

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Topologi Konverter Bidirectional *Buck-Boost*

Dita Dini Rivanda^{1*}, Anggara Trisna Nugraha², dan Rama Arya Sobhita³

¹ D3 – Teknik Kelistrikan Kapal, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

^{2,3} Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

Email: dinirivanda23@student.ppns.ac.id^{1*}, anggaranugraha@ppns.ac.id², ramasobhita@student.ppns.ac.id³

Abstrak

Topologi *Bidirectional Buck-Boost Converter* merupakan teknologi yang mampu bekerja dalam dua mode, yaitu buck dan boost. Pada mode buck, konverter ini dapat menurunkan tegangan DC-DC, sedangkan pada mode boost, dapat meningkatkan tegangan DC-DC sesuai kebutuhan. Penelitian ini memanfaatkan *bidirectional buck-boost converter* untuk proses pengisian dan pengosongan daya pada baterai dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin. Hal ini dikarenakan daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga angin tidak stabil, karena bergantung pada berbagai kondisi, salah satunya adalah kecepatan angin yang berubah-ubah. Oleh karena itu, dibutuhkan baterai sebagai media penyimpanan energi listrik. Baterai ini dapat berfungsi sebagai beban dan juga sebagai sumber beban. *Bidirectional buck-boost converter* bekerja dalam mode buck untuk proses pengisian daya baterai, yakni dengan menurunkan tegangan dari generator 24VDC menjadi 14.4VDC saat baterai berperan sebagai beban. Selanjutnya, pada mode boost, konverter ini meningkatkan tegangan dari baterai 12VDC menjadi 24VDC ketika baterai menjadi sumber beban. Hasil dari rancangan yang disimulasikan dengan perangkat lunak PSIM menunjukkan bahwa konverter ini dapat bekerja pada kedua mode tersebut. Pada mode buck (pengisian), tegangan input dari generator sebesar 24VDC berhasil diturunkan menjadi 15.9VDC dengan duty cycle sebesar 0.387. Sedangkan pada mode boost (pengosongan), tegangan input dari baterai 12VDC dapat dinaikkan menjadi 25VDC dengan duty cycle sebesar 0.678.

Kata kunci: *Bidirectional buck-boost converter*, pengisian daya, pengosongan daya, pembangkit listrik tenaga angin

Abstract

Bidirectional Buck-Boost Converter topology is a technology that is able to work in two modes, namely buck and boost. Bidirectional Converter buck mode can reduce DC-DC voltage and boost mode can increase DC-DC voltage as needed. This study using a bidirectional buck-boost converter for the process of charging and discharging batteries in a wind power plant. This is because, in wind power plants the power generated is not stable because it depends on several conditions, one of which is the inconstant wind speed. Therefore, a battery is needed to store electrical energy. This battery can function as a load source and as a load. Bidirectional buck-boost converter works in buck mode used for charging batteries that can reduce the generator voltage from 24VDC to 14.4VDC in this case the battery as a load, then works in boost mode which is used for the battery discharging process which can increase the battery voltage from 12VDC to 24VDC in this case the battery as a load source. The results of the design that has been done in a PSIM software show that the bidirectional buck-boost converter is able to work in two modes. During buck mode (charging) the input voltage from the generator of 24VDC is reduced to 15.9V with a duty cycle of 0.387. Furthermore, during boost mode (discharging) the input voltage from the 12VDC battery can be increased to 25VDC with a duty cycle of 0.678.

Keywords: *Bidirectional buck-boost converter, Charging, Discharging, Wind Power Plant*

1. Pendahuluan

Energi listrik memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari [1]. Hampir seluruh aktivitas masyarakat membutuhkan energi listrik untuk mendukung operasionalnya. Di Indonesia, pemanfaatan energi listrik masih didominasi oleh energi tak terbarukan yang berasal dari fosil, khususnya minyak bumi dan batu bara [2]. Padahal, energi fosil memiliki jumlah yang terbatas, dan jika tidak dimanfaatkan secara bijak, akan habis seiring waktu. Solusi yang tepat untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan memanfaatkan sumber energi baru terbarukan (EBT). Sumber energi terbarukan memiliki banyak keuntungan, seperti emisi gas rumah kaca yang rendah saat digunakan maupun selama proses produksinya, serta bahan baku yang tidak akan habis [3]. Salah satu jenis energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi angin [4]. Pemanfaatan energi angin sebagai energi baru terbarukan dilakukan guna mengatasi defisit pasokan listrik di Indonesia.

Energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi yang berasal dari angin. Pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) memiliki prospek yang besar di Indonesia karena kondisi iklimnya yang mendukung, luasnya wilayah alam, serta banyaknya garis pantai dan jalur pemanfaatan. Berdasarkan data dari *National Energy Blueprint* yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, menunjukkan bahwa potensi energi angin di Indonesia sangat menjanjikan untuk dikembangkan, dengan estimasi sebesar 9,29 GW. Namun, yang baru dimanfaatkan hanya sekitar 0,5 GW atau sekitar 5,38%. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah penelitian dan peneliti yang tertarik mengembangkan teknologi ini masih sangat sedikit [5]. Berdasarkan survei Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) di 20 wilayah Indonesia, rata-rata kecepatan angin per tahun berkisar antara 2 hingga 6 m/s. Beberapa daerah di Indonesia bagian timur memiliki kecepatan angin rata-rata sekitar 5 m/s [6].

