan C_L dapat menggunakan persamaan 2.11 dan 2.22 sebagai berikut :

$$C_H = \frac{D}{R_H \times f \times (\Delta V_H / V_H)} \tag{2.25}$$

$$C_L = \frac{(1-D)}{8 \times f^2 \times L_m \times (\Delta V_L / V_L)} \tag{2.26}$$

Untuk menentukan nilai beban R, dapat menggunaka persamaan sebagai berikut :

$$R = \frac{{V_o}^2}{P_o} \tag{2.27}$$

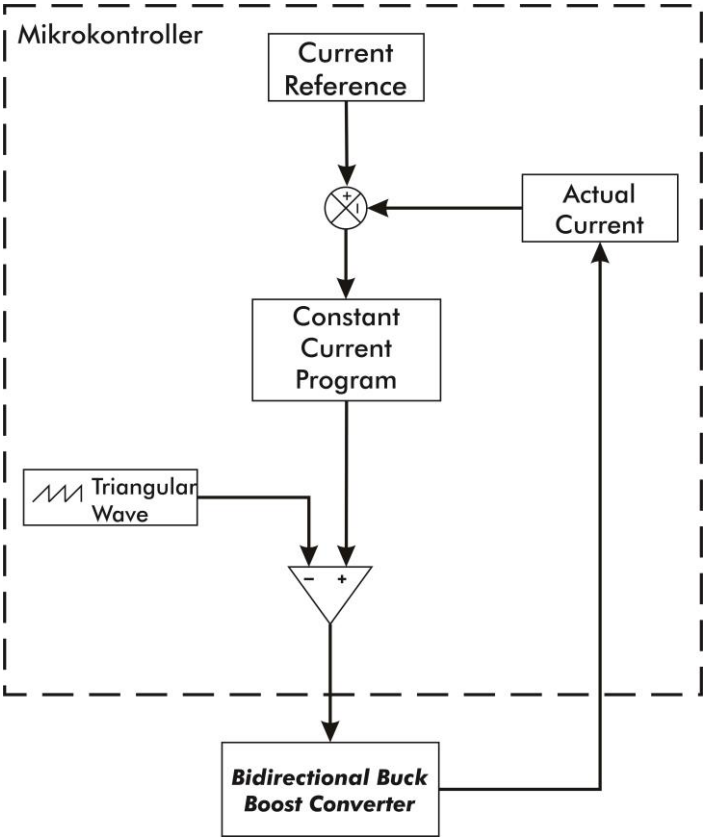
Dimana V_o merupakan tegangan *output* dari konverter sedangkan P_o adalah daya *output* dari konverter yang dianggap ideal sehingga daya *output* sama dengan daya *input*.

2.4 Metode Constant Current

Dalam penggunaan baterai, hal yang perlu diperhatikan adalah menjaga usia baterai agar tidak cepat rusak. Seringkali baterai mengalami degradasi sel elektrokimia lebih cepat daripada yang seharusnya. Hal ini dapat disebabkan proses pengisian baterai yang kurang optimal. Salah sata cara untuk merawat baterai adalah dengan mengoptimalkan proses pengisian baterai atau *charging*. Terdapat beberapa metode *charging* baterai yang dapat dipakai, seperti *Constant Current* (CC), *Constant Voltage* (CV), dan *Constant Current Constant Voltage* (CC-CV) [6].

Sesuai dengan namanya, *constant current* merupakan metode *charging* baterai dengan menjaga arus tetap konstan sesuai dengan arus referensi yang telah ditetapkan hingga tegangan pada baterai telah mencapai tegangan maksimalnya. Keunggulan dari metode ini adalah dapat mempercepat durasi pengisian dengan meningkatkan nilai arus ketika pengisian baterai. Namun kelemahan dari metode ini adalah tidak dapat digunakan hingga baterai mencapai kondisi *full charge*. Hal ini dikarenakan walaupun tegangan baterai mencapai maksimal, namun EMF (*Electro Motive Forece)* pada baterai belum mencapai tegangan terminalnya karena resistansi internal pada baterai mengalami *overpotential*. Untuk pengisian baterai hingga *full charge*, umumnya menggunakan metode CC-CV. Metode CC sering digunakan sebagai *quick charging*, atau pengisian baterai cepat dengan menambah nilai arus ketika pengisian.

Prinsip kerja dari metode ini cukup sederhana, yaitu dengan membandingkan nilai arus aktual *output* konverter dengan arus referensi yang dinginkan. Perbedaan atau *error* yang didapat akan diproses oleh mikrokontroller untuk menghasilkan PWM koreksi. *Switching* pada MOSFET bergantung pada nilai *duty cycle* dari PWM yang dikeluarkan oleh mikrokontroller yang akan mengatur arus aktual *output* konverter agar mendekati nilai arus referensi yang telah ditetapkan, sehingga memperkecil nilai error[6].



Gambar 2.10 Constant current method scheme

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 3
DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Pada bab 3 ini akan dibahas mengenai perancangan sistem keseluruhan dari desain, simulasi hingga implementasi sistem pembangkit mini berbasis konverter *bidirectional buck boost* menggunakan generator BLDC dengan metode *constant current.* Pada proses desain akan dilakukan perhitungan dan penetapan parameter komponen yang diperlukan untuk mmbangun konverter *bidirectional buck boost*. Komponen tersebut meliputi pemilihan nilai kapasitor, induktor dan spesifikasi MOSFET yang sesuai dengan konverter yang telah direncanakan. Desain yang telah dirancang akan disimulasikan menggunakan software PSIM 9.1.1 serta MATLAB R2017a. Langkah ini bertujuan untuk memastikan apakah perhitungan yang telah dilakukan sudah sesuai serta memastikan konverter bekerja dengan baik dalam kondisi *close loop* dan *open loop* sesuai dengan perencanaan awal. Hasil dari proses desain dan simulasi akan diimplementasikan sedemikian rupa dengan mengacu hasil pada langkah sebelumnya.

3.1 Perancangan Sistem

Pada penelitian ini terdapat 2 sistem utama yang bekerja bersamaan, yaitu sistem generator BLDC dan sistem konverter. Sistem generator merupakan sistem yang berperan sebagai sumber energi untuk digunakan pada sistem konverter. Sedangkan sistem konverter merupakan konverter *bidirectional buck boost* beserta sistem kontrol untuk mengisi baterai dengan arus konstan dan mengosongkan baterai dengan arus konstan juga.

3.1.1 Sistem Generator

Gambar 3.1 merupakan skema dari sistem generator. Sistem ini berperan sebagai sumber energi untuk pengisian baterai. Untuk memodelkan generator BLDC pada penelitian ini digunakan 2 buah motor BLDC dengan spesifikasi yang sama dan dikopel satu sama lain. 1 buah motor berperan sebagai penggerak mekanis sedangkan motor yang lain berperan sebagai generator. Untuk penggerak mekanis, membutuhkan baterai LiPo sebagai sumber tegangan dan ESC (*Electronic Speed Controller*) sebagai pengendali motor yang juga memerlukan sinyal PWM agar dapat berfungsi dengan baik. sinyal PWM dihasilkan oleh mikrokontroller Arduino Uno yang telah

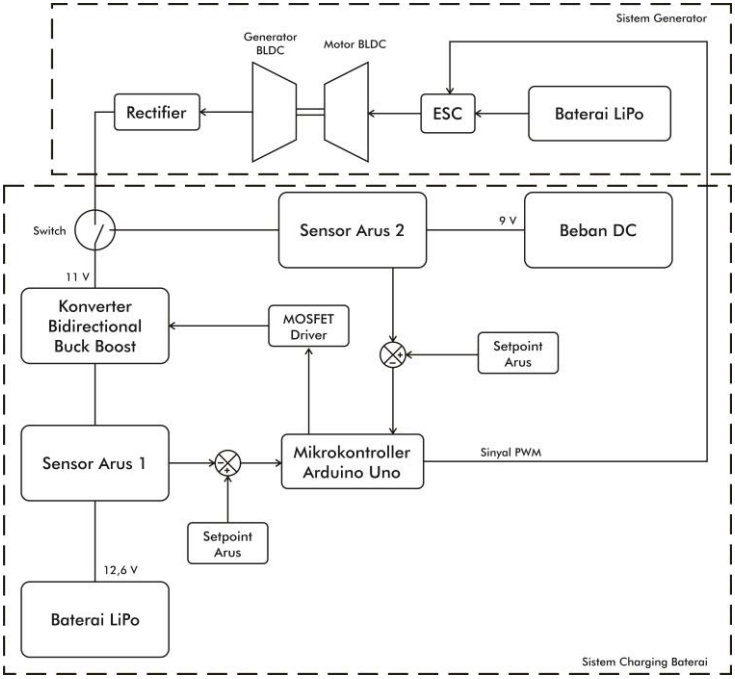
diprogram. Ketika motor BLDC berputar akan menggerakkan generator dan akan menghasilkan tegangan 3 fasa. Pada sisi generator memerlukan rangkaian penyearah (*rectifier*) untuk menyearahkan tegangan yang dihasilkan oleh generator agar dapat digunakan untuk pengisian baterai.

3.1.2 Sistem Konverter

Sistem konverter dapat dilihat pada Gambar 3.1. Dapat dilihat bahwa sistem ini telah menggunakan kontrol *close loop* dan didesain agar baterai dapat di*charge* atau di*discharge*. Saat kondisi charge, sebuah switch akan menyambungkan konverter dengan sistem generator. Konverter *bidirectional buck boost* akan memasuki mode *boost* sehingga aliran daya berasal dari sistem generator ke baterai LiPo menggunakan mode *constant current*. Sensor arus 1 akan membaca arus yang masuk ke baterai, mengirimkan data ke mikrokontroller dan akan dibandingkan dengan nilai *setpoint*. Sinyal *error* yang dihasilkan akan diolah oleh mikrokontroller untuk menghasilkan sinyal kontrol PWM. Sinyal PWM yang dihasilkan akan memperkecil nilai *error*, dikirim ke *driver* MOSFET untuk dikuatkan sinyalnya agar MOSFET dapat melakukan *switching*. Sehingga MOSFET dapat menjaga agar arus yang masuk ke dalam baterai tetap konstan.

Saat kondisi *discharge*, switch akan memutuskan koneksi antara konverter dan sistem generator, dan menyambungkan ke beban DC yang disimulasikan berupa rheostat. Baterai akan mengalami pengosongan daya, mengalirkan dayanya menuju rheostat. Konverter *bidirectional buck boost* akan memasuki mode *buck*, sehingga aliran daya berasal dari baterai LiPo ke beban DC yang diasumsikan menggunakan rheostat. Dengan mode *constant current*, arus yang keluar dari baterai akan dijaga konstan. Sama dengan mode *boost*, proses yang sama juga berlaku. Namun kali ini dibantu oleh sensor arus 2. Sensor tersebut akan membaca dan mengirimkan data arus yang keluar dari baterai, mengirimkan data dan dibandingkan oleh mikrokontroller dengan nilai arus *setpoint*. Proses tersebut akan meghasilkan sinyal error. Sinyal tersebut diproses dan diolah menjadi sinyal PWM. *Driver* MOSFET akan menerima sinyal tersebut untuk dikuatkan agar MOSFET dapat melakukan *switching*. Nilai rheostat yang digunakan diasumsikan ketika beban penuh sesuai dengan

perhitungan daya dari konverter yang telah didesain. Baterai akan dikosongkan hingga berkapasitas 50%.



Gambar 3.1 Overall system scheme

3.2 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian pada penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu prosedur saat pengisian baterai LiPo dan pengosongan baterai LiPo. Kedua proses tersebut menggunakan metode *constant current*. Prosedur ini mengasumsikan bahwa generator beroperasi dalam kondisi maksimal.

