

**ANALISIS KENDALI TEGANGAN DAN ARUS DENGAN METODE  
*MULTI LOOP* PADA *MULTIPHASE INTERLEAVED BUCK CONVERTER*  
(MIBC)**

**Skripsi**

**Oleh**

**I Ketut Agung Astiti**

**2015031081**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

## ABSTRAK

### ANALISIS KENDALI TEGANGAN DAN ARUS DENGAN METODE *MULTI LOOP* PADA *MULTIPHASE INTERLEAVED BUCK CONVERTER* (MIBC)

Oleh

I KETUT AGUNG ASTITI

Peningkatan penggunaan kendaraan listrik menuntut adanya sistem pengisian daya baterai yang stabil. Topologi *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC) diaplikasikan karena efisiensi dayanya yang tinggi. Namun, penggunaan sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) *single loop* pada MIBC sering kali menyebabkan arus antarfasa menjadi tidak seimbang dan menghasilkan riak keluaran yang besar. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan sistem kendali PI *multi loop* untuk menyeimbangkan arus-fasa dan menekan persentase riak. Validasi performa dilakukan melalui simulasi perangkat lunak (referensi tegangan 40–900 V dan referensi arus 1-55,5 A) dan pengujian perangkat keras (referensi tegangan 40–60 V dan referensi arus 1-3 A). Hasil simulasi membuktikan metode *multi loop* mampu memperbaiki keseimbangan distribusi arus antarfasa dibandingkan metode *single loop* dengan beban yang sama. Selain itu, pada simulasi referensi 40 V, riak tegangan berhasil ditekan menjadi 0,3% dari 1,5% (*single loop*). Keberhasilan ini tervalidasi pada pengujian perangkat keras, di mana persentase riak tegangan pada referensi 40 V turun dari 32,5% menjadi 12,5%. Pada referensi arus 3 A, riak arus ditekan dari 6% menjadi 2%. Meskipun demikian, metode *multi loop* memiliki kelemahan pada respon transien, terbukti dari *recovery time* lebih lambat 0,13 detik dari metode *single loop*. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa kendali PI *multi loop* sangat efektif dalam menstabilkan arus dan meminimalkan riak keluaran pada konverter MIBC untuk aplikasi pengisian daya.

Kata kunci ; *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC), *multi loop*, *single loop*, riak, *Proportional-Integral* (PI)

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF VOLTAGE AND CURRENT CONTROL USING MULTI LOOP METHODE ON MULTIPHASE INTERLEAVED BUCK CONVERTER (MIBC)**

**By**

**I KETUT AGUNG ASTITI**

*The increasing use of electric vehicles demands a stable battery charging system. Multiphase Interleaved Buck Converter (MIBC) topology is applied due to its high power efficiency. However, the use of a single-loop Proportional-Integral (PI) control system in MIBC often causes inter-phase currents to become unbalanced and produces large output ripples. Therefore, this study applies a multi-loop PI control system to balance the phase currents and suppress the ripple percentage. Performance validation is carried out through software simulations (voltage reference 40–900 V and current reference 1–55.5 A) and hardware testing (voltage reference 40–60 V and current reference 1–3 A). The simulation results prove that the multi-loop method is able to improve the balance of inter-phase current distribution compared to the single-loop method with the same load. In addition, in the 40 V reference simulation, the voltage ripple was successfully suppressed to 0.3% from 1.5% (single loop). This success was validated in hardware testing, where the percentage of voltage ripple at a 40 V reference dropped from 32.5% to 12.5%. At a 3 A reference current, the current ripple was suppressed from 6% to 2%. However, the multi-loop method has a weakness in transient response, as evidenced by a slower recovery time of 0.13 seconds compared to the single-loop method. Overall, this study concludes that the multi-loop PI control is very effective in stabilizing the current and minimizing output ripple in MIBC converters for charging applications.*

*Keywords: Multiphase Interleaved Buck Converter (MIBC), multi-loop, single-loop, ripple, Proportional-Integral (PI)*

**ANALISIS KENDALI TEGANGAN DAN ARUS DENGAN METODE  
*MULTI LOOP PADA MULTIPHASE INTERLEAVED BUCK CONVERTER*  
(MIBC)**

**Oleh**

**I KETUT AGUNG ASTITI**

**Skripsi**

**Sebagai salah satu syarat untuk mendapat gelar**

**SARJANA TEKNIK**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

Judul Skripsi : **ANALISIS KENDALI TEGANGAN DAN ARUS DENGAN METODE *MULTI LOOP* PADA *MULTIPHASE INTERLEAVED BUCK CONVERTER (MIBC)***

Nama Mahasiswa : **I Ketut Agung Astiti**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015031081

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



**Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.**  
NIP 19730215 199903 2 003

**Nadia Julian Putri, S.T., M.T.**  
NIP 19960704 202406 2 002

## 2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

**Herlinawati, S.T., M.T.**  
NIP 19710314 199903 2 001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

**Sumadi, S.T., M.T.**  
NIP 19731104 200003 1 001

## MENGESAHKAN

### 1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.** 

Sekretaris : **Nadia Julian Putri, S.T., M.T.** 

Penguji Utama : **Ir. Noer Soedjarwanto, S.T., M.T.** 

### 2. Dekan Fakultas Teknik

  
  
**Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

NIP 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **13 April 2026**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku

Bandar Lampung, 13 April 2026



1 Ketut Agung Astiti

NPM. 2015031081

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandarlampung pada tanggal 12 Maret 2002 sebagai anak ke empat dari empat bersaudara, dari Bapak I Wayan Sukanten dan Ibu Sumartini.

Riwayat Pendidikan penulis dimulai dari, SD Sejahtera 4 pada tahun 2008 hingga 2014, SMP Fransiskus Bandarlampung pada tahun 2014 hingga 2017, SMA Fransiskus Bandarlampung pada tahun 2017 hingga 2020.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2020 melalui jalur UTBK/SBMPTN. selama menjadi mahasiswa penulis bergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) pada tahun 2021 diamanahkan dalam Departemen Kerohanian, serta menjadi anggota Divisi Penelitian dan Pengembangan. Penulis memiliki pengalaman magang di beberapa institusi. Pada tahun 2022, penulis menjalani magang di PT. Teknik Otomasi Raja Asia, Batam, yang membuat laporan berjudul “*Design Converter Base On Simulink Matlab Simulation And Design Interface For The Converter*”. Pada tahun 2023, penulis menjalani magang sekaligus kerja praktik di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Serpong, tepatnya di Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, dan membuat laporan berjudul “*Pengukuran Charging Profile Mobil Toyota BZ4X pada Charging Station PRKKE BRIN, Serpong Menggunakan Power Quality Analyzer*”. Pada tahun 2025 penulis menjalankan magang di PT. Teknik Otomasi Raja Asia, Bandung dengan membuat laporan tugas akhir dengan judul “*Analisis Kendali Tegangan dan Arus dengan Metode Multi Loop pada Multiphase Interleaved Buck Converter (MIBC)*”.

Dengan segala kerendahan hati,  
kupersembahkan karya sederhanaku ini sebagai tanda cinta, kasih, serta rasa  
terima kasihku

**Kepada Kedua Orang Tua**

**Bapak I Wayan Sukanten dan Ibu Sumartini**

yang telah membesarkan dan mendidikku dengan penuh perjuangan dan kasih  
serta selalu mendukung dan mendo'akan yang terbaik untuk keberhasilan dan  
kebahagianku

**Saudara Tersayang**

**I Wayan Tresna Raditya**

**I Made Mulyawan**

**Ni Nyoman Krisningrum**

terima kasih untuk cinta, kasih, dukungan dan semangat yang selalu diberikan  
selama ini

## **MOTTO**

“Bukan dengan pertolongan ibu, ayah, ataupun sanak keluarga; namun pikiran yang diarahkan dengan baik, yang akan membantu dan mengangkat derajat seseorang”

**(Dhammapada : 43)**

“Satu halaman jelek lebih baik daripada tidak ada halaman sama sekali”

**(Raditya Dika)**

“Belajarlah bersyukur dari hal-hal yang baik dihidupmu dan belajarlah menjadi kuat dari hal-hal yang buruk dihidupmu”

**(B.J. Habibie)**

## SANWACANA

Puji Syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Mah Esa, karena telah diberikannya kelancaran dalam penyelesaian skripsi dengan judul “Analisis Kendali Tegangan dan Arus dengan Metode *Multi Loop* pada *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC)”. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kepada kedua orang tua tercinta, mamas, kakak, dan mbak, serta seluruh keluarga besar, terima kasih atas kasih sayang yang tak ternilai, doa yang tiada henti, dan dukungan yang senantiasa mengiringi langkah saya. Tanpa cinta dan kehadiran kalian, perjalanan ini tak akan mungkin terselesaikan. Kalian adalah sumber kekuatan dan inspirasi terbesar dalam setiap langkah saya.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan dan nilai-nilai kehidupan kepada penulis dengan baik dan ramah. Serta membantu penulis mempersiapkan diri menjadi seorang sarjana teknik.
5. Ibu Nadia Julian Putri, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan nasihat, arahan, dan bimbingan rutin, motivasi, dan pandangan kehidupan kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah dalam mempersiapkan diri menjadi seorang Sarjana Teknik.
6. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.

7. Segenap Dosen dan staf di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis.
8. Sahabat sekaligus keluarga besar *The Son's of God*, yang selalu menjadi tempat berbagi cerita, memberikan dukungan, dan menenangkan hati setelah hari-hari yang penuh tantangan. Terima kasih atas setiap momen kebersamaan yang penuh kehangatan dan dorongan semangat. Kehadiran kalian selalu memberi kekuatan bagi saya untuk terus maju dan menyelesaikan perjalanan ini.
9. Ni Putu Tanti Sumerti, selaku pasangan yang selalu memberi dukungan moral dan emosional, serta membantu dalam menyelesaikan perkuliahan.
10. Rekan-rekan HELIOS 2020 dan HIMATRO Unila, terima kasih telah memberikan banyak bantuan dan motivasi serta sudah menjadi keluarga selama awal kuliah sampai saat ini.
11. Segenap keluarga besar dari TORASIA, Pak Rejeki, Bu Rika, Kak Rio, Alfin, Panji, Andri, Aziz, Akmal, Hanan, Aldy, Aqil, dan Nabil yang telah membantu dalam proses penulis dari awal sampai menyelesaikan skripsi.
12. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik, terima kasih atas semangat dan kebersamaannya selama menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Elektro.
13. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi yang tidak bisa disebutkan satu per satu penulis ucapkan terimakasih atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 13 April 2026



I Ketut Agung Astiti

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>viii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian .....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
1.6. Hipotesis Penelitian.....	4
1.7. Sistematika Penulisan.....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Penelitian Terdahulu .....	6
2.2. Konverter <i>buck</i> .....	7
2.2.1 Prinsip Kerja <i>Asynchronous</i> Konverter <i>buck</i> .....	8
2.2.2 Prinsip Kerja <i>Synchronous</i> Konverter <i>buck</i> .....	9
2.2.3 Analisa Rangkaian Konverter <i>buck</i> .....	12
2.3. DC-DC <i>Multiphase Interleaved Buck Converter</i> (MIBC).....	13
2.4. Perhitungan Induktor dan Kapasitor <i>Multiphase Interleaved Buck Converter</i> (MIBC) .....	16
2.5. Kendali <i>Multiphase Interleaved Buck Converter</i> (MIBC).....	18
2.5.1. Kendali PI.....	18
2.5.2. Sistem Kendali <i>Multi Loop</i> .....	19
2.5.3. Pengaturan Kendali PI.....	21

<b>III.</b>	<b>METODE PENELITIAN.....</b>	<b>25</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	25
3.2	Alat dan Bahan.....	26
3.3	Perancangan Model MIBC.....	26
3.4	Diagram Blok Penelitian.....	27
3.5	Spesifikasi Alat .....	29
3.5.1	Perhitungan Induktor.....	29
3.5.2	Perhitungan Kapasitor.....	30
3.6	Parameter Kendali PI .....	32
3.7	Perancangan Simulasi Menggunakan Perangkat Lunak QSpice .....	33
3.8	Pengujian Perangkat Keras .....	33
3.8.1.	Perancangan Penyearah.....	34
3.8.2.	Keluaran PWM pada Mikrokontroler .....	34
3.8.3.	Keluaran PWM pada <i>gate driver</i> dan IGBT .....	35
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>36</b>
4.1	Pengujian Simulasi QSpice.....	37
4.1.1	Pengujian Pergeseran Fase untuk Setiap Fase PWM.....	39
4.1.2	Pengujian <i>Close Loop</i> pada Rangkaian MIBC.....	41
4.2	Pengujian Perangkat Keras .....	61
4.2.1	Pengujian Keluaran PWM.....	61
4.2.2	Pengujian Keluaran Penyearah 1 Fase .....	66
4.2.3	Pengujian <i>Closed Loop</i> Rangkaian MIBC .....	67
4.3	Perbandingan Metode <i>Multi Loop</i> dengan <i>Single Loop</i> pada Pengujian Simulasi dan Perangkat Keras .....	80
4.3.1.	Perbandingan dengan Pengujian Simulasi dan Perangkat Keras ..	80
<b>V.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>83</b>