Pembangkit listrik tenaga angin memiliki kekurangan, yaitu daya listrik yang dihasilkan tidak stabil [7]. Ketidakstabilan ini disebabkan oleh beberapa kondisi, salah satunya adalah kecepatan angin yang berubah-ubah, sehingga daya yang dihasilkan tidak maksimal dan terjadi fluktuasi daya pada sisi beban. Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga angin dilengkapi dengan baterai. Baterai ini berfungsi sebagai beban maupun sebagai sumber daya. Baterai berperan sebagai beban ketika daya yang dihasilkan oleh sistem pembangkit angin melebihi kebutuhan beban, sehingga energi tersebut digunakan untuk mengisi daya baterai. Sebaliknya, baterai berfungsi sebagai sumber beban ketika daya yang dihasilkan lebih kecil dari kebutuhan beban, sehingga baterai digunakan untuk menyuplai energi listrik ke beban.

Sistem pengisian dan pengosongan daya pada baterai memerlukan konverter DC-DC untuk menaikkan atau menurunkan tegangan DC. Konverter *bidirectional buck-boost* dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penyimpanan energi, sehingga kerusakan baterai dapat dicegah dan masa pakai baterai dapat diperpanjang [8]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan simulasi *bidirectional buck-boost converter* menggunakan perangkat lunak PSIM. *Bidirectional buck-boost converter* dapat bekerja dalam dua mode, yaitu buck dan boost. Pada mode buck, tegangan 24VDC yang berasal dari generator akan diturunkan menjadi 14.4VDC untuk proses pengisian daya baterai. Selanjutnya, pada mode boost, tegangan 12VDC dari baterai akan dinaikkan menjadi 24VDC yang akan digunakan sebagai sumber daya untuk inverter.

2. Metode Penelitian

Bab ini akan membahas penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan *bidirectional buck-boost converter*. Selain itu, akan dijelaskan pula landasan teori yang mendukung simulasi dari *bidirectional buck-boost converter*.

A. PENELITIAN TERDAHULU

1. RANCANG BANGUN PROTOTIPE SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN SKALA KECIL DENGAN BATERAI

Penelitian pertama dilakukan pada tahun 2020 dan membahas rangkaian *bidirectional converter* yang menggunakan sumber dari pembangkit listrik tenaga angin. Dalam penelitian ini, ketika tegangan keluaran turbin angin lebih dari 14V, maka rangkaian bekerja dalam mode pengisian. Sebaliknya, jika tegangan keluaran prototipe kurang dari 14V, maka rangkaian bekerja dalam mode pengosongan. Namun, penelitian ini memiliki kelemahan karena belum menerapkan metode kendali untuk mengetahui respon dari *bidirectional converter*. Akibatnya, respon sistem dari konverter tidak diketahui untuk mengevaluasi performanya karena pengujian hanya dilakukan terhadap *pulse width modulation* pada *bidirectional converter* [9].

2. IMPLEMENTASI KONTROL PROPORTIONAL-INTEGRAL PADA BIDIRECTIONAL CONVERTER UNTUK SISTEM PENGISIAN BATERAI TURBIN ANGIN

Penelitian kedua dilakukan pada tahun 2021 yang menitikberatkan pada perancangan rangkaian *switching* untuk sistem pengisian baterai. Rangkaian *switching* yang digunakan adalah *bidirectional converter*. Ketika tegangan keluaran prototipe turbin angin lebih dari 24V, rangkaian akan bekerja dalam mode pengisian dan sebaliknya, jika tegangan keluaran kurang dari 24V, maka rangkaian akan bekerja dalam mode pengosongan. Kontrol PI berfungsi untuk mengatur tegangan agar memiliki nilai output yang stabil. Nilai K_p , K_i , dan K_d ditentukan melalui metode coba-coba (*trial and error*). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa waktu pengisian baterai dari tegangan awal 22.9 Volt hingga 24 Volt tanpa menggunakan kontrol PI membutuhkan waktu 6 jam 57 menit, sedangkan dengan kontrol PI waktu pengisian menjadi lebih cepat yaitu 2 jam 45 menit. Namun, kelemahan dari penelitian ini adalah hanya menggunakan metode PI sehingga tidak terdapat perbandingan dengan metode kontrol lainnya. Padahal, perbandingan ini penting untuk mengetahui respon terbaik [10].

3. PENGENDALIAN TEGANGAN PADA SISTEM HIBRIDA PANEL SURYA-TURBIN ANGIN DENGAN MANAJEMEN PENYIMPANAN BATERAI

Penelitian ketiga dilakukan pada tahun 2020 yang memfokuskan pada optimasi daya dari sistem energi surya dan turbin angin hibrida yang dikombinasikan dengan baterai dan perangkat kondisioning sinyal saat terjadi perubahan beban. Penelitian ini menggunakan lima konverter daya, yaitu satu konverter AC ke DC, dua konverter *boost* DC-DC, satu *bidirectional buck-boost converter*. Namun, kekurangan dari penelitian ini adalah belum adanya metode kontrol untuk menentukan respon dari *bidirectional buck-boost converter*, sehingga kesimpulan dari penelitian ini hanya menunjukkan keseimbangan daya antara sistem tenaga panel surya–turbin angin dengan baterai [11].

