



## Analisis Kinerja dan Efisiensi Konverter DC–DC Multi-Tahap untuk Aplikasi Energi Terbarukan

Muhammad Hasanuddin<sup>1,\*</sup>, Efriansyah Putra Bahari Barus<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Magister Teknologi Informasi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia  
Author(s) Email: <sup>1</sup>[muhammadhasan20feb@gmail.com](mailto:muhammadhasan20feb@gmail.com), <sup>2</sup>[efriansyahbarus@gmail.com](mailto:efriansyahbarus@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 30 Mei, 2025

Revised 30 Mei, 2025

Accepted 30 Mei, 2025

Publish 30 Mei, 2025

### ABSTRACT

Pemanfaatan energi terbarukan memerlukan sistem konversi daya yang mampu menghasilkan tegangan keluaran stabil dan efisien di tengah karakteristik sumber energi yang bersifat fluktuatif. Salah satu solusi yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah penggunaan konverter DC–DC multi-tahap, yang mengombinasikan beberapa tahapan konversi guna memperluas rentang pengaturan tegangan dan meningkatkan kinerja sistem. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja dan efisiensi konverter DC–DC multi-tahap pada aplikasi energi terbarukan melalui pendekatan simulasi pemodelan sistem tenaga listrik. Model konverter dirancang dengan konfigurasi bertingkat dan diuji pada berbagai variasi tegangan masukan serta perubahan beban untuk mengevaluasi stabilitas tegangan keluaran, efisiensi konversi daya, respons dinamis, dan distribusi rugi daya antartahap. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur multi-tahap mampu mempertahankan kestabilan tegangan keluaran dalam batas toleransi operasional dengan nilai riak yang relatif kecil. Efisiensi konverter mencapai tingkat tinggi pada kondisi beban nominal serta tetap terjaga pada variasi beban lainnya dibandingkan karakteristik umum konverter satu tahap. Distribusi rugi daya yang merata pada setiap tahapan konversi turut meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi potensi konsentrasi panas pada komponen semikonduktor daya. Respons dinamis sistem terhadap perubahan beban juga menunjukkan waktu pemulihan yang cepat, sehingga mendukung penerapan konverter multi-tahap pada sistem energi terbarukan yang memiliki kondisi operasi dinamis. Temuan penelitian ini mengindikasikan bahwa konverter DC–DC multi-tahap merupakan solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan sistem konversi daya pada aplikasi energi terbarukan.

#### Kata Kunci:

Konverter DC–DC, Multi-tahap, Efisiensi Energi, Stabilitas Tegangan, Energi Terbarukan

### ABSTRACT

The utilization of renewable energy requires a power conversion system capable of producing stable and efficient output voltage amidst the fluctuating characteristics of energy sources. One solution developed to address this issue is the use of multi-stage DC-DC converters, which combine multiple conversion stages to expand the voltage regulation range and improve system performance. This research aims to analyze the performance and efficiency of multi-stage DC-DC converters in

renewable energy applications thru a power system modeling simulation approach. The model converter is designed with a cascaded configuration and tested under various input voltage variations and load changes to evaluate output voltage stability, power conversion efficiency, dynamic response, and interstage power loss distribution. The analysis results show that the multi-stage structure is able to maintain the output voltage stability within operational tolerance limits with relatively small ripple values. The converter's efficiency reaches a high level under nominal load conditions and remains stable under other load variations compared to the general characteristics of single-stage converters. The even distribution of power loss at each conversion stage also contributes to increased system reliability and reduces the potential for heat concentration on power semiconductor components. The system's dynamic response to load changes also demonstrates rapid recovery times, supporting the application of multi-stage converters in renewable energy systems with dynamic operating conditions. The findings of this research indicate that multi-stage DC-DC converters are an effective solution for improving the efficiency and stability of power conversion systems in renewable energy applications.

*Keywords:*

DC-DC Converter, Multi-stage, Energy Efficiency, Voltage Stability, Renewable Energy

**Corresponding Author:**

Muhammad Hasanuddin,

Magister Teknologi Informasi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

Email: [muhammadhasan20feb@gmail.com](mailto:muhammadhasan20feb@gmail.com)

Copyright © 2025 The Author(s). Published by Raskha Media Group.

