

PERANCANGAN TWO PHASE INTERLEAVED BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER BERBASIS MIKROKONTROLER DSPIC30F2020

Zahirah Ahlami^{1*}, Iwan Setiawan², dan Enda Wista Sinuraya³

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

*E-mail: zahirah.a.za@gmail.com

Abstrak

Rangkaian konverter arus searah dibutuhkan untuk mengatur arah aliran daya yang mengalir pada baterai dengan tegangan yang lebih tinggi dan baterai dengan tegangan yang lebih rendah. Pengaturan ini diperlukan untuk menyesuaikan arah aliran daya dengan kebutuhan beban. Dalam penelitian ini telah dirancang *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* berbasis Mikrokontroler dsPIC30F2020 yang mampu menghasilkan riak arus keluaran yang semakin halus dengan fitur *phase shift*. Pengujian dilakukan dengan variasi *duty cycle* pada rentang 35%–65% dengan interval nilai *duty cycle* sebesar 5% untuk mengetahui arah aliran daya pada baterai 24V sebagai tegangan sisi tinggi dan baterai 12V sebagai tegangan sisi rendah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat nilai *duty cycle* berada di atas 50%, maka konverter akan bekerja dalam mode *buck* dan mengalirkan daya dari baterai 24V menuju baterai 12V. Sedangkan saat nilai *duty cycle* berada di bawah 50%, maka konverter akan bekerja dalam mode *boost* dan mengalirkan daya dari baterai 12V menuju baterai 24V. Fitur *phase shift* yang diatur menggunakan mikrokontroler 16 bit dsPIC30F2020 menyebabkan arus yang mengalir pada dua buah induktor tidak mengalami kenaikan maupun penurunan secara bersamaan sehingga menghasilkan riak arus keluaran sebesar 21,42% dari riak arus yang mengalir pada salah satu induktor.

Kata kunci: Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter, buck, boost, dsPIC30F2020, phase shift.

Abstract

Direct current converter circuit is required to regulates power flow direction that flow at high voltage battery to low voltage battery. This regulation is required to adjust the power flow direction with load necessary. In this research, Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter berbasis Mikrokontroler dsPIC30F2020 has realized and give current ripple output increasingly fine with phase shift feature. The experiment carried out by varying the dutycycle 35%–65% in range with 5% of dutycycle interval to find out the power flow direction of 24V battery as the high voltage side and 12V battery as low voltage side. The result of the experiment indicate that when the dutycycle is greater than 50% then, the converter will operate in buck mode and flow the power from 24V battery to 12V battery. While, when the dutycycle less than 50% then the converter will operate in boost mode and flow the power from 12V battery to 24V. the phase shift feature that adjusted using 16 bit dsPIC30F2020 microcontroller cause the current that flow in 2 inductors not increase and decrease simultaneously with the result that produce 21,42% output current ripple of the current ripple that flow in one of the inductor.

Keywords: Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter, buck, boost, dsPIC30F2020, phase shift.

1. Pendahuluan

Kebutuhan manusia terhadap energi listrik akan terus meningkat seiring perkembangan teknologi yang semakin pesat. Sebagian besar energi listrik yang digunakan di seluruh dunia berasal dari batu bara meskipun emisi karbon dari batu bara jauh lebih tinggi dibanding bahan bakar lainnya. Namun, produksi batu bara nasional pada tahun 2016 mengalami penurunan sebanyak 39.463 ton dibanding tahun 2013[1]. Diperkirakan dengan kondisi produksi saat ini, cadangan batubara akan habis dalam waktu 70 tahun jika tidak ditemukan cadangan baru. Penurunan jumlah cadangan energi tak terbarukan yang

kian menipis sebaiknya diantisipasi dengan memanfaatkan Energi Baru Terbarukan (EBT). Penggunaan EBT sebagai pembangkit listrik hanya sekitar 15.06% dari total kapasitas terpasang nasional sebanyak 64.924,80 MW[2]. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu EBT yang sedang dikembangkan di Indonesia, baik oleh PLN, *Independence Power Producer* (IPP), maupun DITJEN Ebtke. Energi surya dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan *Photovoltaic* (PV) yang dipengaruhi oleh iridiasi sinar matahari, suhu lingkungan, dan sudut datang matahari[3].

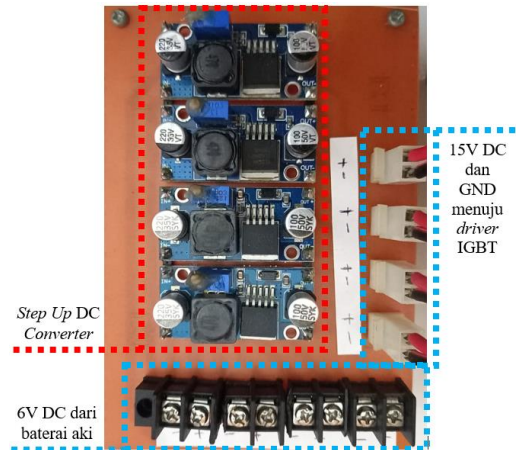
Elemen penyimpanan merupakan salah satu bagian terpenting dalam sistem energi terbarukan[4]. Elemen penyimpanan mengumpulkan fluktuasi energi dan memungkinkan untuk meningkatkan sifat dinamis sistem. Sebuah baterai kimia atau *super capacitor* dapat digunakan sebagai elemen penyimpanan[5]. Oleh karena itu, dibutuhkan rangkaian konverter yang dapat diatur arah aliran daya yang mengalir untuk mengisi dan menggunakan baterai, sehingga digunakan rangkaian *Bidirectional DC-DC Converter* yang dapat mengalirkan daya untuk keperluan mengisi atau menggunakan baterai[6]. Dua buah baterai yang memiliki nilai tegangan berbeda dengan *Bidirectional DC-DC converter* dapat mengendalikan arah arus *charge/discharge* baterai secara efektif. Topologi *Two Phase Interleaved* terdiri atas dua modul *Bidirectional DC-DC Converter* yang terhubung secara paralel yang dapat menghasilkan riak arus keluaran lebih kecil dibanding dengan topologi konvensional[7]. Riak dari arus keluaran akan lebih kecil karena arus dari sumber akan dibagi kearah dua rangkaian paralel dan salah satu rangkaian mengalami pergeseran fasa sebesar 180° [8]. *Pulse Width Modulation (PWM)* digunakan sebagai pemuncian *Bidirectional DC-DC Converter* untuk menentukan arah aliran daya[9].