4. STUDI PENGGUNAAN SUPERCAPACITOR SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Penelitian terakhir dilakukan pada tahun 2018 dan berfokus pada perbandingan beberapa parameter antara superkapasitor dengan baterai timbal-asam sebagai sistem penyimpanan energi. Rangkaian *Bidirectional DC-DC Converter* digunakan untuk membantu proses pengisian dan pengosongan daya baterai. Kekurangan dari penelitian ini adalah kurangnya penjelasan secara rinci mengenai pembuatan, pengujian, dan implementasi dari *bidirectional DC-DC converter*. Selain itu, penelitian ini juga hanya menggunakan metode PI, sehingga tidak ada pembandingan dengan metode kontrol lainnya untuk mengetahui metode mana yang memberikan respon lebih cepat [12].

B. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) merupakan sistem pembangkit yang memanfaatkan energi angin sebagai sumber utama untuk menghasilkan energi listrik [13]. Energi angin merupakan salah satu sumber energi baru terbarukan (EBT) yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia. Efisiensi kerja dari pembangkit ini cukup baik, dengan rata-rata sebesar 40%. Nilai efisiensi tersebut disebabkan oleh masih adanya energi kinetik yang tersisa pada angin, karena angin yang keluar dari turbin tidak mungkin memiliki kecepatan nol [14].

Turbin angin terbagi menjadi dua jenis, yaitu turbin angin horizontal dan turbin angin vertikal [15]. Pada turbin angin horizontal, poros rotor dan generator ditempatkan di bagian atas menara dan harus selalu diarahkan sejalan dengan arah datangnya angin. Turbin berskala kecil akan menghadap angin secara otomatis dengan bantuan baling-

baling kecil yang ditempatkan di bagian rotor, sedangkan turbin berskala besar dilengkapi sensor dan motor servo untuk mengatur arah baling-baling agar selalu menghadap angin. Sementara itu, turbin angin vertikal memiliki poros rotor yang tegak lurus. Keuntungan utama dari konfigurasi ini adalah turbin tidak perlu diarahkan ke arah angin yang datang. Hal ini sangat berguna di wilayah dengan arah angin yang tidak menentu atau turbulen. Dengan poros vertikal, komponen utama seperti generator bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, sehingga tidak memerlukan penopang tambahan pada menara dan memudahkan perawatan.

Secara umum, komponen utama dari turbin angin terdiri dari [16]:

- **Baling-baling (Blade)**

Baling-baling merupakan bagian dari kincir angin yang berbentuk seperti pelat datar. Ketika sejumlah massa udara dengan kecepatan tertentu (v) melewati suatu bidang seluas m^2 (luas baling-baling), maka energi yang terkandung dalam angin tersebut dapat dimanfaatkan sebagai tenaga.

- **Generator DC**

Generator DC adalah perangkat listrik yang mengubah energi kinetik (gerak putar) menjadi energi listrik arus searah (DC). Terdapat dua bagian utama pada generator, yakni bagian diam (stator) dan bagian bergerak (rotor). Stator terdiri dari bodi generator, magnet, dan sikat (brush), sementara rotor terdiri dari jangkar dan lilitannya.

- **Pengatur Tegangan (Voltage Regulator)**

Pengatur tegangan merupakan komponen elektronik yang berfungsi menstabilkan tegangan pada nilai tertentu. IC yang digunakan dalam pengatur tegangan ini adalah LM7815 yang memiliki tiga terminal, yaitu terminal input (V_{in}) yang terhubung ke sumber, terminal output (V_{out}) yang terhubung ke beban, dan terminal ground (GND) yang terhubung ke tanah.

- **Baterai**

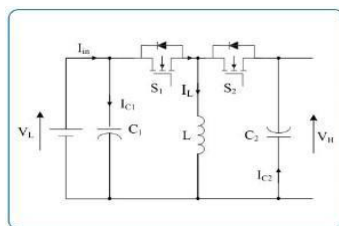
Baterai atau aki adalah alat yang dapat menyerap, menyimpan, dan melepaskan energi listrik melalui proses kimia [17]. Dikenal dua jenis elemen sebagai sumber arus searah (DC) hasil dari proses kimia, yaitu elemen primer dan sekunder. Elemen sekunder dapat diisi ulang berkali-kali, yang umum dikenal sebagai baterai isi ulang. Elemen primer sendiri terdiri dari elemen basah (berbentuk larutan atau cairan) dan elemen kering.

C. KONVERTER DC-DC BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST

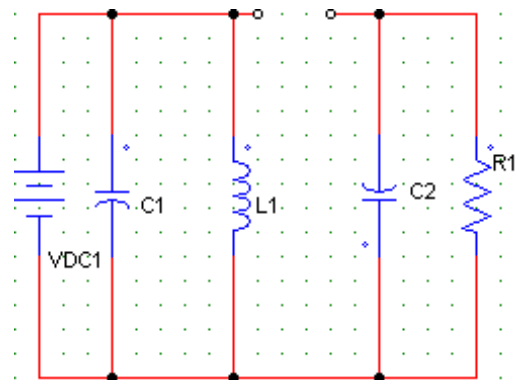
Konverter DC-DC merupakan teknologi yang mampu mengubah tegangan input DC menjadi tegangan output DC dengan nilai yang dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan input tersebut [18]. Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi rangkaian bidirectional buck-boost converter untuk mendukung proses pengisian (charging) dan pelepasan daya (discharging) baterai pada sistem pembangkit listrik tenaga angin.