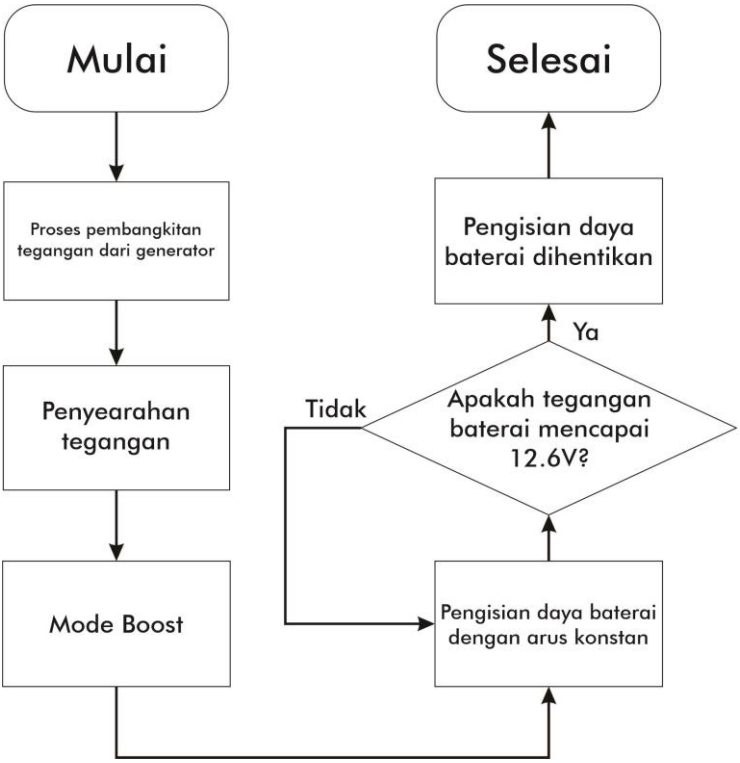
Prosedur pengisian baterai LiPo ditetapkan saat konverter beroperasi pada mode *boost* sehingga arah aliran daya berasal dari generator bertegangan 11 V ke baterai LiPo bertegangan 12.6 V. Kemudian prosedur pengosongan baterai LiPo ditetapkan saat konverter beroperasi pada mode *buck* sehingga arah aliran daya berasal dari baterai LiPo bertegangan 12.6 V ke rheostat dengan tegangan yang diatur adalah 9 V. Baterai akan dikosongkan hingga

tegangan baterai mencapai 11.6 V. Nilai rheostat telah diatur pada kondisi beban penuh dari konverter yang telah dirancang.

Data yang telah diambil dari kedua prosedur pengujian tersebut berupa grafik nilai arus dan tegangan pada kondisi *charge* dan *discharge*. Grafik yang telah didapatkan akan dianalisa ulang apakah sudah sesuai dengan teori dan perhitungan yang telah dilakukan.

3.3 Prosedur Pengisian Baterai

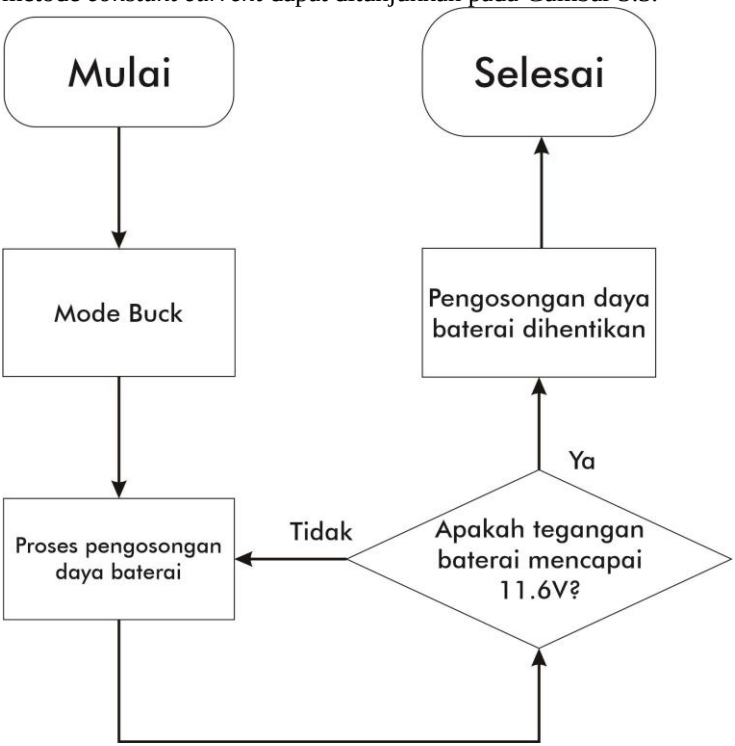
Diagram alir dari prosedur pengisian baterai menggunakan metode *constant current* dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Flowchart of battery charging procedure

3.4 Prosedur Pengosongan Baterai

Diagram alir dari prosedur pengosongan baterai menggunakan metode *constant current* dapat ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Flowchart of battery discharge procedure

3.5 Spesifikasi Sistem Generator

Pada penelitian ini diperlukan beberapa komponen untuk mengimplementasikan sistem generator, yang terdiri dari motor BLDC, rangkaian penyearah, hingga baterai yang digunakan. Berikut spesifikasi tiap komponen yang digunakan

3.5.1 Generator BLDC

Pada penelitian ini menggunakan 2 buah motor BLDC yang dikopel satu sama lain dengan spesifikasi yang sama untuk mengimplementasikan generator BLDC.

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC SunnySky X2212 1250 KV

Parameter	Nilai
Stator Diameter	22mm
Stator Thickness	12mm
No.of Stator Slots	12
No.of Rotor Poles	14
Max Lipo Cell	2-4S
ESC	30A
Motor Kv	1250
No-load current	0.6A/10V
Motor Resistance	79mΩ
Max Continuous Current	25A/10s
Max Continuous Power	390W
Weight	58g

3.5.2 Baterai

Berikut merupakan baterai yang digunakan sebagai sumber tegangan dari motor BLDC sisi penggerak mekanis :

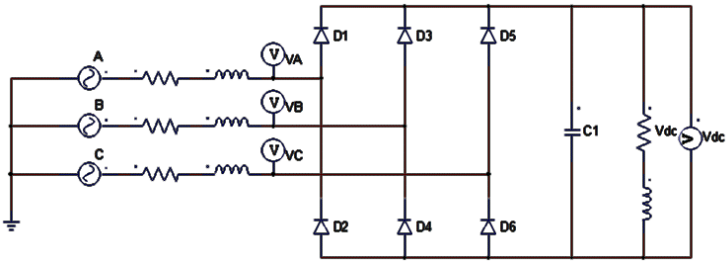
Tabel 3.2 Spesifikasi Baterai Sistem Generator

Parameter	Nilai
Capacity	2200mAh
Voltage	3S1P / 3 Cell / 11.1 V
Discharge	25C
Weight	159g
Dimension	105 x 33 x 22 mm

3.5.3 Rangkaian Penyearah

Topologi rangkaian penyearah yang digunakan pada penelitian ini adalah *three phase uncontrolled full wave rectifier*. Dengan topologi

ini, rangkaian ini menyearahkan tegangan AC 3 fasa gelombang penuh dan tegangan *output* yang tidak dapat dikontrol. Resistor dan induktor yang terpasang di dekat sumber AC digunakan untuk memodelkan induktansi yang dapat terjadi di dalam generator BLDC



Gambar 3.4 Rectifier circuit topology

3.6 Spesifikasi Baterai

Pemilihan spesifikasi baterai menentukan perhitungan dari desain konverter yang akan dirancang. Berikut merupakan spesifikasi baterai yang digunakan dalam penelitian ini :

Tabel 3.3 Spesifikasi Baterai Uji

Parameter	Nilai
Capacity	2200mAh
Voltage	3S1P / 3 Cell / 11.1 V
Discharge	25C
Internal Resistance	$\leq$ 160 mΩ
Weight	159g
Dimension	105 x 33 x 22 mm

3.7 Desain Konverter Bidirectional Buck Boost

Dalam merancang sebuah konverter *bidirectional buck boost* terdapat beberapa hal yang harus ditentukan. Langkah awal yang harus dilakukan untuk merancang konverter adalah memastikan ketersediaan komponen di pasaran dan peralatan uji pada Laboratorium Konversi Energi Elektro ITS agar dapat menunjang penelitian ini. Kemudian menentukan parameter-parameter awal dengan berdasarkan spesifikasi beban dan sumber yang akan

digunakan. Parameter tersebut meliputi daya *output* (P_{out}), tegangan *output* (V_{out}), tegangan *input* (V_{in}), frekuensi *switching* (f_s), *ripple* arus induktor (ΔI_L), dan *ripple* tegangan kapasitor (ΔV_C). Berikut adalah nilai parameter awal yang telah ditetapkan dalam merancang konverter *bidirectional buck boost* dapat ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Spesifikasi Desain Konverter

Parameter	Nilai
Output Power (P_{out})	30 W
Output Voltage (V_{out})	12,6 V
Input Voltage (V_{in})	11 V
Switching Frequency (f_s)	20 kHz
Ripple ΔI_L	20%
Ripple ΔV_{CH}	1%
Ripple ΔV_{CL}	1%

Nilai tegangan *input* ditentukan oleh tegangan yang dihasilkan oleh generator setelah disearahkan, yaitu 11 V. Nilai tegangan *output* ditentukan oleh pemilihan baterai yang digunakan. Nilai tegangan *charging* baterai LiPo tiap sel adalah 4.2 V dan baterai yang digunakan memiliki konfigurasi 3S1P, maka ditetapkan tegangan *output* adalah 12.6 V. Daya *output* ditentukan dari hasil perkalian tegangan *charging* total baterai dengan kapasitas baterai, dan ditetapkan nilainya adalah 30 Watt. *Ripple* arus induktor ditetapkan sebesar 20% agar nilai induktansi dari induktor bernilai kecil dan tidak mengakibatkan inti mengalami saturasi, serta membuat tegangan *output* konverter mendekati stabil untuk menjaga kondisi baterai. *Ripple* tegangan kapasitor ΔV_{CH} dan ΔV_{CL} bernilai 1% ditentukan berdasarkan ketersediaan komponen yang ada di pasaran.

3.7.1 Penentuan Nilai Resistansi Beban

Nilai resistansi ditentukan dari nilai tegangan *output* dan daya *output* saat keadaan *steady state*. Nilai ini untuk memodelkan beban pada simulasi. Dengan menggunakan nilai tegangan *output* dan daya *output* yang telah ditentukan sebelumnya dan persamaan 2.27, maka nilai resistansi beban dapat dihitung :

$$R = \frac{{V_o}^2}{P_o} = \frac{12.6^2}{30} = 5.292 \cong 5.3$$

3.7.2 Penentuan Nilai Duty Cycle

Nilai *duty cycle* merupakan nilai rasio waktu antara saklar berkonduksi (ON) dengan saklar terbuka (OFF). Dalam hal ini saklar yang digunakan adalah komponen semikonduktor berupa MOSFET. *Duty cycle* digunakan oleh MOSFET untuk menentukan durasi waktu ketika keadaan ON dan OFF dalam satu siklus penuh. Nilai *duty cycle* didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.8 dan 2.21. Dengan mensubtitusikan tegangan sisi *input* dan *output* yang telah ditetapkan sebelumnya pada persamaan maka didapatkan nilai *duty cycle* :

- Untuk operasi *buck*

$$V_L = V_H D_1$$

$$11 = 12.6 D_1$$

$$\frac{11}{12.6} = D_1$$

$$D_1 = 0.873$$

- Untuk operasi *boost*

$$V_H = \frac{1}{1 - D_2} V_L$$

$$\frac{12.6}{11} = \frac{1}{1 - D_2}$$

$$1.145 = \frac{1}{1 - D_2}$$

$$1.145 - 1.145 D_2 = 1$$

$$0.145 = 1.145 D_2$$

$$D_2 = 0.127$$

Didapatkan dua nilai *duty cycle* yang akan digunakan sesuai dengan kondisi konverter. Kedua nilai tersebut akan dioperasikan pada frekuensi sebesar 20 kHz. Nilai *duty cycle* yang telah didapatkan akan digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM oleh mikrokontroller, dan mengatur pensaklaran dari MOSFET.

3.7.3 Penentuan Nilai Induktor

Perhitungan nilai induktor L_m dihitung pada kondisi konverter beroperasi secara CCM (*Continuous Conduction Mode*), dimana arus yang melewati induktor tidak akan pernah bernilai nol. Langkah awal

pada tahap ini adalah menentukan arus maksinal yang dapat melewati induktor pada kedua operasi dengan persamaan berikut :

$$I_L = \frac{1}{1-D} I_O$$

$$I_L = \frac{1}{1-D} \times \frac{P_O}{V_O}$$

$$I_L = \frac{2.38}{1-0.127}$$

$$I_L = \frac{2.38}{0.873}$$

$$I_L = 2.726\ A$$

Maka nilai *ripple* arus yang mengalir pada induktor berdasarkan desain adalah :

$$\Delta I_L = I_L \times \%\Delta I_L$$

$$\Delta I_L = 2.726 \times 20\%$$

$$\Delta I_L = I_L \times \%\Delta I_L$$

$$\Delta I_L = 0.5452\ A$$

Penentuan nilai induktor dapat menggunakan persamaan 2.26 sebagai berikut

$$L = \frac{V_L \times D}{\Delta i_L \times f}$$

$$L = \frac{11 \times 0.127}{0.5452 \times 20000}$$

$$L = 128\ \mu H$$

Karena nilai induktor yang didapatkan tidak tersedia di pasaran, maka induktor dibuat dengan menggunakan inti induktor yang dibelit dengan kawat tembaga. Pemilihan inti induktor dilakukan berdasarkan jumlah fluks yang mampu ditampung oleh inti induktor agar tidak mengalami saturasi. Penentuan jenis kawat tembaga yang akan digunakan dilkaukan berdasarkan pada dua parameter yaitu arus

maksimal yang melewati induktor dan frekuensi switching yang telah ditetapkan. Inti induktor yang digunakan adalah jenis *ferrite*. Berikut merupakan spesifiasi inti induktor yang digunakan.