This is an open-access article under the CC BY-SA license  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).



## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi terbarukan telah menjadi salah satu fokus utama dalam upaya pemenuhan kebutuhan energi global yang berkelanjutan dan ramah lingkungan[1]. Pertumbuhan penduduk, peningkatan aktivitas industri, serta ekspansi teknologi digital turut mendorong kebutuhan energi listrik dalam skala yang semakin besar[2]. Di sisi lain, keterbatasan sumber energi fosil dan dampak negatifnya terhadap lingkungan memacu pergeseran menuju sumber energi alternatif seperti tenaga surya, angin, mikrohidro, dan sistem penyimpanan energi berbasis baterai. Meskipun memiliki potensi besar, pemanfaatan energi terbarukan juga menghadapi tantangan signifikan berupa karakteristik daya yang fluktuatif dan tidak menentu akibat faktor cuaca, kondisi lingkungan, serta variasi beban. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pengelolaan daya yang mampu menjamin proses konversi energi berjalan secara efisien, stabil, dan andal[3].

Sistem konversi daya memegang peranan krusial dalam menghubungkan sumber energi terbarukan dengan beban atau jaringan listrik[3][4]. Salah satu komponen utama dalam sistem ini adalah konverter DC-DC yang berfungsi mengatur level tegangan sesuai dengan kebutuhan beban atau perangkat penyimpanan energi[5]. Tegangan keluaran dari panel surya, misalnya, sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari dan suhu permukaan modul[6]. Demikian pula pada sumber energi angin, tegangan dapat berubah mengikuti kecepatan angin dan karakteristik generator[7]. Kondisi serupa juga terjadi pada sistem baterai, di mana tegangan akan berubah seiring dengan status pengisian daya[8]. Variasi tegangan inilah yang harus distabilkan oleh konverter DC-DC agar sistem dapat bekerja secara optimal dan aman.

Konverter DC-DC satu tahap merupakan jenis yang paling umum digunakan karena memiliki struktur rangkaian yang sederhana dan mudah diimplementasikan[9]. Topologi seperti *buck*, *boost*, dan *buck-boost* telah banyak diaplikasikan pada berbagai sistem tenaga skala kecil hingga menengah[10]. Namun demikian, konverter satu tahap memiliki keterbatasan dalam menangani rentang tegangan masukan yang lebar serta perubahan beban yang cepat. Pada kondisi ekstrem, konverter jenis ini cenderung mengalami penurunan efisiensi akibat meningkatnya rugi daya switching dan konduksi pada komponen elektronik daya. Selain itu, fluktuasi tegangan masukan dapat mempengaruhi kemampuan pengaturan tegangan keluaran, sehingga berpotensi memperbesar riak tegangan dan menurunkan kualitas daya yang dihasilkan[11].

Seiring berkembangnya tuntutan performa sistem konversi energi yang lebih adaptif dan efisien, konverter DC-DC multi-tahap menjadi salah satu alternatif solusi yang menjanjikan. Arsitektur multi-tahap mengombinasikan dua atau lebih tahapan konversi daya yang dirancang untuk bekerja secara sinergis guna mengoptimalkan proses transformasi energi dari masukan menuju keluaran. Pendekatan ini memungkinkan pembagian beban kerja konversi ke beberapa tahap sehingga setiap tahap dapat dioperasikan pada kondisi yang lebih optimal. Dengan demikian, total rugi daya sistem dapat

ditekan, sekaligus memperluas rentang tegangan masukan yang dapat ditangani. Selain itu, konfigurasi multi-tahap juga memberikan fleksibilitas dalam pengaturan tegangan dan arus, sehingga meningkatkan stabilitas operasi terutama pada kondisi dinamika beban dan fluktuasi sumber energi[12][13].