Bidirectional buck-boost converter merupakan salah satu topologi konverter dua arah yang memiliki kemampuan untuk menurunkan maupun menaikkan tegangan, serta memungkinkan perubahan arah polaritas arus [19]. Fungsi utama dari bidirectional buck-boost converter adalah untuk mengatur tegangan DC bus melalui pengaturan pengisian dan pengosongan baterai yang dilakukan oleh konverter tersebut. Konverter ini memiliki dua mode operasi serta satu mode perintah untuk memutus aliran daya, yaitu mode pengisian (charging), mode pelepasan daya (discharging), dan mode mati (off) [20].

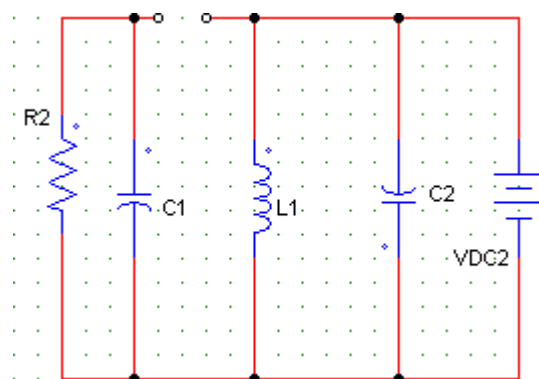
Gambar 1 di bawah ini menunjukkan rangkaian bidirectional buck-boost converter yang digunakan dalam penelitian ini. Gambar 2 dan 3 masing-masing menggambarkan konfigurasi rangkaian saat bekerja pada mode buck dan boost.



Gambar 1. Topologi Konverter Buck-Boost



Gambar 2. Mode Operasi Bidirectional Buck-Boost (Saklar Aktif/On) [21]



Gambar 3. Mode Operasi Bidirectional Buck-Boost (Saklar Nonaktif/Off) [21]

Perbedaan antara konverter buck-boost konvensional dan konverter bidirectional buck-boost meliputi [22]:

- Fungsi**
 Konverter buck-boost berfungsi untuk menurunkan atau menaikkan tegangan input DC menjadi tegangan output DC yang nilainya bisa lebih rendah atau lebih tinggi. Sedangkan konverter bidirectional buck-boost tidak hanya dapat menurunkan atau menaikkan tegangan DC, tetapi juga dapat mengubah arah aliran daya antara dua sumber daya DC.
- Konfigurasi**
 Konverter buck-boost konvensional memiliki konfigurasi satu jalur (single-ended) yang terdiri atas satu saklar (transistor), satu dioda, dan satu induktor. Sedangkan konverter bidirectional buck-boost menggunakan konfigurasi dua jalur (dual-ended) dengan dua saklar (transistor) dan dua induktor.
- Arus** **Keluaran**
 Konverter buck-boost menghasilkan arus keluaran yang searah dengan arus masukannya. Sebaliknya, konverter bidirectional buck-boost dapat menghasilkan arus keluaran yang mengalir berlawanan arah dengan arus masuk, sehingga memungkinkan perubahan arah aliran daya antara dua sumber daya DC.
- Keandalan**
 Konverter bidirectional buck-boost cenderung lebih kompleks dan mahal dibandingkan konverter buck-boost biasa. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi dua jalur serta adanya komponen tambahan untuk mendukung aliran daya dua arah. Oleh karena itu, konverter jenis ini juga lebih rentan terhadap kegagalan komponen serta kebocoran daya.

D. PWM (PULSE WIDTH MODULATION)

PWM (Pulse Width Modulation) adalah sebuah metode untuk menghasilkan tegangan output variabel menggunakan mikrokontroler. PWM dibentuk dengan menghasilkan gelombang persegi pada frekuensi tinggi [16]. Pulse Width Modulation merupakan teknik untuk memanipulasi lebar dari sinyal pulsa dalam satu periode tertentu. Amplitudo sinyal asli yang belum dimodulasi memiliki hubungan langsung dengan lebar pulsa PWM, artinya siklus kerjanya (duty cycle) bervariasi antara 0% hingga 100%, sedangkan frekuensi gelombang PWM tetap konstan [23].

PWM digunakan sebagai pengendali saklar (switching) dan untuk memodulasi tegangan input DC menjadi sinyal gelombang dengan frekuensi tinggi, yang kemudian akan diteruskan melalui komponen filter L-C untuk menghasilkan tegangan output DC [24].

E. SOFTWARE PSIM

PSIM (Power Simulator) merupakan perangkat lunak yang bermanfaat untuk melakukan simulasi berbagai karakteristik elektronika [25]. Selain itu, perangkat lunak ini dapat digunakan untuk mensimulasikan rangkaian tenaga listrik, serta untuk memahami dan mempelajari cara kerja sistem dari rangkaian yang telah dirancang [26]. PSIM menyediakan sistem simulasi yang tepat untuk menganalisis konverter daya, desain loop kendali, dan sistem pengendalian motor.

Adapun keunggulan dari PSIM adalah sebagai berikut [27]:

- Simulasi dapat menampilkan perkiraan performa dari sistem nyata berdasarkan pengaturan proyek pada kondisi operasional tertentu.
- Dapat digunakan untuk mendesain sistem dengan berbagai alternatif pilihan.
- Simulasi mampu mengelola kendali terhadap kondisi yang ada secara lebih baik sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat.