Tabel 3.5 Spesifikasi Inti Induktor

Parameter	Nilai
μ_e	125
A_L	127 ± 8% nH/T^2
A_e	65.6 mm^2

Persamaan yang dapat digunakan untuk menentukan jumlah belitan adalah sebagai berikut.

$$L = A_L \, X \, N^2$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

$$N = \sqrt{\frac{128.000 \, n\text{H}}{127 \, n\text{H}}}$$

$$N = 31.74 \approx 32 \text{ Lilitan}$$

Selain itu, penentuan jenis kawat induktor bergantung pada frekuensi switching yang telah ditetapkan. Kawat induktor harus mampu bekerja dengan baik pada frekuensi 20kHz, sehingga kawat yang cocok untuk kondisi ini adalah kawat email jenis AWG 20 yang memiliki diameter 0.8128 mm dengan resistansi 0.033292 Ω/m, daya hantar arus 1.5 A dan mampu bekerja pada frekuensi 27 kHz. Berdasarkan parameter arus, kawat email induktor harus mampu menahan arus sebesar 3.3 Ampere. Nilai tersebut merupakan hasil penjumlahan nilai arus rata-rata yang melewati induktor dengan nilai desain *ripple* arus pada induktor. Untuk meningkatkan keamanan, maka dipilih kawat tembaga yang memiliki kapasitas arus yang lebih besar yaitu AWG 12 dengan diameter 2.05232 mm, resistansi 0.00520864 Ω/m, daya hantar arus hingga 9.3 A dan mampu beroperasi pada frekuensi 4.15 kHz.

Untuk memenuhi kebutuhan spesifikasi induktor yang diinginkan, perlu dilakukan pemilinan kabel. Hal ini dapat menambah kapasitas kawat email sehingga mampu bekerja pada parameter yang

diinginkan. Perhitungan jumlah pilinan didapatkan dari hasil pembagian diameter kawat kapasitas arus besar dengan kapasitas arus kecil. Perhitungan jumlah pilinan adalah sebagai berikut.

$$n_{kawat} = \frac{d_{AWG\ 12}}{d_{AWG\ 20}} = \frac{2.05232}{0.8128} = 2.525 \approx 3\ pilinan$$

3.7.4 Penentuan Nilai Kapasitor

Kapasitor yang digunakan dalam merancang konverter *bidirectional buck boost* adalah kapasitor filter pada sisi *input* dan *output* dari konverter. Nilai kapasitor C_H dan C_L harus memperhatikan tegangan kapasitor serta nilai *ripple* yang tersedia di pasaran. Nilai *ripple* tegangan yang telah ditetapkan adalah sebesar 0.12 V. Nilai kapasitor C_H dan C_L tersebut dapat ditentukan dengan persamaan 2.25 dan 2.26.

$$C_H = \frac{D}{R_H \times f \times (\Delta V_H / V_H)}$$

$$C_H = \frac{0{,}127}{\frac{12{,}6^2}{30} \times 20000 \times (\frac{0{,}12}{12{,}6})}$$

$$C_H = 126\mu F$$

$$C_L = \frac{(1 - D)}{8 \times f^2 \times L_m \times (\Delta V_L / V_L)}$$

$$C_L = \frac{(1 - 0{,}873)}{8 \times 20000^2 \times 128\mu H \times (\frac{0{,}12}{11})}$$

$$C_L = 195{,}37\mu F$$

Dalam implementasi, digunakan kapasitor jenis elco (*electrolytic condenser)* pada kapasitor filter tegangan *input* dan *output* dengan nilai 1000 µF 50 Volt. Hal ini dikarenakan pertimbangan berbagai *losses* pada saat fase implementasi sehingga dipilih nilai komponen yang lebih besar. Pemilihan tegangan 50 Volt didasarkan atas nilai tegangan output sebesar 12.6 Volt namun untuk keamanan maka digunakan kapasitor yang memiliki tegangan rating sebesar 50 V.

3.7.5 Penentuan MOSFET

Pada penelitian ini konverter *bidirectional buck boost* menggunakan dua buah komponen MOSFET dengan spesifikasi yang sama. Komponen ini digunakan sebagai saklar atau *switching*. Pemilihan MOSFET ditentukan oleh tiga parameter yaitu frekuensi *switching*, tegangan *drain-source* maksimal, dan arus *drain-source* maksimal yang mengalir pada MOSFET. Berdasarkan parameter pertama, MOSFET harus mampu dioperasikan pada frekuensi 20 kHz. Tegangan *drain-source* maksimal dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_{DS(\max)} = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{12.6}{1-0{,}127} = 14{,}4V$$

Sehingga MOSFET yang dipilih harus mampu menahan tegangan yang melalui *drain-source* maksimal sebesar 12.6 V. Untuk parameter ketiga, nilai arus I_{DS} dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$I_{DS} = I_{DS} \times D$$

$$I_{DS} = 3{,}3 \times 0{,}873$$

$$I_{DS} = 2{,}8809\ A$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka dapat dipilih jenis MOSFET dengan tipe IRFP4227. Berikut spesifikasi dari MOSFET yang dipilih.

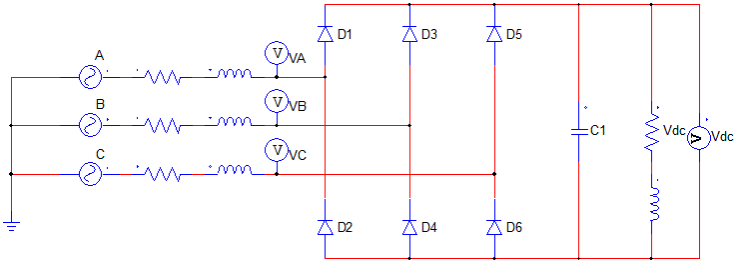
Tabel 3.6 Spesifikasi MOSFET IRFP4227

Parameter	**Nilai**
V_{GS}	± 30 V
V_{DS}	± 200 V
$R_{DS\ (ON)}$	25 mΩ
I_{DS} at 175°C	65 A
t_{rr} (Reverse Recovery Time)	100 ns
Switching frequency	1 MHz

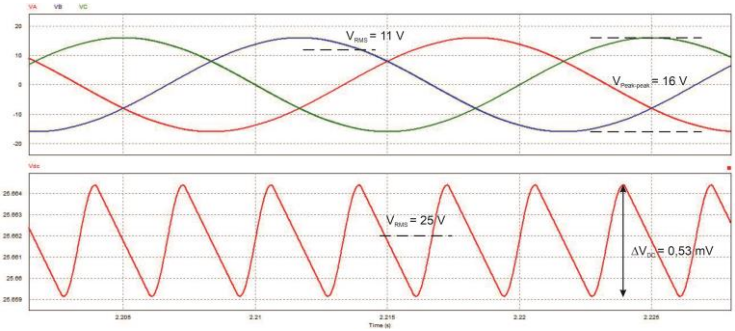
Karena nilai perhitungan masih lebih rendah daripada spesifikasi MOSFET yang dipilih, maka MOSFET ini dapat diterapkan pada konverter.

3.8 Simulasi Sistem Generator

Simulasi sistem generator diperlukan untuk mengetahui karakteristik rangkaian penyearah yang digunakan. Rangkaian resistor dan induktor yang terletak dekat dengan sumber AC memodelkan induktansi yang dapat terjadi di dalam generator BLDC. Hasil simulasi ini akan diketahui nilai tegangan *output* setelah disearahkan dan dijadikan pertimbangan untuk merancang desain konverter *bidirecrional buck-boost*. Gambar 3.5 menunjukkan simulasi rangkaian penyearah serta Gambar 3.6 menunjukkan bentuk gelombang tegangan *input* yang berupa tegangan AC tiga fasa dan tegangan *output* yang berupa tegangan DC pada rangkaian penyearah.



Gambar 3.5 Simulation of Rectifier



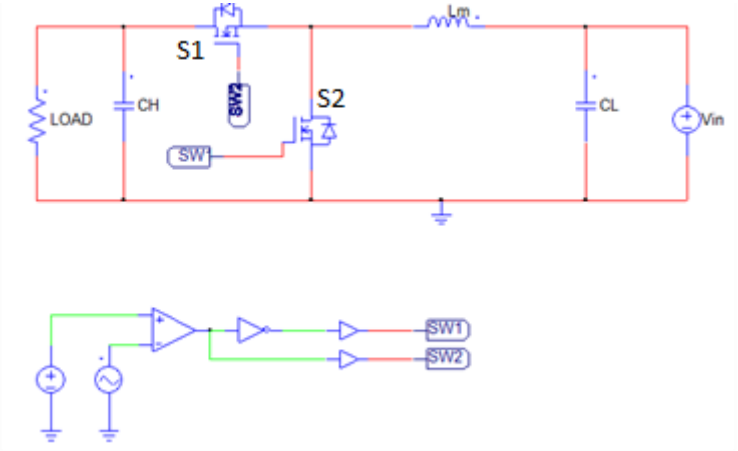
Gambar 3.6 Waveform of input voltage and output voltage

Dapat disimpulkan dari Gambar 3.6 bahwa simulasi rangkaian penyearah bekerja dengan baik. Pada sisi *input* nilai $V_{peak\text{-}peak}$ sebesar 16 V, V_{RMS} sebesar 11 V maka dapat disearahkan menjadi tegangan DC dengan nilai V_{RMS} sebesar 25 V dan ΔV_{DC} sebesar 0,53 mV. Dengan hasil keluaran rangkaian penyearah maka dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk merancang konverter *bidirectional buck-*

boost. Namun, perlu diingat bahwa simulasi yang dilakukan dalam kondisi ideal yang berarti *losses* dapat diabaikan. Pada kondisi nyata, dapat terjadi penurunan tegangan akibat *losses* pada setiap dioda yang digunakan.

3.9 Simulasi Konverter pada Kondisi Tunak

Simulasi pada keadaan tunak dilakukan untuk mengetahui dan memastikan bahwa konverter dapat bekerja dengan baik sesuai dengan desain yang telah direncang pada subbab sebelumnya. Pada simulasi ini seluruh komponen dianggap dalam kondisi ideal dan semua *losses* dapat diabaikan. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.7.

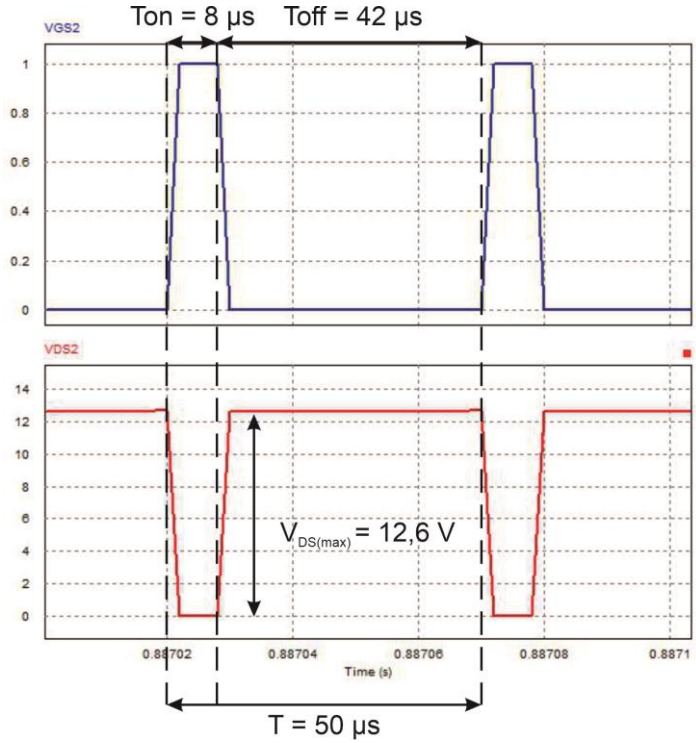


Gambar 3.7 Converter simulation in steady mode

3.9.1 Simulasi Pensaklaran

Hasil simulasi berupa tegangan *gate-source* dan tegangan *drain-source*. Dapat dilihat bahwa ketika *gate-source* dalam keadaan *high*, maka pada *drain-source* dalam keadaan *low* sehingga arus dapat melewati pada bagian *drain-source*. Pada S1, durasi waktu untuk MOSFET dalam konduksi adalah 42 µs dan durasi waktu MOSFET untuk terbuka adalah 8 µs. Tegangan maksimal pada *drain-source* (V_{DSmax}) sebesar 12.6 V. Nilai tersebut telah memenuhi desain yang telah dirancang dengan nilai *duty cycle* 0,873 dan frekuensi *switching*

sebesar 20 kHz. Hal yang sama juga berlaku pada S2. Pada desain konverter yang dirancang, S1 dan S2 bekerja secara bergantian.

