

## IMPLEMENTASI KONVERTER BUCK SEBAGAI PENGKONDISI TEGANGAN INPUT PADA ZERO VOLTAGE SWITCHING (ZVS)

Toha Khoirul Arham<sup>1\*</sup>), Meido Ageng<sup>1</sup>, Muchammad Yusuf<sup>1</sup>, Abdul Syakur<sup>1</sup> dan M. Munadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

E-mail: [thohakh909@outlook.co.id](mailto:thohakh909@outlook.co.id)

### Abstrak

Penelitian ini mengkaji desain, pengujian, dan evaluasi performa konverter buck XL4016 sebagai unit pengkondisi tegangan untuk sistem Zero Voltage Switching (ZVS) pada aplikasi generator tegangan tinggi. Studi ini bertujuan untuk meminimalkan riak tegangan input dan output, memastikan stabilitas operasi jangka panjang, serta mengevaluasi kelayakan komponen seperti kapasitor, induktor, dioda Schottky, dan op-amp LM358. Pengukuran riak tegangan dilakukan pada berbagai level tegangan keluaran (4V hingga 12V), menunjukkan bahwa riak absolut meningkat seiring kenaikan tegangan keluaran, tetapi tetap berada dalam standar industri yang dapat diterima (1%-3% dari tegangan input). Pengujian jangka panjang selama 30 menit pada tegangan keluaran 5,5V menunjukkan performa stabil, dengan riak tegangan berkisar antara 0,4V hingga 0,6V. Penggunaan rangkaian kontrol umpan balik, termasuk pembagi tegangan dan komparator berbasis LM358, memungkinkan pengaturan tegangan keluaran yang presisi dari 1,25V hingga 36V sesuai spesifikasi datasheet XL4016. Evaluasi menunjukkan bahwa komponen yang digunakan cocok untuk mencapai riak rendah dan efisiensi tinggi, sehingga desain ini valid untuk aplikasi tegangan tinggi yang stabil dan andal.

*Kata kunci: Konverter Buck, ZVS, Pengkondisian Tegangan, Riak Tegangan, Stabilitas Sistem, Efisiensi Sistem*

### Abstract

*This research investigates the design, testing, and performance evaluation of the XL4016 buck converter as a voltage conditioning unit for the Zero Voltage Switching (ZVS) system in high-voltage generator applications. The study aims to minimize input and output voltage ripple, ensure long-term operational stability, and evaluate the suitability of components such as capacitors, inductors, Schottky diodes, and LM358 operational amplifiers. Measurements of ripple voltage were performed at various output levels (4V to 12V), revealing that absolute ripple increases with higher output voltage but remains within acceptable industry standards (1%-3% of the input voltage). Long-term testing over 30 minutes at 5.5V output demonstrated stable performance, with ripple voltage maintained between 0.4V and 0.6V. The use of feedback control circuitry, including a voltage divider and LM358-based comparator, enabled precise output voltage adjustment from 1.25V to 36V as specified in the XL4016 datasheet. The evaluation confirms that the components used are well-suited for achieving low ripple and high efficiency, validating the design for reliable and stable high-voltage applications.*

*Keywords: Buck converter, ZVS, voltage conditioning, voltage ripple, system stability, system efficiency*

### 1. Pendahuluan

Indonesia adalah negara agraris, di mana sekitar 40% penduduknya bergantung pada sektor pertanian. Pertanian memiliki peran penting dalam perekonomian dan pemenuhan kebutuhan pangan masyarakat, apalagi dengan meningkatnya jumlah penduduk yang menyebabkan kebutuhan pangan juga semakin besar. Untuk meningkatkan produksi pangan, petani memiliki dua opsi: membuka lahan baru atau meningkatkan produktivitas

lahan yang ada. Sebagian besar petani lebih memilih untuk meningkatkan produktivitas karena pembukaan lahan baru memerlukan biaya yang sangat tinggi [1]. Peningkatan produktivitas dilakukan dengan cara perawatan tanaman yang intensif, salah satunya dengan memberikan nutrisi yang diperlukan, seperti nitrogen. Nitrogen memainkan peran vital dalam pertumbuhan tanaman karena berfungsi untuk membentuk asam amino, komponen dasar protein, dan klorofil yang diperlukan untuk fotosintesis. Proses siklus nitrogen yang terjadi dalam tanah mengubah

nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman, seperti nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dan amonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), dengan bantuan mikroorganisme di tanah [2]. Untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen dalam pertanian, diperlukan teknologi yang dapat mengoptimalkan penggunaan nitrogen dari sumber yang tersedia. Salah satu teknologi inovatif yang dapat digunakan adalah pemanfaatan tegangan tinggi impuls untuk mempercepat proses pengolahan bahan pupuk cair. Tegangan tinggi impuls ini dapat meningkatkan kadar nitrogen, yang berfungsi sebagai akselerator dalam proses tersebut. Dalam rangka pengembangan teknologi ini, diperlukan purwarupa reaktor plasma untuk meningkatkan kualitas air pertanian dengan menerapkan pelepasan korona pada air yang akan diamati kadar nitrogen (N) setelah pengaplikasiannya. Namun, untuk memastikan operasi yang aman dan stabil dari generator tegangan tinggi, diperlukan metode pengkondisian tegangan yang efektif untuk mengontrol masukan daya [4][5]. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk pengkondisian tegangan adalah konverter buck, yang dapat menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan sistem melalui pengaturan duty cycle [6][7][8][9]. Dalam penelitian ini, konverter buck digunakan sebagai unit pengkondisi tegangan untuk rangkaian Zero Voltage Switching (ZVS), yang bertujuan untuk mengurangi rugi daya dan meningkatkan efisiensi pengoperasian sistem [10][11].

Rangkaian ZVS sangat bergantung pada masukan tegangan yang stabil dan bersih, sehingga pengkondisian tegangan oleh konverter buck berfungsi untuk meminimalkan riak tegangan dan menjaga kestabilan output [12][13]. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi efektivitas konverter buck sebagai unit pengkondisi tegangan bagi rangkaian ZVS dengan fokus pada analisis stabilitas tegangan, karakteristik keluaran, dan efisiensi sistem [14][15]. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah sebagai berikut: pertama, mengukur riak tegangan pada berbagai level tegangan keluaran yang dihasilkan oleh konverter buck untuk menilai fluktuasi tegangan pada setiap levelnya. Kedua, menganalisis pengaruh fluktuasi tegangan terhadap kestabilan sistem dan kemampuan konverter buck dalam menjaga tegangan keluaran yang konsisten untuk rangkaian ZVS. Ketiga, mengukur daya yang disuplai ke rangkaian ZVS pada setiap level tegangan keluaran untuk mengevaluasi kestabilan daya yang diberikan. Selanjutnya, penelitian ini juga akan menguji kestabilan jangka panjang untuk memastikan apakah konverter buck dapat menjaga kestabilan tegangan dan daya dalam pengoperasian yang lebih lama. Terakhir, penelitian ini bertujuan untuk menilai performa konverter buck dalam menangani tegangan rendah dan tinggi serta kemampuan konverter dalam memberikan tegangan yang stabil pada sistem ZVS.