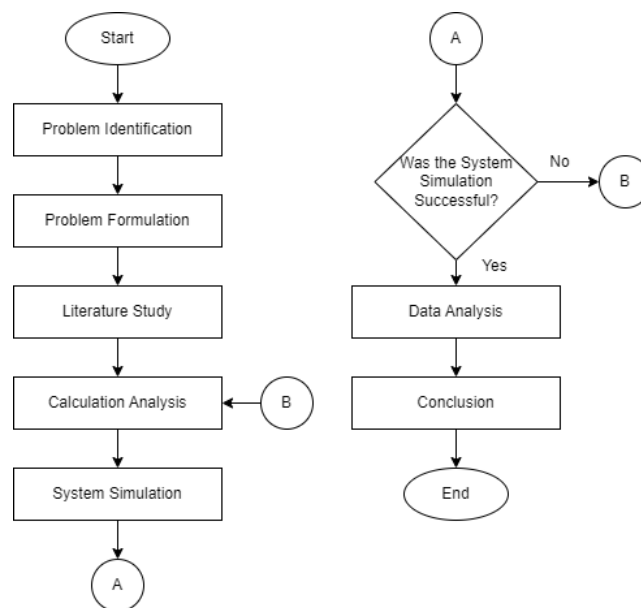
Sementara itu, kekurangan dari PSIM antara lain:

- Hanya mampu memperkirakan karakteristik sistem nyata berdasarkan input tertentu.
- Model simulasi umumnya membutuhkan biaya mahal dan waktu lama untuk dikembangkan.
- Banyak model yang dihasilkan dari simulasi hanya berupa output saja.

3. Hasil dan Diskusi

Gambar 4 menunjukkan tahapan-tahapan penelitian yang akan dilakukan. Langkah pertama adalah mengidentifikasi permasalahan untuk kemudian dirumuskan ke dalam bentuk rumusan masalah. Tahap selanjutnya adalah melakukan studi literatur dengan menggunakan berbagai referensi seperti buku, jurnal, prosiding, makalah, internet, dan sumber lainnya. Berdasarkan hasil kajian dari referensi yang telah dikumpulkan, maka dapat ditentukan rumus atau persamaan yang sesuai untuk sistem *bidirectional buck-boost converter*.

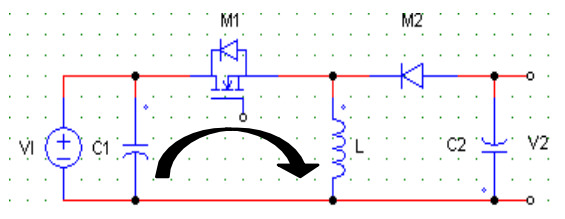
Tahap berikutnya adalah melakukan analisis perhitungan terhadap *bidirectional buck-boost converter*. Hasil dari analisis ini kemudian dijadikan dasar untuk melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM. Tahapan simulasi ini bertujuan untuk menguji hasil perhitungan yang telah dilakukan terhadap rangkaian *bidirectional buck-boost converter*. Apabila pada saat simulasi sistem belum berjalan sesuai harapan, maka akan dilakukan pengecekan ulang terhadap perhitungannya. Namun, jika sistem berhasil dijalankan dengan baik saat pengujian, maka dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu analisis data. Tahap analisis data dilakukan untuk mengolah data sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

3.1. Perhitungan Bidirectional Buck-Boost Converter

Mode Buck (Pengisian Daya) Penomoran ke-1 di bawah subbab



Gambar 5. Mode Buck pada Bidirectional Buck-Boost Converter

Gambar 5 di atas merupakan konfigurasi rangkaian konverter ketika bekerja dalam mode buck. V1 berperan sebagai sumber tegangan DC yang berasal dari generator. Tegangan ini disalurkan secara paralel melalui kapasitor C1. Saklar M1 berfungsi sebagai saklar utama, sedangkan dioda pada saklar M2 bertugas menghambat arus listrik dari arah beban. Beberapa parameter berikut digunakan untuk perencanaan mode buck:

- Tegangan dari generator (V1): 9V – 24V
- Tegangan pengisian baterai (V2): 14,4V
- Arus beban: 7,5 A

Perhitungan Nilai Minimum dan Maksimum Fungsi Transfer Tegangan DC:

$M_{VDC \min} = \frac{[V2]}{V1 \max} = \frac{14.4}{24} = 0.6$	(1)
$M_{VDC \max} = \frac{[V2]}{V1 \min} = \frac{14.4}{9} = 1.6$	(2)

- Perhitungan Nilai Siklus Kerja (Duty Cycle) Minimum dan Maksimum:

$$D_{1 \min} = \frac{M_{VDC \min}}{M_{VDC + \eta}} \quad (3)$$

$$= \frac{0.6}{0.6 + 0.95} = \frac{0.6}{1.55} = 0.387$$

$$D_{1 \min} = \frac{M_{VDC \max}}{M_{VDC + \eta}} \quad (4)$$

$$= \frac{1.6}{1.6 + 0.95} = \frac{1.6}{2.55} = 0.627$$

- Perhitungan Nilai Hambatan Beban:

$$R_L = \frac{[V_2]}{I} \quad (5)$$

$$= \frac{14.4}{7.5} = 1.92 \Omega = 0.627$$

- Perhitungan Ripple Tegangan Keluaran Maksimum:

$$L_{1 \min} = \frac{V_2 (1 - D_{1 \min})^2}{2 \times I \times f_s} \quad (6)$$

$$= \frac{14.4 (1 - 0.387)^2}{2 \times 7.5 \times 4.10^4} = \frac{14.4 (0.613)^2}{600000} =$$