5.1	Kesimpulan .....	83
5.2	Saran.....	84
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>86</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) Rangkaian <i>Asynchronous</i> Konverter <i>buck</i> (b) Rangkaian <i>Synchronous</i> Konverter <i>buck</i> .....	8
Gambar 2.2	Rangkaian <i>Asynchronous</i> Konverter <i>buck</i> Kondisi saklar non-aktif	8
Gambar 2.3	Rangkaian <i>Asynchronous</i> Konverter <i>buck</i> Kondisi saklar aktif.....	9
Gambar 2.4	<i>Synchronous</i> konverter <i>buck</i> .....	10
Gambar 2.5	Pulsa PWM dengan <i>dead-time</i> .....	11
Gambar 2.6	(a) Arus induktor; (b) Arus saklar ; (c) arus induktor ; (d) tegangan induktor; (e) arus kapasitor; (f) riak tegangan kapasitor; (g) arus keluaran; (h) tegangan dioda; (i) sinyal pulsa .....	12
Gambar 2.7	(a) 2 fase <i>Multiphase Interleaved Buck Converter</i> (MIBC) (b) 3 fase <i>Multiphase Interleaved Buck Converter</i> (MIBC).....	14
Gambar 2.8	Pergeseran fase pada 4 leg <i>Interleaved</i> Konverter <i>buck</i> .....	15
Gambar 2.9	(a) Arus induktor pada <i>single phase</i> konverter <i>buck</i> (b) Arus induktor pada 2 leg <i>multiphase</i> konverter <i>buck</i> .....	16
Gambar 2.10	<i>Multi loop</i> kendali PI.....	19
Gambar 2.11	<i>outer voltage loop</i> dan <i>inner current loop</i> .....	20
Gambar 3.1	Skematik MIBC 2 fase .....	27
Gambar 3.2	Close Loop Kendali MIBC .....	27
Gambar 3.3	Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 3.4	Desain Penyearah 1 fase.....	34
Gambar 3.5	Pengujian Keluaran PWM pada Mikrokontroler .....	35
Gambar 3.6	Pengujian keluaran PWM pada gate driver.....	35
Gambar 4.1	Rangkaian simulasi 2 fase MIBC.....	38
Gambar 4.2	Sinyal pembawa (carrier) yang telah digeser 180°.....	39
Gambar 4.3	Pergeseran fase PWM .....	40
Gambar 4.4	dead time PWMH dengan PWML .....	41
Gambar 4.5	Referensi yang masuk ke kendali PI .....	42
Gambar 4.6	Hasil Simulasi CV dengan Metode Single loop Tegangan Keluaran 900 V dan Daya 50 kW (a) Gelombang Arus Induktor, Arus Keluaran, Tegangan Keluaran (b) Tegangan Jatuh Saat Beban Berubah (c)	

Tegangan dan Arus Puncak ke Puncak Pada Induktor dan Tegangan Keluaran.....	43
Gambar 4. 7 Hasil Simulasi CV dengan Metode Multi Loop Tegangan Keluaran 900 V dan Daya 50 kW (a) Gelombang Arus Induktor, Arus Keluaran, Tegangan Keluaran (b) Tegangan Jatuh Saat Beban Berubah (c) Tegangan dan Arus Puncak ke Puncak Pada Induktor dan Tegangan Keluaran.....	46
Gambar 4.8 Perbandingan riak tegangan keluaran dengan referensi tegangan dari metode multi loop dan single loop pada mode CV.....	49
Gambar 4.9 Perbandingan arus puncak puncak pada induktor dengan referensi tegangan dari metode multi loop dan single loop pada mode CV ...	50
Gambar 4.10 Perbandingan tegangan jatuh saat terjadi perubahan beban dari metode multi loop dan single loop pada mode CV.....	51
Gambar 4. 11 Perbandingan waktu pemulihan saat terjadi perubahan beban dari metode multi loop dan single loop pada mode CV.....	51
Gambar 4.12 Hasil Simulasi CC dengan Metode Single loop Arus Keluaran 55,5 A dan Daya 50 kW (a) Gelombang Arus Induktor, Arus Keluaran, Tegangan Keluaran (b) Tegangan Jatuh Saat Beban Berubah (c) Arus Puncak ke Puncak Pada Induktor dan Arus Keluaran .....	53
Gambar 4.13 Hasil Simulasi CC dengan Metode Multi Loop Arus Keluaran 55,5 A dan Daya 50 kW (a) Gelombang Arus Induktor, Arus Keluaran, Tegangan Keluaran (b) Tegangan Jatuh Saat Beban Berubah (c) Tegangan dan Arus Puncak ke Puncak Pada Induktor dan Tegangan Keluaran.....	55
Gambar 4.14 Perbandingan riak arus keluaran dengan referensi arus dari metode multi loop dan single loop pada mode CC.....	58
Gambar 4.15 Perbandingan arus puncak puncak pada induktor dengan referensi arus dari metode <i>multi loop</i> dan <i>single loop</i> pada mode CC .....	59
Gambar 4.16 Perbandingan tegangan jatuh saat terjadi perubahan beban dari metode multi loop dan single loop pada mode CC.....	60
Gambar 4. 17 Perbandingan waktu pemulihan saat terjadi perubahan beban dari metode multi loop dan single loop pada mode CC.....	61

Gambar 4. 18 (a) set up pengujian keluaran PWM pada Launchpad dan kontroler board (b) Keluaran PWM dari Launchpad (c) Keluaran PWM dari kontroler board.....	63
Gambar 4. 19 Pergeseran fase antara PWM 1 dengan PWM 2 .....	64
Gambar 4. 20 <i>Dead time</i> antara PWM H dengan PWM L.....	65
Gambar 4. 21 (a) Set up pengujian keluaran PWM pada gate driver (b) Keluaran PWM pada gate driver .....	66
Gambar 4. 22 (a) Penyearah 1 fase (b) keluaran penyearah 1 fase .....	67
Gambar 4. 23 (a) Rangkaian Pengujian MIBC (b) Beban dengan resistansi 21,3 $\Omega$ .....	69
Gambar 4.24 <i>Constant Voltage</i> (CV) dengan referensi 40V .....	70
Gambar 4. 25 <i>Constant Voltage</i> (CV) dengan referensi 50 V .....	70
Gambar 4. 26 <i>Constant Voltage</i> (CV) dengan referensi 60 V .....	71
Gambar 4.27 <i>Constant Voltage</i> (CV) dengan referensi 40 V .....	72
Gambar 4.28 <i>Constant Voltage</i> (CV) dengan referensi 50 V .....	72
Gambar 4.29 <i>Constant Voltage</i> (CV) dengan referensi 60 V .....	73
Gambar 4.30 Perbandingan riak tegangan keluaran dengan referensi tegangan dari metode <i>multi loop</i> dan <i>single loop</i> pada mode <i>Constant Voltage</i> (CV) .....	75
Gambar 4.31 <i>Constant Current</i> (CC) dengan referensi 1 A.....	75
Gambar 4.32 <i>Constant Current</i> (CC) dengan referensi 2 A.....	75
Gambar 4.33 <i>Constant Current</i> (CC) dengan referensi 3 A.....	76
Gambar 4.34 <i>Constant Current</i> (CC) dengan referensi 1 A.....	77
Gambar 4.35 <i>Constant Current</i> (CC) dengan referensi 2 A.....	77
Gambar 4.36 <i>Constant Current</i> (CC) dengan referensi 3 A.....	77
Gambar 4. 37 Perbandingan riak arus keluaran dengan referensi arus dari metode <i>multi loop</i> dan <i>single loop</i> pada mode <i>constant current</i> (CC).....	79
Gambar 4. 38 Perbandingan riak tegangan keluaran dengan referensi tegangan dari metode <i>multi loop</i> dan <i>single loop</i> pada mode <i>Constant Voltage</i> (CV) .....	82
Gambar 4. 39 Perbandingan riak arus keluaran dengan referensi arus dari metode <i>multi loop</i> dan <i>single loop</i> pada mode <i>constant current</i> (CC).....	82

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Kendali PI.....	19
Tabel 3 .1 Jadwal Penelitian.....	25
Tabel 3. 2 Spesifikasi Desain <i>Multiphase Interleaved Buck Converter 2 Fase</i> ....	31
Tabel 3. 3 Spesifikasi Pengujian Perangkat Keras.....	32
Tabel 4.1 Paramater Pengujian .....	36
Tabel 4.2 Parameter PI.....	41
Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Closed Loop dengan Mode CV Simulasi QSpice dengan Metode Single Loop.....	45
Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Closed Loop dengan Mode CV Simulasi QSpice dengan Metode Multi Loop .....	47
Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian Closed Loop dengan Mode CC Simulasi QSpice dengan Metode Single Loop.....	53
Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Closed Loop dengan Mode CC Simulasi QSpice dengan Metode Multi Loop .....	56
Tabel 4. 7 Spesifikasi Pengujian Perangkat Keras.....	67
Tabel 4 . 8 Parameter PI Perangkat Keras.....	68
Tabel 4.9 Data Hasil Pengujian Perangkat Keras <i>Closed Loop</i> dengan Mode <i>Constant Voltage (CV)</i> dengan Kendali <i>Single Loop</i> .....	71
Tabel 4.10 Data Hasil Pengujian Perangkat Keras Closed Loop dengan Mode Constant Voltage (CV) dengan Kendali Multi Loop.....	73
Tabel 4.11 Data Hasil Pengujian Perangkat Keras Closed Loop dengan Mode Constant Current (CC) dengan Kendali Single Loop.....	76
Tabel 4.12 Data Hasil Pengujian Perangkat Keras Closed Loop dengan Mode Constant Current (CC) dengan Kendali Multi Loop .....	78

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi konversi daya listrik semakin pesat seiring meningkatnya kebutuhan energi pada sistem elektronik modern, kendaraan listrik, serta peralatan industri. Salah satu komponen penting dalam sistem konversi energi adalah konverter DC-DC, yaitu rangkaian yang berfungsi untuk mengubah tegangan DC dari satu level ke level lainnya. Dalam berbagai aplikasi, konverter DC-DC dituntut memiliki efisiensi tinggi, respon cepat, serta kestabilan tegangan dan arus keluaran agar dapat mendukung performa sistem secara keseluruhan [1].

Salah satu jenis konverter DC-DC yang banyak digunakan adalah konverter *buck*, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan DC ke level yang lebih rendah. Namun, pada sistem konverter *buck* konvensional (*single-phase*), terdapat beberapa kelemahan seperti tingginya riak arus dan riak tegangan, distribusi arus yang tidak merata pada komponen daya, serta keterbatasan dalam kapasitas daya yang dapat ditangani. Kondisi ini dapat menyebabkan efisiensi sistem menurun dan dapat merusak komponen dengan lebih cepat [2]. Penggunaan satu fase dalam konverter *buck* dapat menimbulkan rugi-rugi *switching* dan peningkatan stres termal pada perangkat semikonduktor, sehingga efisiensi konversi daya menjadi tidak optimal, khususnya pada sistem dengan arus tinggi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan topologi *multiphase interleaved buck converter* (MIBC). Topologi ini terdiri dari beberapa konverter *buck* yang disusun secara paralel dan dioperasikan dengan pergeseran fase antar sinyal PWM. Pendekatan *interleaving* ini memberikan keuntungan signifikan, yaitu pengurangan riak arus masukan dan tegangan keluaran, serta distribusi arus dan

panas yang lebih merata pada setiap induktor fase [3]. Pemilihan topologi ini dibanding dengan topologi lain karena memiliki keluaran arus dengan riak yang kecil karena arusnya sudah dibagi pada komponen pasif induktor di tiap-tiap fase.

Selain topologi rangkaian, sistem kendali memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga kestabilan keluaran konverter. Dua metode kendali yang umum digunakan adalah mode *Constant Current* (CC) dan mode *Constant Voltage* (CV). Pada mode CC, sistem dikendalikan agar arus keluaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban atau variasi tegangan masukan. Sementara pada CV, sistem mempertahankan tegangan keluaran agar tetap stabil ketika beban berubah. Kombinasi kedua mode kendali ini sering digunakan dalam sistem pengisian baterai atau superkapasitor. Konverter akan bekerja dalam mode CC pada tahap awal pengisian, dan beralih ke mode CV ketika tegangan baterai mencapai batas nominal.

Dalam penelitian ini menggunakan CV dan CC sebagai sistem kendali karena pada sistem elektronik modern, terutama karena maraknya kendaraan listrik saat ini, dibutuhkan pengendalian arus agar pada pengisian baterai dibutuhkan arus yang stabil agar baterai dapat diisi dengan baik. Dengan menerapkan kendali CC dan CV pada topologi MIBC, diharapkan dapat diperoleh sistem konversi daya yang efisien, stabil, serta mampu beroperasi pada beban arus tinggi dengan riak tegangan yang rendah [4].

Sistem kendali mode CC dan mode CV ini dapat dilakukan dengan sistem kendali PI. Sistem kendali PI yang biasa digunakan adalah *single loop*, tetapi pada sistem pengendalian *single loop* memiliki kekurangan jika digunakan dalam pengendalian MIBC karena memungkinkan arus antarfase memiliki arus yang tidak seimbang (*current imbalance*), sehingga dilakukan pengaplikasian metode *multi loop* yang menggunakan arus antarfase induktor sebagai umpan balik, sehingga arus antarfasenya lebih stabil, sehingga dapat menekan riak keluaran.