## 2. Metode

### 2.1 Desain Pengujian

Pengujian bertujuan untuk menguji performa konverter buck sebagai unit pengkondisi tegangan untuk rangkaian Zero Voltage Switching (ZVS) dan transformer flyback dalam sistem generator tegangan tinggi DC. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa konverter buck mampu menyediakan tegangan output yang stabil dan sesuai kebutuhan rangkaian ZVS serta untuk mengevaluasi efisiensi konverter dalam menjaga kestabilan tegangan output.

#### 2.1.1 Spesifikasi Konsep Produk

Pendekatan pengujian dilakukan dengan metode pengukuran langsung pada output konverter buck yang dihubungkan ke rangkaian ZVS dan flyback. Pengujian ini dilakukan dalam kondisi *steady-state* untuk mengumpulkan data terkait stabilitas tegangan output dan efisiensi sistem. Voltmeter digunakan sebagai alat pemantau tegangan output konverter sekaligus sebagai umpan balik untuk pengaturan operasional. Hierarki kebutuhan disusun untuk mengidentifikasi kebutuhan utama yang dianggap paling penting dan memiliki dampak besar terhadap keberhasilan desain produk. Hierarki kebutuhan produk ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1. Hierarki kebutuhan produk

No	Need Statement	Importance
1	Alat praktis dan mudah digunakan	5
2	Memastikan tegangan output yang stabil pada berbagai level	5
3	Meminimalkan riak tegangan (Vripple) untuk memastikan kualitas output yang tinggi	5
4	Menjaga operasi yang stabil untuk jangka waktu yang lama, hingga 30 menit	5
5	Kompatibel sepenuhnya dengan input 24V sambil memberikan konversi tegangan yang efisien dan stabil.	5
6	Menyediakan suplai daya yang stabil dan andal untuk mendukung sistem sensitif seperti ZVS	5
7	Biaya murah	3
8	Ukuran <i>compact</i>	2
9	Memiliki bobot yang ringan	2
10	Tersedia dan mudah dijangkau di Indonesia	5

### 2.1.2 Matriks Morfologi Sistem

Metode morfologi digunakan untuk menghasilkan solusi alternatif dalam proses desain dengan memetakan semua kemungkinan kombinasi komponen yang dapat digunakan untuk memenuhi fungsi-fungsi yang diperlukan dalam sistem. Pada tabel "Matriks Morfologi Komponen," setiap sub-fungsi diberikan beberapa alternatif solusi yang dapat dipilih untuk membentuk konsep produk secara keseluruhan. Dalam hal ini, sub-fungsi utama adalah pengkondisi tegangan input untuk rangkaian ZVS dan menampilkan tegangan output sebagai umpan balik operasi. Sub-fungsi pertama, pengkondisi tegangan input ZVS, mencakup berbagai IC konverter buck populer yang sesuai dengan kebutuhan teknis sistem. Sub-fungsi kedua, menampilkan tegangan output konverter buck, mencakup alternatif voltmeter digital dan analog, yang masing-masing memiliki kelebihan sesuai dengan aplikasi dan desain produk. Proses kombinasi solusi dari setiap sub-fungsi memungkinkan eksplorasi berbagai konsep desain, yang nantinya dapat diseleksi berdasarkan kriteria teknis, efisiensi, dan kesesuaian dengan tujuan sistem. Matriks morfologi komponen ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Matriks morfologi komponen

Sub-Fungsi	Sub-Fungsi 1	Sub-Fungsi 2	
Pengkondisi tegangan input ZVS	Konverter buck	XL4016	A.1
		XL4015	A.2
		MP1584	A.3
		LM2596	A.4
		LM2675	A.5
		LM2576	A.6
Menampilkan tegangan output konverter buck untuk umpan balik operasi	Voltmeter	Voltmeter digital	B.1
		Voltmeter analog	B.2

Untuk menemukan alternatif solusi dari konsep produk yang akan dibuat dibentuklah kombinasi-kombinasi solusi yang terdiri dari satu solusi dari setiap sub-fungsi dan sub-sub-fungsi. Penggunaan voltmeter analog dianggap tidak praktis dan lebih mahal dibandingkan voltmeter digital, sehingga tidak dipilih untuk kombinasi solusi. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya adalah biaya produksi yang lebih tinggi akibat komponen mekanis tambahan seperti jarum dan mekanisme koil. Selain itu, voltmeter analog memiliki tingkat akurasi yang lebih rendah, terutama ketika digunakan untuk memantau perubahan tegangan kecil yang memerlukan presisi tinggi. Potensi kesalahan pembacaan akibat parallax (kesalahan sudut pandang) juga menjadi kelemahan utama yang dapat memengaruhi konsistensi hasil pengukuran. Dalam hal kompatibilitas, voltmeter analog tidak mudah diintegrasikan dengan sistem digital modern yang memerlukan fitur pencatatan data atau antarmuka digital.