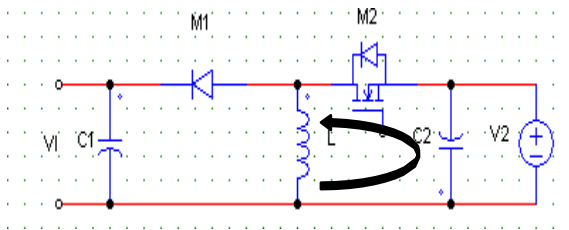
$$= 0.000009018456 H = 9.02 \mu H$$

- Perhitungan Nilai Kapasitor:

$$V_{r2} = 0.01 \times V_2 = 0.01 \times 14.4 = 0.144 V$$

$$= 144 mV \quad (7)$$

- Mode Boost (Pelepasan Daya)



Gambar 6. Mode Boost pada Bidirectional Buck-Boost Converter

Gambar 6 menunjukkan rangkaian konverter ketika bekerja dalam mode boost. Tegangan V2 digunakan sebagai sumber tegangan DC, dan beban dihubungkan secara paralel melalui kapasitor C2. Saklar M2 bertindak sebagai saklar utama, sedangkan dioda pada saklar M1 berfungsi untuk menghambat arah arus dari beban. Parameter yang digunakan untuk perhitungan mode boost adalah:

- Tegangan inverter (V1): 24V
- Tegangan baterai (V2): 12V
- Arus inverter: 8.3A

- Perhitungan Nilai Siklus Kerja:

$M_{VDC} = \frac{V_1}{[V_2]} = \frac{24}{12} = 2$	(8)
---	-----

- Perhitungan Nilai Hambatan Beban:

$D_2 = \frac{M_{VDC}}{M_{VDC} + \eta}$ $= \frac{2}{2 + 0.95} = \frac{2}{2.95} = 0.678$	(9)
---	-----

- Perhitungan Nilai Hambatan Beban:

$R_L = \frac{V_1}{I_1} = \frac{24}{8.3} = 2.89\Omega$	(10)
---	------

- Perhitungan Nilai Induktansi Maksimum:

$L_{2max} = \frac{V_1(1-D_2)^2}{2 \times I \times f_s}$ $= \frac{24(1-0.678)^2}{2 \times 8.3 \times 4.10^4} = \frac{24(0.322)^2}{664000} = 3.75\mu H$	(11)
--	------

- Perhitungan Ripple Tegangan Output Maksimum:

$V_{r1} = 0.01 \times V_1 = 0.01 \times 24 = 0.24 \text{ Volt}$ $= 240 \text{ mV}$	(12)
---	------

- Perhitungan Kapasitor:

$V_{rcpp} = 100\text{mV}$

$V_r = \min(144\text{mV}, 240\text{mV}) = 144\text{mV}$	(13)
---	------

$V_{C_{pp}} = V_r - V_{rcpp} = 144\text{mV} - 100\text{mV}$ $= 44 \text{ mV}$	(14)
--	------

$\frac{D1max I2 max}{F_s \times V_{rcpp}}$ $= \frac{0.627 \times 7.5}{40000 \times 0.044} = \frac{4.7025}{1760} = 0.002671875F$ $= 2671,875\mu F$	(15)
---	------

Berdasarkan nilai-nilai di atas, akan dilakukan penyesuaian terhadap nilai kapasitas kapasitor yang beredar di pasaran. Maka pada Tugas Akhir ini akan dilakukan penelitian dengan menggunakan kapasitor berkapasitas 3300uF.

- Perhitungan Nilai InduInduktor:

$L_{min} = \max(9.02\mu H, 3,75\mu H)$ $= 9.02\mu H \times 10 = 90.2 \mu H$	(15)
---	------

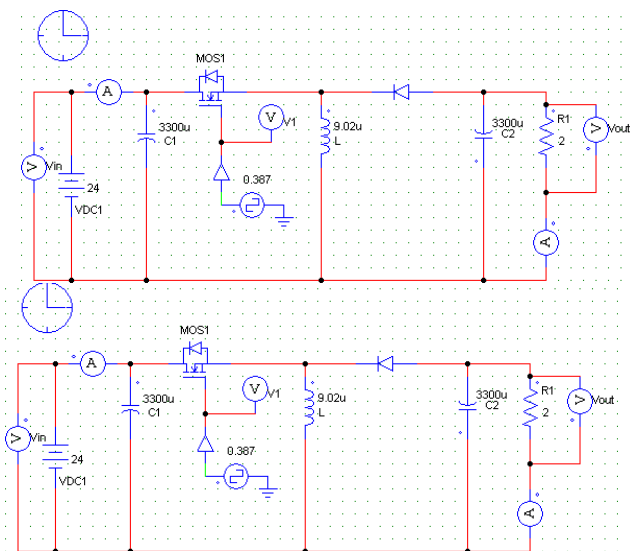
Tabel 1. Deskripsi Simbol

Simbol	Keterangan
Mvdc	Mosfet
D	Duty Cycle
RL	Resistor Resistance Value
Lmax	Maximum Inductance Value
Vr1	Maximum Output Voltage Ripple
C	Capasitor
Imax	Maximum Current