Penelitian ini berfokus pada perancangan perangkat keras dan simulasi sistem tersebut, yang meliputi perhitungan komponen utama seperti induktor dan kapasitor, desain sistem kendali berbasis PI yang membandingkan sistem kendali metode *single loop* dan *multi loop* untuk membandingkan perbandingan riak

keluaran dan pembagian arus antarfasa, serta analisis kinerja melalui simulasi menggunakan perangkat lunak QSpice, karena pada perangkat lunak ini menggunakan bahasa pemrograman C dalam membuat sistem kendalinya, sehingga dapat menggambarkan sistem kendali saat diimplementasikan pada perancangan perangkat keras yang akan dibuat pada penelitian ini.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem konverter DC-DC berdaya tinggi yang efisien dan andal, serta menjadi referensi bagi pengembangan sistem kendali arus dan tegangan pada aplikasi konversi energi masa depan seperti kendaraan listrik, sistem penyimpanan energi, dan sistem tenaga surya.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana cara merancang MIBC dengan riak yang rendah.
2. Bagaimana menerapkan mode *Constant Current* (CC) dan *Constant Voltage* (CV) sebagai sistem kendalinya.

## **1.3. Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Topologi yang digunakan *2 phase interleaved buck converter*.
2. Sistem kendali berbasis *closed loop* dengan pengaturan *Constant Current* (CC) dan *Constant Voltage* (CV) menggunakan kendali PI.

## **1.4. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mendesain induktor dan kapasitor, serta pembangkitan PWM pada *multiphase interleaved buck converter* (MIBC) menggunakan metode kendali PI.

2. Menerapkan dan menganalisis kendali arus di induktor *closed loop Constant Current (CC)* dan *Constant Voltage (CV)* pada *multiphase interleaved buck converter (MIBC)* menggunakan kendali PI *multi loop* dan *single loop*.
3. Menganalisis riak keluaran saat menggunakan kendali PI *multi loop* dan *single loop* dengan dua mode yaitu *Constant Current (CC)* dan *Constant Voltage (CV)*.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah

1. Memberikan pemahaman desain MIBC dengan kendali dua mode.
2. Meningkatkan efisiensi sistem konversi energi dengan pengendalian yang adaptif.

### **1.6. Hipotesis Penelitian**

Adapun hipotesis pada penelitian ini adalah implementasi sistem kendali dua mode *Constant Current (CC)* dan *Constant Voltage (CV)* berbasis kendali PI dengan *multi loop (outer voltage loop dan inner current loop)* mampu menjaga kestabilan arus dan tegangan keluaran.

### **1.7. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### **BAB I            PENDAHULUAN**

Bagian pendahuluan mencakup latar belakang dari suatu masalah yang menjadi landasan penelitian, serta penjelasan terkait tujuan dari penelitian, dan manfaat yang dapat diberikan dari penelitian, yang kemudian disusun dalam suatu sistematika penulisan memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan

penelitian, manfaat penelitian, hipotesis penelitian, dan sistematika penulisan.

**BAB II      TINJAUAN PUSTAKA**

Menyajikan beberapa teori pendukung dan kajian pustaka yang diperoleh dari berbagai sumber buku, jurnal, dan penelitian ilmiah yang digunakan untuk penulisan laporan tugas akhir ini.

**BAB III     METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang hal hal yang dilakukan dalam penelitian seperti waktu dan tempat, alat dan bahan, metode penelitian dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

**BAB IV     HASIL DAN PEMBAHASAN**

Menjelaskan hasil dan analisa yang didapatkan pada penelitian.

**BAB V      KESIMPULAN DAN SARAN**

Memuat simpulan yang diperoleh dari hasil penelitian, dan saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut.

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Penelitian Terdahulu

Adapun teori dan penelitian dari masalah terkait yang digunakan untuk menentukan topik yang diambil maka diambil referensi penelitian sebagai berikut ;

Zomorodi H, Nazari E pada penelitian yang berjudul “*Design and Simulation of Synchronous Buck Converter in Comparison with Regular Buck Converter*”[3]. Penelitian ini membandingkan performa antara *synchronous* konverter *buck* dan konverter *buck* konvensional. Fokus utama dari penelitian adalah pada peningkatan efisiensi dan pengurangan rugi-rugi *switching* dengan menggunakan IGBT sinkron pada sisi *low-side*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *synchronous buck converter* mampu mengurangi rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem, terutama pada beban tinggi. Perbandingan ini juga menunjukkan keunggulan dari sisi kestabilan tegangan keluaran dan keandalan sistem secara umum.

Usman A, Endah K dan Anisa U D pada penelitian yang berjudul “*Desain Pwm Pada Three Phase Interleaved Buck Converter Sebagai Catu Daya 10kW*”[5]. Penelitian ini membahas secara mendalam perancangan konverter *buck multiphase*, termasuk desain PWM untuk MIBC, perbandingan antara konverter *buck* konvensional dengan MIBC dalam efisiensi untuk mengurangi riak pada keluaran konverter *buck*.

Harimon M A, Ponniran A, Kasiran A N, Hamzah H H pada penelitian yang berjudul “*A Study on 3-phase Interleaved DC-DC Boost Converter Structure and Operation for Input Current Stress Reduction*” [6]. Penelitian ini memfokuskan pada analisis struktur dan operasi konverter *boost* tiga fase

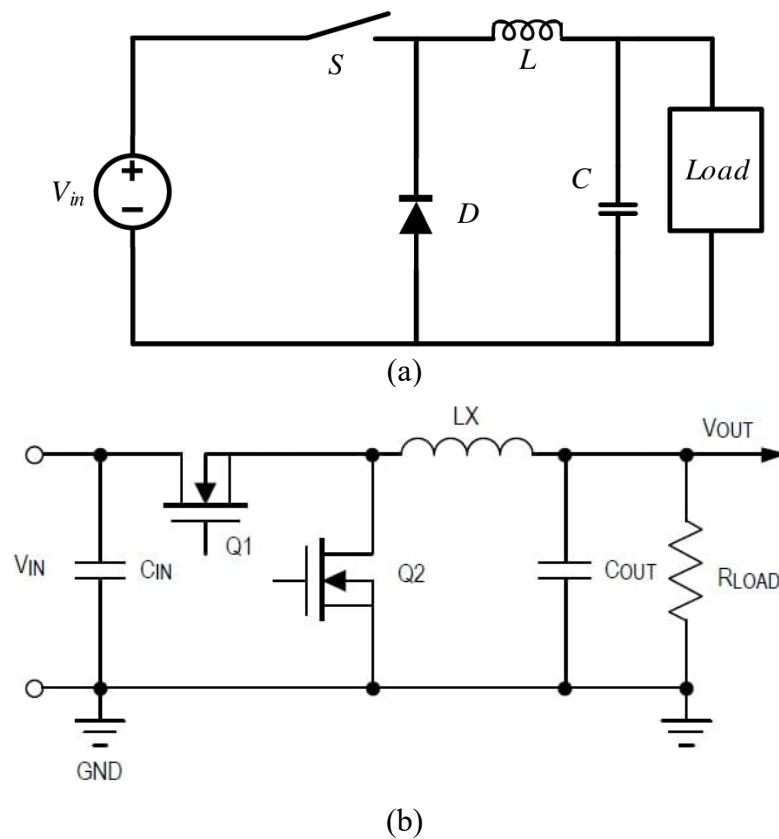
*interleaved*, dengan tujuan utama mengurangi *input current stress*. Topologi *interleaved* yang digunakan terbukti efektif dalam mengurangi riak arus masukan dan meningkatkan efisiensi sistem. Penelitian ini juga mencakup simulasi dan pengujian eksperimental yang mendukung efektivitas metode ini dalam meningkatkan kinerja konverter dibandingkan dengan metode konvensional.

## 2.2. Konverter *buck*

Konverter DC-DC merupakan konverter yang dapat menurunkan atau menaikkan tegangan masukan DC sesuai topologinya. Konverter memiliki peran penting dalam sistem tenaga terbarukan, kendaraan listrik, dan perangkat elektronik portabel, dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan memastikan kestabilan tegangan keluaran, salah satu topologi dari Konverter DC-DC adalah konverter *buck*. Konverter *buck* merupakan salah satu topologi dari Konverter DC-DC yang membuat tegangan keluaran DC menjadi lebih rendah dibandingkan tegangan masukannya [2]. Pada konverter *buck* juga memiliki 2 topologi dalam praktiknya yaitu *asynchronous* konverter *buck* dan *synchronous* konverter *buck*.

*Synchronous* konverter *buck* merupakan pengembangan dari konfigurasi *asynchronous* konverter *buck*, di mana dioda pada *asynchronous* konverter *buck* digantikan oleh sakelar semikonduktor aktif umumnya MOSFET atau IGBT. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi konduksi pada saat sakelar atas dalam keadaan non-aktif. Dioda silikon, meskipun sederhana dan andal, memiliki tegangan jatuh (*voltage drop*) khas sebesar 0,3–0,4 V, yang bersifat relatif konstan terhadap arus.

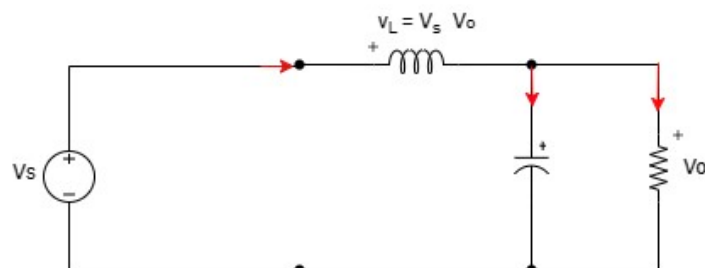
Pada saat sakelar aktif (misalnya MOSFET dengan  $R_{DSon}$  yang rendah sebesar  $\pm 50$  m $\Omega$ ) menghasilkan *voltage drop* yang proporsional terhadap arus ( $V = I \times R_{DSon}$ ), sehingga pada arus beban moderat hingga tinggi ( $< 8$  A), rugi-rugi pada konverter akan signifikan lebih rendah, yang mengakibatkan, efisiensi konversi daya meningkat, terutama saat dioperasikan dengan arus tinggi atau frekuensi *switching* menengah, meskipun dengan penambahan kompleksitas pengendalian *gate driver* dan risiko hubung singkat (*shoot-through*) yang harus diantisipasi melalui *dead-time* yang tepat [7]. Rangkaian *asynchronous* konverter *buck* dan *synchronous* konverter *buck* ditunjukkan pada gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2. 1 (a) Rangkaian *Asynchronous* Konverter *buck* (b) Rangkaian *Synchronous* Konverter *buck*[8]

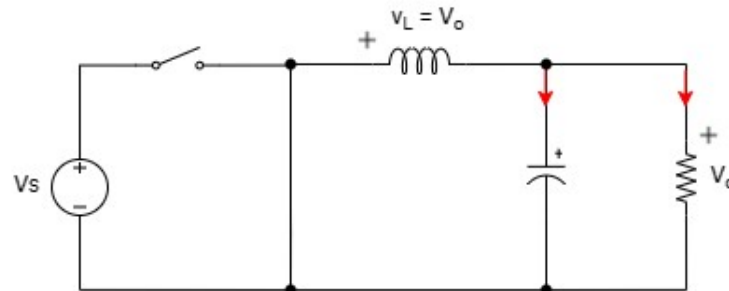
### 2.2.1 Prinsip Kerja *Asynchronous* Konverter *buck*

Prinsip kerja pada *asynchronous* konverter *buck* ada pada bagaimana proses *switching* yang terjadi pada IGBT, bagaimana proses yang terjadi pada komponen induktor serta kapasitor. Ketika saklar tertutup, dioda dalam keadaan *reverse bias* sehingga sinyal masukan menuju induktor dan terjadi penyimpanan energi, rangkaian konverter *buck* pada saat kondisi saklar non-aktif ditunjukkan dalam gambar 2.2



Gambar 2. 2 Rangkaian *Asynchronous* Konverter *buck* Kondisi saklar non-aktif [9]

Sedangkan saat kondisi saklar terbuka dioda menjadi *forward bias* sehingga ada aliran tegangan yang melalui kapasitor.