Berdasarkan uraian diatas, maka dalam penelitian ini telah dirancang *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* dengan menggunakan dsPIC30F2020. Pembangkitan sinyal PWM menggunakan dsPIC30F2020 lebih mudah dan ringkas karena pembangkitan sinyalnya dilakukan melalui senarai program. Selain itu, dsPIC30F2020 memiliki kemampuan *Digital Sinyal Processing* yang mampu memproses data secara cepat dan mempunyai lebar data 16 bit dan memiliki fitur *phase shift* untuk melakukan pergeseran fasa[10]. Sinyal *carrier* dirancang pada 20 kHz. *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* yang dirancang diharapkan mampu menghasilkan riak arus keluaran yang lebih kecil.

2. Metode

2.1. Perancangan Rangkaian Suplai Driver

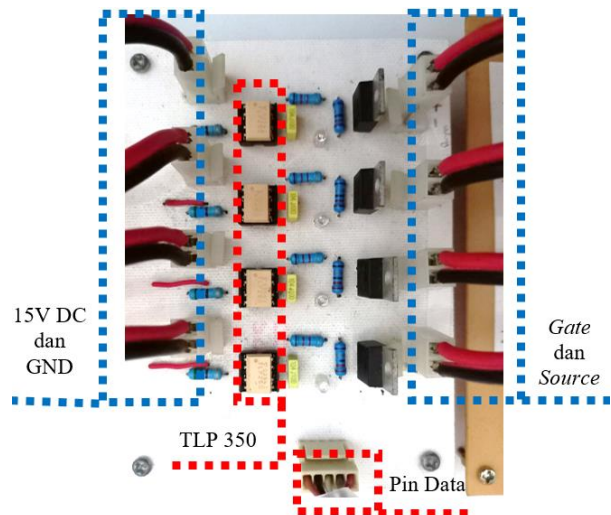
Rangkaian suplai pada penelitian ini berupa rangkaian suplai untuk *driver IGBT*. Rangkaian suplai tersebut bersumber dari baterai aki 6 V_{DC} 4Ah yang kemudian nilai tegangannya dinaikkan menggunakan modul penaik tegangan DC (*step-up converter*). Sumber tegangan dari baterai aki 6 V_{DC} akan dinaikkan *level* tegangannya menggunakan modul penaik tegangan DC menjadi 15 V_{DC}. Nilai tegangan tersebut akan dijadikan penguat sinyal PWM yang akan memicu pensaklaran IGBT[11]. Berikut merupakan gambar rangkaian suplai *driver*:



Gambar 1. rangkaian suplai *driver IGBT*.

2.2. Perancangan Rangkaian Driver

Rangkaian TLP 350 digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal dari mikrokontroler dengan level tegangan 5 Volt yang dibangkitkan dsPIC30F2020 menjadi level tegangan yang lebih tinggi dengan sistem ground terpisah (level tegangan 15 V) dan cukup untuk memicu IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) sebagai *driver*. Guna memicu satu IGBT dalam satu *leg Bidirectional Converter* diperlukan satu buah TLP350, sehingga pada penelitian ini dibutuhkan empat buah TLP350 secara keseluruhan. Rangkaian *driver IGBT* TLP350 ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian *driver* TLP350.

2.3. Perancangan Rangkaian Daya

Rangkaian daya yang digunakan pada ini adalah konverter DC-DC topologi *two phase interleaved*. Rangkaian ini digunakan untuk mengatur arah aliran daya[12]. Spesifikasi rangkaian *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Spesifikasi Rangkaian Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter.

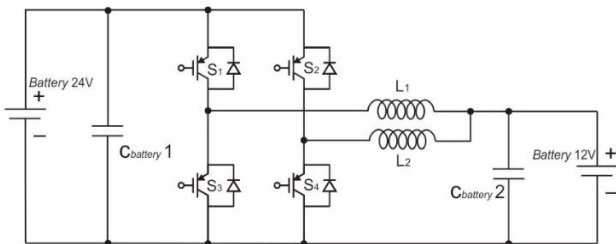
Spesifikasi	Nilai
Tegangan Masukan (Baterai)	24 V
Kapasitas Baterai	3,5 Ah
Tegangan Keluaran (Baterai)	12 V
Kapasitas Baterai	42 Ah
Frekuensi	20 kHz
Duty Cycle (D)	10% - 80%
Switch	IGBT IRG4PC50UD
Driver IGBT	TLP350
Dioda	U1560
Frekuensi Switching (fs)	20 kHz
Beban (R)	100 Ω

Terdapat 5 komponen penting pada rangkaian *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter*, yaitu *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), dioda[13], induktor, kapasitor, dan baterai. Komponen penyusun *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

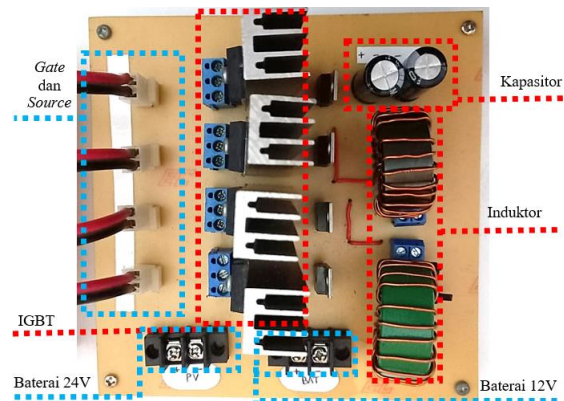
Tabel 2. Komponen penyusun Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter

Komponen	Tipe/Nilai
IGBT	IRG4PC50UD
Dioda	MUR1560
Induktor	5,4 mH
Kapasitor	1000 μ F/50V
Baterai	12V/42Ah dan 24V/3,5Ah

Rangkaian daya dari *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* menggunakan baterai 24V sebagai tegangan sisi tinggi dan baterai 12V sebagai tegangan sisi rendah seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3[14].



Gambar 3. Rangkaian daya.



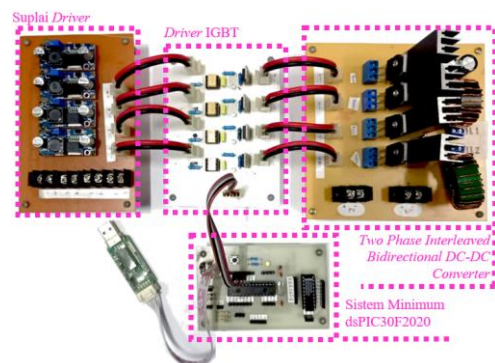
Gambar 4. Realisasi rangkaian daya.