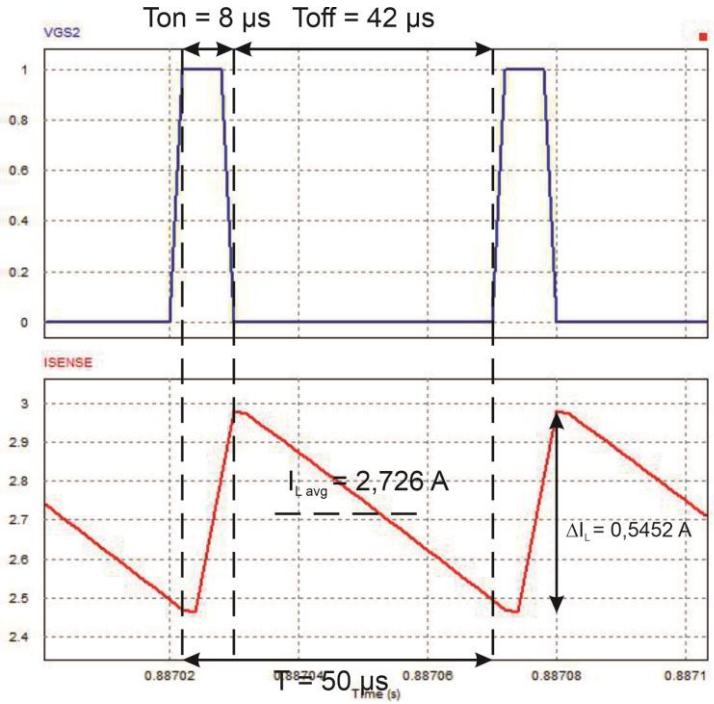


Gambar 3.8 V_{GS} and V_{DS} voltage waveform

3.9.2 Simulasi Arus Induktor

Bentuk gelombang tegangan *gate-source* dan arus induktor ditunjukkan pada Gambar 3.7. Dapat dilihat bahwa ketika MOSFET berkonduksi, maka arus akan melewati induktor sehingga induktor termagnetisasi dan arus meningkat. Bila MOSFET dalam kondisi terbuka atau tegangan *gate-source* bernilai *low*, arus pada induktor akan menurun. Berdasarkan simulasi, durasi waktu ketika MOSFET konduksi dan terbuka sudah sesuai dengan desain awal yaitu t_{on} = 8 µs dan t_{off} = 42 µs. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa arus rata-rata induktor terukur sebesar 2.726 A dengan nilai ripple arus sebesar

0.5452 A. Gambar 3.9 menunjukkan bahwa konverter telah bekerja dengan mode CCM dan nilai yang terukur sesuai dengan desain yang telah dirancang.

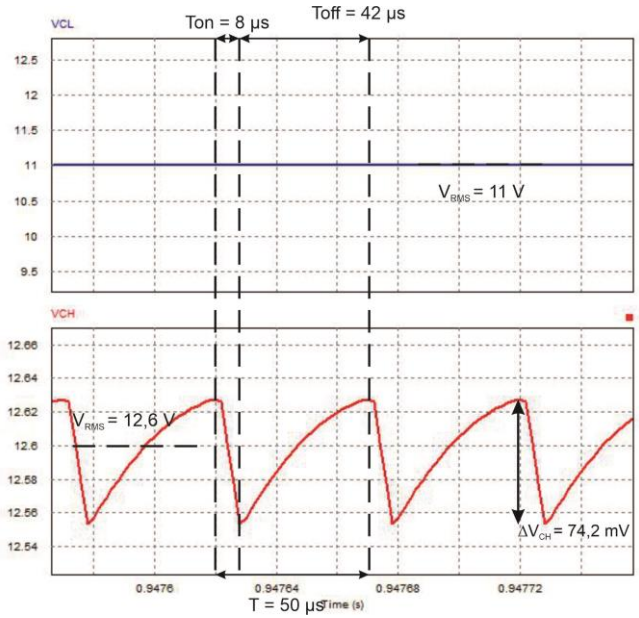


Gambar 3.9 V_{GS} and inductor current Waveform

3.9.3 Simulasi Tegangan Kapasitor

Gambar 3.10 di bawah menunjukkan bentuk gelombang kapasitor sisi tegangan rendah (V_{CL}) dan kapasitor sisi tegangan tinggi (V_{CH}) saat MOSFET berkonduksi dan terbuka. Dapat diperhatikan bahwa ketika MOSFET berkonduksi, C_L dan C_H mengalami pengisian muatan (*charging*) dan ketika MOSFET dalam keadaan terbuka, maka C_L dan C_H mengalami pengosongan muatan (*discharging*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai V_{RMS} dari C_L sebesar 11

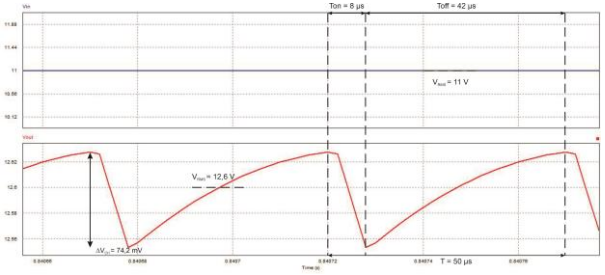
V,dan nilai V_{RMS} dari C_H sebesar sebesar 12.6 V. Sedangkan Nilai *ripple* C_H adalah 74.2 mV dan sudah mendekati dari nilai perhitungan



Gambar 3.10 V_{CL} dan V_{CH} capacitor voltage waveforms

3.9.4 Simulasi Tegangan *Input* dan *Output*

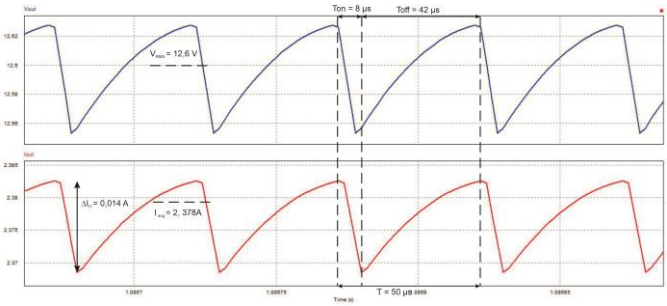
Gambar 3.11 merupakan bentuk gelombang dari tegangan *input* dan *output*. Nilai tegangan input konverter adalah 11 V dari hasil pembangkitan listrik oleh generator BLDC dan nilai tegangan rms konverter adalah 12.6 V



Gambar 3.11 Input and output voltage waveforms

3.9.5 Simulasi Daya Output

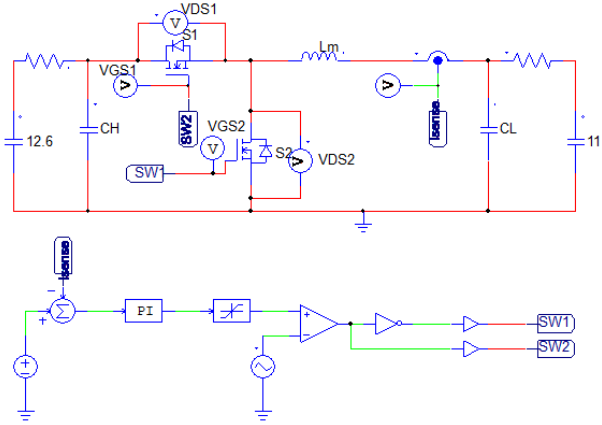
Gambar 3.12 merupakan bentuk gelombang dari tegangan *output* dengan arus *output*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan *output* rms konverter adalah 12.6 V dan nilai arus *output* rata-rata adalah 2.378 A. Dengan nilai ripple arus *output* adalah 0.014 A, daya *output* pada konverter sebesar 29.9628 Watt dan sudah mendekati dari desain awal konverter.



Gambar 3.12 Output voltage and current waveforms

3.10 Simulasi Konverter pada Kondisi Dinamis

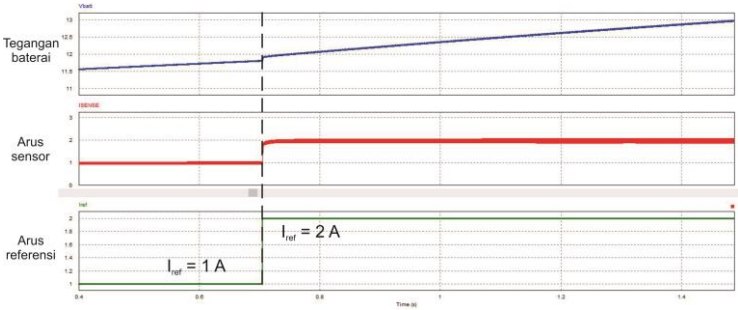
Konverter *bidirectional buck-boost* harus mampu menjaga arus agar tetap konstan sesuai dengan arus referensi yang telah ditentukan ketika beroperasi *buck* maupun *boost*. Gambar 3.13 merupakak konverter *bidirectional buck-boost* beserta kontrol *close* loop.



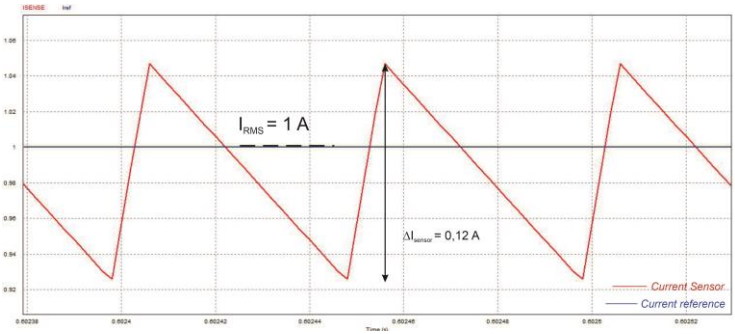
Gambar 3.13 Converter simulation in dynamic mode

Pada proses implementasi, terdapat kemungkinan perubahan nilai yang terukur karena adanya faktor yang ada di pasaran tidak dalam kondisi ideal. Perubahan nilai yang dimaksud adalah seperti penurunan tegangan akibat pembebanan, serta penurunan efisiensi konverter. Nilai *duty cycle* perlu dikontrol agar konverter dapat mempertahankan arus tetap konstan. Pengaturan nilai *duty cycle* pada konverter ini dilakukan oleh mikrokontroller yang digunakan. Sensor arus (*Isense*) akan membaca nilai arus dan mengirimkan sinyal *feedback* ke mikrokontroller untuk dibandingkan dengan nilai arus *setpoint* dan dikoreksi. Mikrokontroller akan memperkecil *error* yang terjadi dan menghasilkan sinyal PWM yang akan mengatur *duty cycle* dari konverter agar arus tetap konstan sesuai dengan nilai arus setpoint.

Gambar 3.14 dan 3.15 merupakan bentuk gelombang konverter dengan mode *constant current*.



Gambar 3.14 Converter waveform with constant current mode



Gambar 3.15 Setpoint and sensor current waveforms

Pada Gambar 3.12, konverter telah bekerja dalam metode *constant current*. Hal ini dapat diketahui dari ketika konverter dioperasikan dan arus setpoint diubah nilainya dari 1 A menjadi 2 A, arus sensor bergerak mendekati nilai dari arus setpoint. Gambar 3.13 menunjukkan nilai arus rms adalah 1 A dan *ripple* arus sensor sebesar 0.12 A.