Gambar 2. 3 Rangkaian *Asynchronous* Konverter *buck* Kondisi saklar aktif [9]

Tegangan keluaran pada rangkaian konverter *buck* berhubungan dengan *duty cycle*. *Duty cycle* adalah rasio dari waktu saklar tidak aktif dan waktu saklar aktif, sesuai dengan persamaan (1) berikut:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

Serta tegangan keluaran pada konverter *buck* didapatkan dari persamaan (2) berikut:

$$V_o = V_{in} \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

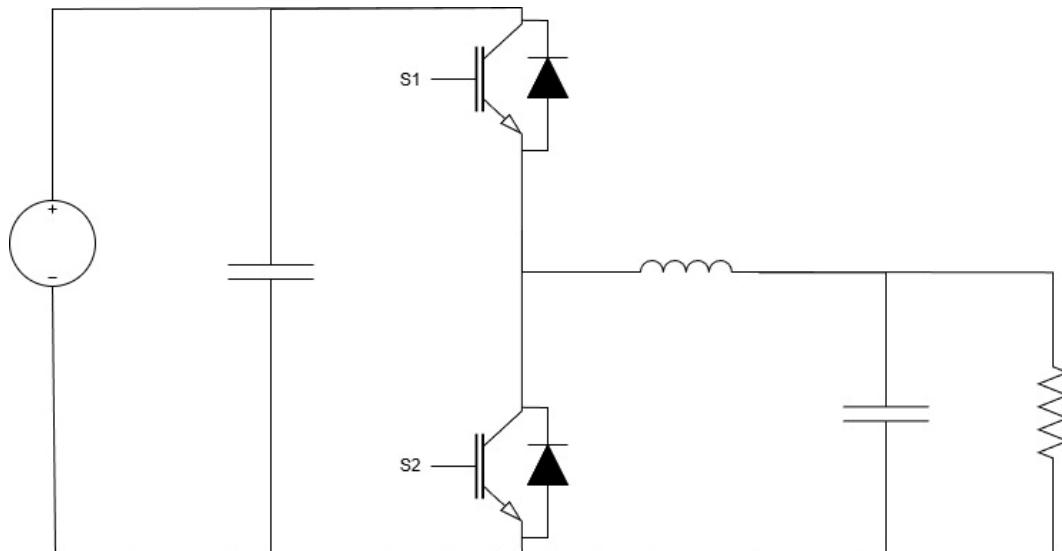
Dari persamaan (1) substitusikan dengan persamaan (2) untuk mendapatkan hubungan antara tegangan keluaran dengan *duty cycle*

$$V_o = V_{in} D \quad (3)$$

Dari persamaan (3) didapatkan bahwa tegangan keluaran pada konverter *buck* berhubungan dengan *duty cycle*.

### 2.2.2 Prinsip Kerja *Synchronous* Konverter *buck*

Prinsip kerja pada *synchronous* konverter *buck* memiliki kemiripan dengan *asynchronous* konverter *buck*, tetapi pada rangkaian *synchronous* konverter *buck* memiliki 2 MOSFET atau IGBT. Rangkaian *Synchronous* konverter *buck* ditunjukkan pada Gambar 2.4

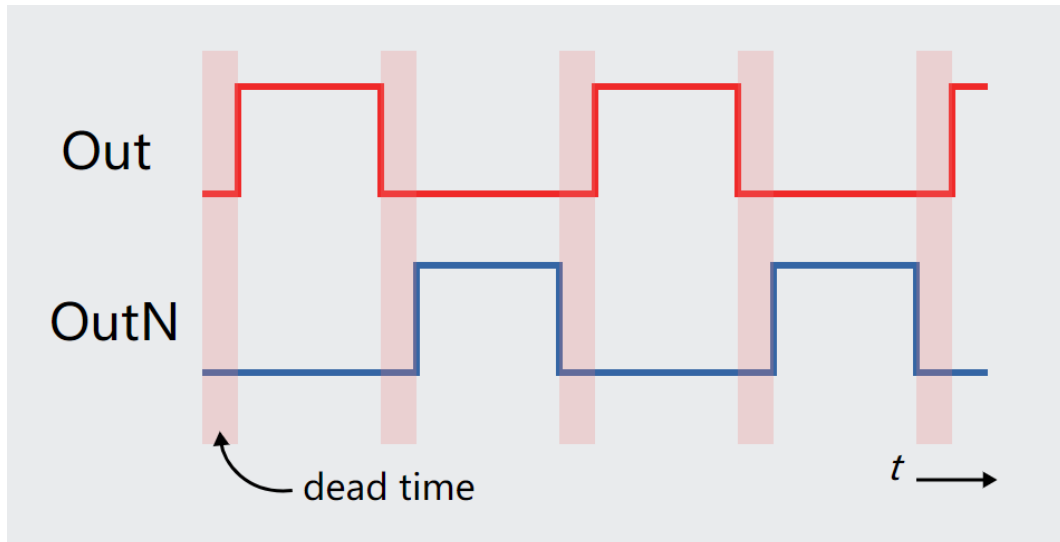


Gambar 2. 4 *Synchronous* konverter *buck* [10]

IGBT S1 berperan sebagai *High-side switch* dan IGBT S2 sebagai *Low-side switch*. Saat IGBT *High-side* aktif, maka IGBT *Low-side* akan non-aktif, dan sebaliknya. Kedua IGBT ini tidak boleh aktif pada waktu bersamaan untuk menghindari hubung singkat (*shoot through*), sehingga *dead time* atau jeda saat pergantian dalam mengaktifkan dan menon-aktifkan kedua IGBT sangat penting dalam topologi *synchronous* konverter *buck*.

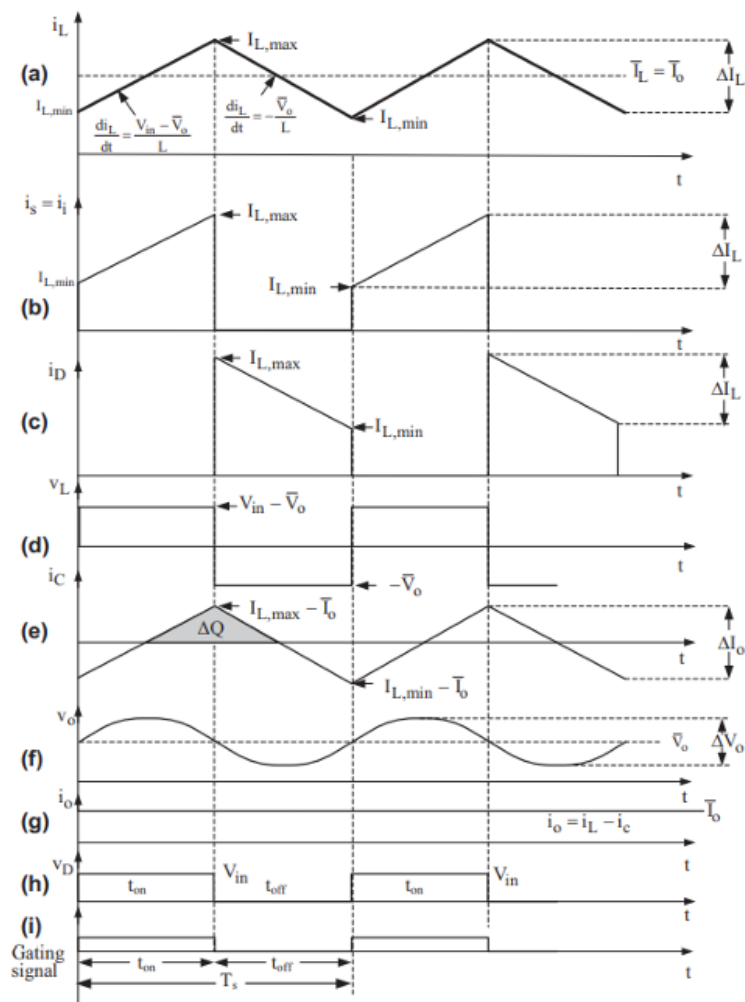
*Dead-time* adalah waktu saat pergantian saklar dari kedua IGBT, yang membuat kedua IGBT non-aktif secara bersamaan dalam waktu singkat, agar kedua IGBT tidak memiliki kondisi yang membuat mereka aktif bersamaan, yang akan membuat hubung singkat (*shoot through*).

Pada praktiknya, *dead-time* diatur oleh rangkaian kendali atau mikrokontroler yang mengendalikan sinyal PWM ke IGBT, sinyal PWM yang dikirim oleh mikrokontroler harus memiliki *dead time*, sehingga sinyal yang diterima oleh IGBT tidak akan membuat IGBT akan aktif secara bersamaan. Dalam penentuan *dead time* juga mempertimbangkan seberapa cepat perangkat akan merespon sinyal yang diberikan mikrokontroler, oleh karena itu penentuan *dead time* perlu melihat respon dari perangkat apakah keluaran pada perangkat sudah sesuai dengan sinyal yang dikirim oleh mikrokontroler untuk menghindari *shoot through*.



Gambar 2. 5 PWM dengan *dead time* [10]

### 2.2.3 Analisa Rangkaian Konverter *buck*



Gambar 2. 6 (a) Arus induktor; (b) Arus saklar; (c) arus induktor ; (d) tegangan induktor; (e) arus kapasitor; (f) riak tegangan kapasitor; (g) arus keluaran; (h) tegangan dioda; (i) sinyal pulsa [11]

Pada gambar 2.4 (a) terdapat perubahan arus pada induktor saat saklar aktif maka riak arus induktor  $\Delta I_L$  akan dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in} - \bar{V}_o}{L}$$

$$\frac{\Delta I_L}{t_{on}} = \frac{V_{in} - \bar{V}_o}{L}$$

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} - \bar{V}_o}{L} t_{on}$$

$$\Delta I_L = \frac{\bar{D} - \bar{V}_o}{L} DT_s$$

$$\Delta I_L = \frac{\overline{V}_o (1-D)}{L f_s} \quad (4)$$

Pada Gambar 2.4 (e), dan (f), arus pada kapasitor bernilai positif selama setengah periode, yang menghasilkan tegangan kapasitor naik antara tegangan yang paling rendah dan tinggi. Selama selang waktu ini, Q akan disimpan dalam kapasitor. Sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$\Delta Q = C \times \Delta V_o \quad (5)$$

Di mana  $\Delta V_o$  merupakan riak tegangan keluaran dari puncak ke puncak. Daerah yang diarsir berupa segitiga pada gambar 2.4 (e) menunjukkan total pengisian kapasitor dan dapat menggunakan persamaan dari segitiga:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T_s}{2} \right) \left( \frac{\Delta I_L}{2} \right)$$

$$\Delta Q = \frac{\Delta I_L T_s}{8} \quad (6)$$

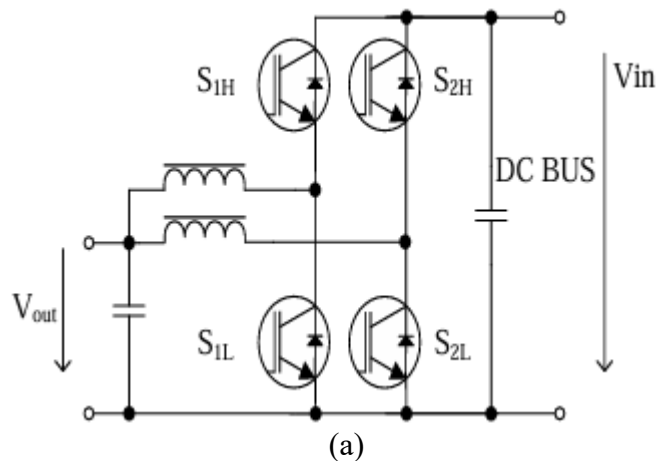
Substitusi persamaan (4) ke persamaan (5) yang menghasilkan persamaan (6) yang merupakan nilai untuk riak tegangan keluaran puncak ke puncak [11].

$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_L T_s}{8C} \quad (7)$$

### 2.3. DC-DC *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC)

*Multiphase* konverter *buck* atau *interleaved* konverter *buck* merupakan rangkaian yang terdiri dari beberapa konverter *buck* yang dihubungkan secara paralel, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7 Masing-masing fase dalam rangkaian ini memiliki induktor serta pasangan sakelar (IGBT) tersendiri. Seluruh set rangkaian tersebut

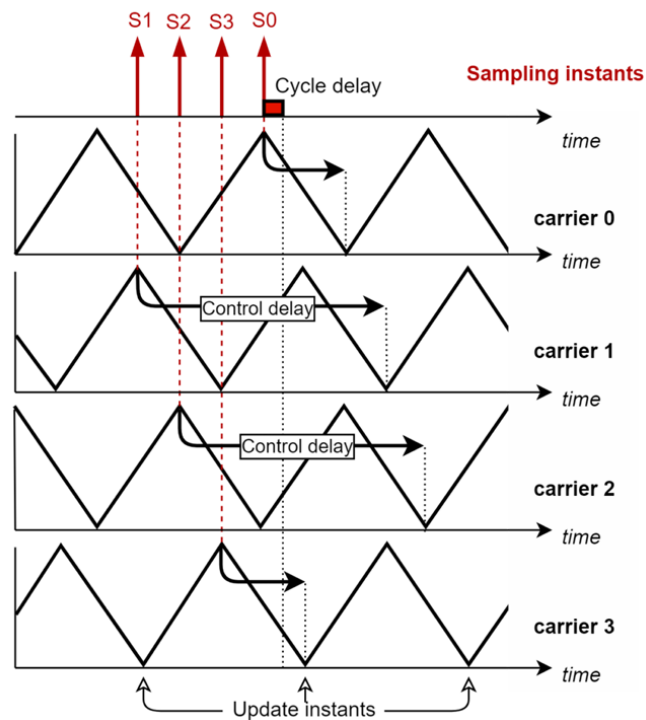
disebut sebagai fase. Fase-fase ini berbagi kapasitor masukan dan keluaran secara bersamaan dalam konfigurasi paralel.