2.4. Sistem Minimum dsPIC30F2020

Mikrokontroler DSPI30F4011 digunakan sebagai rangkaian kontrol pada penelitian ini. Mikrokontroler dsPIC30F2020 berfungsi untuk menghasilkan gelombang pemicuan PWM dengan pergeseran fasa sebesar 180° dengan menggunakan mode *multi-phase*. Mikrokontroler dsPIC30F2020 diprogram untuk bekerja pada frekuensi sebesar 20 kHz. Pin PWM1H dan pin PWM2H pada mikrokontroler dsPIC30F2020 digunakan sebagai pin keluaran PWM untuk mode *buck*, sedangkan Pin PWM1L dan pin PWM2L digunakan sebagai pin keluaran PWM untuk mode *boost* yang merupakan *complementary* dari pin PWM1H dan pin PWM2H. Pin PWM2H dan pin PWM2L mengalami pergeseran fasa sebesar 180°.

2.5. Perancangan Rangkaian Keseluruhan

Rangkaian sistem secara keseluruhan dari konverter arus searah tipe *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* terdiri dari beberapa blok utama, yaitu blok suplai *driver IGBT*, blok rangkaian daya yang merupakan *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter*, serta blok rangkaian kontrol yang terdiri dari mikrokontroler 16-bit dsPIC30F2020 dan *driver IGBT* TLP 350 yang ditunjukkan pada Gambar 5.

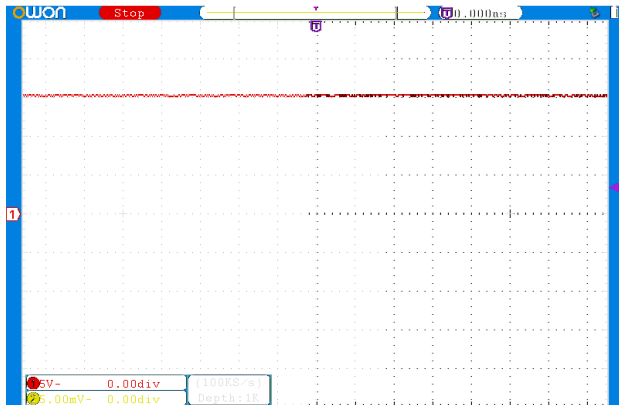


Gambar 5. Realisasi rangkaian keseluruhan.

3. Hasil dan Analisis

3.1. Pengujian Rangkaian Suplai

Pengujian rangkaian suplai *driver* IGBT bertujuan untuk mengetahui gelombang dan nilai tegangan keluaran rangkaian suplai. Pengujian dilakukan pada pin keluaran modul penaik tegangan DC yang dihubungkan ke *probe* osiloskop untuk menampilkan gelombang tegangan keluaran. Hasil pengujian rangkaian suplai *driver* IGBT dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Gelombang tegangan keluaran rangkaian suplai *driver* IGBT.

Gambar 5. merupakan gelombang tegangan keluaran rangkaian suplai *driver* IGBT. Nilai tegangan keluaran dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V = \text{jumlah div} \times V/\text{div} \quad (4.1)$$

$$V = 3 \times 5$$

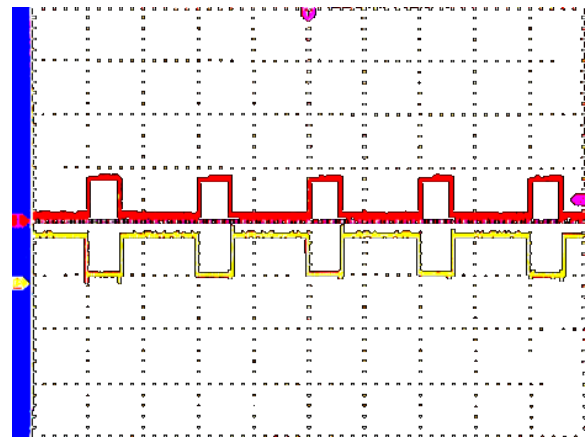
$$V = 15 \text{ V}$$

3.2. Pengujian Rangkaian Pembangkit PWM

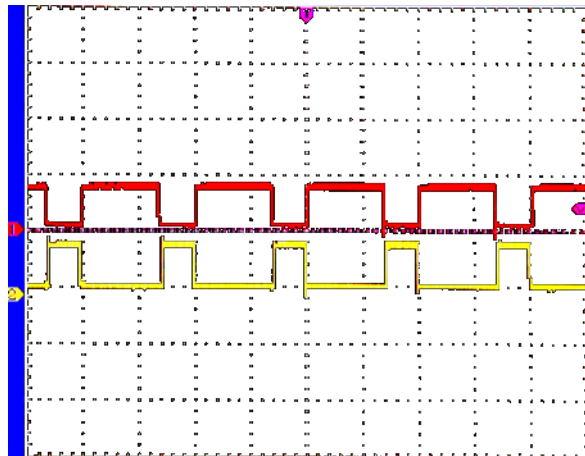
Pengujian rangkaian pembangkit PWM terdiri dari 2 bagian pengujian, yaitu pengujian mode *complementary* dan pengujian *two phase interleaved*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik *output* sinyal PWM hasil pemrograman yang telah dirancang dengan frekuensi sinyal *carrier* 20 kHz.

3.2.1. Pengujian Complementary Mode

Pengujian dilakukan pada pin *output* PWM dsPIC30F2020, yaitu pin RE1 untuk *output* PWM1H, pin RE0 untuk *output* PWM1L dan pin Vss sebagai referensi. Hasil gelombang *output* sinyal PWM dsPIC30F2020 dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 6. Gelombang keluaran PWMH dan PWML 30%.

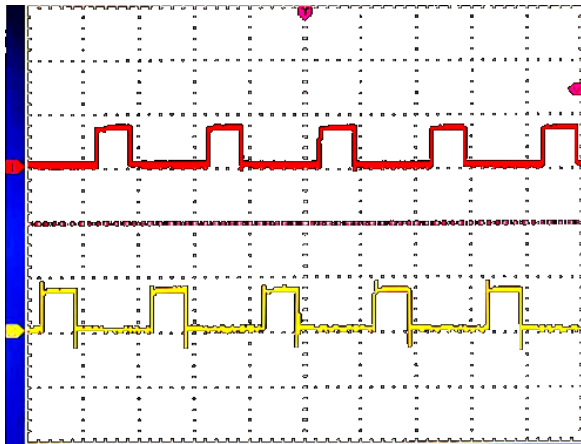


Gambar 7. Gelombang keluaran PWMH dan PWML 70%.