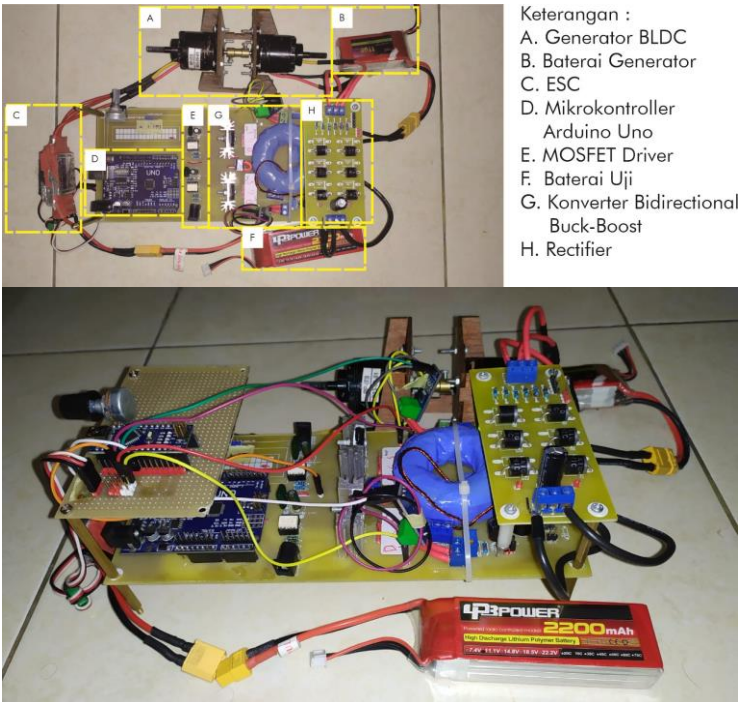
3.11 Implementasi Konverter

Pada bab ini hasil perhitungan dan perancangan konverter *bidirectional buck-boost* akan menjadi acuan untuk implementasi konverter. Berikut merupakan komponen yang digunakan untuk membangun konverter *bidirectional buck-boost.*

Tabel 3.7 Spesifikasi Konverter *Bidirectional Buck-Boost*

Parameter Baterai	**Jumlah**	**Nilai**
Lithium Polymer Battery	2	LPB 3S 2200 mAh 11.1 V
Parameter Sistem Generator	**Jumlah**	**Nilai**
BLDC Motor	2	SunnySky 1250KV
ESC	1	Turnigy 60 A
Diode	6	Diode 6A10
Capacitor	1	Elco 1000 µF 50 V
Parameter Konverter	**Jumlah**	**Nilai**
Microcontroller	1	Arduino Uno
Inductor	1	350 µH
C_L and C_H Capacitor	2	Elco 1000 µF 50 V
MOSFET	2	IRFP4227
Optocoupler	2	TLP250
Gate Supply	2	12 V
Inductor core	1	Toroid Ferrite Core 0077548A7
Switching Frequency		20 kHz
Output Power		30 W
Current Sensor	2	ACS 712 5 A
Voltage Sensor	2	Multiturn 10KΩ

Pada proses implementasi, pemilihan nilai komponen dibuat agar lebih tinggi dari hasil perhitungan karena alasan keamanan dan memperoleh hasil yang lebih baik. Pada penelitian ini terdapat dua sistem utama, yaitu sistem generator dan sistem konverter. Sistem generator terdiri dari dua buah motor BLDC yang dikopel, baterai LiPo sebagai sumber tegangan, ESC sebagai pengendali motor BLDC serta sebuah rangkaian penyearah. Lalu sistem konverter terdiri dari induktor, kapasitor, mikrokontroller, baterai uji, *driver* MOSFET serta MOSFET itu sendiri. Gambar 3.16 merupakan hasil implementasi pada penelitian ini.



Gambar 3.16 Bidirectional buck-boost converter implementation

BAB 4
HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab 4 ini akan dibahas mengenai pengujian implementasi konverter *bidirectional buck boost* dan analisis data hasil pengujian dari karakteristik generator BLDC, algoritma kontrol metode *Constant Current*, kemudian dilanjutkan pengujian karakteristik *charge* dan *discharge* baterai Lithium Polymer 3S 2200 mAh. Pengujian dilakukan secara bertahap yaitu pengujian sinyal pensaklaran, pengujian arus induktor, pengujian efisiensi, pengujian respon dinamik konverter, dan pengujian *charge discharge* baterai menggunakan metode *constant current*. Hasil dari pengujian akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil simulasi konverter menggunakan PSIM dan hasil perhitungan yang telah dilakukan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan peralatan yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Teknik Elektro ITS.

4.1 Peralatan Pengujian Konverter

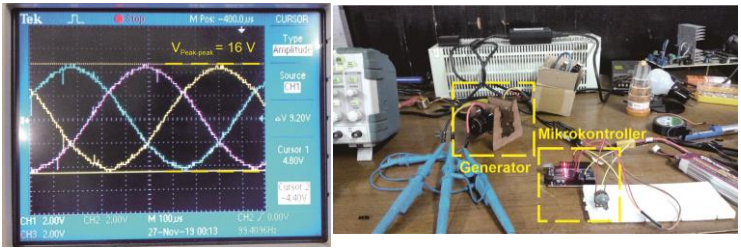
Pengujian konverter *bidirectional buck-boost* dilakukan dengan menggunakan peralatan yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Teknik Elektro ITS. Peralatan yang digunakan adalah *Power Supply DC Variable*, *Oscilloscope*, *Multimeter*, *Amperemeter*, serta rheostat beban resistip. *Power Supply DC Variable* memiliki rating tegangan maksimal hingga 30 V dan arus maksimal hingga 5 A. *Power Supply* ini memiliki dua *channel output*, yang dapat dirangkai seri maupun paralel sesuai dengan kebutuhan. Sumber DC ini dapat berperan sebagai tegangan masukan untuk konverter. *Oscilloscope* yang digunakan adalah merk GW INSTEK GDS 2202A yang memiliki 2 channel dengan frekuensi maksimal 200 MHz, dapat digunakan untuk mengukur tegangan maupun arus sesuai dengan *probe* yang terpasang. Dalam pengujian ini juga menggunakan rheostat dengan spesifikasi 25 Ω dan 5 A.

4.2 Pengujian Sistem Generator

Sistem generator berperan sebagai sumber DC dari konverter *bidirectional buck-boost*. Pengujian sistem generator dilakukan dengan menganalisis tegangan *input* yang dihasilkan oleh generator BLDC dan tegangan *output* yang telah disearahkan oleh rangkaian penyearah ketika generator beroperasi secara maksimal. Pengoperasian sistem generator dilakukan dengan menggunakan

beberapa komponen seperti motor BLDC, ESC, rangkaian penyearah, mikrokontroller, baterai, dan untuk pengujian menggunakan osiloskop untuk menganalisa tegangan yang dihasilkan generator.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa generator BLDC menghasilkan tegangan AC 3 fasa dengan $V_{peak\text{-}peak}$ sebesar 16 V.



(a) (b)

Gambar 4.1 Generator system testing (a) Output voltage generator waveform (b) Test setup

Pada pengujian ini, tegangan yang dihasilkan oleh generator akan disearahkan menjadi tegangan DC oleh rangkaian penyearah sebagai sumber DC untuk konverter. Pada prakteknya, setiap dioda akan menyumbang *losses* dalam bentuk penurunan tegangan sebesar 0,7 Volt. Sehingga pada tegangan *output* rangkaian penyearah terjadi penurunan tegangan DC menjadi 11 V. Nilai ini akan menjadi acuan untuk merancang konverter.

4.3 Pengujian Sensor

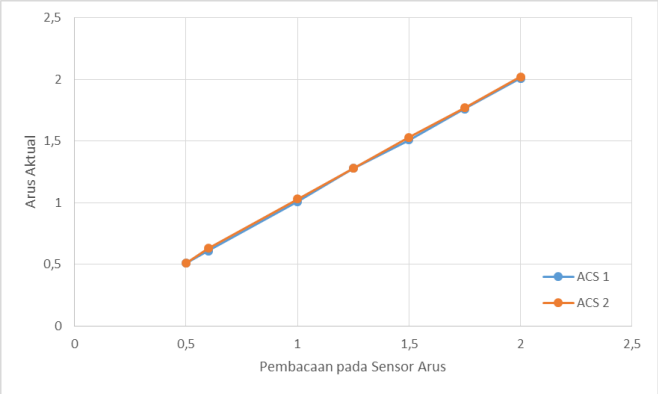
Pada subbab ini membahas pengujian sensor ACS 712 5 Ampere sebagai sensor arus dan Multiturn 10kΩ sebagai sensor tegangan.

4.3.1 Pengujian Sensor Arus

Pengujian sensor arus ini sangatlah penting karena metode *constant current* sangat bergantung pada keakuratan nilai yang terbaca pada sensor ini. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan nilai arus yang terukur pada sensor arus dengan nilai arus aktual pada konverter. Alat ukur yang digunakan adala amperemeter dan multimeter. Data hasil pembacaan kedua sensor arus dan nilai arus aktual dapat ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.2.

Tabel 4.1 Pengujian sensor arus

No	Actual Current (A)	ACS 1 (A)	ACS 2 (A)	Error ACS 1 (%)	Error ACS 2 (%)
1	0.5	0.51	0.51	2	2
2	0.6	0.61	0.63	1.67	5
3	1	1.01	1.03	1	3
4	1.25	1.28	1.28	2.4	2,4
5	1.5	1.51	1.53	0.67	2
6	1.75	1.76	1.77	0.57	1,14
7	2	2.01	2.02	0.5	1
		Average Error		1.26	2.36



Gambar 4.2 Current sensor graph

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 4.1 diatas dapat disimpulkan bahwa sensor yang dipakai bekerja dengan dan memiliki kesalahan pembacaan yang relatif kecil, yaitu 1.26% pada sensor pertama dan 2.36% pada sensor kedua.

4.3.2 Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian sensor tegangan ini juga perlu diperhatikan tingkat keakuratan dalam pembacaan tegangan, karena sensor tegangan berperan untuk memutus daya ketika baterai telah mencapai tegangan *cut-off*. Sensor tegangan yang digunakan adalah Multiturn 10kΩ.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan aktual pada konverter yang terbaca menggunakan *multimeter* dengan nilai tegangan yang terbaca oleh sensor. Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 merupakan hasil pengujian pembacaan sensor tegangan.

Tabel 4.2 Pengujian Sensor Tegangan 1

No	Actual Voltage (V)	Multiturn 1 (V)	Error (%)
1	1.5	1.35	10
2	2.5	2.37	5,2
3	3	2.88	4
4	5	4.88	2,4
5	6	5.93	1,16
6	7.5	7.44	0,8
7	9	8.94	0,67
8	10	9.98	0,2
9	11.5	11.55	0,43
10	12.15	12.17	0,16
		Average Error	2.5

Tabel 4.3 Pengujian Sensor Tegangan 2

No	Actual Voltage (V)	Multiturn 2 (V)	Error (%)
1	1.685	1.5	11
2	2.854	2.68	6,09
3	4.56	4.4	3,50
4	5.74	5.62	2,09
5	6.8	6.68	1,76
6	7.93	7.88	0,63
7	9.13	9.1	0,33
8	10.26	10.22	0,39
9	11.3	11.28	0,18
10	12.49	12.5	0,08
		Average Error	2.60

Berdasarkan data pengujian kedua sensor tegangan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 diatas dapat disimpulkan bahwa sensor tegangan yang digunakan telah bekerja dengan baik dan memiliki nilai *error* yang relatif kecil, dengan sensor pertama sebesar 2.5% dan sensor kedua sebesar 2.6%.

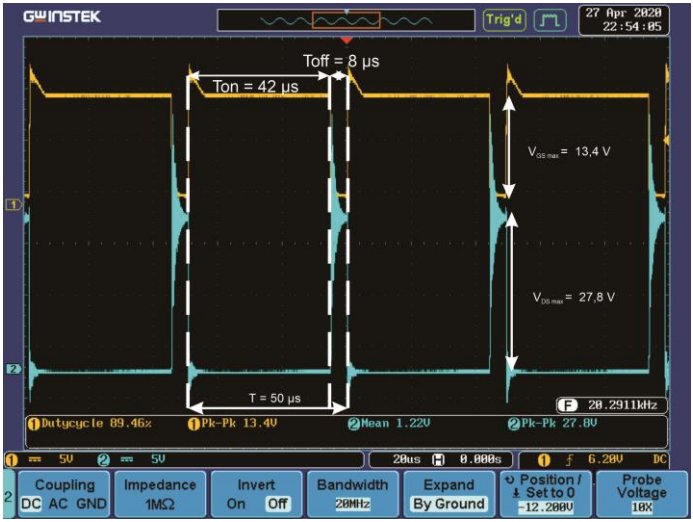
4.4 Pengujian Konverter Bidirectional Buck-Boost

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan memastikan kinerja konverter telah memenuhi desain dan perancangan. Pengujian dilakukan dengan beberapa tahap antara lain pengujian pensaklaran, pengujian arus induktor L_m, dan pengujian efisiensi. Peralatan yang digunakan untuk pengujian ini adalah *Variable DC Supply*, Rheostat beban resistif, multimeter, amperemeter, clamp meter, serta osiloskop.