Oleh karena itu, voltmeter digital dipilih karena memberikan hasil pengukuran yang lebih akurat, lebih mudah digunakan, lebih ekonomis, dan lebih andal dalam jangka panjang. Dengan demikian, kombinasi yang menggunakan voltmeter analog dihilangkan dari alternatif solusi. Dari Tabel 2 didapatkan 6 alternatif konsep terbaik sebagai berikut:

- Konsep 1 = A.1 + B.1
- Konsep 2 = A.2 + B.1
- Konsep 3 = A.3 + B.1
- Konsep 4 = A.4 + B.1
- Konsep 5 = A.5 + B.1
- Konsep 6 = A.6 + B.1

### 2.1.3 Pemilihan Konsep

Metode Pugh digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan beberapa alternatif solusi berdasarkan kriteria tertentu yang telah ditentukan. Setiap alternatif dibandingkan terhadap konsep referensi (baseline) dengan menggunakan simbol "+" untuk kinerja yang lebih baik, "0" untuk kinerja yang setara, dan "-" untuk kinerja yang lebih rendah. Setiap kriteria memiliki bobot yang mencerminkan tingkat kepentingannya dalam proyek. Dengan menjumlahkan bobot dari nilai positif dan negatif, metode ini memberikan hasil terukur untuk menentukan alternatif terbaik secara objektif. Matriks pugh ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3. Matriks pugh

Kriteria	Bobot	Konsep					
		1	2	3	4	5	6
Stabilitas tegangan output	5	0	0	-	0	-	0
Minimalisasi riak tegangan	5	0	0	-	0	-	0
Efisiensi	4	0	0	+	-	-	-
Harga	2	0	+	-	+	-	0
Ketersediaan	4	+	+	0	+	-	+
Kompabilitas	4	0	0	-	0	-	0
Rentang tegangan	5	+	0	-	-	-	-
Rentang arus	5	+	0	-	-	-	-
Total bobot +		14	6	4	6	0	4
Total bobot -		0	0	26	1	34	1
Total bobot keseluruhan		14	6	-22	-8	-34	-10

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 3, berikut adalah skor total dari masing-masing konsep:

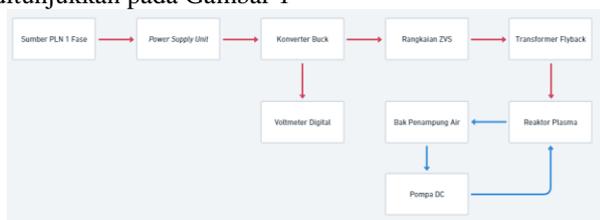
Konsep 1: Total bobot keseluruhan = 14

- Konsep 2: Total bobot keseluruhan = 6
- Konsep 3: Total bobot keseluruhan = -22
- Konsep 4: Total bobot keseluruhan = -8
- Konsep 5: Total bobot keseluruhan = -34
- Konsep 6: Total bobot keseluruhan = -10

Konsep 1 mendapatkan skor tertinggi dengan total bobot keseluruhan sebesar 14, menjadikannya solusi terbaik berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan. Kombinasi penggunaan IC XL4016 sebagai pengkondisi tegangan dan voltmeter digital sebagai alat tampilan memberikan keunggulan dalam hal stabilitas tegangan, minimalisasi riak, efisiensi, kompatibilitas, serta kemampuan menangani rentang tegangan dan arus yang luas. Selain itu, voltmeter digital juga memberikan keuntungan berupa akurasi tinggi, biaya yang lebih rendah, dan kemudahan integrasi dengan sistem modern.

## 2.2 Rancangan Sistem

Bagian ini menjelaskan rancangan sistem untuk mencapai tujuan penelitian, yang dirancang untuk mengatur tegangan input yang stabil bagi rangkaian ZVS dan memastikan bahwa keluaran yang dihasilkan memenuhi kriteria stabilitas yang diharapkan. Diagram blok system ditunjukkan pada Gambar 1

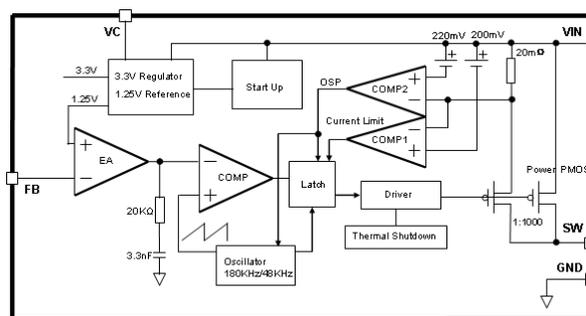


Gambar 1. Diagram blok sistem

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem secara keseluruhan. Pada penelitian ini bagian yang akan dibahas adalah konverter buck yang berfungsi sebagai pengkondisi tegangan dan voltmeter digital yang berfungsi sebagai monitoring tegangan untuk umpan balik operasi.

### 2.2.1 Konverter Buck XL4016

Konverter buck XL4016 dipilih berdasarkan fitur-fitur yang mendukung tujuan penelitian, yaitu XL4016 dikenal memiliki efisiensi konversi yang tinggi, yang membantu mengurangi kerugian daya dan panas yang dihasilkan selama proses konversi tegangan. Konverter ini memiliki kemampuan untuk menurunkan dan mengatur tegangan input dengan baik, sambil mengurangi riak tegangan yang mungkin terjadi selama proses switching. Hal ini penting untuk memastikan tegangan keluaran yang stabil dan mengoptimalkan kinerja rangkaian ZVS dan transformator flyback dalam penelitian ini. Diagram blok fungsi IC XL4016 ditunjukkan pada Gambar 2

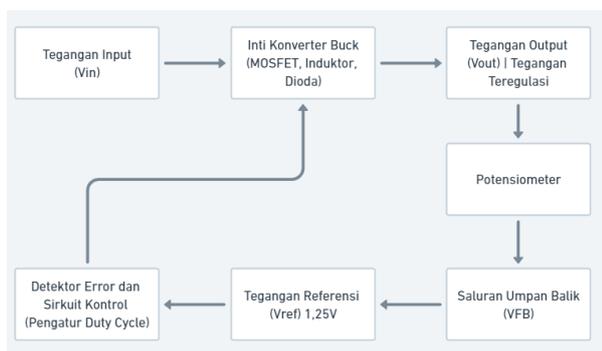


Gambar 2. Diagram blok fungsi IC XL4016

Pada Gambar 2 ditunjukkan diagram blok fungsi IC XL4016. Setiap blok dalam diagram memiliki peran khusus untuk memastikan operasi XL4016 yang stabil dan efisien. Fitur utama meliputi osilator untuk mengontrol frekuensi switching, penguat kesalahan (error amplifier) untuk umpan balik tegangan, pembatas arus untuk perlindungan, dan thermal shutdown untuk menjaga keamanan. Komponen-komponen ini bekerja sama untuk mengatur tegangan output dan meminimalkan kehilangan daya, sehingga membuat IC ini cocok untuk berbagai aplikasi. Berikut penjelasan tiap komponen:

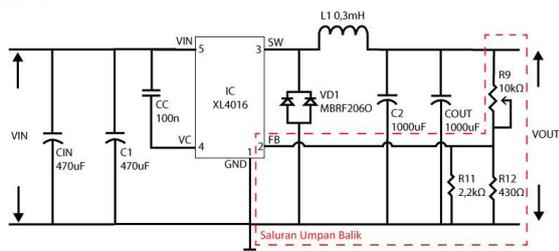
- 3,3 V / 1,25 V Reference Regulator menghasilkan tegangan referensi yang stabil (3,3 V dan 1,25 V) yang digunakan secara internal oleh sirkuit kontrol.
- Error Amplifier (EA) membandingkan tegangan umpan balik dari pin FB dengan tegangan referensi internal 1,25 V. Perbedaan (kesalahan) diperkuat dan digunakan untuk mengontrol siklus kerja sakelar internal guna mengatur tegangan output.
- PWM Comparator (COMP) membandingkan output dari error amplifier dengan sinyal tanjakan yang dihasilkan oleh osilator internal untuk mengontrol siklus kerja sakelar.
- Current Limit Comparator (COMP1) melindungi konverter dengan membatasi arus yang melalui sakelar. Jika arus melebihi ambang batas tertentu, sakelar dimatikan.
- Thermal Shutdown adalah fitur proteksi yang menonaktifkan sakelar jika suhu IC melebihi batas aman untuk mencegah overheating.
- Driver dan PMOS mengontrol sakelar PMOS internal, menyalakan dan mematikannya sesuai dengan siklus kerja yang ditentukan oleh pembanding PWM.

Secara keseluruhan, komponen-komponen ini bekerja bersama untuk memastikan operasi yang stabil, mengatur tegangan output, serta melindungi konverter dari kondisi arus berlebih dan suhu yang terlalu tinggi. Diagram blok umpan balik konverter buck XL4016 ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3. Diagram blok umpan balik konverter buck XL4016

Pada Gambar 3 ditunjukkan diagram blok cara kerja mekanisme umpan balik pada konverter buck, di mana tegangan output ( $V_{out}$ ) dipantau dan disesuaikan untuk menjaga kestabilan. Konverter XL4016 menggunakan mekanisme umpan balik untuk menjaga stabilitas tegangan outputnya. Pada diagram blok di atas, tegangan input ( $V_{in}$ ) dari sumber daya 24V memasuki inti konverter buck, yang terdiri dari MOSFET, induktor, dan dioda. Inti konverter ini bekerja untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang sesuai, yang kemudian diberikan kepada beban sebagai tegangan teregulasi ( $V_{out}$ ). Tegangan output ini dipantau melalui saluran umpan balik (VFB) yang mengirim sinyal kembali ke sirkuit kontrol. Sistem umpan balik ini berfungsi dengan membandingkan tegangan VFB dengan tegangan referensi internal ( $V_{ref}$ ), yang ditetapkan pada 1,25V. Jika tegangan output ( $V_{out}$ ) yang dibaca oleh IC konverter mengalami perubahan yang menyebabkan VFB tidak sesuai dengan  $V_{ref}$ , detektor error akan mendeteksi perbedaan tersebut. Sirkuit kontrol kemudian melakukan penyesuaian pada duty cycle MOSFET untuk mengembalikan tegangan output ke level yang diinginkan. Dengan cara ini, mekanisme umpan balik dalam konverter XL4016 memastikan bahwa tegangan output tetap stabil meskipun terjadi perubahan pada beban atau tegangan input. Potensiometer dapat digunakan untuk mengatur tegangan output dengan cara merubah nilai VFB yang dibaca  $V_{ref}$ , menyebabkan perubahan *duty cycle*, merubah tegangan output konverter.  $V$  ditunjukkan pada Gambar 4