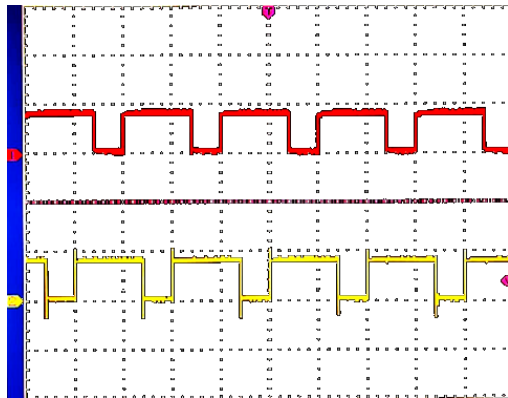
Gambar 6. dan Gambar 7. menunjukkan perbedaan gelombang keluaran PWM1H dan PWM1L yang ditampilkan di osiloskop. PWML merupakan *complementary* dari PWMH sehingga saat PWMH bernilai *high*, PWML akan bernilai *low* dan saat PWMH bernilai *low*, PWML akan bernilai *high*.

3.2.2. Pengujian Phase Shift

Pengujian dilakukan pada pin *output* PWM dsPIC30F2020, yaitu pin RE1 untuk *output* PWM1H, pin RE3 untuk *output* PWM2H dan pin VDD sebagai referensi. Hasil gelombang *output* sinyal PWM dsPIC30F2020 dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 8. Gelombang keluaran PWM 30%.

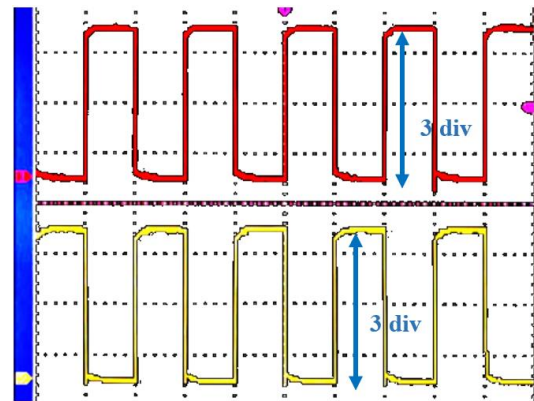


Gambar 9. Gelombang keluaran PWM 70%.

Gambar 8. dan Gambar 9. menunjukkan perbedaan gelombang keluaran PWM1H dan PWM2H yang ditampilkan di osiloskop. PWM2H mengalami pergeseran fasa sebesar 180° dibanding PWM1H dengan tujuan agar saat dihubungkan dengan rangkaian daya, arus salah satu induktor akan bergeser sehingga menghasilkan riak arus keluaran yang lebih kecil.

3.3. Pengujian Rangkaian Driver

Pengujian dilakukan guna memastikan rangkaian Driver IGBT TLP350 mendapat *supply* yang diinginkan dari mikrokontroler dsPIC30F2020. Pengamatan gelombang keluaran dilakukan pada pin 6 TLP350 dengan $V/div = 5$ V, $T/div = 25.0$ us dan faktor pengali *probe* osiloskop 1x. Gelombang keluaran driver IGBT TLP350 yang mendapat *supply* sinyal PWM dari mikrokontroler dsPIC30F2020 melalui *channel* PWM1H pin RE1 dan PWM2H pin RE3 ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Gelombang keluaran driver TLP350 dengan *duty cycle* 50%.

Gambar 10. menunjukkan keluaran driver IGBT TLP350 membentuk pola yang sama dengan pola sinyal pemucuan PWM yang dibangkitkan oleh mikrokontroler, namun dengan nilai *magnitude* tegangan yang lebih besar. Keluaran TLP350 memiliki 3 div dalam skala $V/div = 5$ V/div, sehingga diperoleh tegangan keluaran driver IGBT adalah sebagai berikut.

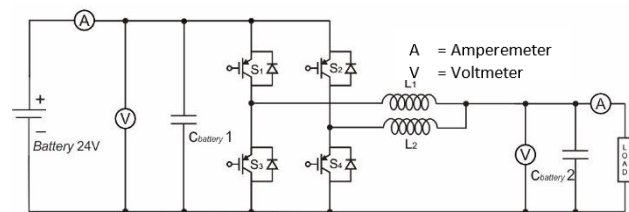
$$V_{MOSFET\ Driver} = 3 \times 5\ V/div \times 1$$

$$V_{MOSFET\ Driver} = 15\ Volt$$

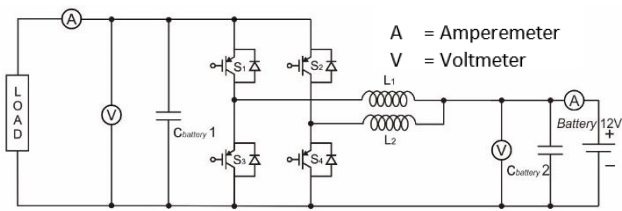
Tegangan keluaran driver IGBT yang dihasilkan sudah cukup untuk memicu IGBT IRG4PC50UD yang berdasarkan *datasheet* memerlukan tegangan pemucuan (V_{GS}) 15V – 25V.

3.4. Pengujian Rangkaian Daya

Pengujian rangkaian daya bertujuan untuk mengetahui kinerja *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan mengukur nilai tegangan masukan, arus masukan, tegangan keluaran, dan arus keluaran. Berikut merupakan gambar rangkaian pengujian mode *buck* dan mode *boost* pada *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter*.



Gambar 11. Rangkaian pengujian rangkaian daya mode *buck*.



Gambar 12. Rangkaian pengujian rangkaian daya mode *boost*.

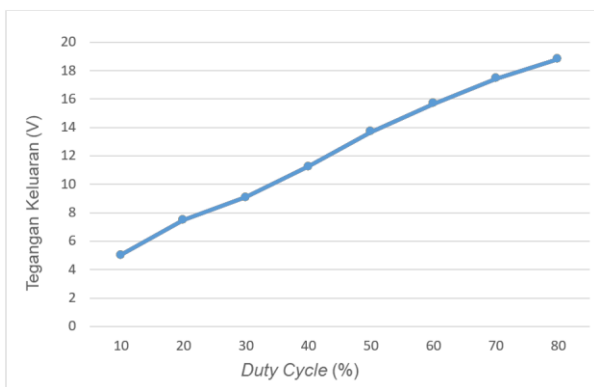
3.4.1 Pengujian Mode Buck

Pengujian mode *buck* dilakukan dengan cara memberikan sinyal PWM dari mikrokontroler dsPIC30F2020 pada IGBT S₁ dan S₂, serta menonaktifkan PWM ke IGBT S₃ dan S₄. Berikut merupakan data hasil pengujian rangkaian pada mode *buck*.

Tabel 3. Data hasil pengujian mode *buck* dengan beban 100 Ohm.