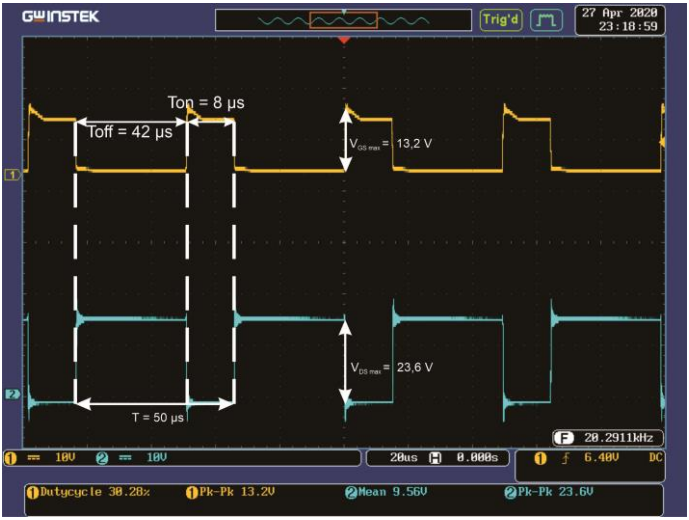
4.4.1 Pengujian Pensaklaran

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa pembangkitan sinyal PWM sudah sesuai dengan frekuensi dan nilai tegangan yang diinginkan dengan mengamati gelombang *gate-source* dan *drain-source* pada kedua MOSFET. Pengujian ini dilakukan pada kedua operasi konverter *bidirectional buck-boost*, yaitu ketika beroperasi *buck* serta *boost*.

Gambar 4.3 menunjukkan bentuk gelombang hasi pengujian pensaklaran MOSFET 1. Dapat diamati bahwa ketika nilai *gate* dari MOSFET bernilai *high*, maka nilai pada *drain-source* akan bernilai *low* atau berkebalikan dengan nilai *gate.* Hal yang serupa terjadi bila nilai *gate* dari MOSFET bernilai *low*, maka nilai *drain-source* akan bernilai *high.* Sehingga dapat disimpulkan kinerja MOSFET sudah sesuai dengan teori. Hasil pengujian dapat diamati bahwa frekuensi *switching* bernilai 20.3 kHz. Periode pensaklaran sebesar 50 µs dengan durasi waktu saklar berkonduksi sebesar 42 µs dan durasi waktu saklar terbuka sebesar 8 µs. Nilai tegangan pada sisi *drain-source* sebesar 27.8 V. Nilai ini lebih besar daripada hasil perhitungan dan hasil simulasi, namun masih dalam batas aman karena nilai tersebut masih di bawah nilai rating MOSFET. Nilai tegangan *gate-source* sebesar 13.4 V.



Gambar 4.3 V_{GS} and V_{DS} waveforms in MOSFET 1



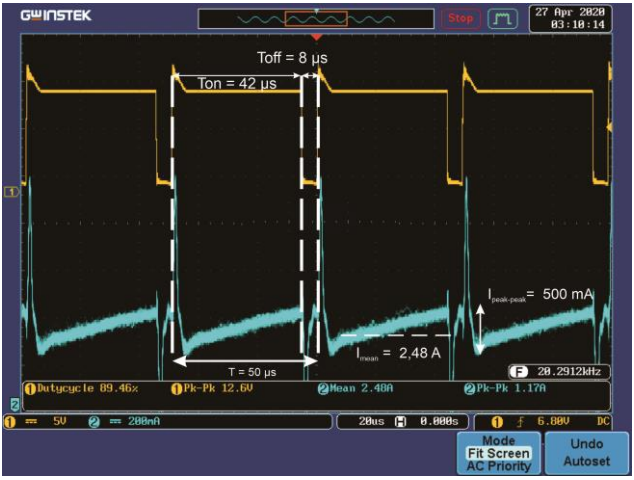
Gambar 4.4 V_{GS} and V_{DS} waveforms in MOSFET 2

Hal yang sama juga berlaku untuk MOSFET 2. Gambar 4.4 merupakan hasil pengujian pada MOSFET 2. Dapat diamati bahwa MOSFET 2 beroperasi pada frekuensi 20 kHz, dengan periode pensaklaran adalah 50 µs. Durasi waktu saklar konduksi sebesar 8 µs dan durasi waktu saklar terbuka adalah 42 µs. Nilai V_{DS} sebesar 23.6 V dan nilai V_{GS} adalah 13.2 V.

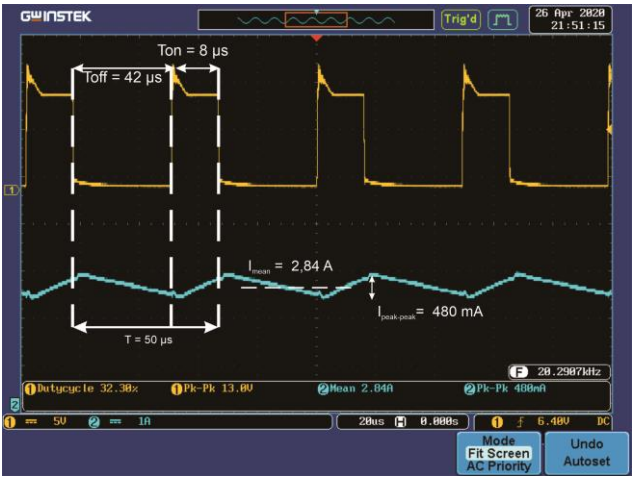
Namun karena pemilihan dan penggunaan komponen yang tidak ideal, menyebabkan terdapat *spike* pada hasil pengujian. Nilai *spike* ini disebabkan oleh energi yang tersisa dari induktor saat transisi pensaklaran mengalir ke MOSFET secara sesaat dan menghasilkan sinyal *spike* yang tinggi pada *drain-source*. *Spike* juga dapat menyebabkan *losses* penurunan tegangan.

4.4.2 Pengujian Arus Induktor L_m

Pengujian arus induktor dilakukan untuk mengetahui dan memastikan mode *charge* dan *discharge* induktor berdasarkan durasi pensaklaran. Hasil pengujian akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil simulasi. Pengujian ini juga bertujuan untuk memastikan bahwa konverter telah bekerja dalam mode CCM (*Continuous Conduction Mode*). Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 menunjukkan bentuk gelombang tegangan *gate-source* MOSFET dengan arus induktor L_m pada mode *buck* dan *boost*.



Gambar 4.5 V_{GS} and IL_m waveforms in buck mode



Gambar 4.6 V_{GS} and IL_m waveforms in boost mode

Nilai arus induktor yang terukur pada hasil pengujian pada kedua mode *buck* dan *boost* berturut-turut adalah 2.48 A dan 2.84 A. Nilai *ripple* arus induktor berturut-turut adalah 480 mA dan 500 mA. Nilai yang terukur memiliki sedikit perbedaan dengan hasil perhitungan dan hasil simulasi. Hal ini disebabkan oleh komponen yang tidak ideal pada inti induktor dan kawat tembaga yang dipilih. Pada pengujian ini terdapat *losses* seperti rugi-rugi inti induktor, rugi-rugi belitan dan flux bocor. Namun, nilai yang telah terukur masih dapat ditoleransi dan induktor tetap dapat bekerja dengan baik.

4.4.3 Pengujian Efisiensi

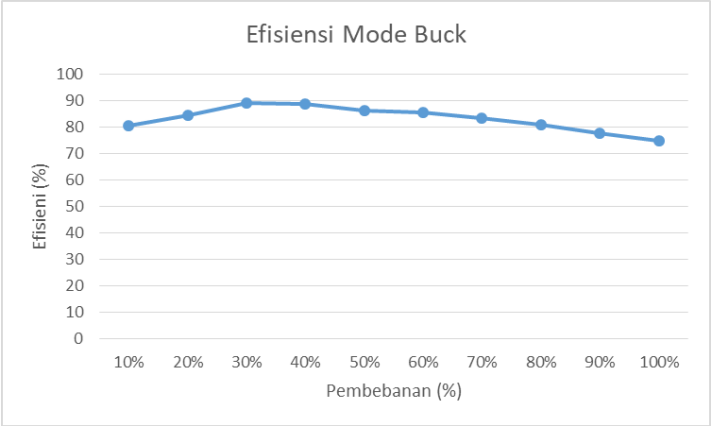
Pengujian efisiensi dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kinerja konverter *bidirectional buck-boost* serta memastikan bahwa konverter telah bekerja dengan baik dan sesuai dengan hasil perhitungan dan hasil simulasi. Pengujian dilakukan dengan menjaga tegangan *input* dan *output* tetap konstan dan daya maksimal sebesar 30 W. Untuk operasi *buck* dijaga konstan pada nilai yaitu 9 V dan 12.6 V. Untuk operasi *boost* dijaga konstan pada nilai yaitu 11 V dan 12.6 V Nilai beban akan disesuaikan dengan nilai pembebanan 10-100% berdasarkan desain yang telah ditentukan. Hasil pengujian akan diolah dengan membandingkan nilai daya *input* dan daya *output* konverter. Tabel 4.4 dan 4.5 merupakan hasil pengujian efisiensi konverter ketika beroperasi pada mode *buck* dan *boost*.

Tabel 4.4 Hasil pengujian efisiensi konverter pada mode *buck*

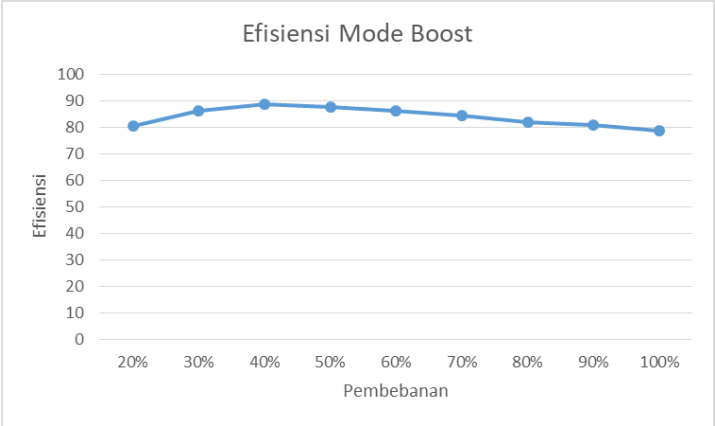
No	Input Power (W)	Output Power (W)	Efficiency (%)
1	9.9	7.92	80,6
2	11.72	9.9	84,5
3	13.6	12.15	89,3
4	15	13.32	88,8
5	18.55	16.02	86,5
6	20.54	17.55	85,45
7	23.18	19.35	83,46
8	26.08	21.15	81,09
9	31.25	24.3	77,76
10	37.17	27.9	75,06
		Rata-rata efisiensi	83.25 %

Tabel 4.4 Hasil pengujian efisiensi konverter pada mode *boost*

No	Input Power (W)	Output Power (W)	Efficiency (%)
1	3.3	1.18	35,89
2	7.04	5.67	80,54
3	10.23	8.82	86,21
4	13.53	11.97	88,47
5	16.83	14.74	87,59
6	20.46	17.64	86,21
7	24.64	20.79	84,37
8	28.49	23.31	81,81
9	31.24	25.2	80,67
10	36.08	28.35	78,57
		Rata-rata efisiensi	79.04 %