Gambar 2. 7 (a) 2 fase *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC) [12]

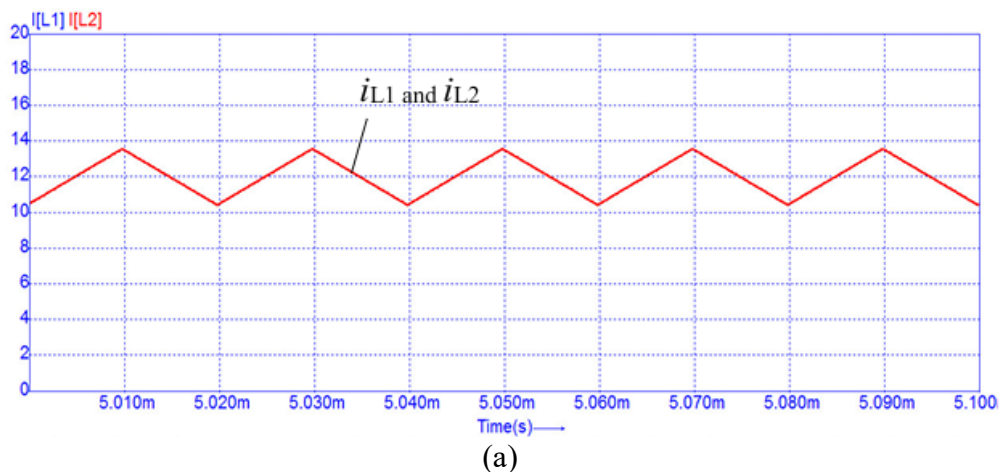
Pada *multiphase interleaved buck converter* (MIBC) dalam pembangkitan PWM tiap fase perlu diaktifkan secara bergantian dalam satu periode *switching* dengan pergeseran sudut sebesar  $360^\circ$  dibagi jumlah fase ( $n$ ). Prinsip kerja *interleaved konverter buck* secara umum mirip dengan konverter buck satu fase konvensional, namun perbedaannya terletak pada metode pengaktifan sakelar. Sakelar pada setiap fase dikendalikan dengan pola *duty cycle* tertentu dan digeser secara merata berdasarkan jumlah fase yang digunakan. Sebagai contoh, pada sistem dua fase digunakan pergeseran sebesar  $180^\circ$  (yaitu  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ ), sedangkan untuk tiga fase masing-masing fase digeser  $120^\circ$  ( $0^\circ$ ,  $120^\circ$ , dan  $240^\circ$ ), untuk 4 fase masing masing fase digeser  $90^\circ$  ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , dan  $270^\circ$ ) dan seterusnya [5].

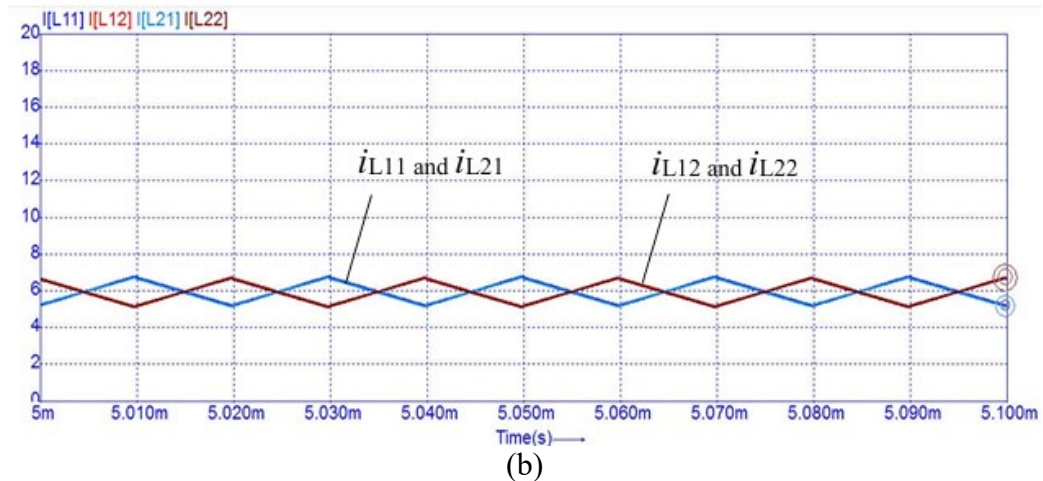
Dalam praktiknya penggunaan *multiphase interleaved buck converter* memiliki banyak keunggulan yaitu dapat mengurangi nilai induktor dan kapasitor keluaran, karena setiap fase induktor terhubung ke keluaran yang sama, arus induktor dijumlahkan secara bersama, sehingga kapasitor keluaran diisi dan dikosongkan pada saat bersamaan. Hal ini menyebabkan nilai riak pada arus keluaran induktor lebih kecil jika dibandingkan dengan konverter *buck* dengan fase yang lebih sedikit [13], hal ini dapat ditunjukkan dengan gambar 2.9.



Gambar 2. 8 Pergeseran fase pada 4 fase *Interleaved* Konverter *buck*[14]

Karena riak arus pada induktor lebih kecil maka spesifikasi induktor yang akan dibutuhkan akan lebih kecil dan lebih murah karena riak arus dan nilai induktansi yang lebih kecil menyebabkan ukuran induktor yang lebih kecil, dan karena riak arus keluaran dari induktor makin kecil maka kapasitor yang akan digunakan akan semakin kecil juga yang menyebabkan nilai kapasitansi pada kapasitor semakin kecil, sehingga kelebihan jika membuat MIBC adalah mendapatkan efisiensi daya yang tinggi dengan penggunaan LC filter yang lebih rendah.





Gambar 2. 9 (a) Arus induktor pada *single phase buck converter* (b) Arus induktor pada 2 fase *multiphase buck converter* [15]

#### 2.4. Perhitungan Induktor dan Kapasitor *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC)

Peran *multiphase interleaved buck converter* (MIBC) memiliki komponen pasif yaitu induktor dan kapasitor pada keluaran nya, induktor untuk menyimpan energi dan mengendalikan riak arus, sedangkan pada kapasitor keluaran untuk meredam riak tegangan. Nilai L dan C ditentukan dari spesifikasi riak yang diizinkan dan *switching frequency*. Dalam perancangan MIBC salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan adalah penentuan besaran induktansi. Penting nya penentuan nilai induktansi ini berhubungan langsung dengan riak arus dan berpengaruh pada tegangan keluaran. Dari persamaan (8) dapat dibuat untuk mencari nilai induktor yang digunakan adalah:

$$L = \frac{\bar{V}_o (1-D)}{\Delta I_L f_s}$$

$$L = \frac{V_{out} \times \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right)}{f_s \times \left(\%ripple \times \frac{I_{out}}{n_{phase}}\right)} \quad (8)$$

Dengan :

$L$  = Induktansi

$V_{out}$  = Tegangan Keluaran

$V_{in}$  = Tegangan Masukan

$D$  = *Duty Cycle*

$f_s$  = *Switching* Frekuensi

$n_{phase}$  = Banyak Fase

Setelah menentukan nilai induktansi induktor maka perlu dilakukan perhitungan untuk besaran arus yang akan mengalir melalui induktor untuk menentukan spesifikasi dari arus maksimal yang akan mengalir pada induktor. Persamaan (9) (10) dan (11) untuk mendapatkan nilai riak arus pada induktor

$$\Delta I_L = \%ripple \times \frac{I_{out}}{N_{Phase}} \quad (9)$$

$$I_{peak/phase} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{out}}{n_{phase}} \quad (10)$$

$$P_{peak/phase} = V_{out} \times I_{peak/phase} \quad (11)$$

Dengan :

$\Delta I_L$  = Arus Puncak ke Puncak pada Induktor

$I_{peak/phase}$  = Arus Puncak pada Induktor

$I_{out}$  = Arus keluaran

$V_{out}$  = Tegangan Keluaran

$P_{peak/phase}$  = Daya Induktor

$n_{phase}$  = Jumlah Fase

Setelah menentukan riak arus dan nilai induktansi dari induktor maka diperlukan juga untuk menentukan nilai kapasitansi untuk kapasitor keluaran. Untuk mendapatkan nilai dari parameter kapasitor pada konverter *buck* maka dapat dihitung menggunakan persamaan (12) maka didapatkan untuk mendapatkan parameter kapasitor :

$$C_{out} = \frac{I_{peak-peak/phase}}{8 \times f_s \times (\%ripple \times V_{out})} \quad (12)$$

Dengan :

$C_{out}$  = Kapasitor keluaran

$I_{peak-peak/phase}$  = Arus Puncak ke Puncak pada Induktor

$f_s$  = Frekuensi *Switching*

$\%ripple$  = Persentase riak

$V_{out}$  = Tegangan Keluaran

Pada *multiphase interleaved buck converter* (MIBC) kapasitor masukan juga memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan tegangan masukan ( $V_{in}$ ) saat adanya beban transien pada keluaran[13]. Dalam menentukan besaran kapasitor masukan yang dibutuhkan dapat dilakukan dengan persamaan (13) dan persamaan (14) berikut:

$$C_{in} = \frac{I_{peak/phase} \times D_{ADJ} \times n(1-D_{ADJ})}{f_s \times V_{in}} \quad (13)$$

$$D_{ADJ} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times \eta \quad (14)$$

Dengan :

$C_{in}$	= Kapasitor masukan
$I_{peak/phase}$	= Arus puncak pada Induktor
$f_s$	= Frekuensi <i>Switching</i>
% <i>ripple</i>	= Persentase riak
$V_{in}$	= Tegangan Keluaran
$D_{ADJ}$	= <i>Adjusted duty cycle</i>
$\eta$	= target efisiensi

## 2.5. Kendali *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC)

Dalam penelitian ini dalam sistem pengendalian *multiphase interleaved buck converter* (MIBC) menggunakan kendali PI sebagai sistem kendalinya. Sistem kendali PI (*Proportional Integral*) merupakan kendali untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada suatu sistem.

### 2.5.1. Kendali PI

Sistem kendali PI terdiri dari dua buah cara pengaturan yaitu kendali P (*Proportional*) dan I (*Integral*) dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya masing-masing dapat bekerja dengan sendiri maupun digabung. Tegangan transien yang muncul pada saat *start up*, yaitu timbulnya respon maksimum (*overshoot*), waktu naik (*rise time*) dan waktu menuju keadaan stabil (*settling time*) yang lama. Gejala transien ini tidak dapat dihilangkan, tetapi dapat diperkecil dampaknya dengan melakukan pengendalian PWM pada

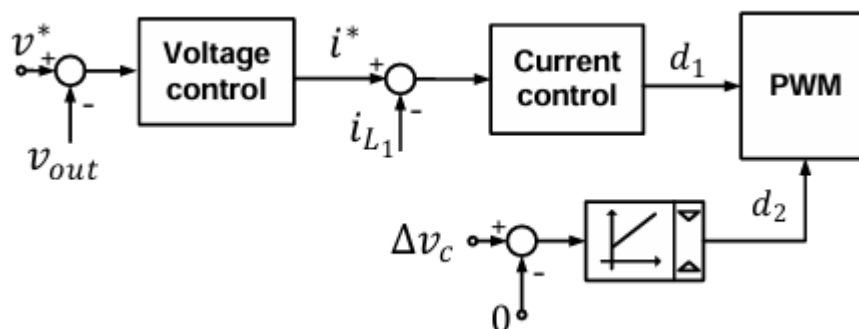
konverter. Proses pengontrol PI dengan menghitung nilai kesalahan (*error*) sebagai perbedaan antara *set point* yang diinginkan dan variabel proses terukur dan menerapkan koreksi berdasarkan istilahnya yaitu *Proportional* dan *Integral* [16].

Tabel 2. 1 Karakteristik Kendali PI

<i>Response</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>SS Error</i>
<b>Kp</b>	Berkurang	Bertambah	Sedikit Berubah	Berkurang
<b>Ki</b>	Berkurang	Bertambah	Bertambah	Disingkirkan

### 2.5.2. Sistem Kendali *Multi Loop*

Pada sistem kendali *multi loop* memiliki dua tahap yaitu tahap *outer voltage loop* dan *inner current loop*. Pada tahap *outer voltage loop* nilai referensi dibandingkan dengan nilai *actual* dari keluaran rangkaian untuk didapatkan nilai *error*. Kemudian nilai *error* dimasukkan ke dalam proses kendali PI, dan hasil dari *outer voltage loop* ini dijadikan sebagai referensi dari *inner current loop*, yang kemudian dibandingkan dengan arus pada induktor untuk di dapatkan nilai *error*. Kemudian nilai *error* dimasukkan ke dalam proses kendali PI dan menghasilkan nilai referensi yang akan dibandingkan dengan sinyal pembawa (*carrier*), yang akan menghasilkan PWM.