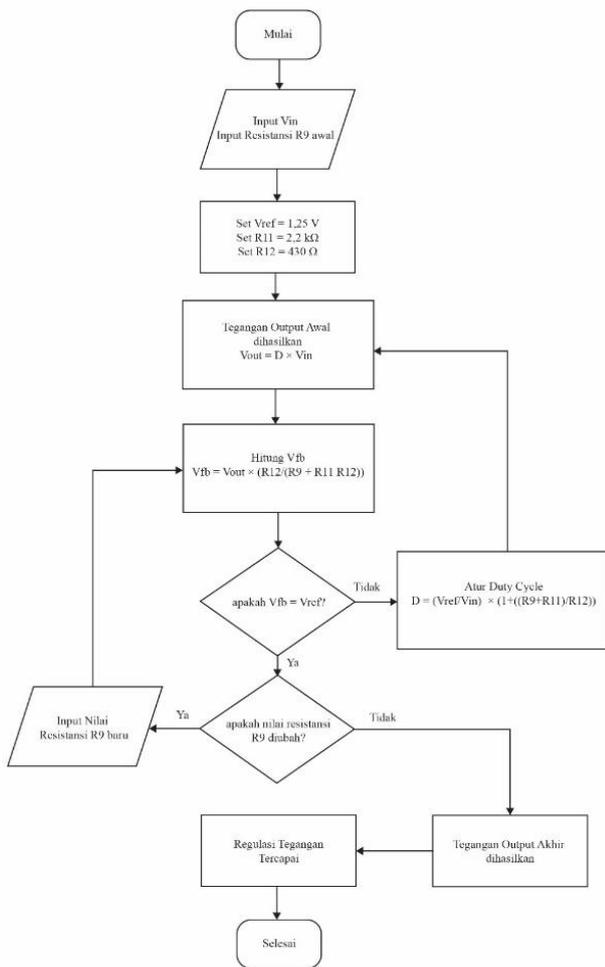


Gambar 4. Rangkaian ekuivalen konverter buck XL4016

Pada Gambar 4, ditunjukkan rangkaian ekuivalen konverter buck XL4016E1 dalam pengaturan tegangan output. Rangkaian ini terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja bersama untuk menghasilkan tegangan output yang stabil. Tegangan input 24V disuplai ke rangkaian melalui pin VIN pada IC XL4016. Tegangan ini akan diolah oleh IC untuk menghasilkan tegangan output yang lebih rendah dan stabil. Dua kapasitor input ( $C_{IN}$  dan  $C_1$ ), masing-masing dengan kapasitansi  $470\mu F$ , berfungsi untuk menyaring fluktuasi tegangan dan noise pada jalur input, memastikan bahwa tegangan yang diterima IC stabil, dan mengurangi gangguan pada operasi switching IC. Kapasitor *decoupling* ( $CC$ ), dengan nilai kapasitansi  $100nF$ , terhubung antara pin VC dan VIN untuk menstabilkan sinyal pada bagian kontrol internal IC, mencegah osilasi yang tidak diinginkan, dan menjaga kestabilan operasi. Induktor ( $L_1$ ), dengan nilai  $0,3mH$ , menyimpan energi saat switch internal dalam kondisi ON dan melepaskan energi tersebut ke beban saat switch OFF, membantu menghasilkan tegangan DC yang stabil di output dan mengurangi riak tegangan. Dioda Schottky ( $VD_1$ ), jenis MBRF2060, berfungsi sebagai jalur arus balik ketika switch internal dimatikan. Dioda ini memiliki waktu pemulihan cepat dan drop tegangan maju rendah, meningkatkan efisiensi konverter dengan mengurangi kerugian daya selama transisi switching. Kapasitor output ( $C_2$  dan  $C_{OUT}$ ), masing-masing dengan kapasitansi  $1000\mu F$ , ditempatkan pada jalur output untuk meratakan tegangan dan mengurangi riak atau noise yang masih ada setelah proses switching. Saluran umpan balik, yang terdiri dari potensiometer  $R_9$  ( $10k\Omega$ ),  $R_{11}$  ( $2,2k\Omega$ ), dan  $R_{12}$  ( $430\Omega$ ), membentuk jaringan pembagi tegangan untuk mengatur tegangan umpan balik (VFB) yang dikirimkan ke pin FB pada IC. Tegangan umpan balik ini dibandingkan dengan tegangan referensi internal  $1,25V$ , dan jika terdapat perbedaan, IC akan menyesuaikan duty cycle untuk mencapai tegangan output yang diinginkan. Secara keseluruhan, komponen-komponen ini bekerja bersama untuk memastikan konverter buck berfungsi dengan efisien, memberikan tegangan output yang stabil dan mengurangi riak tegangan pada sistem.

## 2.2.2 Diagram Alir Operasi Regulasi Tegangan Konverter Buck XL4016

Diagram alir digunakan untuk menjelaskan tentang alur proses regulasi tegangan yang terjadi dalam konverter buck XL4016. Diagram alir proses regulasi tegangan konverter buck XL4016 ditunjukkan pada Gambar 5



Gambar 5. Diagram alir proses regulasi tegangan konverter buck XL4016

Pada Gambar 5 ditampilkan alur proses regulasi tegangan menggunakan saluran umpan balik dari konverter buck XL4016. Proses ini mengilustrasikan langkah-langkah untuk mencapai stabilisasi tegangan output dengan menggunakan komponen-komponen utama seperti tegangan referensi, resistor pembagi tegangan, dan pengaturan *duty cycle*.

1. Mulai

Proses dimulai dengan menginput nilai tegangan input  $V_{in}$  dan nilai resistansi awal dari potensiometer R9. Nilai-nilai ini akan menjadi dasar untuk perhitungan awal dalam rangkaian.

2. Pengaturan Nilai Awal

Pada langkah ini, nilai tegangan referensi  $V_{ref} = 1,25 \text{ V}$ , resistansi  $R_{11} = 2,2 \text{ k}\Omega$ , dan resistansi  $R_{12} = 430 \Omega$  diatur. Nilai-nilai ini akan digunakan dalam perhitungan untuk menghasilkan tegangan output awal. Tegangan output awal dihasilkan menggunakan rumus

$$V_{out} = V_{in} \times D \tag{1}$$

dimana D adalah *duty cycle* dari konverter buck.

3. Perhitungan Tegangan Umpan Balik (Vfb)

Tegangan umpan balik  $V_{fb}$  dihitung menggunakan persamaan:

$$V_{fb} = V_{out} \times \left( \frac{R_{12}}{R_{12} + R_9 + R_{11}} \right) \tag{2}$$

Nilai ini dibandingkan dengan tegangan referensi  $V_{ref}$  untuk menentukan apakah tegangan output perlu disesuaikan.

4. Perbandingan  $V_{fb}$  dengan  $V_{ref}$

Langkah berikutnya adalah membandingkan nilai  $V_{fb}$  dengan  $V_{ref}$ . Jika  $V_{fb}$  tidak sama dengan  $V_{ref}$ , maka *duty cycle*  $D$  akan diatur ulang menggunakan rumus:

$$D = \frac{V_{ref}}{V_{in}} \times \left( 1 + \frac{R_9 + R_{11}}{R_{12}} \right) \tag{3}$$

Ini memungkinkan penyesuaian tegangan output untuk mendekati nilai yang diinginkan.

5. Penyesuaian atau Pengubahan Nilai R9

Jika  $V_{ref}$  sudah sama dengan  $V_{fb}$ , maka akan diperiksa apakah resistansi R9 telah diubah. Jika R9 diubah, nilai baru akan dimasukkan, dan proses regulasi akan diulang untuk menghitung tegangan output yang dihasilkan.

6. Tegangan Output Akhir

Setelah penyesuaian selesai dan  $V_{fb}$  sama dengan  $V_{ref}$ , tegangan output akhir dihasilkan, dan proses regulasi tegangan dianggap tercapai.

7. Regulasi Tegangan Tercapai

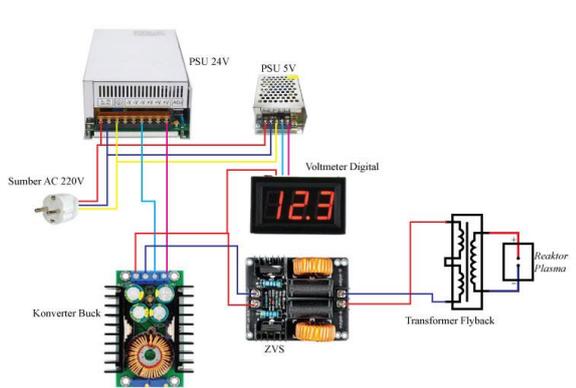
Proses regulasi tegangan dinyatakan selesai ketika tegangan output sesuai dengan tegangan referensi yang diharapkan, yang menandakan bahwa sistem telah mencapai stabilisasi tegangan yang diinginkan.

8. Selesai

Proses berakhir setelah tegangan output stabil dan sesuai dengan nilai yang diinginkan.