3.2. Simulasi *Bidirectional Buck-Boost Converte*

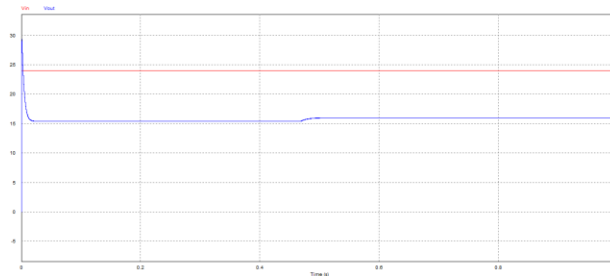
- Simulasi Rangkaian Konverter Buck

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PSIM. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk memastikan bahwa tegangan output sesuai dengan nilai yang telah ditentukan, yaitu sebesar 14.4V untuk proses pengisian baterai. Komponen seperti kapasitor, induktor, resistor, dan MOSFET telah disesuaikan berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 7. Simulasi Rangkaian Buck

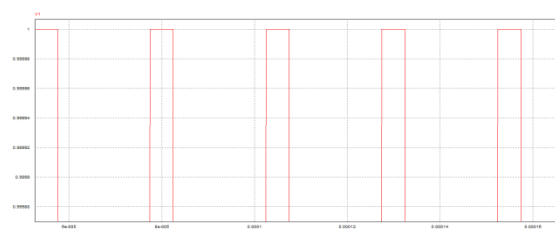
Hasil dari simulasi rangkaian di atas dapat dilihat pada gambar sinyal berikut (Gambar 6). Sinyal berwarna merah menunjukkan tegangan input sebesar 12V, sedangkan garis berwarna biru memperlihatkan sinyal tegangan output dari hasil simulasi *bidirectional buck converter*. Tegangan output mencapai 15 volt pada kondisi *buck* dengan waktu mencapai keadaan tunak selama 0,3 detik.



Gambar 8. Sinyal Hasil Simulasi Mode Buck

Measure	
Time	5.2000000e-001
Vin	2.4000000e+001
Vout	1.5984666e+001

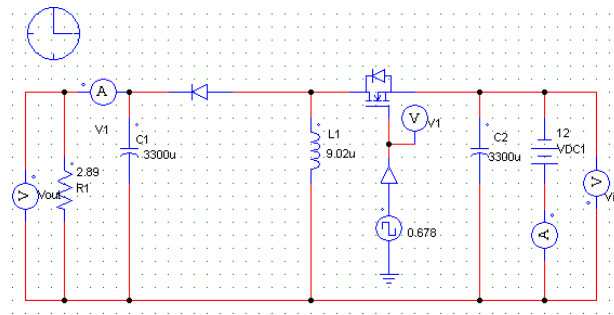
Gambar 9. Nilai Tegangan Mode Buck



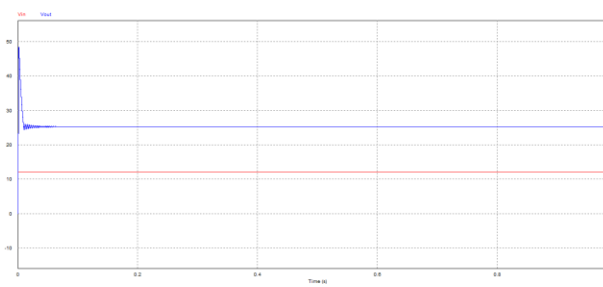
Gambar10. Sinyal PWM Mode Buck

- Simulasi Rangkaian *Bidirectional Boost Converter*

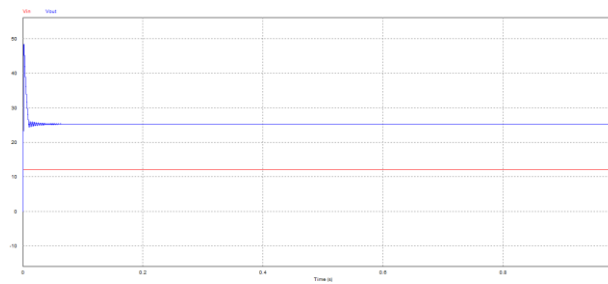
Berikut ini adalah desain simulasi untuk mode *boost*. Pada kondisi ini, tegangan output yang diinginkan adalah sebesar 24VDC sebagai sumber tegangan untuk inverter. Tegangan input berasal dari baterai sebesar 12VDC. Nilai kapasitor, induktor, resistor, dan komponen MOSFET telah disesuaikan dengan hasil perhitungan sebelumnya.