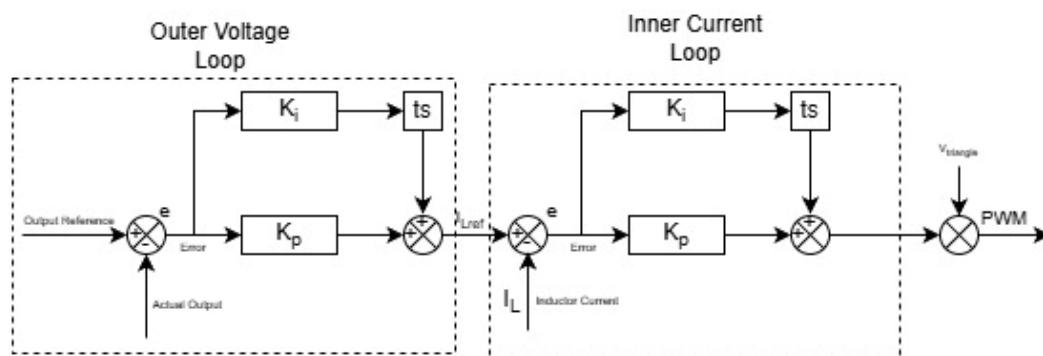


Gambar 2. 10 *Multi loop* Kendali PI[17]

Sistem kendali *multi loop* ini memiliki respon yang cepat dan pada perubahan beban, jika dibandingkan dengan sistem kendali dengan 1 *loop* saja, misalkan jika hanya menggunakan *outer voltage loop* saja maka saat terjadi perubahan beban, arus pada induktor tidak terjaga, dan akan memungkinkan terjadinya osilasi, karena perbedaan *parasitic* parameter juga tidak dapat dihindari dan beberapa faktor yang

dapat menyebabkan ketidak seimbangan arus dapat mempengaruhi ketidakseimbangan arus di tiap fase nya [18].

Sedangkan *multi loop* saat terjadi perubahan beban, keluaran dari konverter akan stabil dan tidak terjadi osilasi karena tidak hanya mendapatkan umpan balik dari keluaran pada konverter, tapi juga mendapatkan umpan balik arus di induktor [19]. Arus induktor adalah titik kendali utama karena ia menjadi variabel antara (*intermediate variabel*) yang menjembatani hubungan antara keluaran dan *duty cycle*. Oleh karena arus pada Induktor digunakan dalam *inner current loop* [20].



Gambar 2. 11 *outer voltage loop* dan *inner current loop* [21]

Terlihat pada Gambar 2.11 tahapan dalam sistem kendali *multi loop* ini dimulai dari *outer voltage loop*, membandingkan nilai referensi dengan nilai aktual pada rangkaian, sehingga didapatkan nilai *error*. Setelah itu nilai *error* dimasukkan ke dalam perhitungan PI. Hasil dari perhitungan PI akan digunakan sebagai nilai referensi untuk *inner current loop*.

Pada tahap *inner current loop* nilai referensi yang tadi telah diperoleh pada tahap *outer voltage loop* akan dibandingkan dengan arus pada induktor. Setelah diperoleh nilai *error*, kemudian masuk ke perhitungan PI. Hasil dari perhitungan PI tersebut akan digunakan sebagai referensi yang dibandingkan dengan sinyal yang akan membentuk sinyal PWM [21].

Dari diagram blok di atas didapatkan persamaan pada *outer voltage loop* terlihat pada persamaan (15) di bawah ini

$$e = ref - actual\ output$$

$$Int = e \times Ki \times ts$$

$$I_{ref} = (e \times K_p) + Int \quad (15)$$

Persamaan *inner current loop* seperti terlihat pada persamaan (16) di bawah ini

$$e_i = I_{ref} - IL$$

$$Int_i = e_i \times K_i \times ts$$

$$Duty = (e_i \times K_p) + Int_i \quad (16)$$

Sistem kendali PI yang digunakan untuk *multiphase interleaved buck converter* memiliki 2 *loop* yaitu *outer voltage loop* dan *inner current loop*. Dalam hal ini membuat respons cepat terhadap perubahan beban, pembatasan arus, serta pembagian arus antarfasa yang seimbang [22].

### 2.5.3. Pengaturan Kendali PI

Dalam melakukan pengaturan nilai PI, dapat dilakukan dengan berbagai cara, seperti Ziegler Nichols, pembentukan *loop*, “*magnitude optimum*”, penempatan kutub, dll. *Continuous time transfer function* adalah salah satu yang terkenal dalam pengaturan PI, seperti pada persamaan (17) di bawah ini.

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (17)$$

$k_p$  adalah *proportional* sedangkan  $k_i$  adalah *integral*. Secara umum *continuous function* dalam sistem kendali bertujuan untuk mempertahankan frekuensi dan karakteristik stabilitas

Metode penyesuaian pada “*magnitude optimum*” bertujuan untuk merancang pengendali agar keluaran pada sistem secara keseluruhan dapat memiliki kestabilan yang tinggi. Dalam menentukan parameter dari “*magnitude optimum*”, diperlukan *first order*, yang dijelaskan dalam domain laplace, dengan persamaan (18) berikut:

$$P_i(s) = \frac{K_1}{1+sT_1} \quad (18)$$

kendali PI *transfer function* ditulis kembali dalam:

$$C(s) = \frac{1+sT_n}{sT_i} \quad (19)$$

*Delay* dalam aktuator juga diperhitungkan dengan *first order* model :

$$D(s) = e^{(-sT_{d,tot})} \approx \frac{1}{1+sT_{d,tot}} \quad (20)$$

Setelah memperoleh *transfer function* pada *loop* terbuka untuk keseluruhan sistem (kendali PI, *delay* aktuator, *plant*), diperoleh persamaan (21) di bawah ini yang merupakan kriteria *magnitude optimum*:

$$H_{OL}(s) = C(s)D(s)P_1(s) = \frac{1+sT_n}{sT_i} \frac{1}{1+sT_{d,tot}} \frac{K_1}{1+sT_1} \quad (21)$$

Pemilihan parameter kendali  $T_n = T_1$  untuk menghilangkan konstanta waktu dominan pada  $s = -1/T_1$ , dapat disederhanakan dengan *transfer function loop* terbuka menjadi :

$$H_{OL}(s) = \frac{K_1}{sT_i(1+sT_{d,tot})} \quad (22)$$

Menghitung dengan *closed loop transfer function* menghasilkan:

$$H_{CL}(s) = \frac{1}{1+s\frac{T_i}{K_1} + s^2\frac{T_iT_{d,tot}}{K_1}} \quad (23)$$

Untuk menghitung nilai gain frekuensi dari *transfer function closed loop*, gantikan  $s = j\omega$  untuk membuat simpel:

$$\text{den}|H_{CL}(j\omega)|^2 = \omega^4\left(\frac{T_iT_{d,tot}}{K_1}\right)^2 + \omega^2\left(\left(\frac{T_i}{K_1}\right)^2 - 2\frac{T_iT_{d,tot}}{K_1}\right) + 1 \quad (24)$$

Dalam frekuensi rendah (pengali dari  $\omega^2$ ) diatur ke 0 untuk mendapatkan parameter kendali dari  $T_i$

$$\left(\frac{T_i}{K_1}\right)^2 - 2\frac{T_iT_{d,tot}}{K_1} = 0$$

$$T_i = 2K_1T_{d,tot} \quad (25)$$

Pemilihan  $T_i$  bertujuan untuk menjaga *transfer function closed loop* tetap mendekati dengan frekuensi rendah. Dalam persamaan (26) di bawah formula untuk *magnitude optimum*, dapat digunakan untuk pengaturan kendali PI.

$$T_n = T_1$$

$$T_i = 2K_1T_{d,tot} \quad (26)$$

Untuk optimum simetris, rumus *generic* ditunjukkan pada persamaan (27) dan persamaan (28) berikut:

$$T_n = 4T_{d,tot} \quad (27)$$

$$T_i = 8K_1 T_{d,tot}^2 \quad (28)$$

Lalu substitusikan persamaan (19) dengan persamaan (17), dan menghasilkan persamaan (29) dan persamaan (30) berikut: [23]

$$K_p = \frac{T_n}{T_i} \quad (29)$$

$$K_i = \frac{1}{T_i} \quad (30)$$

Pada umumnya kendali konverter *buck* memanfaatkan induktif energi yang terkumpul pada induktor.

$$I = \frac{1}{L} \int (V_1 - V_2) dt \quad (31)$$

Setelah di transformasikan ke dalam domain *laplace*, akan menghasilkan persamaan *transfer function first order* di bawah ini:

$$\frac{I_L(s)}{V_L(s)} = \frac{1}{sL + R_b} \quad (32)$$

Lakukan substitusi ke persamaan (19) dari persamaan *transfer function first order* yang telah diketahui:

$$P_i(s) = \frac{K_1}{1 + sT_1} \quad (33)$$

Dengan :

$$K_1 = \frac{1}{R_b}$$

$$T_1 = \frac{L_b}{R_b}$$

Dalam banyak kasus untuk kinerja dalam pengaturan PI perlu mengutamakan stabilitas dari gangguan riak, kriteria umum untuk menyesuaikan parameter pengendali PI disebut kriteria “*magnitude optimum*”. Dengan *transfer function* dari konverter buck, maka dihasilkan persamaan (34) dan persamaan (35) berikut:

$$K_p = \frac{L}{2T_{d,tot}} \quad (34)$$

$$K_i = \frac{R_b}{2T_{d,tot}} \quad (35)$$

Parameter  $T_{d,tot}$  merupakan *time sampling period* ( $T_s$ ) sedangkan  $R_b$  merupakan seri resistansi induktor pada sistem [24].



### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### a. Perangkat Keras

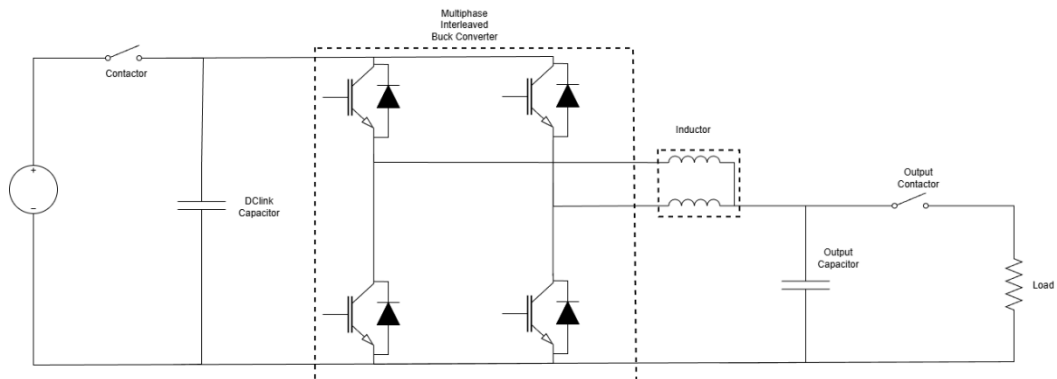
1. Laptop sebagai perangkat untuk melakukan simulasi dan sebagai sarana untuk menulis *code* untuk mikrokontroler.
2. Penyearah 1 fase yang terdiri dari sumber tegangan 1 fase AC, transformator variabel (*volt slider*), trafo 1 fase, dan dioda untuk menyearahkan dari AC ke DC.
3. Rangkaian *multiphase interleaved buck converter* (MIBC) yang terdiri dari kapasitor, IGBT, sensor tegangan dan arus, induktor, dan resistor.
4. Mikrokontroler f28379d yang digunakan untuk mengendalikan keluaran dari MIBC.
5. *Power supply* untuk memberikan suplai tegangan ke rangkaian dan mikrokontroler.
6. Multimeter sebagai alat ukur.
7. Osiloskop sebagai alat ukur.