Berbagai topologi konverter DC–DC multi-tahap telah dikembangkan dalam aplikasi energi terbarukan, di antaranya kombinasi konverter *boost–buck*, topologi bertingkat (*cascaded converter*), konverter berstruktur *interleaved*, hingga penerapan konverter multi-level. Setiap topologi memiliki keunggulan dan karakteristik tersendiri dalam hal efisiensi, stabilitas tegangan, serta kompleksitas implementasi. Penggunaan beberapa jalur konversi yang bekerja secara bergantian pada topologi *interleaved* memungkinkan pengurangan riak arus dan tegangan, sehingga meningkatkan kualitas daya keluaran. Sementara itu, susunan bertingkat pada topologi *cascaded* memberikan fleksibilitas pengaturan rasio tegangan dan kemampuan menangani variasi masukan yang lebih luas. Kombinasi topologi tersebut umumnya dilengkapi dengan teknik kontrol modern seperti *pulse width modulation* adaptif maupun algoritma *maximum power point tracking* untuk memastikan konverter selalu bekerja pada titik operasi paling efisien, terutama ketika digunakan bersama panel surya.

Sejumlah kajian terdahulu telah membahas pengembangan konverter DC–DC multi-tahap dengan fokus pada peningkatan efisiensi konversi daya dan kestabilan sistem. Beberapa penelitian menekankan optimalisasi nilai komponen pasif dan pengaturan frekuensi switching untuk menekan rugi daya konduksi dan switching. Studi lain mengevaluasi peran metode kontrol adaptif dalam meningkatkan respons dinamis konverter terhadap perubahan beban dan masukan secara mendadak. Selain itu, terdapat pula penelitian yang mengkaji topologi *interleaved* untuk mengurangi riak arus serta meningkatkan kualitas daya pada sistem fotovoltaik, serta penelitian yang memanfaatkan simulasi numerik guna memprediksi performa topologi konverter bertahap pada berbagai kondisi operasional. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan struktur multi-tahap dapat memberikan peningkatan performa dibandingkan dengan konverter satu tahap, terutama pada aspek stabilitas tegangan dan kualitas keluaran.

Meskipun demikian, kajian yang tersedia masih menunjukkan adanya keterbatasan. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada analisis topologi tertentu atau metode kontrol spesifik tanpa mengevaluasi kinerja sistem konverter multi-tahap secara menyeluruh. Evaluasi sering kali hanya dilakukan pada kondisi operasi ideal atau terbatas pada beban tertentu, sehingga belum sepenuhnya mewakili situasi dinamis yang lazim terjadi pada implementasi energi terbarukan. Selain itu, distribusi rugi daya di setiap tahapan konversi jarang dibahas secara detail, padahal informasi tersebut penting untuk mengidentifikasi titik-titik kritis penyebab penurunan efisiensi sistem. Keterbatasan lain juga ditemukan pada minimnya analisis keterkaitan antara stabilitas tegangan keluaran dan karakteristik rugi daya antartahap, yang sejatinya saling mempengaruhi dalam menentukan performa keseluruhan konverter.

Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan perlunya suatu kajian komprehensif yang tidak hanya menilai efisiensi konverter DC–DC multi-tahap secara terpisah, tetapi memandang sistem konversi sebagai suatu kesatuan terpadu. Pendekatan analisis terpadu ini diperlukan untuk mengevaluasi bagaimana interaksi antartahap konversi dapat mempengaruhi stabilitas sistem, kualitas daya, serta efisiensi total. Dengan memahami kontribusi masing-masing tahap terhadap rugi daya dan dinamika tegangan keluaran, optimasi desain dapat dilakukan secara lebih terarah dan menyeluruh. Hal ini menjadi penting mengingat konverter DC–DC multi-tahap memiliki struktur yang relatif lebih kompleks dibandingkan konverter konvensional, sehingga memerlukan kajian mendalam guna memastikan bahwa kompleksitas tersebut sebanding dengan peningkatan performa yang dihasilkan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis kinerja dan efisiensi konverter DC–DC multi-tahap pada aplikasi energi terbarukan melalui pendekatan evaluasi parameter kelistrikan utama menggunakan simulasi dan pengamatan karakteristik operasional sistem. Analisis meliputi pengukuran efisiensi konversi, stabilitas tegangan keluaran terhadap variasi beban dan tegangan masukan, serta distribusi rugi daya pada setiap tahapan konverter. Dengan melakukan analisis secara menyeluruh, diharapkan dapat diperoleh gambaran objektif mengenai keunggulan serta keterbatasan konverter multi-tahap dibandingkan struktur satu tahap.