Duty Cycle (%)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Efisiensi (%)
10	24.45	0.02	5.05	0.04	41.31
20	24.44	0.03	7.48	0.06	61.21
30	24.42	0.04	9.12	0.08	74.69
40	24.38	0.06	11.29	0.1	77.18
50	24.34	0.09	13.68	0.13	81.18
60	24.31	0.11	15.67	0.16	93.76
70	24.19	0.13	17.43	0.18	99.77
80	24.13	0.16	18.83	0.2	97.54

Perbandingan variasi *duty cycle* dengan tegangan keluaran pengukuran ditunjukkan pada Gambar 13. berikut:



Gambar 13. Grafik tegangan keluaran variasi *duty cycle* mode *buck*.

Pada Gambar 13. ditunjukkan grafik hubungan *duty cycle* dengan tegangan keluaran dari hasil pengukuran. Pengaruh *duty cycle* pada tegangan keluaran berbanding lurus, artinya ketika dilakukan penambahan nilai *duty cycle*, maka tegangan keluaran *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* mode *buck* juga meningkat. Pada mode *buck* nilai tegangan keluaran akan selalu lebih kecil dibandingkan dengan tegangan masukan.

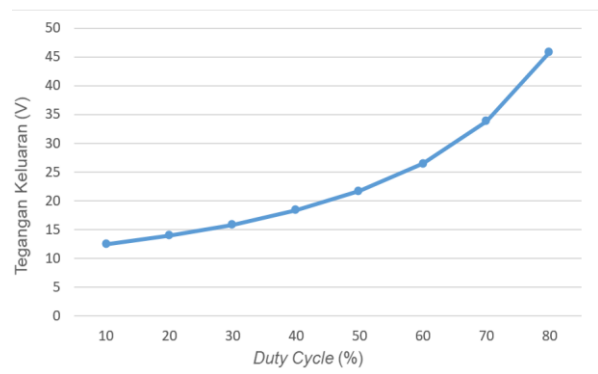
3.4.2 Pengujian Mode Boost

Pengujian mode *boost* dilakukan dengan cara memberikan sinyal PWM dari mikrokontroler dsPIC30F2020 pada IGBT S₃ dan S₄, serta menonaktifkan PWM ke IGBT S₁ dan S₂. Berikut merupakan data hasil pengujian rangkaian pada mode *boost*.

Tabel 4. Data hasil pengujian mode *boost* dengan beban 100 Ohm.

Duty Cycle (%)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Efisiensi (%)
10	11.94	0.17	12.46	0.13	79.80
20	11.92	0.21	13.97	0.15	83.71
30	11.88	0.26	15.88	0.17	87.40
40	11.82	0.35	18.37	0.2	88.81
50	11.76	0.48	21.74	0.24	92.43
60	11.65	0.74	26.57	0.3	92.46
70	11.45	1.24	33.85	0.36	85.83
80	11.08	2.45	45.85	0.48	81.07

Perbandingan variasi *duty cycle* dengan tegangan keluaran pengukuran ditunjukkan pada Gambar 14. berikut:



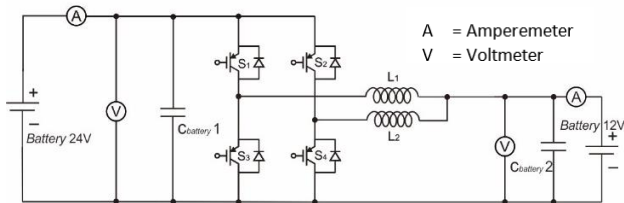
Gambar 14. Grafik tegangan keluaran variasi *duty cycle* mode *boost*.

Pada Gambar 14. ditunjukkan grafik hubungan *duty cycle* dengan tegangan keluaran dari hasil pengukuran. Pengaruh *duty cycle* pada tegangan keluaran berbanding lurus, artinya ketika dilakukan penambahan nilai *duty cycle*, maka tegangan keluaran *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* mode *boost* juga meningkat. Pada mode *boost* hasil tegangan keluaran bergantung pada $gain \frac{1}{1-D}$ menghasilkan tegangan keluaran akan selalu lebih tinggi dari pada tegangan masukan.

3.5. Pengujian Rangkaian Keseluruhan

Pengujian rangkaian keseluruhan bertujuan untuk mengetahui kinerja seluruh rangkaian dan program pada *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan mengukur nilai tegangan baterai 1 (baterai 24V), arus

baterai 1, tegangan baterai 2 (baterai 12V), arus baterai 2, arus induktor 1, arus induktor 2, serta gambar gelombang dari induktor 1 dan induktor 2. Berikut merupakan gambar rangkaian pengujian *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter*.



Gambar 15. Pengujian rangkaian keseluruhan.

Tabel 5. Data hasil pengujian rangkaian keseluruhan.

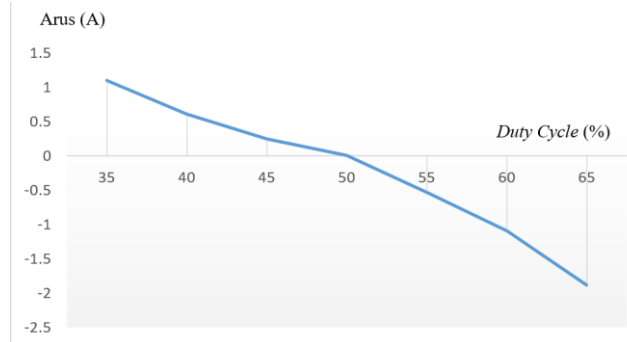
Duty Cycle (%)	V _{bat1} (V)	I _{bat1} (A)	P _{bat1} (W)	IL ₁ (A)	IL ₂ (A)	V _{bat2} (V)	I _{bat2} (A)	P _{bat2} (W)
35	26.12	1.1	28.73	-1.58	-1.52	11.58	-3.11	-36.01
40	25.43	0.61	15.51	-0.87	-0.76	11.74	-1.64	-19.25
45	24.69	0.25	6.17	-0.29	-0.23	11.94	-0.54	-6.45
50	24.22	0.01	0.24	-0.02	-0.01	12.05	-0.03	-0.36
55	23.95	-0.53	-12.69	0.49	0.46	12.15	0.95	11.54
60	23.64	-1.09	-25.77	0.97	0.94	12.35	1.92	23.71
65	23.49	-1.88	-44.16	1.77	1.71	12.58	3.48	43.78

Nilai arus bertanda negatif menunjukkan arah arus keluar dari baterai, sedangkan nilai arus yang bertanda positif menunjukkan arah masuk ke baterai. Tabel 6. menunjukkan data perbandingan *duty cycle* dengan arus pada baterai 1 dan baterai 2:

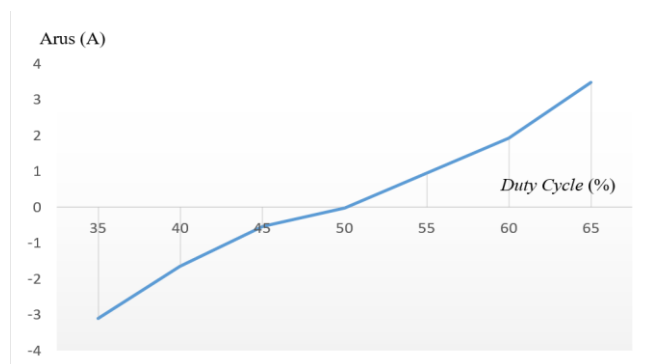
Tabel 6. Data perbandingan *duty cycle* dan arus baterai.