Gambar 4.7 Converter efficiency test results in buck mode

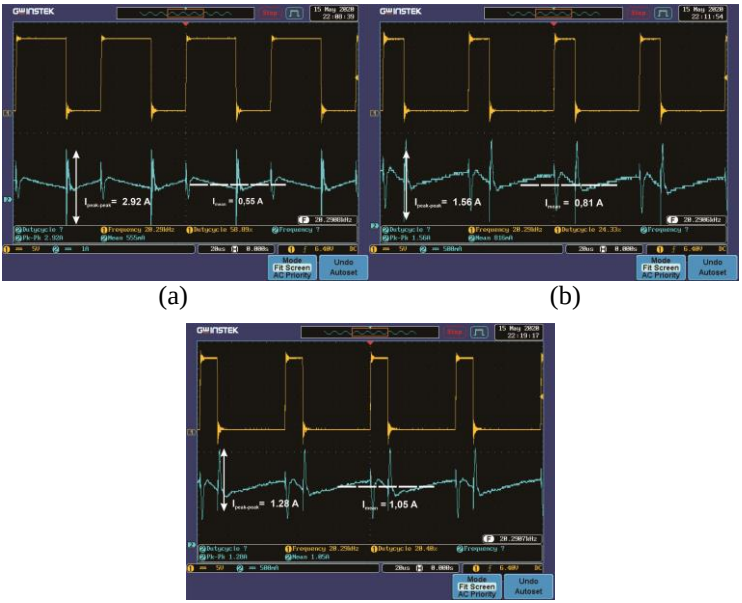


Gambar 4.8 Converter efficiency test results in boost mode

Grafik hasil pengujian efisiensi konverter *bidirectional buck-boost* menunjukkan bahwa semakin besar persentase pembebanan maka akan semakin menurun nilai efisiensi. Hal ini terjadi karena dengan meningkatnya pembebanan juga akan meningkatkan nilai arus pada konverter. Efisiensi konverter ketika beroperasi mode *buck* dan *boost* berturut-turut adalah sebesar 83.251 % dan 79.036 %

4.5 Pengujian Metode *Constant Current*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui dan memastikan bahwa konverter telah mampu menjaga arus tetap konstan sesuai dengan nilai arus setpoint yang telah ditetapkan. Untuk operasi *buck*, nilai arus setpoint yang digunakan adalah 0.5 A, 0.8 A, dan 1 A. Sedangkan untuk operasi *boost*, nilai arus setpoint yang digunakan adalah 0.5 A, 1 A, dan 1.5. Pada kedua operasi mode *buck* dan *boost*, nilai rheostat atau nilai beban diatur tetap. Bentuk gelombang dari hasil pengujian dapat ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.

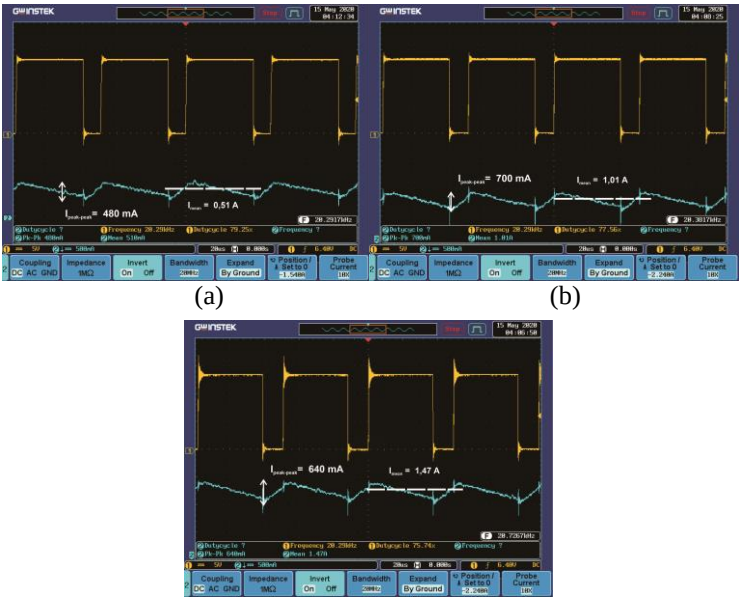


(a) (b)

(c)

Gambar 4.9 Graph of constant current test results in buck mode (a) 0.5 A (b) 0.8 A and (c) 1 A

Spike yang muncul pada pengujian ini disebabkan oleh komponen induktor yang tidak ideal. Meskipun nilai yang terukur berbeda sedikit dengan hasil perhitungan dan desain, namun tetap dapat ditoleransi karena konverter masih dapat bekerja sesuai dengan desain.

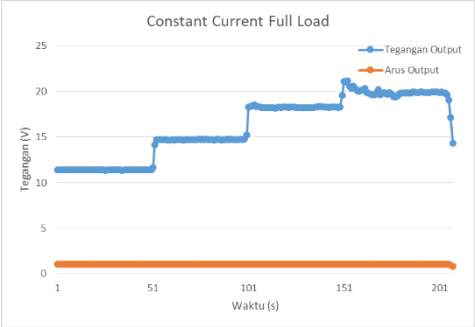


(a) (b)

(c)

Gambar 4.10 Graph of constant current test results in boost mode (a) 0.5 A (b) 1 A and (c) 1.5 A

Selain itu, pada pengujian ini konverter dioperasikan dengan arus setpoint tetap dan nilai rheostat atau nilai beban berubah-ubah. Hal ini bertujuan untuk mengamati respon algoritma terhadap berbagai kondisi pembebanan.



Gambar 4.11 Constant current test results with various load

Pada Gambar 4.11 respon algoritma pada konverter dapat digunakan untuk berbagai kondisi pembebanan, dan tetap mempertahankan arusnya. Nilai arus setpoint yang digunakan adalah sebesar 1 A. Dari hasil pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa konverter telah beroperasi menggunakan metode *constant current* pada mode *buck* maupun *boost*.

4.6 Pengujian Baterai

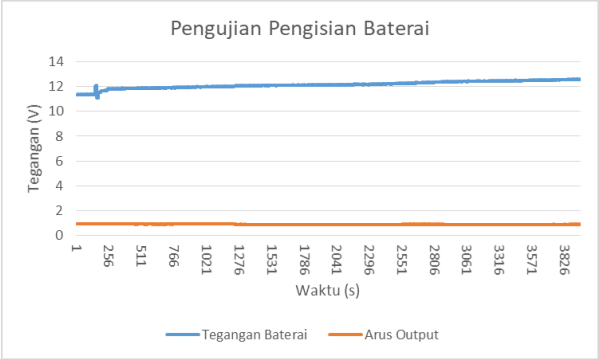
Pada subbab ini, pengujian dilakukan dengan menganalisis karakteristik baterai LiPo 3S 2200 mAh dalam kondisi *charging* dan *discharging.* Untuk *charging* baterai, konverter *bidirectional buck-boost* akan beroperasi pada mode *boost*. Baterai akan diisi menggunakan generator BLDC sebagai sumber DC. sedangkan untuk *discharging* baterai menggunakan mode *buck*, dengan mengalirkan daya dari baterai ke rheostat yang nilainya diatur pada kondisi *full load*. Hasil dari pengujian ini adalah durasi waktu pengisian dan pengosongan, tegangan akhir baterai serta grafik pengisian dan pengosongan. Konverter harus dapat mempertahankan arusnya ketika pengisian maupun pengosongan baterai.

4.6.1 Pengujian Pengisian Baterai

Pada subbab ini dilakukan pengujian pengisian baterai menggunakan generator BLDC sebagai sumber DC. Generator BLDC diatur untuk beroperasi secara maksimal selama proses pengujian ini. Konverter *bidirectional buck-boost* akan beroperasi pada mode *boost*, dengan nilai tegangan *input* dan tegangan *output* konverter berturut-turut adalah 11 V dan 12.6 V.

Tabel 4.5 Data Pengujian Pengisian Baterai

Parameter	Nilai
Open Circuit Initial Voltage	11.5 V
Set Point Current	1 A
Cut-off Voltage	12.6 V
Duration of Testing Time	45 minutes
Open Circuit End Voltage	12.4 V



Gambar 4.12 Graph of battery charging test results

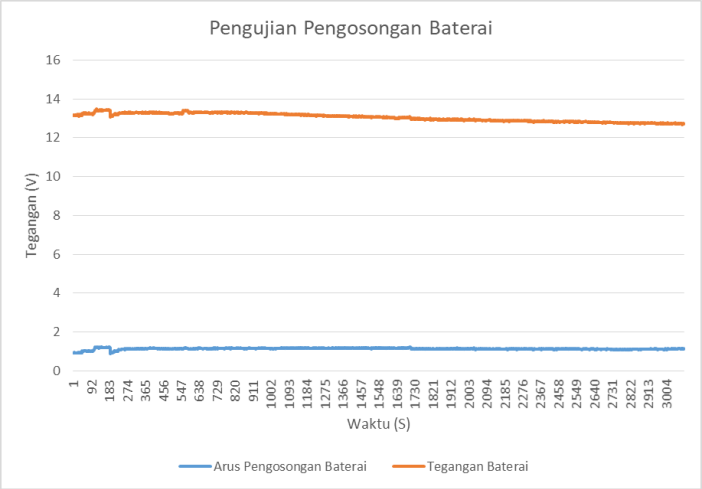
Mula-mula tegangan baterai sebelum *charging* adalah 11.5 V. Nilai ini dapat diasumsikan sebagai 50% dari kapasitas baterai. Pengisian daya baterai dilakukan dengan menggunakan arus *charging* atau arus setpoint sebesar 1 A. Durasi waktu pengisian baterai hingga mencapai tegangan *cut off* adalah 45 menit. Tegangan akhir baterai adalah 12.4 V. Dari hasil pengujian, konverter telah berhasil mengisi daya baterai dengan mempertahankan arusnya.

4.6.2 Pengujian Pengosongan Baterai

Pada subbab ini akan dilakukan pengujian pengosongan baterai. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengamati karakteristik pengosongan baterai LiPo dengan arus konstan. Aliran daya akan mengalir dari baterai menuju beban rheostat resistif. Nilai rheostat akan diatur ketika dalam kondisi *full load*, yaitu 5.3 Ω. Konverter *bidirectional buck-boost* akan beroperasi dengan mode *buck*, dengan nilai tegangan *input* dan tegangan *output* berturut-turut adalah 12.6 V dan 9 V.

Tabel 4.6 Data Pengujian Pengosongan Baterai

Parameter	Nilai
Open Circuit Initial Voltage	12.2 V
Set Point Current	1 A
Cut-off Voltage	11.6 V
Duration of Testing Time	45 minutes
Open Circuit End Voltage	11.6 V



Gambar 4.13 Graph of battery discharging test results

Mula-mula tegangan baterai sebelum *discharging* adalah 12.2 V. Pengosongan daya baterai dilakukan dengan menggunakan arus *discharging* atau arus setpoint sebesar 1 A. Durasi waktu pengosongan baterai hingga mencapai tegangan *cut off* adalah 45 menit. *Ripple* yang terjadi karena komponen ACS712 atau sensor arus dari konverter ini tidak stabil apabila digunakan pada waktu yang lama. Tegangan akhir baterai adalah 11.6 V. Ini membuktikan bahwa konverter telah berhasil mengosongkan daya baterai dengan mempertahankan arusnya.

Dari keseluruhan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa implementasi konverter *bidirectional buck-boost* telah beroperasi menggunakan metode *constant current* pada mode *buck* maupun *boost*. Konverter juga mampu mengisi maupun mengosongkan daya baterai dengan mempertahankan arusnya. Namun, metode ini memiliki kelemahan yaitu bila baterai diisi atau dikosongkan dengan metode ini maka kemungkinan besar dapat mengurangi umur baterai, karena metode ini tidak menggunakan *balancer* atau *equalizer* yang dapat memperpanjang umur baterai. Sehingga untuk penggunaan kontinu diperlukan beberapa metode yang lain sebagai penunjang, seperti metode *Constant Current Constant Voltage* (CC-CV) [6]. Selain itu, generator BLDC dapat digunakan sebagai sumber DC untuk mengisi

daya baterai LiPo. Meskipun terdapat beberapa hasil pengujian yang tidak sesuai dengan desain dan hasil simulasi, namun hal tersebut masih dapat ditoleransi karena seluruh sistem tetap dapat bekerja dengan baik.