#### b. Perangkat Lunak

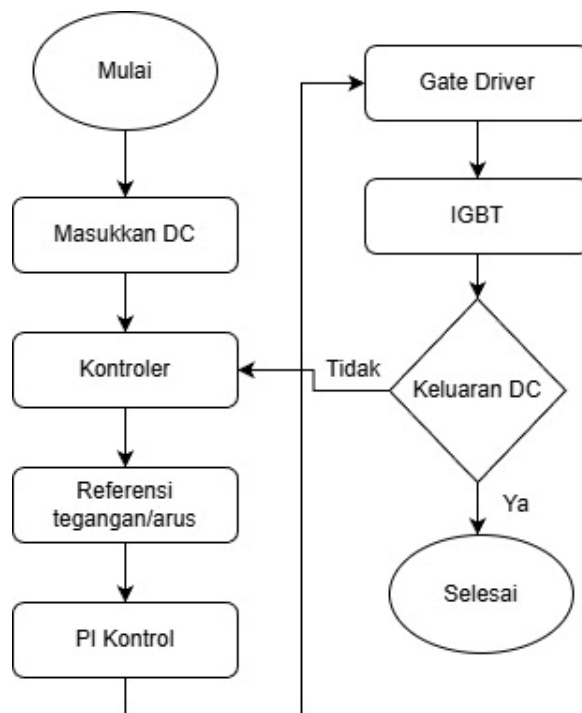
1. Perangkat Lunak *Code Composer Studio* untuk menuliskan *code* untuk pengendalian dari MIBC
2. Perangkat Lunak QSpice untuk melakukan simulasi rangkaian MIBC

### 3.3 Perancangan Model MIBC

Adapun skematik model MIBC yang akan digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 3.1 yang memperlihatkan skematik MIBC yang akan dirancang dalam penelitian ini. Untuk menjaga kestabilan arus dan tegangan keluaran, maka dalam sistem pengendalian nya menggunakan metode kendali PI dengan diagram blok yang ditunjukkan pada gambar 3.2



Gambar 3. 1 Skematik MIBC 2 fase

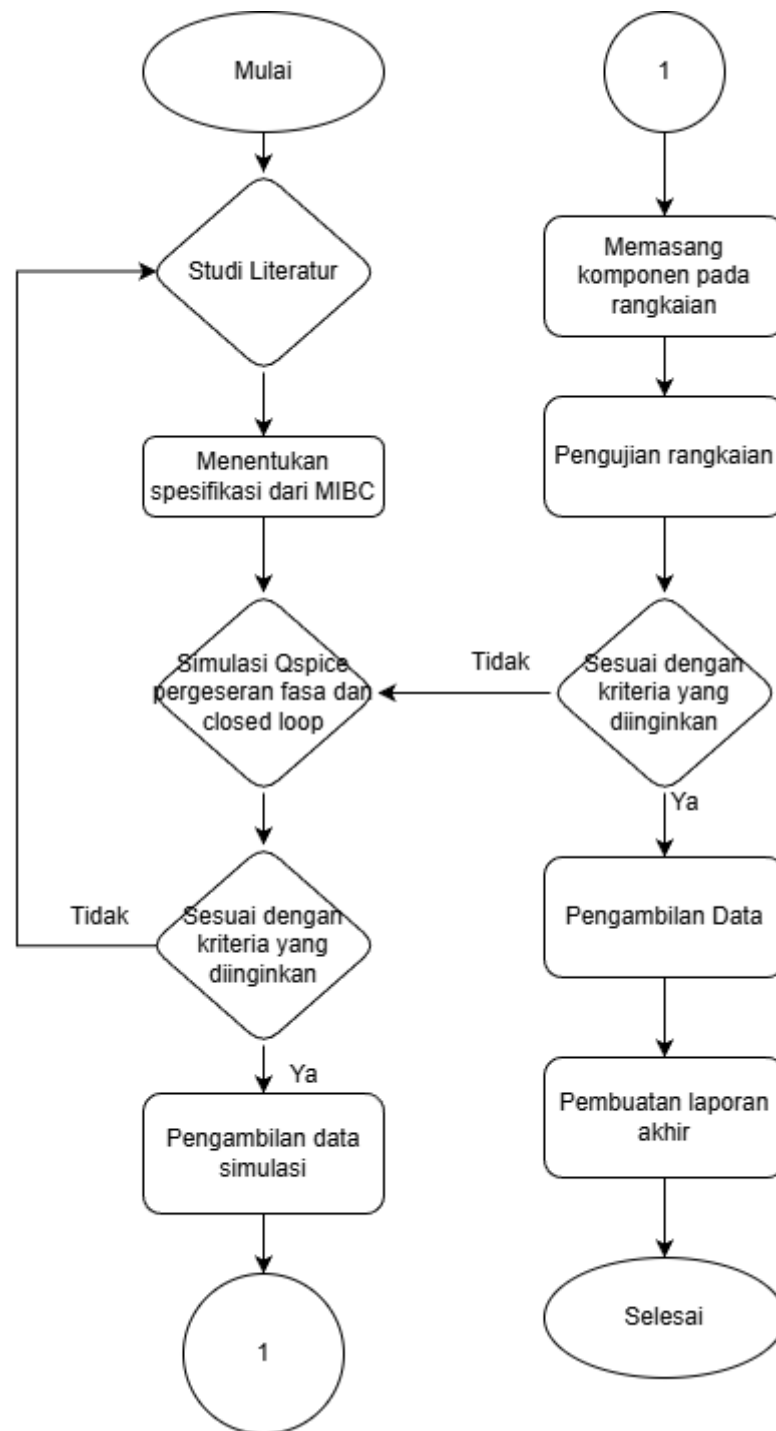


Gambar 3. 2 *Close Loop* Kendali MIBC

### 3.4 Diagram Blok Penelitian

Diagram alir pada perancangan penelitian ini disusun dengan sistematis, yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur dan perancangan untuk menentukan parameter spesifikasi MIBC, selanjutnya dilakukan simulasi berdasarkan parameter tersebut, jika hasil belum memenuhi kriteria, maka perlu dilakukan evaluasi ulang terhadap spesifikasi alat, kemudian jika simulasi berhasil, maka akan diimplementasikan ke perangkat keras. Tahap akhir dari

penelitian adalah pengambilan data hasil dari implementasi perangkat keras, kemudian dilakukan pengambilan data.



Gambar 3. 3 Diagram alir penelitian

### 3.5 Spesifikasi Alat

Pada tahap perancangan MIBC, diawali dengan menentukan parameter-parameter yang akan digunakan, menggunakan perhitungan matematis, khususnya pada komponen induktor dan kapasitor yang akan digunakan pada MIBC.

#### 3.5.1 Perhitungan Induktor

Menentukan nilai induktansi yang akan digunakan pada rangkaian MIBC. Pada perhitungan nilai induktansi perlu menetapkan batas riak arus induktor. Dalam standar perancangan konverter daya, riak arus yang diizinkan umumnya berkisar antara 20% - 40%. Perhitungan Induktansi, dapat dihitung menggunakan persamaan (8) pada Bab II.

$$L = \frac{V_{out} \times \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right)}{f_s \times \left(\%_{ripple} \times \frac{I_{out}}{n_{phase}}\right)}$$

$$L = \frac{900 \times \left(1 - \frac{900}{1000}\right)}{10000 \times \left(25\% \times \frac{55.5}{2}\right)} = 1,29 \text{ mH}$$

Setelah menghitung nilai induktansi, perlu juga untuk menghitung besaran arus yang akan mengalir pada induktor, agar induktor sesuai dengan spesifikasi konverter yang akan dibuat. Perhitungan arus yang mengalir pada induktor, dapat dihitung menggunakan persamaan (9) (10) (11) pada Bab II.

$$I_{peak-peak/phase} = \%_{ripple} \times \frac{I_{out}}{N_{Phase}}$$

$$I_{peak-peak/phase} = 0.25 \times \frac{55.5 \text{ A}}{2} = 6,937 \text{ A}$$

$$I_{peak/phase} = \frac{I_{peak-peak/phase}}{2} + \frac{I_{out}}{n_{phase}}$$

$$I_{peak/phase} = \frac{6.937A}{2} + \frac{55.5A}{2} = 31,218 A$$

$$P_{peak/phase} = V_{out} \times I_{peak/phase}$$

$$P_{peak/phase} = 900 V_{dc} \times 31.218 A = 28,096 kW$$

Berdasarkan dari perhitungan yang telah dilakukan, induktor yang akan digunakan memiliki nilai induktansi sebesar 1,29 mH, dengan minimal arus yang dapat dialirkan oleh induktor sebesar 32 A. Dikarenakan pada laboratorium induktor yang yang tersedia sebesar 1.28 mH, maka induktor tersebut yang akan digunakan.

### 3.5.2 Perhitungan Kapasitor

Setelah menentukan parameter induktor, maka menentukan nilai kapasitansi pada kapasitor masukan dan kapasitor keluaran juga penting dalam konverter MIBC. Tahap pertama dalam menentukan kapasitor keluaran adalah menentukan riak. Dalam penelitian ini nilai riak yang digunakan sebesar 0.1%. Perhitungan kapasitansi kapasitor keluaran ( $C_{out}$ ) pada rangkaian ini menggunakan persamaan (13) pada Bab II.

$$C_{out} = \frac{I_{peak-peak/phase}}{8 \times f_s \times (\%ripple \times V_{out})}$$

$$C_{out} = \frac{6.937}{8 \times 10000 \times (0.1\% \times 900)}$$

$$C_{out} = 96 \mu F$$

Kemudian perlu menentukan kapasitansi kapasitor masukan. Tahap pertama adalah menentukan target efisiensi pada konverter dengan nilai 85% dan nilai kapasitansi untuk kapasitor masukan dapat dihitung menggunakan persamaan (14) dan (15) pada Bab II.

$$D_{ADJ} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times \eta$$

$$D_{ADJ} = \frac{900}{1000} \times 0.85$$

$$D_{ADJ} = 0,765$$

$$C_{in} = \frac{I_{peak/phase} \times D_{ADJ} \times n(1-D_{ADJ})}{f_s \times V_{in}}$$

$$C_{in} = \frac{31.218 \times 0.765 \times 2(1-0.765)}{10000 \times 1000}$$

$$C_{in} = 1151 \mu f$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, kapasitansi dari kapasitor keluaran sebesar  $96 \mu F$ , dengan tegangan keluaran yang dihasilkan sebesar  $900 V$ , dan kapasitansi dari kapasitor masukan sebesar  $1122 \mu F$  dengan tegangan masukan sebesar  $1000 V$ . Dalam laboratorium terdapat kapasitor film dengan kapasitansi  $310 \mu F$  maka kapasitor tersebut yang akan digunakan untuk kapasitor masukan dan keluaran.

Dari perhitungan yang sudah dilakukan, maka didapatkan spesifikasi dari konverter yang akan dibuat, seperti yang terlihat pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Spesifikasi Desain *Multiphase Interleaved Buck Converter 2 Fase*

PARAMETER		MIN	NOM	MAX	UNITS
Karakteristik Sumber (DC Terminal)					
$V_{in}$	Tegangan DC		900	1000	V
$C_{in}$	Kapasitor masukan		1240		$\mu F$
Karakteristik Filter Keluaran					
$L_{out}$	Induktor		1,28		mH
$C_{out}$	Kapasitor keluaran		310		$\mu F$
Karakteristik Keluaran (DC Terminal)					
$V_{out}$	Tegangan Keluaran*	700	800	900	V
$I_{out}$	Arus Keluaran*	30	40	55,5	A
$P_{out}$	Daya Keluaran*			50000	W
Karakteristik Sistem Kendali					

$f_s$	Frekuensi Penyakelaran		10000		Hz
-------	------------------------	--	-------	--	----

Dalam pengujian perangkat keras yang akan dilakukan pada penelitian ini akan dibuat dengan parameter sesuai dengan Tabel 3.3. Hal ini dikarenakan keterbatasan sumber tegangan DC yang ada pada laboratorium. Sehingga menggunakan *volt slider trafo* yang disearahkan dengan dioda sehingga menghasilkan 200 V DC untuk tegangan masukan pada pengambilan data perangkat keras.

Tabel 3 . 3 Spesifikasi Pengujian Perangkat Keras

PARAMETER		MIN	NOM	MAX	UNITS
Karakteristik Sumber (DC Terminal)					
$V_{in}$	Tegangan DC		200		V
Karakteristik Filter					
$L_{out}$	Induktor		1,28		mH
$C_{out}$	Kapasitor keluaran		310		$\mu$ F
$C_{in}$	Kapasitor masukan		1240		$\mu$ F
Karakteristik Keluaran (DC Terminal)					
$V_{out}$	Tegangan Keluaran*	40	50	60	V
$I_{out}$	Arus Keluaran*	1	2	3	A
$P_{out}$	Daya Keluaran	22	82	191	W
Karakteristik Sistem Kendali					
$f_s$	Frekuensi Penyakelaran		10000		Hz

### 3.6 Parameter Kendali PI

Penentuan nilai konstanta proporsional dan integral untuk keperluan pengujian *closed loop* menggunakan persamaan (35) dan persamaan (36) pada Bab II:

$$K_p = \frac{L}{2T_{d,tot}}$$

$$K_p = \frac{0.00128}{2 \times 0.00005}$$

$$K_p = 12.8$$

$$K_i = \frac{R_b}{2T_{d,tot}}$$

$$K_i = \frac{0.033}{2 \times 0.00005}$$

$$K_i = 330$$

Berdasarkan perhitungan maka diperoleh nilai *proportional* (Kp) adalah 12.8 dan *integral* (Ki) adalah 330. Hasil perhitungan nilai Kp dan Ki digunakan sebagai acuan untuk melakukan *trial* dan *error* dalam menentukan nilai Kp dan Ki untuk pengujian simulasi dan pengujian perangkat keras.