Tujuan utama penelitian ini adalah memperoleh pemahaman komprehensif mengenai performa konverter DC–DC multi-tahap dalam mendukung sistem energi terbarukan yang stabil dan efisien. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi pengembangan dan pemilihan topologi konverter yang sesuai dengan kebutuhan sistem energi terbarukan modern. Temuan penelitian ini juga diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain konverter DC–DC yang memiliki karakteristik efisiensi tinggi, stabilitas unggul, serta keandalan jangka panjang, sehingga dapat mendukung percepatan implementasi teknologi energi terbarukan secara lebih luas dan berkelanjutan.

## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini disusun untuk menganalisis kinerja dan efisiensi konverter DC–DC multi-tahap yang diterapkan pada sistem energi terbarukan melalui pendekatan simulasi sistem tenaga listrik. Penelitian dilakukan secara bertahap mulai dari perumusan konsep sistem, pemodelan rangkaian konverter, penentuan parameter utama, proses simulasi, hingga analisis hasil. Seluruh tahapan dirancang untuk memastikan bahwa data yang diperoleh merepresentasikan karakteristik kerja sistem konversi daya secara komprehensif, khususnya terkait dengan efisiensi, stabilitas tegangan keluaran, serta distribusi rugi daya pada setiap tahapan konversi.

### 2.1 Tahapan Penelitian

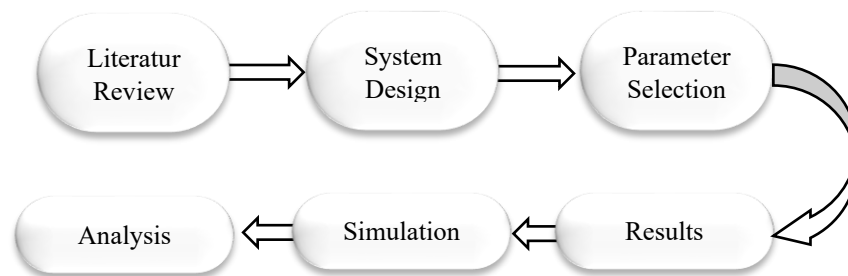
Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur untuk memperoleh informasi terkait topologi konverter DC–DC multi-tahap, teknik kontrol yang umum digunakan pada aplikasi energi terbarukan, serta parameter performa yang

relevan untuk dianalisis. Informasi tersebut menjadi dasar dalam perancangan model sistem yang akan dievaluasi. Selanjutnya dilakukan perancangan rangkaian konverter multi-tahap berdasarkan konfigurasi bertingkat yang merepresentasikan kondisi aplikasi nyata, dengan menyesuaikan spesifikasi sumber energi terbarukan dan karakteristik beban.

Setelah model rangkaian dibuat, tahap berikutnya adalah pemilihan parameter komponen utama seperti induktor, kapasitor, sakelar daya, serta perangkat semikonduktor lainnya. Nilai parameter ditentukan dengan mempertimbangkan kestabilan sistem, batas arus dan tegangan kerja komponen, serta efisiensi operasional. Proses pengaturan parameter dilakukan secara iteratif untuk memperoleh konfigurasi yang mampu menghasilkan performa optimal.

Langkah selanjutnya adalah proses simulasi rangkaian menggunakan perangkat lunak simulasi sistem tenaga listrik. Simulasi dilakukan dalam beberapa kondisi operasi, meliputi variasi tegangan masukan dan perubahan beban. Output simulasi berupa nilai tegangan keluaran, arus beban, riak tegangan, serta estimasi rugi daya pada setiap tahap konverter. Data tersebut kemudian dianalisis untuk mengevaluasi karakteristik efisiensi konversi daya serta kestabilan kerja sistem.

Pada tahap akhir, seluruh hasil simulasi dianalisis secara komparatif antarvariasi kondisi operasi. Analisis bertujuan mengidentifikasi kecenderungan performa konverter multi-tahap terhadap perubahan tegangan masukan dan beban, serta menentukan batas operasi optimal sistem.



**Gambar 1.** Diagram alir tahapan penelitian analisis konverter DC–DC multi-tahap

Gambar ini menunjukkan alur kegiatan penelitian mulai dari studi literatur, perancangan sistem, penentuan parameter, simulasi, hingga analisis hasil.