BAB 5
PENUTUP

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan dan saran dari seluruh kegiatan penelitian yang dilakukan

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, implementasi dan pengujian dari sistem pembangkit mini berbasis konverter *bidirectional buck-boost* menggunakan generator BLDC dengan metode *constant current* maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Implementasi pemodelan sistem generator BLDC dan konverter *bidirectional buck-boost* yang digunakan dapat bekerja sesuai desain dan simulasi yang diinginkan
2. Efisiensi rata-rata dari konverter *bidirectional buck-boost* pada pembebanan 10-100% ini adalah sebesar 83.251 % ketika beroperasi mode *buck* dan 79.036 % ketika beroperasi mode *boost*
3. Algoritma yang digunakan pada konverter *bidirectional buck-boost* dapat menghasilkan nilai arus *charge* dan *discharge* yang konstan
4. Pada pengujian *charging* dan *discharging* baterai Lithium Polymer didapatkan bahwa keseluruhan proses *charging* membutuhkan waktu 45 menit dan proses *discharging* membutuhkan waktu 45 menit dengan menggunakan arus setpoint sebesar 1 A.
5. Metode *Constant Current* cocok digunakan dalam proses pengisian cepat daya baterai (*fast charging*) karena dapat diubah nilai arus setpoint sesuai kebutuhan.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah :

1. Penggunaan topologi rangkaian penyearah *fully controlled three phase* akan dapat meningkatkan efisiensi sistem. Dengan topologi tersebut memungkinkan untuk mengontrol tegangan *output rectifier* sesuai dengan kebutuhan.

2. Pemilihan dan penggunaan motor BLDC sebagai generator memerlukan perhitungan yang lebih banyak untuk meningkatkan efisiensi sistem.
3. Diperlukan pemilihan kawat email dengan resistansi belitan yang rendah pada induktor agar mendapatkan efisiensi yang lebih tinggi, karena sebagian *losses* disebabkan oleh komponen induktor.
4. Perlu menggunakan sensor arus dan tegangan yang memiliki tingkat akurasi dan presisi yang lebih tinggi daripada ACS 712 dan Multiturn, sehingga akan didapatkan kinerja sistem yang lebih efektif dan efisien.
5. Untuk setiap akan melakukan pengujian diperlukan kalibrasi sensor secara berkala.
6. Rangkaian konverter *bidirectional buck-boost* dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai sistem pembangkit mandiri.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Hyung-Woo Lee, Tae-Hyung Kim, and M. Ehsani, "Power density maximization of the brushless DC generator," in *IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, Roanoke, VA, USA, 2003, vol. 3, pp. 2162–2166, doi: 10.1109/IECON.2003.1280578.

[2] M. Thowil Afif and I. Ayu Putri Pratiwi, "Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid dan Nickel-Metal Hydride pada Penggunaan Mobil Listrik - Review," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. 95–99, Aug. 2015, doi: 10.21776/ub.jrm.2015.006.02.1.

[3] "A Guide to Understanding LiPo Batteries — Roger's Hobby Center." https://rogershobbycenter.com/lipoguide (accessed May 26, 2020).

[4] O. C. Onar, Y. Gurkaynak, and A. Khaligh, "A brushless DC generator & synchronous rectifier for isolated telecommunication stations," in *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, Incheon, South Korea, Oct. 2009, pp. 1–6, doi: 10.1109/INTLEC.2009.5352047.

[5] P. J. Zhao and Y. Yu, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note," p. 19, 2014.

[6] "Battery Chargers and Charging Methods." https://www.mpoweruk.com/chargers.htm (accessed May 29, 2020).

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

LAMPIRAN

1. Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter (mm)	Luas Area (mm^2)	Arus (A)
1	7.350	42.4000	119
2	6.540	33.6000	94
3	5.190	21.2000	75
4	5.190	21.2000	60
5	4.620	16.8000	47
6	4.110	13.3000	37
7	3.670	10.6000	30
8	3.260	8.3500	24
9	2.910	6.6200	19
10	2.590	5.2700	15
11	2.300	4.1500	12
12	2.050	3.3100	9.3
13	1.830	2.6300	7.4
14	1.630	2.6300	5.9
15	1.450	1.650	4.7
16	1.290	1.3100	3.7
17	1.150	1.0400	2.9
18	1.024	0.8230	2.3
19	0.912	0.6530	1.8
20	0.812	0.5190	1.5
21	0.723	0.4120	1.2
22	0.644	0.3250	0.92
23	0.573	0.2590	0.729
24	0.511	0.4120	0.577
25	0.455	0.1630	0.457
26	0.405	0.1280	0.361
27	0.361	0.1020	0.288
28	0.321	0.0804	0.226
29	0.286	0.0646	0.182
30	0.255	0.0503	0.142

2. Program Arduino

```
int potValue;
float persen;
bool masuk = true;
int sistem = 0;
//===========================
#define PWM_SD 9
#define PWM_SU 10
unsigned long CurrentTime, previousTime;
double WaktuSekarang, WaktuTerlewat, WaktuTerdahulu = 0;
double pwmval;
int ctr = 0;

//     KALIBRASI SENSOR
//============================
int ACSoffsetin = 2480;
int ACSoffsetout = 2515;
int mVperAmp = 185;
double MultiplierOut = 93;
double MultiplierIn = 104;
const int volt_out = A2;
const int volt_in = A3;
const int amp_out = A0;
const int amp_in = A1;
float VsamplingOut = 0;
float VsamplingIn = 0;
float IsamplingOut = 0;
float IsamplingIn = 0;
float VavgOut = 0;
float VavgIn = 0;
float IavgOut = 0;
float IavgIn = 0;
float Vout = 0;
float Vin = 0;
float Iout = 0;
float Iin = 0;
double VoltageOut = 0;
double VoltageIn = 0;
double VacsOut = 0;
double VacsIn = 0;
```

```
double AmpOut = 0;
double AmpIn = 0;
int RawValue1 = 0;
int RawValue2 = 0;
//============================
int feedbacktegangan val;
int feedbackarusval;
double VoltageTresholdAwal = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PWM_SD, OUTPUT);
  pinMode(PWM_SU, OUTPUT);
  ESC.attach(11,1000,2000);
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT);
  pinMode(A3, INPUT);

  TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B0)| _BV(COM1B1)  ;
  TCCR1B = _BV(WGM13) |  _BV(CS11);
  ICR1 = 49;              //20kHz freq calculation = 16M/(2*8*ICR1
or TOP)
  pwmval = 0;
  OCR1A = pwmval * ICR1;      //  9
  OCR1B = (pwmval+0.1) * ICR1;      //  10

}
void loop(){
Baca_Sensor();
kontrol_motor();
if(masuk){
  while (VoltageOut > 11.6){
    ctr = 0;
  ChargingBaterai();
  }
}
while (VoltageOut <= 11.6){
  ctr = ctr+1;
  ChargingBaterai();
  if(ctr >= 10){
```

```
    pwmval = 0;
    OCR1B = 0;
    masuk = false;
    Serial.print("BateraiPenuh");
    Serial.print("\t");
    Serial.print("Tegangan Baterai = ");
    Serial.print(VoltageOut);
    Serial.println();
    }
  }
}

void ChargingBaterai(){
  CC();
//  Baca_Sensor();
  }

void CC(){
//================ buck ===========
      feedbackarusval = analogRead(A1);
  while(feedbackarusval > 465){
//    delay(10);
    if (pwmval >= 0.89)
    {
      feedbackarusval = analogRead(A1);
    }
    else{
      pwmval = pwmval + 0.001;
      OCR1A = pwmval * ICR1;
      OCR1B = (pwmval+0.05) * ICR1;
      feedbackarusval = analogRead(A1);
    }
  }
  while(feedbackarusval < 465){
    if (pwmval <= 0.1){
      feedbackarusval = analogRead(A1);
    }
    else{
      pwmval = pwmval - 0.001;
      OCR1A = pwmval * ICR1;
```

```
        delay(100);
        OCR1B = (pwmval+0.05) * ICR1;
        feedbackarusval = analogRead(A1);
        }
      }
  //=====================                                    boost
=========================
    feedbackarusval = analogRead(A0);
    while (feedbackarusval < 555){
  //    delay(10);
      if (pwmval >= 0.60){
        feedbackarusval = analogRead(A0);
      }
      else{
        pwmval = pwmval + 0.001;
  //      OCR1A = pwmval * ICR1;
        OCR1B = (pwmval+0.1) * ICR1;
        feedbackarusval = analogRead(A0);
      }
    }
    while (feedbackarusval > 555){
      if (pwmval <= 0.1){
        feedbackarusval = analogRead(A0);
      }
      else{
        pwmval = pwmval - 0.001;
  //      OCR1A = pwmval * ICR1;
        OCR1B = (pwmval+0.1) * ICR1;
        feedbackarusval = analogRead(A0);
        }
      }
   }

  void Baca_Sensor(){
  VsamplingOut = 0;
  VsamplingIn = 0;
  IsamplingOut = 0;
  IsamplingIn = 0;

  for(int x = 0; x <1000; x++)
```

```
    {
      Vout = analogRead(A2);
      Vin = analogRead(A3);
      Iout = analogRead(A0);
      Iin = analogRead(A1);

       VsamplingOut = VsamplingOut + Vout;
       VsamplingIn = VsamplingIn + Vin;
       IsamplingOut = IsamplingOut + Iout;
       IsamplingIn = IsamplingIn + Iin;

      VavgOut = VsamplingOut/1000;
      VavgIn = VsamplingIn/1000;
      IavgOut = IsamplingOut/1000;
      IavgIn = IsamplingIn/1000;

      VoltageOut  =  (VavgOut*MultiplierOut/1023.0);  //buck  131,
boost 109
      VoltageIn = (VavgIn*MultiplierIn/1023.0); //buck 78, boost 98
      //delayMicroseconds(1);
    }
  //    VoltageOut = (VavgOut/1023.0)*MultiplierOut;
  //    VoltageIn = (VavgIn/1023.0)*MultiplierIn;

    RawValue1 = analogRead(IavgIn);
    RawValue2 = analogRead(IavgOut);
    VacsOut = (IavgOut/1023.0)*5000; //mendapatkan nilai mV
    VacsIn = (IavgIn/1023.0)*5000;
    float AmpOut = (VacsOut-ACSoffsetout) / mVperAmp;
    float AmpIn = (VacsIn-ACSoffsetin) / mVperAmp;
  //Serial.print(Iout);
  //Serial.print("\t");
    Serial.print(Iin);
    Serial.print("\t");
    Serial.print("TeganganInput=");
    Serial.print(VoltageIn);
    Serial.print("\t");
    Serial.print("ArusInput=");
    Serial.print(AmpIn);
    Serial.print("\t");
```

```
  Serial.print("TeganganOutput=");
  Serial.print(VoltageOut);
  Serial.print("\t");
  Serial.print("ArusOutput=");
  Serial.println(AmpOut);
//analogread 2 A = 580
  }
  void kontrol_motor(){
  potValue = analogRead(A4);      // reads the value of the potentiometer (value between 0 and 1023)
  potValue = map(potValue, 0, 1023, 1000, 2000);   // scale it to use it with the servo library (value between 0 and 180)
  persen = ((potValue*100)/1000)-100;
  ESC.write(potValue);   // Send the signal to the ESC
  Serial.print (persen);
  Serial.print("%");
  Serial.println ();
}
  void BacaTegangan ()

{
  VsamplingOut = 0;
  for (int x = 0; x < 1000; x++)
  {
    RawValue2 = analogRead (A2);
    VsamplingOut = VsamplingOut + RawValue2;

     }
    VavgOut = VsamplingOut/1000;
    VoltageTresholdAwal = (VavgOut/1023.0)*MultiplierOut;

}

void BateraiPenuh()
{
  VsamplingOut = 0;
  for (int x = 0; x < 1000; x++)
  {
    RawValue2 = analogRead (A2);
    VsamplingOut = VsamplingOut + RawValue2;
```

```
  }
  VavgOut = VsamplingOut/1000;
  VoltageTresholdAwal = (VavgOut/1023.0)*MultiplierOut;
  pwmval = pwmval - 0.001;
  OCR1A = pwmval * ICR1;
  OCR1B = (pwmval+0.1) * ICR1;
}
```

BIODATA PENULIS

Penulis buku penelitian dengan judul **"Desain dan Implementasi Sistem Pembangkit Mini Menggunakan Generator BLDC berbasis *Bidirectional Buck Boost Converter* Dengan Metode *Constant Current*"** ini bernama lengkap Almizan Aryanto dan biasa dipanggil Mijan. Penulis lahir di kota dingin Malang pada tanggal 22 Juni 1998. Penulis hidup dan besar di Malang dan bertempat tinggal di Perumahan Citra Cengger Ayam No. 45. Riwayat pendidikan penulis ialah SDN Wandanpuro 3, SMPN 5 Malang, SMAN 4 Malang. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan S1 di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis memiliki pengalaman di bidang robotika dan kepanitiaan yang cukup banyak diantaranya Tim Bayucaraka ITS dan Evolty ITS sebagai ketua pelaksana BARONAS 2019 (Lomba Robot Nasional).