### 2.3 Rancangan Perangkat Keras

Bagian ini menjelaskan rancangan perangkat keras yang digunakan dalam penelitian, termasuk koneksi antar komponen dan diagram pengkabelan sistem. Diagram pengkabelan sistem ditunjukkan pada Gambar 6



Gambar 6. Diagram pengkabelan sistem

Diagram pengkabelan pada Gambar 6 menunjukkan bagaimana komponen-komponen utama dalam sistem dirangkai untuk memastikan alur tegangan yang stabil dan efisien. PSU 24V digunakan sebagai sumber daya utama dan terhubung ke input konverter buck. Konverter buck kemudian menurunkan dan mengkondisikan tegangan untuk menghasilkan output yang stabil sesuai kebutuhan. Tegangan output dari konverter buck ini dihubungkan ke input rangkaian ZVS dan transformer flyback. Voltmeter digital ditempatkan setelah konverter buck untuk memantau tegangan output secara *real-time*, memastikan bahwa tegangan telah terjaga stabilitasnya dan memiliki riak tegangan yang minimal. Rangkaian ini dirancang untuk memastikan bahwa input tegangan ke ZVS telah melalui tahap pengkondisian yang optimal oleh konverter buck, sehingga rangkaian ZVS dan transformer flyback dapat beroperasi dengan optimal, menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai untuk aplikasi yang diinginkan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

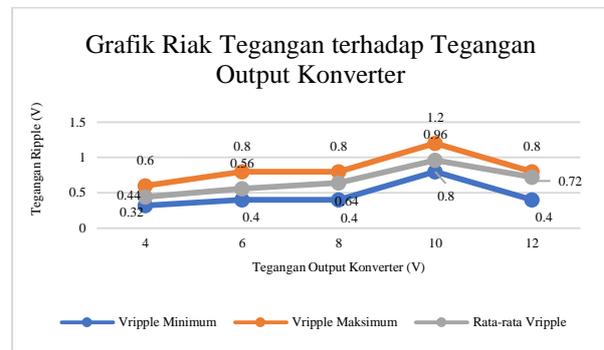
#### 3.1 Analisis Riak Tegangan

Riak tegangan Vripple dihitung sebagai selisih antara  $V_{max}$  dan  $V_{min}$ . Nilai ini penting untuk mengevaluasi kualitas penyaringan pada konverter buck. Data analisis riak tegangan ditunjukkan pada Tabel 4

Tabel 4. Data analisis riak tegangan

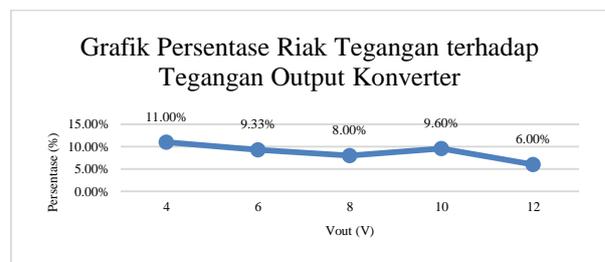
Vout (V)	Vripple Minimum (V)	Vripple Maksimum (V)	Rata-rata Vripple (V)	Persentase Vripple (%)
4	0,32	0,6	0,44	11,00%
6	0,4	0,8	0,56	9,33%
8	0,4	0,8	0,64	8,00%
10	0,8	1,2	0,96	9,60%
12	0,4	0,8	0,72	6,00%

Grafik riak tegangan terhadap tegangan output konverter ditunjukkan pada Gambar 7



Gambar 7. Grafik riak tegangan terhadap tegangan output konverter

Pada Gambar 7 menunjukkan hubungan antara riak tegangan terhadap tegangan output konverter pada berbagai level tegangan keluaran. Riak tegangan dibagi menjadi tiga kategori, yaitu riak tegangan minimum, riak tegangan maksimum, dan rata-rata riak tegangan. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa riak tegangan absolut meningkat seiring dengan peningkatan tegangan keluaran. Pada  $V_{out} = 4$  V, riak tegangan minimum tercatat sekitar 0,32 V, sedangkan riak tegangan maksimum tercatat sekitar 0,44 V. Sebagai perbandingan, pada  $V_{out} = 12$  V, riak tegangan maksimum meningkat signifikan menjadi 1,2 V, dan riak tegangan minimum tercatat sekitar 0,4 V. Fluktuasi riak tegangan pada tegangan keluaran lebih tinggi menunjukkan bahwa peningkatan tegangan menyebabkan peningkatan riak tegangan. Hal ini disebabkan oleh penurunan efisiensi penyaringan pada tegangan yang lebih tinggi, yang memungkinkan lebih banyak fluktuasi tegangan yang tercatat. Meskipun riak tegangan lebih besar pada tegangan yang lebih tinggi, peningkatan tersebut menunjukkan bahwa sistem masih beroperasi dalam batas yang dapat diterima. Grafik persentase riak tegangan terhadap tegangan output konverter ditunjukkan pada Gambar 8



Gambar 8. Grafik persentase riak tegangan terhadap tegangan output konverter

Pada grafik di atas, ditunjukkan hubungan antara persentase riak tegangan dan tegangan keluaran pada

konverter buck. Persentase riak tegangan dihitung dengan membandingkan nilai riak (baik minimum maupun maksimum) terhadap tegangan keluaran  $V_{out}$  memberikan gambaran tentang seberapa besar fluktuasi tegangan yang terjadi pada setiap level tegangan keluaran. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa pada tegangan keluaran rendah  $V_{out} = 4\text{ V}$  persentase riak tegangan adalah yang paling tinggi, yaitu 11,00%. Ini menunjukkan bahwa pada tegangan yang lebih rendah, fluktuasi tegangan lebih besar dibandingkan dengan tegangan keluarannya. Artinya, sistem tidak dapat menjaga kestabilan tegangan dengan sangat baik pada tegangan rendah. Namun, ketika tegangan keluaran meningkat menjadi  $V_{out} = 6\text{ V}$  dan  $V_{out} = 8\text{ V}$ , persentase riak mulai menurun secara bertahap, dengan nilai sekitar 9,33% dan 8,00%. Ini menunjukkan bahwa konverter buck bekerja lebih stabil pada tegangan yang lebih tinggi, dengan fluktuasi yang lebih kecil relatif terhadap tegangan keluaran. Pada  $V_{out} = 10\text{ V}$ , terjadi peningkatan kecil dalam persentase riak menjadi 9,60%, yang dapat disebabkan oleh penurunan efisiensi penyearangan atau kerugian pada komponen konverter pada tegangan lebih tinggi. Namun, pada akhirnya, pada tegangan keluaran 12 V, persentase riak turun lagi menjadi 6,00%, yang menunjukkan bahwa pada tegangan yang lebih tinggi, konverter buck dapat mengurangi fluktuasi tegangan relatif dengan lebih efektif. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada tegangan rendah, fluktuasi tegangan relatif lebih besar, yang berarti konverter buck membutuhkan peningkatan penyearangan atau komponen filter tambahan. Sebaliknya, pada tegangan lebih tinggi, meskipun riak absolut lebih besar, persentase riak lebih rendah, yang menunjukkan bahwa konverter buck lebih stabil dan dapat mengelola fluktuasi dengan lebih baik. Penurunan persentase riak pada tegangan tinggi menunjukkan performa penyearangan yang lebih baik pada tegangan yang lebih besar. Perbandingan hasil simulasi dan pengujian ditunjukkan pada Tabel 5