## 2.2 Model Sistem Konverter DC–DC Multi-Tahap

Model sistem yang digunakan dalam penelitian ini merepresentasikan struktur konverter DC–DC multi-tahap yang terdiri dari beberapa blok konversi daya yang tersusun secara berurutan. Setiap tahapan konverter memiliki fungsi masing-masing dalam menyesuaikan tegangan masukan menuju level tegangan keluaran yang diinginkan. Konfigurasi sistem dirancang agar mampu menerima tegangan masukan dengan rentang yang relatif lebar sekaligus menghasilkan keluaran yang stabil.

Sumber energi terbarukan dimodelkan sebagai sumber tegangan DC variabel untuk menyesuaikan kondisi fluktuasi nyata yang terjadi pada panel surya atau turbin angin. Beban sistem dibuat dalam bentuk beban resistif variabel untuk merepresentasikan perubahan kebutuhan daya pada peralatan atau jaringan yang terhubung. Pada setiap tahapan konverter dipasang sensor virtual untuk memantau tegangan, arus, serta estimasi rugi daya, sehingga data yang diperoleh dapat dianalisis secara terperinci.

## 2.3 Skenario Simulasi dan Variasi Pengujian

Pengujian performa sistem dilakukan melalui beberapa skenario simulasi yang dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasi nyata[14]. Variasi pengujian difokuskan pada perubahan tegangan masukan serta perubahan nilai beban. Tegangan masukan disimulasikan dalam beberapa rentang kerja untuk menggambarkan kondisi fluktuasi daya sumber energi terbarukan. Sementara itu, beban diubah secara bertahap guna menguji stabilitas tegangan keluaran konverter pada kondisi perubahan konsumsi daya.

Setiap skenario simulasi dijalankan selama interval waktu tertentu hingga sistem mencapai kondisi tunak. Data hasil simulasi yang dikumpulkan meliputi nilai tegangan keluaran, arus beban, persentase riak tegangan, serta besar rugi daya pada masing-masing tahap konversi. Data kemudian diolah untuk menghitung nilai efisiensi total konverter yang diperoleh dari perbandingan antara daya keluaran terhadap daya masukan sistem[15].

## 2.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan mengkaji hubungan antara variasi tegangan masukan dan beban terhadap karakteristik performa konverter. Stabilitas tegangan dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem menjaga nilai tegangan keluaran tetap berada dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Efisiensi konversi daya dianalisis melalui perhitungan daya masuk dan daya keluar pada setiap kondisi simulasi untuk menentukan tingkat kehilangan energi yang terjadi.

Distribusi rugi daya pada setiap tahapan konverter dianalisis guna mengidentifikasi bagian sistem yang memberikan kontribusi terbesar terhadap penurunan efisiensi. Dari hasil analisis tersebut, dilakukan evaluasi menyeluruh untuk menilai efektivitas struktur multi-tahap dalam meningkatkan performa konverter dibandingkan dengan pendekatan konversi satu tahap.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

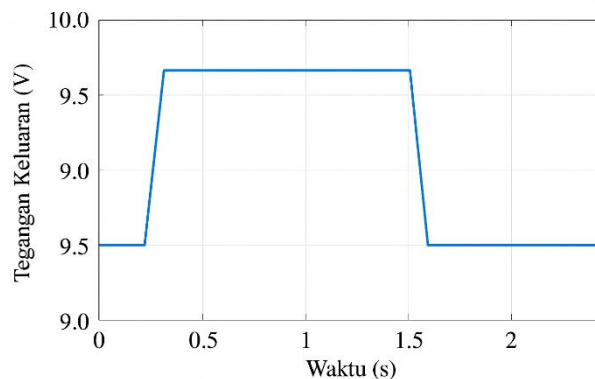
Bagian ini menyajikan hasil penelitian serta pembahasan komprehensif mengenai kinerja konverter DC–DC multi-tahap pada aplikasi energi terbarukan berdasarkan proses simulasi yang telah dilakukan. Evaluasi difokuskan pada parameter utama sistem konversi daya, yaitu stabilitas tegangan keluaran, efisiensi konversi energi, karakteristik rugi daya pada setiap tahap, maupun respons sistem terhadap perubahan kondisi beban dan tegangan masukan. Seluruh hasil simulasi dianalisis secara terpadu untuk memberikan gambaran objektif mengenai keunggulan dan keterbatasan struktur konverter multi-tahap.