### 3.7 Perancangan Simulasi Menggunakan Perangkat Lunak QSpice

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak QSpice, yaitu *software* yang dapat membantu pemodelan rangkaian konverter dan sistem kendali. QSpice dapat mengimplementasikan *code* pada *controller* yang sesungguhnya. Pemodelan alat dalam simulasi memerlukan beberapa hal yang diperhatikan untuk pengujian, yaitu:

1. Pengujian pergeseran PWM pada tiap fase MIBC
2. Pengujian *dead time* pada PWM H dan PWM L
3. Pengujian *close loop* kendali rangkaian MIBC

### 3.8 Pengujian Perangkat Keras

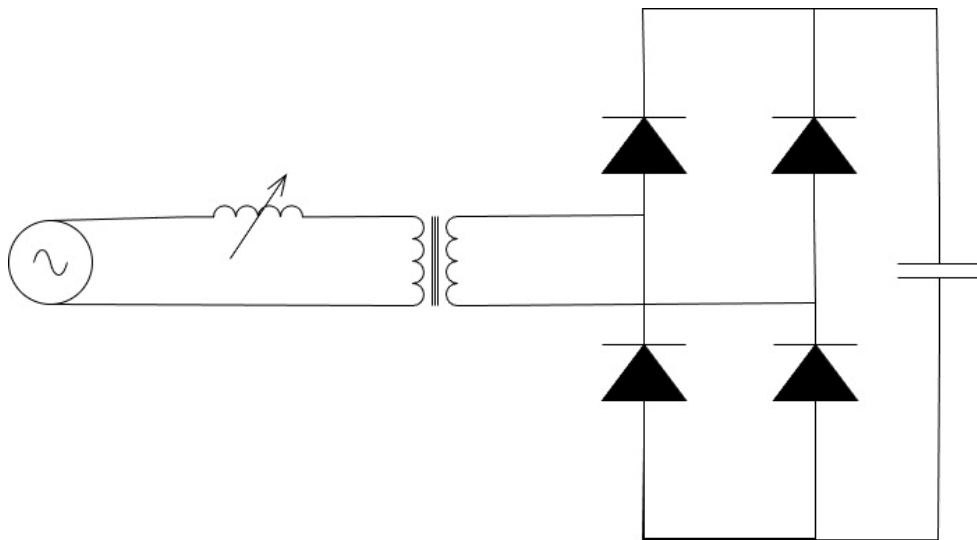
Pada tahap pengujian perangkat keras dilakukan dengan metode *close loop* MIBC dengan dua metode yaitu *single loop* dan metode *multi loop*. Dalam pengujian kedua metode tersebut digunakan dua mode yaitu mode *Constant Voltage* (CV) dan mode *Constant Current* (CC). Dengan menggunakan sumber AC 1 fase yang disearahkan untuk mendapatkan sumber DC sebagai masukan dari MIBC yang

akan digunakan, serta menghitung nilai riak keluaran menggunakan persamaan (36) berikut :

$$Riak = \frac{Keluaran_{Peak\ to\ Peak}}{Referensi} \times 100\% \quad (36)$$

### 3.8.1. Perancangan Penyearah

Perancangan penyearah ini dibutuhkan dalam pengujian perangkat keras sebagai tegangan masukan ke MIBC. Desain penyearah AC 1 fase ini menggunakan trafo dengan perbandingan 1:1, seperti terlihat pada gambar 3.4



Gambar 3. 4 Desain Penyearah 1 fase

### 3.8.2. Keluaran PWM pada Mikrokontroler

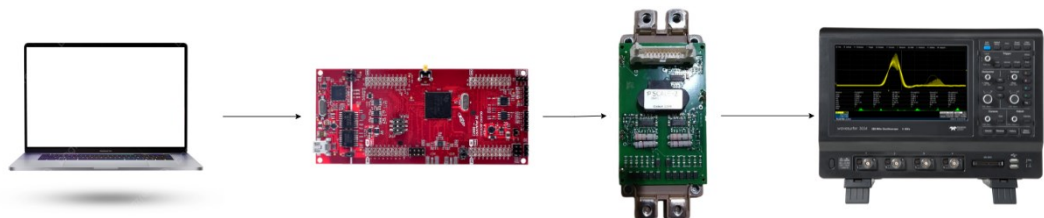
Pengujian keluaran PWM pada mikrokontroler bertujuan untuk memastikan keluaran sinyal PWM-nya sudah sesuai, yaitu saat PWM atas aktif dan PWM bawah non-aktif, serta saat bergantian kondisi aktif dan non-aktif pada PWM atas dan bawah harus memiliki *deadtime* sehingga kedua sisi tidak aktif secara bersamaan. Serta melihat apakah PWM 1 dengan PWM 2 memiliki beda fase sebesar 180°.



Gambar 3. 5 Pengujian Keluaran PWM pada Mikrokontroler

### 3.8.3. Keluaran PWM pada *gate driver* dan IGBT

Keluaran sinyal PWM pada mikrokontroler akan diteruskan ke *gate driver* dengan bentuk gelombang yang sama tetapi dengan level tegangan yang berbeda. Tegangan yang masuk ke *gate driver* ini yang akan mengirimkan tegangan pada kaki *gate* di IGBT yang membuat *switch* pada IGBT akan non-aktif atau aktif sesuai dengan sinyal PWM yang dikirimkan oleh mikrokontroler.



Gambar 3. 6 Pengujian keluaran PWM pada *gate driver*

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi dan desain perangkat keras *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC) berkapasitas 50 kW telah berhasil direalisasikan. Sistem menggunakan algoritma kendali *Proportional-Integral* (PI) terbukti mampu beroperasi dengan baik pada mode tegangan konstan (*Constant Voltage / CV*) maupun arus konstan (*Constant Current / CC*) dengan menerapkan struktur *single loop* maupun *multi loop*.
2. Penerapan metode kendali *multi loop* terbukti lebih unggul dalam menyeimbangkan arus antarfase dibandingkan dengan metode *single loop*. Hal ini dikonfirmasi melalui pengujian simulasi, di mana mekanisme kendali lapis dalam (*inner current loop*) secara efektif menurunkan selisih arus puncak antar-induktor sehingga distribusi arus menjadi lebih konsisten.
3. Berdasarkan pengujian perangkat keras, metode *multi loop* terbukti menghasilkan riak keluaran yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan *single loop*. Pada pengujian mode CV (referensi 40–60 V), *multi loop* mampu menekan riak ke rentang 11,67% – 24% (dibandingkan *single loop* yang mencapai 21,67% – 32,5%). Pada pengujian mode CC (referensi 1–3 A), riak keluaran *multi loop* juga berhasil direduksi hingga rentang 2% – 6% (dibandingkan *single loop* pada rentang 5% – 6,67%).

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Pengembangan Algoritma Kendali yang Lebih Lanjut: Penggunaan kendali *Proportional-Integral* (PI) pada metode *multi loop* terbukti memiliki kelemahan berupa waktu pemulihan (*recovery time*) yang cenderung lebih lambat. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan metode kendali yang lebih cerdas dan adaptif, seperti *Fuzzy Logic Controller* (FLC), *Model Predictive Control* (MPC), atau *Sliding Mode Control* (SMC). Metode-metode tersebut diharapkan mampu memberikan respons transien yang lebih cepat sekaligus mempertahankan tingkat riak (*ripple*) yang rendah.
2. Optimalisasi Desain dan Komponen Perangkat Keras (*Hardware*): Mengingat tingginya selisih riak keluaran antara simulasi dan implementasi perangkat keras akibat faktor suhu, tundaan (*delay*) sensor, dan resistansi kabel, penelitian selanjutnya perlu melakukan optimalisasi desain tata letak (*layout*) sirkuit. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan komponen semikonduktor generasi terbaru (seperti MOSFET SiC atau GaN) yang lebih tahan terhadap suhu tinggi, meminimalkan jalur kabel untuk mengurangi induktansi parasitik, serta menambahkan filter *Electromagnetic Interference* (EMI) yang lebih presisi.
3. Pengujian dengan Beban Dinamis dan Realistis: Penelitian ini masih menggunakan beban resistif statis. Untuk penelitian ke depannya, disarankan melakukan pengujian menggunakan beban dinamis yang lebih realistis, seperti menggunakan *Battery Management System* (BMS) dari baterai kendaraan listrik (*Electric Vehicle / EV*) yang sebenarnya. Hal ini bertujuan untuk menguji keandalan sistem *Multiphase Interleaved Buck Converter* (MIBC) secara langsung pada siklus pengisian daya aktual (*State of Charge / SoC*) yang bervariasi.
4. Kompensasi *Ripple Cancellation* Secara Aktif: Karena topologi MIBC sangat dipengaruhi oleh fenomena *ripple cancellation* pada siklus kerja (*duty cycle*) tertentu, penelitian selanjutnya dapat mengkaji teknik modulasi lebar pulsa (PWM) yang teroptimasi secara dinamis. Tujuannya adalah untuk secara aktif menggeser atau mengontrol titik operasi sistem agar selalu berada di sekitar

efisiensi pembatalan riak tertinggi, meskipun nilai referensi tegangan atau arus terus berubah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Wang, J. Zhang, X. Li, S. Chen, J. Ma, and H. Han, "The Control Strategies for Charging and Discharging of Electric Vehicles in the Vehicle – Grid Interaction Modes," 2024.
- [2] N. Hinov, "applied sciences Design Considerations of Multi-Phase Buck DC-DC Converter," 2023.
- [3] H. Zomorodi and E. Nazari, "Design and Simulation of Synchronous Buck Converter in Comparison with Regular Buck Converter," *Int. J. Robot. Control Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 79–86, 2022, doi: 10.31763/ijrcs.v2i1.538.
- [4] A. M. Youssef, "Multiphase Interleaved Bidirectional DC/DC Converter for Fuel Cell/Battery Powered Electric Vehicles," *2020 12th Int. Conf. Electr. Eng. ICEENG 2020*, vol. 4, no. 2, pp. 34–43, 2020, doi: 10.1109/ICEENG45378.2020.9171753.
- [5] U. Agani, E. Komalasari, and A. Darajat, "Desain Pwm Pada Three Phase Interleaved Buck Converter Sebagai Catu Daya 10Kw," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, pp. 1603–1607, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4330.
- [6] M. A. Harimon, A. Ponniran, A. N. Kasiran, and H. H. Hamzah, "A study on 3-phase interleaved DC-DC boost converter structure and operation for input current stress reduction," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 1948–1953, 2017, doi: 10.11591/ijpeds.v8.i4.pp1948-1953.
- [7] A. X. Svensson, "Investigation of switching power losses of SiC MOSFET used in a DC / DC Buck converter Investigation of switching power losses of SiC MOSFET used in a DC / DC Buck converter," 2022.
- [8] Y. Zhang, S. Member, R. Zane, and A. Prodic, "Online Calibration of MOSFET On-State Resistance for Precise Current Sensing," no. October, 2004, doi: 10.1109/LPEL.2004.839635.
- [9] A. S. Samosir, T. Sutikno, and L. Mardiyah, "Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter," vol. 14, no. 1, pp. 327–336, 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp327-336.
- [10] H. Wang, J. Guo, J. Gong, J. Chen, and S. Zhang, "The Impact of Dead-time on Synchronous Rectification Circuit Efficiency," vol. 89, no. Wcnme, pp. 125–128, 2019.
- [11] P. Electronics and M. D. Systems, *DC e DC Converters 7.0*, vol. 1. 2017.
- [12] M. Jarabicova, M. Prazenica, and S. Kascak, "Interleaved DC / DC Converter with Coupled Inductor – Theory and Application American Journal of Engineering Research ( AJER )," no. 5, pp. 80–88, 2018.
- [13] C. Parisi, "Multiphase Buck Design From Start to Finish ( Part 1 )," no.

APRIL 2017, pp. 1–19, 2021.

- [14] J. Ançay, “Interleaved buck converter current control Software resources Interleaved buck converter principle,” 2025.
- [15] I. M. Pop-Calimanu and F. Renken, “A comparison between single-phase and two-phase Hybrid Buck L converter,” *2016 12th Int. Symp. Electron. Telecommun. ISETC 2016 - Conf. Proc.*, pp. 223–226, 2016, doi: 10.1109/ISETC.2016.7781097.
- [16] M. Dinesh, “Design and Control of Buck Converter using PI control and Reference Design and Control of Buck Converter using PI control and Reference Regulator Technique,” no. June, pp. 3–7, 2020.
- [17] A. Pevere and R. Petrella, “Novel Interleaved Multiphase Proposal for a Three Level Neutral Point Clamped Buck Converter,” no. May, 2015, doi: 10.1109/APEC.2015.7104460.
- [18] X. Zhang, G. Zhang, and S. S. Yu, “Review of Control Techniques for Interleaved Buck Converters : Control Strategies , Efficiency Optimization and Phase Shedding \*,” vol. 11, no. 1, 2025.
- [19] M. Florides, “Interleaved Switching of DC / DC Converters,” no. January 2010, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.12009.49768.
- [20] R. R. Makineni, D. Sutanto, K. M. Muttaqi, R. Islam, and A. P. Agalgaonkar, “Dual Loop Cascade Control of a Stacked Interleaved Buck Converter for Electrolyzer Application,” pp. 1029–1035, 2022.
- [21] M. Trunti, “Voltage and Current-Mode Control for a Buck-Converter based on Measured Integral Values of Voltage and Current Implemented in FPGA,” no. December, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2301935.
- [22] M. T. Iqbal and M. Tariq, “Modeling , Analysis and Control of Different DC-DC Converter Topologies for Photo Voltaic Emulator,” vol. 6, no. 1, pp. 46–55, 2017, doi: 10.11591/ijape.v6i1.pp46-55.
- [23] J. Ançay and G. Fernandez, “Discrete PI controller implementation General principles PI controller structure Controller type Digital implementation,” 2025.
- [24] J. Ançay, “PI based current control,” 2025.
- [25] B. Applications, *Design IEEE Standar for the Design*. 2022.
- [26] C. Engineering, “TECHNICAL SPECIFICATION FOR BATTERY CHARGER.”
- [27] M. Kumar, “Analysis of Conventional and Interleaved Boost Converter with Solar Photovoltaic System,” 2022.