Tabel 5 Perbandingan hasil simulasi dan pengujian

$V_{out}$ (V)	Vripple Simulasi (V)	Persentase Vripple Simulasi (%)	Vripple Pengujian (V)	Persentase Vripple Pengujian (%)
6	0,58	9,6%	0,56	9,33%
8	0,64	8%	0,64	8,00%
10	0,89	8,9%	0,96	9,60%
12	0,74	6,16%	0,72	6,00%

Hasil pengujian riak tegangan output pada konverter buck menunjukkan perbedaan kecil dibandingkan hasil simulasi menggunakan Multisim, meskipun tren perubahan riak tegangan tetap konsisten. Riak tegangan pada pengujian

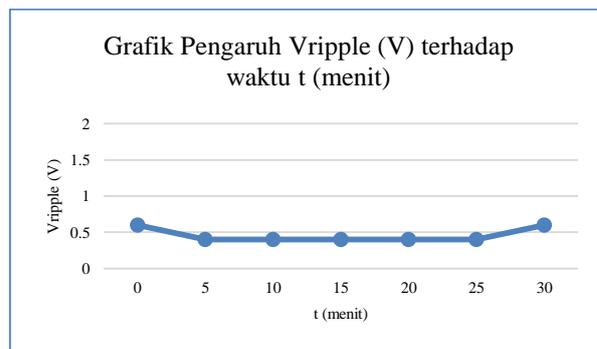
nyata cenderung lebih tinggi akibat karakteristik komponen nyata, seperti ESR kapasitor, resistansi parasitik, dan switching losses pada MOSFET dan dioda Schottky, yang tidak sepenuhnya dimodelkan dalam simulasi. Dalam Multisim, model SPICE sering memanfaatkan parameter ideal atau semi-ideal, sehingga menghasilkan riak tegangan lebih rendah dan performa yang lebih stabil. Faktor lain, seperti noise dan fluktuasi frekuensi PWM dalam pengujian fisik, juga memengaruhi kestabilan riak tegangan dibandingkan hasil simulasi. Perbedaan ini wajar dan dapat dijelaskan secara teoritis. Pengujian menunjukkan bahwa riak absolut meningkat seiring kenaikan tegangan keluaran, tetapi persentase riak menurun pada tegangan lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa konverter tetap bekerja dalam batas toleransi yang dapat diterima. Untuk hasil simulasi yang lebih akurat, penggunaan model SPICE dengan parameter seperti ESR dan switching losses dapat meningkatkan representasi kondisi nyata.

### 3.2 Pengujian Stabilitas Operasi Jangka Panjang

Pengujian dilakukan pada  $V_{out} = 5.5\text{ V}$  selama 30 menit untuk mengevaluasi kestabilan operasi. Data diambil setiap 5 menit untuk memonitor perubahan riak tegangan dan efisiensi. Data pengujian stabilitas operasi jangka panjang ditunjukkan pada Tabel 6 dan Grafik pengaruh vripple (v) terhadap waktu t (menit) ditunjukkan pada Gambar 9

Tabel 6. Data pengujian stabilitas operasi jangka panjang

t (menit)	$V_{min}$ (V)	$V_{max}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$I_{out}$ (A)	Vripple (V)
0	5,2	5,8	0,09	0,21	0,6
5	5,4	5,8	0,07	0,21	0,4
10	5,4	5,8	0,07	0,21	0,4
15	5,4	5,8	0,06	0,21	0,4
20	5,4	5,8	0,06	0,21	0,4
25	5,4	5,8	0,06	0,21	0,4
30	5,4	6	0,07	0,21	0,6



Gambar 9. Grafik pengaruh vripple (v) terhadap waktu t (menit)

Pada Gambar 9 ditunjukkan pengaruh waktu terhadap riak tegangan pada konverter buck selama 30 menit pengujian. Data yang diambil setiap 5 menit menunjukkan bahwa riak tegangan tetap stabil sepanjang waktu pengujian. Nilai riak tegangan berkisar antara 0.4 V hingga 0.6 V, dengan sedikit fluktuasi antara titik-titik waktu yang berbeda. Dari data yang tercatat, dapat dilihat bahwa pada waktu awal ( $t = 0$  menit), riak tegangan adalah 0.6 V, yang sedikit menurun pada 5 menit pertama menjadi 0.4 V. Setelah itu, riak tegangan tetap stabil di sekitar 0.4 V hingga 0.6 V, dengan fluktuasi kecil pada interval waktu selanjutnya. Hal ini menunjukkan bahwa konverter buck dapat mempertahankan kestabilan dalam jangka waktu yang cukup lama tanpa adanya penurunan atau lonjakan riak tegangan yang signifikan. Stabilitas ini menunjukkan bahwa konverter buck berfungsi dengan baik dalam memberikan tegangan keluaran yang konsisten meskipun diuji dalam durasi panjang. Dengan demikian, pengujian ini membuktikan bahwa konverter buck yang digunakan dapat menjaga stabilitas tegangan pada jangka panjang dengan fluktuasi riak tegangan yang minimal, yang mengindikasikan performanya yang andal untuk aplikasi yang memerlukan kestabilan tegangan terus-menerus.

### 3.3 Pengujian Duty Cycle terhadap Saluran Umpan Balik

Pengujian dilakukan dengan memvariasikan nilai resistansi pada saluran umpan balik untuk mengevaluasi kinerja saluran umpan balik pada desain ini dengan  $V_{in} = 24$  V. Hubungan resistansi  $R_1$  terhadap  $V_{out}$  ditunjukkan pada Tabel 7

Tabel 7 Hubungan resistansi  $R_1$  terhadap  $V_{out}$

$R_1$ Potensiometer ( $\Omega$ )	$V_{out}$ (V)	Duty Cycle
1000	4,73	0,197
2000	8,21	0,342
3000	11,68	0,487
4000	15,16	0,632
5000	18,64	0,777
6000	22,12	0,922
7000	24	1

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan output  $V_{out}$  meningkat seiring dengan kenaikan nilai  $R_1$  (potensiometer). Pada nilai  $R_1 = 1000 \Omega$ , tegangan output tercatat sebesar 4,70V dengan duty cycle sebesar 0,196.