Duty Cycle (%)	I _{bat1} (A)	I _{bat2} (A)
35	1.1	-3.11
40	0.61	-1.64
45	0.25	-0.54
50	0.01	-0.03
55	-0.53	0.95
60	-1.09	1.92
65	-1.88	3.48

Pada Tabel 6. dapat dilihat bahwa saat nilai *duty cycle* berada dibawah 50%, maka arus pada baterai 2 mengalir menuju baterai 1 sehingga konverter berada pada mode *boost*. Sedangkan saat nilai *duty cycle* berada diatas 50%, maka arus pada baterai 1 mengalir menuju baterai 2 sehingga konverter berada pada mode *buck*. Saat nilai *duty cycle* 50%, arus memiliki nilai yang mendekati nol. Grafik perbandingan nilai *duty cycle* dan arus baterai dapat dilihat pada Gambar 16. dan Gambar 17.:



Gambar 16. Grafik Perbandingan *Duty Cycle* dengan Arus Baterai 1.



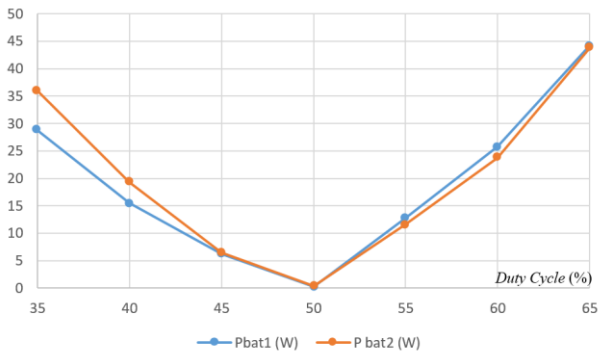
Gambar 17. Grafik Perbandingan *Duty Cycle* dengan Arus Baterai 2.

Menurut grafik pada Gambar 16. dapat dilihat bahwa semakin besar nilai *duty cycle*, maka arus pada baterai 1 akan semakin kecil, sedangkan pada Gambar 17. dapat dilihat bahwa semakin besar nilai *duty cycle*, maka arus pada baterai 2 akan semakin besar. Titik peralihan antara mode *buck* dan mode *boost* berada pada *duty cycle* 50% dengan nilai arus mendekati 0.

Tabel 7. Data perbandingan daya baterai 1 dan baterai 2.

Duty Cycle (%)	P _{bat1} (W)	P _{bat2} (W)	Efisiensi (%)
35	28.73	-36.01	79.78
40	15.51	-19.25	80.57
45	6.17	-6.45	95.66
50	0.24	-0.36	66.67
55	-12.69	11.54	90.94
60	-25.77	23.71	92.01
65	-44.16	43.78	99.14

Pada Tabel 7. dapat dilihat bahwa besar daya pada baterai 1 dan baterai 2 memiliki nilai yang hampir sama, namun besar daya yang menyuplai (daya yang bertanda negatif) sedikit lebih besar dari daya yang menyerap (daya yang bertanda positif). Perbedaan besar daya yang menyuplai dan daya yang menyerap disebabkan oleh adanya rugi-rugi saat daya mengalir melewati konverter. Grafik dari perbandingan besar daya dapat dilihat pada Gambar 18:



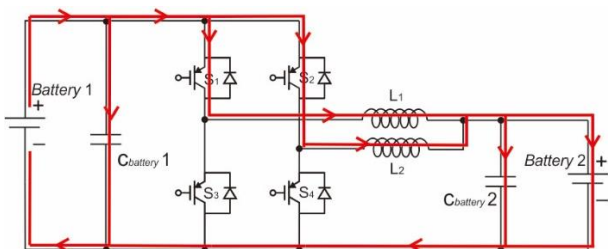
Gambar 18. Grafik perbandingan daya baterai.

Two phase interleaved bidirectional DC-DC converter terdiri dari dua modul Bidirectional buck-boost DC-DC Converter yang terhubung secara paralel. Arus dari sumber akan dibagi kearah dua modul paralel dan salah satu rangkaian mengalami pergeseran fasa sebesar 180° sehingga riak dari arus keluaran akan lebih kecil. Data perbandingan arus induktor 1, arus induktor 2, dan arus baterai 2 sebagai arus induktor total dapat dilihat pada Tabel 8. berikut:

Tabel 8. Data perbandingan arus induktor dan arus baterai.

Duty Cycle (%)	I_{L1} (A)	I_{L2} (A)	I_{bat2} (A)
35	-1.58	-1.52	-3.11
40	-0.87	-0.76	-1.64
45	-0.29	-0.23	-0.54
50	-0.02	-0.01	-0.03
55	0.49	0.46	0.95
60	0.97	0.94	1.92
65	1.77	1.71	3.48

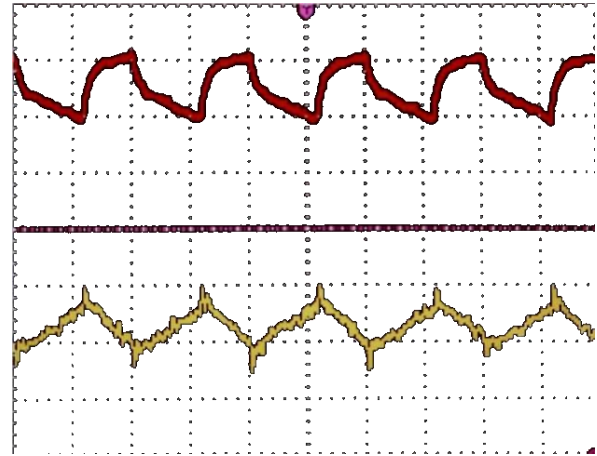
Dari Tabel 8. dapat dilihat bahwa arus pada baterai 2 merupakan akumulasi dari arus induktor 1 dan arus induktor 2. Hal ini terjadi karena pada mode *buck*, arus dari kedua induktor mengalir menuju arus baterai 2 sehingga arus pada baterai 2 merupakan penjumlahan dari arus induktor 1 dan arus induktor 2 seperti yang terlihat pada Gambar 19:



Gambar 19. Arah aliran daya pada mode *buck*. [15]

Bentuk gelombang arus induktor dapat dilihat pada osiloskop dengan menggunakan *probe* arus. Berikut merupakan gambar gelombang arus induktor 1 dan arus

induktor 2 yang di tampilkan oleh osiloskop dengan $V/div = 20$ mV, $T/div = 25.0$ us dan faktor pengali *probe* osiloskop 10x.:



Gambar 20. Arus L_1 dan L_2 pada mode *buck* dengan *duty cycle* 60%.