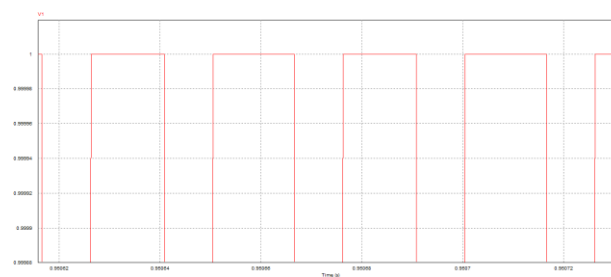
Gambar 11. Simulasi *Bidirectional Boost Converter*



Gambar 12. Sinyal Hasil Simulasi Mode Boost



Gambar 13. Nilai Tegangan Mode Boost



Gambar 14. Sinyal PWM Mode Boost

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa simulasi *bidirectional buck-boost converter* menggunakan perangkat lunak PSIM berhasil dilakukan dengan menggunakan kapasitor berkapasitas 3300 μF dan induktor sebesar 90,2 μH .

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi *buck* (pengisian baterai), tegangan input sebesar 24 VDC berhasil diturunkan menjadi 15,9 VDC dengan *duty cycle* sebesar 0,387. Sedangkan pada kondisi *boost* (pengosongan baterai), tegangan input sebesar 12 VDC berhasil dinaikkan menjadi 25,2 VDC dengan *duty cycle* sebesar 0,678. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa simulasi berhasil karena tegangan output dapat berubah sesuai dengan kebutuhan sistem.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa serta menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan makalah ini. Penulis juga memohon maaf apabila masih terdapat kekurangan dalam penulisan, dan berharap karya ini dapat menjadi pembelajaran untuk penyusunan karya ilmiah selanjutnya.

5. Daftar Pustaka

- [1] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [2] A. D. W. M. Sidik and Z. Akbar, "Analyzing the Potential for Utilization of New Renewable Energy to Support the Electricity System in the Cianjur Regency Region," *Fidel. J. Tek. Elektro*, vol. 3, no. 3, pp. 46–51, 2021, doi: 10.52005/fidelity.v3i3.66.
- [3] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 24, no. January, pp. 38–50, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.01.006.
- [4] W. Arafah, L. Nugroho, R. Takaya, and S. Soekapdjo, "Marketing strategy for renewable energy development in Indonesia context today," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 8, no. 5, pp. 181–186, 2018.
- [5] A. Tasri and A. Susilawati, "Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 7, pp. 34–44, 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.02.008.
- [6] N. A. Satwika, R. Hantoro, E. Septyaningrum, and A. W. Mahmashani, "Analysis of wind energy potential and wind energy development to evaluate performance of wind turbine installation in Bali, Indonesia," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 4461–4476, 2019, doi: 10.15282/jmes.13.1.2019.09.0379.
- [7] F. Díaz-González, M. Hau, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, "Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 551–564, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.03.040.
- [8] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Design of buck-boost converter as a voltage stabilizer on solar power plant at PPNS Baruna 01 Crewboat." *E3S Web of Conferences*. Vol. 473. EDP Sciences, 2024.
- [9] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Application of the Coulomb Counting Method for Maintenance of VRLA Type Batteries in PLTS Systems." *E3S Web of Conferences*. Vol. 473. EDP Sciences, 2024.
- [10] Ihsanudin, Yazid, Edy Prasetyo Hidayat, and Anggara Trisna Nugraha. "Application of Sepic Converters as Solar Panel Output Voltage Stabilizers to Increase Access to Renewable

- Energy in Rural Communities." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.1 (2024): 1-6.
- [11] Ivannuri, Fahmi, Lilik Subiyanto, and Anggara Trisna Nugraha. "Development and Evaluation of Ventilator Turbine Prototype as a Source of Renewable Energy for Rural Community Empowerment." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.1 (2024): 1-7.
- [12] Setiawan, Edy, et al. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Springer, Singapore, 2025. 185-210.
- [13] Muttaqin, Imam Mursyid, Salsabila Ika Yuniza, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of a Single-Phase Controlled Half-Wave Rectifier Applied to AC Motor." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2 (2024): 1-10.
- [14] Sobhita, Rama Arya, Anggara Trisna Nugraha, and Mukhammad Jamaludin. "Analysis of Capacitor Implementation and Rectifier Circuit Impact on the Reciprocating Load of A Single-Phase AC Generator." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 1-9.
- [15] Nugraha, Anggara Trisna, Oktavinna Dwi Pratiwi, and Annas Singgih Setiyoko. "SIMULASI GANGGUAN SAAT TERJADI GANGGUAN UNDERVOLTAGE DAN UNBALANCE LOAD PADA SUB-SUB DISTRIBUSI PANEL." *MEDIA ELEKTRIKA* 16.2 (2024): 162-173.
- [16] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Springer, Singapore, 2025. 211-228.
- [17] Ainudin, Fortunaviaza Habib, and Anggara Trisna Nugraha. "Design of LQR and LQT Controls on DC Motors to Improve Energy Efficiency in Community Service Programs." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2 (2024): 1-7.
- [18] Nugraha, Anggara Trisna, and Chusnia Febrianti. "Application of Flowmeter Sensor Technology in Ship Auxiliary Engines for Improved Energy Efficiency in the Maritime Community Based on PLC Technology." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2 (2024): 1-7.
- [19] Nugraha, Anggara Trisna, and Chusnia Febrianti. "Prototype of Ship Fuel Monitoring System Using NodeMCU." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.1 (2024): 1-9.
- [20] Nugraha, Anggara Trisna, and Moh Ghafirul Pratama Aprilian Sugianto. "Development of a Monitoring System for Daily Fuel Tank Levels on Ships." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.1 (2024): 1-9.