#### 3.1 Karakteristik Tegangan Keluaran

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konverter DC–DC multi-tahap mampu menghasilkan tegangan keluaran yang relatif stabil meskipun terjadi variasi pada tegangan masukan. Pada kondisi masukan rendah, tahapan pertama berfungsi meningkatkan level tegangan hingga mencapai nilai antara sebelum disesuaikan kembali oleh tahapan berikutnya menuju tegangan keluaran nominal. Mekanisme ini memungkinkan setiap tahap bekerja dalam rentang tegangan yang lebih sempit dan sesuai dengan titik operasi optimal, sehingga kestabilan sistem tetap terjaga.

Ketika dilakukan pengujian dengan variasi beban bertahap, nilai tegangan keluaran tetap berada dalam batas toleransi sistem tenaga rendah yang umum digunakan pada aplikasi energi terbarukan. Riak tegangan yang terukur relatif kecil dan masih berada di bawah batas standar kelistrikan untuk perangkat elektronik daya. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur multi-tahap efektif meredam fluktuasi tegangan yang umumnya muncul akibat ketidakstabilan sumber energi terbarukan maupun perubahan beban yang bersifat dinamis.

Stabilitas ini juga dipengaruhi oleh distribusi kerja antar tahapan konverter. Setiap tahap memiliki fungsi spesifik dalam pengaturan tegangan sehingga tidak terjadi pembebanan berlebih pada satu rangkaian tunggal. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pembagian kerja ini mengurangi lonjakan arus sesaat serta menekan potensi terjadinya overshoot dan undershoot tegangan keluaran. Dalam konteks aplikasi energi terbarukan, kestabilan tegangan ini menjadi faktor krusial karena banyak peralatan elektronik yang membutuhkan suplai tegangan dengan toleransi kecil agar dapat beroperasi secara aman dan optimal.



Gambar 2. Karakteristik tegangan keluaran konverter DC–DC multi-tahap pada variasi beban

#### 3.2 Analisis Efisiensi Konversi Daya

Efisiensi konversi energi merupakan parameter utama untuk menilai performa konverter DC–DC. Berdasarkan hasil simulasi, nilai efisiensi konverter multi-tahap berada pada kisaran tinggi di hampir seluruh rentang kondisi operasi. Efisiensi tertinggi diperoleh saat sistem bekerja pada kondisi beban nominal, di mana setiap tahapan konverter berada pada titik operasi optimal. Pada kondisi tersebut, nilai rugi daya switching dan konduksi dapat ditekan secara efektif sehingga sebagian besar energi masukan dapat dikonversikan menjadi daya keluaran.

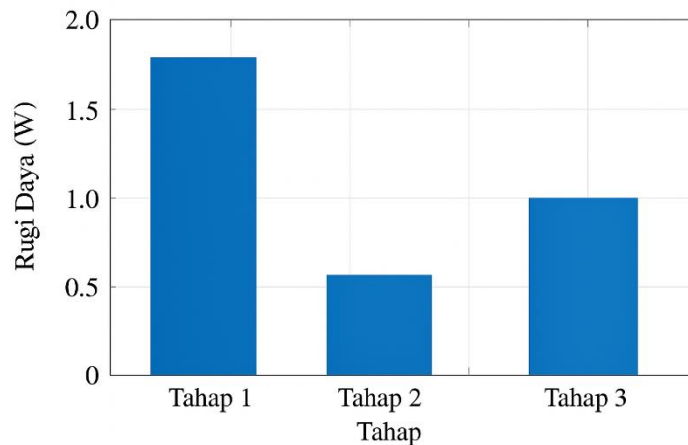
Saat beban menurun atau meningkat di luar titik nominal, terjadi sedikit penurunan efisiensi. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya rasio switching losses akibat perubahan duty cycle ataupun kenaikan arus pada kondisi beban puncak. Meskipun demikian, nilai efisiensi konverter multi-tahap tetap lebih tinggi dibandingkan karakteristik umum konverter satu tahap yang cenderung mengalami penurunan efisiensi lebih signifikan pada perubahan kondisi operasi ekstrem.