Berdasarkan Gambar 20. dapat dilihat bahwa bentuk gelombang dari arus induktor 1 dan arus induktor 2 tidak mengalami kenaikan dan penurunan secara bersamaan. Hal ini disebabkan oleh adanya pergeseran fasa sebesar 180° pada daya yang mengalir menuju induktor 2. Pada *duty cycle* 60%, riak arus induktor 1 dan induktor 2 dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I_{pp} = \text{jumlah div} \times V/div \times \text{faktor pengali probe} \quad (4.2)$$

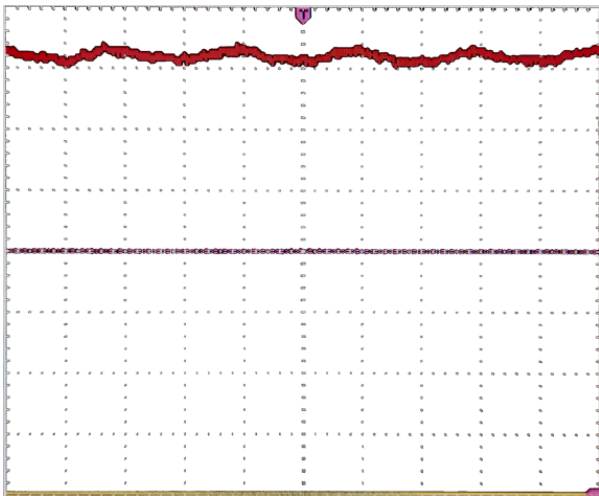
$$I_{pp} = 1,4 \times 0,02 \times 10$$

$$I_{pp} = 0,28 \text{ A}$$

Dimana:

$$I_{pp} = \text{Arus induktor dari puncak ke puncak}$$

Perbedaan waktu kenaikan dan penurunan dari kedua arus induktor yang dirangkai paralel menyebabkan riak dari arus induktor total mengalami pengurangan sehingga tampak semakin halus. Bentuk gelombang dari arus induktor total dapat dilihat melalui osiloskop dengan menggunakan *probe* arus pada Gambar 21:



Gambar 21. Arus L total pada mode *buck* dengan *duty cycle* 60%.

Berdasarkan Gambar 21. dapat dilihat bahwa bentuk gelombang dari arus induktor total memiliki riak yang lebih kecil dibanding arus induktor 1 maupun arus induktor 2. Riak arus induktor total dapat dihitung menggunakan persamaan (4.3):

$$I_{ppT} = \text{jumlah } div \times V/div \times \text{faktor pengali} \quad (4.3)$$

$$I_{ppT} = 0,3 \times 0,02 \times 10$$

$$I_{ppT} = 0,06 \text{ A}$$

Dimana:

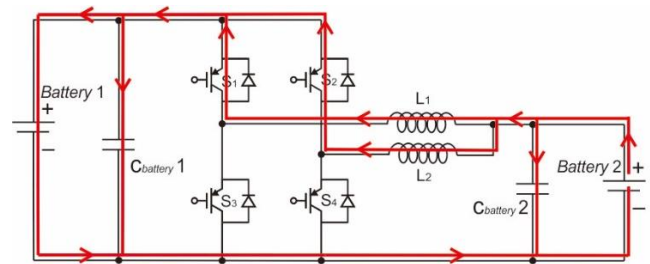
$$I_{ppT} = \text{Arus induktor total dari puncak ke puncak}$$

Sehingga persentase besar riak induktor total dibanding dengan riak arus induktor 1 maupun induktor 2 dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \% I_{ppT} &= \frac{I_{ppT}}{I_{pp}} \quad (4.4) \\ &= \frac{0,06}{0,28} \times 100\% \\ &= 21,42\% \end{aligned}$$

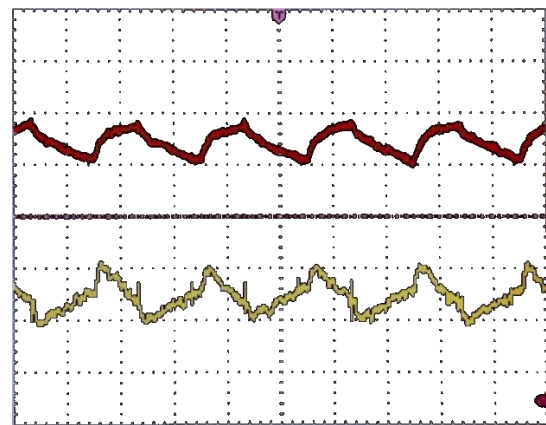
Menurut persamaan diatas dapat dilihat bahwa besar riak arus keluaran adalah 21,42% dari riak arus yang mengalir di induktor 1 maupun induktor 2. Hal ini diperoleh karena arus yang melalui induktor 1 dan induktor 2 dihubungkan secara paralel sehingga akumulasi dari arus yang masuk melalui kedua induktor sama dengan arus total yang masuk ke baterai 2.

Sedangkan pada mode *boost*, arus dari baterai 2 mengalir menuju kedua induktor sehingga arus pada baterai 2 dibagi kearah dua rangkaian paralel induktor 1 dan induktor 2 seperti yang terlihat pada Gambar 22:



Gambar 22. Arah aliran daya pada mode *boost*. [15]

Bentuk gelombang arus induktor dapat dilihat pada osiloskop dengan menggunakan *probe* arus. Berikut merupakan gambar gelombang arus induktor 1 dan arus induktor 2 yang di tampilkan oleh osiloskop dengan $V/div = 20 \text{ mV}$, $T/div = 25,0 \text{ us}$ dan faktor pengali *probe* osiloskop 10x.:



Gambar 23. Arus L_1 dan L_2 pada mode *boost* dengan *duty cycle* 40%.