Nilai ini terus meningkat seiring dengan kenaikan  $R_1$ , di mana pada  $R_1 = 7000 \Omega$ , tegangan output mencapai 24V yang sama dengan tegangan input, dengan duty cycle sebesar 1. Setelah nilai  $R_1$  melebihi  $7000 \Omega$ , tegangan output tetap berada pada 24V dan duty cycle tidak melebihi 1.000, menunjukkan bahwa konverter telah mencapai batas maksimum operasinya. Kondisi ini sesuai dengan prinsip dasar konverter buck, di mana tegangan output tidak dapat melebihi tegangan input ( $V_{out} \leq V_{in}$ ). Pada nilai  $R_1$  yang lebih rendah dari  $7000 \Omega$ , konverter bekerja secara optimal dengan tegangan output yang stabil dan duty cycle yang proporsional terhadap perubahan nilai  $R_1$ . Sementara itu, pada  $R_1 > 7000 \Omega$ , kestabilan tegangan output tetap terjaga di 24V, menunjukkan performa saluran umpan balik yang baik dalam mempertahankan tegangan output pada nilai maksimum yang diizinkan.

### 4. Kesimpulan

Riak tegangan pada berbagai level tegangan keluaran berhasil diukur dan dianalisis. Hasil menunjukkan bahwa riak absolut meningkat seiring dengan kenaikan tegangan keluaran, namun persentase riak menurun. Pada tegangan keluaran 4 V, riak tegangan mencapai 0,44 V dengan persentase tertinggi sebesar 11%, sedangkan pada 12 V, riak tegangan turun menjadi 0,72 V dengan persentase 6%. Hal ini membuktikan bahwa konverter buck bekerja lebih stabil pada tegangan keluaran yang lebih tinggi dengan fluktuasi tegangan yang lebih kecil secara relatif. Pengujian selama 30 menit pada tegangan keluaran 5,5 V menunjukkan performa yang stabil. Riak tegangan berkisar antara 0,4 V hingga 0,6 V sepanjang pengujian, dengan fluktuasi kecil yang tidak signifikan.

Hasil ini membuktikan bahwa konverter buck mampu menjaga kestabilan tegangan dalam durasi operasi panjang tanpa mengalami penurunan performa atau lonjakan tegangan yang berarti, sehingga sistem dinilai andal untuk aplikasi jangka panjang. Evaluasi komponen menunjukkan bahwa pemilihan dan penggunaan komponen dalam desain sudah sesuai dengan kriteria sistem. Dua kapasitor 470  $\mu$ F pada sisi input menghasilkan riak tegangan input jauh di bawah batas standar 1% hingga 3% dari 24 V, dengan nilai maksimum 118,2 mV pada arus beban 20 A. Jaringan pembagi tegangan menggunakan potensiometer 10 k $\Omega$  dan resistor 359,4  $\Omega$  berhasil mengatur  $V_{out}$  dalam rentang 1,25 V hingga 36 V, sesuai dengan spesifikasi IC XL4016.

## Referensi

- [1] Q. Ayun, S. Kurniawan, dan W. A. Saputro, "Perkembangan konversi lahan pertanian di bagian negara agraris," *Vigor: Jurnal Ilmu Pertanian Tropika Dan Subtropika*, vol. 5, no. 2, hlm. 38-44, 2020.
- [2] E. Sukana dan N. Tejoyuwono, "Peranan Pupuk dalam Pembangunan Pertanian," makalah disampaikan pada Diskusi Nasional IV Asosiasi Produsen Pupuk Indonesia, Yogyakarta, 20-21, 1988.
- [3] U. Suwahyono, *Panduan penggunaan pupuk organik*. Penebar Swadaya, 2017.
- [4] M. Tariq dan S. Mekhilef, "Comparison of high efficiency buck converter topologies for renewable energy applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, 2017.
- [5] M. Awais dan M. Kashif, "Design and analysis of high-frequency buck converters for industrial power conditioning," *Int. J. Electron. Electrical Eng.*, vol. 5, no. 8, 2019.
- [6] I. K. Wiryajati, I. N. W. Satiawan, dan I. M. B. Suksmadana, *Interleaved DC-DC Konverter Buck: Konverter Cerdas*, Kubuku.id, 2020.
- [7] Universitas Ahmad Dahlan, *Konverter DC-DC*, Universitas Ahmad Dahlan, 2021.
- [8] M. Fikri, M. Iqbal, dan M. Rizki, "Rancang bangun buck converter efisiensi tinggi dengan pengendali Arduino Nano," *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, vol. 7, no. 3, 2023.
- [9] R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, ed. ke-4, Springer, 2023.
- [10] Universitas Diponegoro, "Perancangan pembangkit tegangan tinggi impuls 11,20 kV dengan menerapkan zero voltage switching (ZVS) pada konverter flyback," [Online]. Tersedia: [www.undip.ac.id/zvs-konverter-flyback](http://www.undip.ac.id/zvs-konverter-flyback). [Diakses: 21 Okt. 2024].
- [11] Universitas Diponegoro, "Perancangan zero voltage switching buck converter dengan beban resistif bervariasi dan sebagai catu daya untuk motor arus searah," [Online]. Tersedia: [www.undip.ac.id/zvs-buck-converter](http://www.undip.ac.id/zvs-buck-converter). [Diakses: 23 Okt. 2024].
- [12] "Zero voltage switching (ZVS) principle," *Electrical Academia*, [Online]. Tersedia: [www.electricalacademia.com/zvs-principle](http://www.electricalacademia.com/zvs-principle). [Diakses: 21 Okt. 2024].
- [13] "Back to basics: zero-voltage switching," *Vicor Corporation*, [Online]. Tersedia: [www.vicor.com/zvs-basics](http://www.vicor.com/zvs-basics). [Diakses: 23 Okt. 2024].
- [14] "Zero voltage switching revolutionizes buck regulator performance," *Power Electronics Europe*, [Online]. Tersedia: [www.power-electronics-europe.com/zvs-revolution](http://www.power-electronics-europe.com/zvs-revolution). [Diakses: 24 Okt. 2024].
- [15] Texas Instruments, "Zero voltage switching resonant power conversion," [Online]. Tersedia: [www.ti.com/zvs-resonant-conversion](http://www.ti.com/zvs-resonant-conversion). [Diakses: 22 Okt. 2024].