Berdasarkan Gambar 23. dapat dilihat bahwa bentuk gelombang dari arus induktor 1 dan arus induktor 2 tidak mengalami kenaikan dan penurunan secara bersamaan. Hal ini disebabkan oleh adanya pergeseran fasa sebesar 180° pada daya yang mengalir menuju induktor 2. Pada *duty cycle* 40%, riak arus induktor 1 dan induktor 2 dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

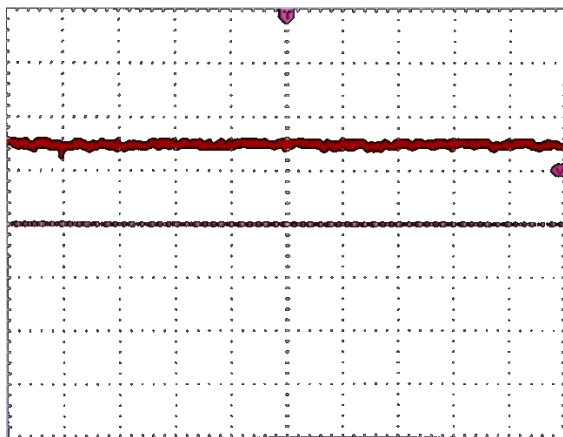
$$I_{pp} = 0,9 \text{ div} \times 0,02/div \times 10$$

$$I_{pp} = 0,18 \text{ A}$$

Dimana:

$$I_{pp} = \text{Arus induktor dari puncak ke puncak}$$

Bentuk gelombang dari arus induktor total dapat dilihat melalui osiloskop dengan menggunakan *probe* arus pada Gambar 4.26:



Gambar 24. Arus baterai 2 pada mode *boost* dengan *duty cycle* 40%.

Berdasarkan Gambar 24. dapat dilihat bahwa bentuk gelombang dari arus baterai 2 pada mode *boost* menyerupai arus DC ideal. Hal ini terjadi karena arus yang di ukur merupakan arus yang mengalir dari baterai 2 yang mengalir menuju rangkaian paralel induktor. Oleh karena itu, arus induktor total tidak dapat diukur saat konverter berada pada mode *boost*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi *duty cycle* menunjukkan bahwa *Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter* dapat menghasilkan riak arus keluaran yang lebih kecil yaitu sebesar 21,42% dari riak arus yang mengalir pada induktor. Hal ini terjadi karena arus pada kedua induktor tidak mengalami kenaikan maupun penurunan secara bersamaan akibat pergeseran fasa sebesar 180°.

Two Phase Interleaved Bidirectional DC-DC Converter akan berada pada mode *buck* saat nilai *duty cycle* diatas 50% dan berada pada mode *boost* saat nilai *duty cycle* dibawah 50%. Pada mode *buck*, arus dari kedua induktor mengalir menuju arus baterai 12V sehingga arus pada baterai 12V yang merupakan hasil penjumlahan dari arus induktor 1 dan arus induktor 2 dapat diamati bentuk gelombangnya sebagai arus induktor total. Pada mode *boost*, arus dari baterai 12V mengalir menuju kedua induktor sehingga arus pada baterai 12V dibagi kearah dua rangkaian paralel induktor 1 dan induktor 2, sehingga riak arus induktor total tidak dapat diamati.

Besar daya pada baterai 12V dan baterai 24V memiliki nilai yang hampir sama, namun besar daya yang menyuplai sedikit lebih besar dari daya yang menyerap. Perbedaan besar daya yang menyuplai dan daya yang menyerap disebabkan oleh adanya rugi-rugi saat daya mengalir melewati konverter.

Referensi

- [1]. _____, Statistik Indonesia 2019, Jakarta, Indonesia : Badan Pusat Statistik, 2019.
- [2]. Direktorat Jendral Ketenagalistrikan, Statistik Ketenagalistrikan 2018, edisi No. 32. Jakarta, Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2019.
- [3]. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 1st ed., John Wiley & Son Ltd, Chicester, England, 2003.
- [4]. M. A. Sofla and L. Wang, "Control of DC-DC Bidirectional Converters for Interfacing Batteries in Microgrids," pp. 1–6, 2011.
- [5]. X. I. E. Jun, Z. Xing, Z. Chongwei, and W. Chengyue, "Research on Bi-Directional DC-DC Converter For a Stand-Alone Photovoltaic Hybrid Energy Storage System," pp. 10–13, 2010.
- [6]. Y. Wang, F. Qin, and Y. Kim, "Bidirectional DC-DC Converter Design and Implementation for Lithium-ion Battery Application," *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 0–4, 2014.
- [7]. P. Sulistomo, I. Setiawan, dan M. Facta, "Implementasi Pengendalian Sistem Pengisian/Pengosongan Baterai pada Sistem *Photovoltaic Stand-Alone* menggunakan *Bidirectional Converter* dengan Metode *Proportional-Integral* berbasis Mikrokontroler DSPIC390F4011," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol.7, no.4, pp. 832-837, May. 2019.
- [8]. A. Chandekar, J. Joseph, J. Fernandes, and E. Raj, "Design and Simulation of Two Phase Interleaved Bidirectional DC to DC Converter," *Electrical Engineering Department, Fr. C Rodrigues Institute of Technology*, Mumbai, 2018.
- [9]. F. Wang, Y. Luo, H. Li, and X. Xu, "Switching Characteristics Optimization of Two-Phase Interleaved Bidirectional DC/DC for Electric Vehicles," *Energies*, January 2019.
- [10]. Microchip Technology Inc., "28/44-Pin dsPIC30F1010/202X Enhanced Flash SMPS 16-Bit Digital Signal Controller," pp. 1–128, 2014.
- [11]. P. Wibowo, "Rancang Bangun Inverter 3 Fasa dengan Insulate Gate Bipolar Transistor (IGBT) Menggunakan Mode Natural PWM berbasis Mikrokontroler AT90PWM3", Skripsi Universitas Indonesia, Juli 2010.
- [12]. L. Jiang, C. C., Li, M. Zhang, X. Zhang dan C. Yin, "A Novel Soft-Switching Bidirectional DC-DC Converter With Coupled Inductors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, pp. 2730-2740, November/December 2013.
- [13]. A. S. Sedra, K. C. Smith, "Microelectronic Circuit (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)," 2010.
- [14]. Ming-Chang Tseng, Chun-Hao Huang, "Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems
- [15]. C. M. Lai, Y. C. Lin, and D. Lee, "Study and Implementation of a Two-Phase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter for Vehicle and DC-Microgrid Systems," *National Taipei University of Technology*, Taiwan, 2015.