Tabel 1. Efisiensi konverter DC–DC multi-tahap pada variasi beban

Kondisi Beban	Daya Masukan (W)	Daya Keluaran (W)	Efisiensi (%)
Beban Ringan	120	112	93,3
Beban Nominal	250	238	95,2
Beban Tinggi	350	330	94,3

Keunggulan struktur multi-tahap dalam mempertahankan efisiensi dapat dijelaskan melalui proses pembagian konversi tegangan yang lebih merata. Tidak terdapat satu rangkaian tunggal yang menanggung seluruh beban konversi dari masukan menuju keluaran, sehingga tekanan kerja pada setiap perangkat semikonduktor dapat dikurangi. Distribusi ini menekan rugi daya akibat pemanasan dan memperpanjang usia komponen elektronik.

### 3.3 Analisis Rugi Daya Setiap Tahapan



Gambar 3. Distribusi rugi daya pada setiap tahap konverter DC–DC multi-tahap

Rugi daya merupakan faktor utama yang memengaruhi efisiensi konverter. Dari hasil pengukuran pada simulasi, diketahui bahwa masing-masing tahapan konverter menyumbang rugi daya yang relatif seimbang, dengan porsi terbesar berasal dari elemen switching seperti MOSFET dan dioda. Rugi konduksi pada induktor dan jalur penghantar juga memberikan kontribusi terhadap total rugi daya, meskipun nilainya lebih kecil dibandingkan rugi akibat switching.

Struktur multi-tahap terbukti mampu membagi total rugi daya ke beberapa bagian rangkaian, sehingga temperatur kerja setiap tahap berada dalam batas aman dan tidak memicu degradasi performa komponen. Kondisi ini berbeda dengan konverter satu tahap, di mana konsentrasi rugi daya yang besar pada satu titik berpotensi menyebabkan kenaikan suhu signifikan serta menurunkan keandalan sistem.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa rugi daya total meningkat seiring dengan kenaikan arus beban. Namun, peningkatan ini masih berada pada rentang yang dapat diterima, dan tidak memicu penurunan kinerja signifikan pada sistem. Distribusi rugi daya yang seimbang juga membantu mempertahankan kestabilan tegangan keluaran, karena tidak terjadi penurunan performa drastis pada salah satu tahapan konverter.

### 3.4 Respons Dinamis terhadap Perubahan Beban

Pengujian respons dinamis dilakukan dengan mensimulasikan perubahan beban secara tiba-tiba dari nilai ringan ke nominal dan kemudian ke beban tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menyesuaikan diri dengan cepat, di mana tegangan keluaran hanya mengalami fluktuasi sementara sebelum kembali stabil pada nilai nominal. Waktu pemulihan yang singkat menunjukkan bahwa struktur kontrol konverter bekerja secara efektif dalam merespon perubahan kondisi operasi.

Respons yang cepat ini diperoleh karena setiap tahap konverter beroperasi dalam rentang kerja yang relatif sempit sehingga gangguan pada salah satu tahap tidak secara langsung memengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan. Selain itu, mekanisme kontrol PWM yang digunakan mampu mengubah duty cycle secara adaptif sehingga kestabilan tegangan dapat dipulihkan dalam waktu singkat.

Hasil ini mengindikasikan bahwa konverter multi-tahap sangat sesuai untuk aplikasi energi terbarukan yang memiliki karakter beban berubah-ubah, seperti sistem penyimpanan energi baterai dan pengisian kendaraan listrik berbasis sumber energi terbarukan.

### 3.5 Pembahasan Kinerja Sistem secara Umum

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa konverter DC–DC multi-tahap memiliki performa yang unggul dibandingkan konsep konversi satu tahap, terutama pada aspek kestabilan tegangan, efisiensi konversi, serta keandalan sistem. Kemampuan membagi proses konversi ke beberapa tahapan memberikan keuntungan signifikan dalam menekan rugi daya dan memperluas rentang tegangan masukan yang dapat ditangani.

Hasil ini juga mendukung berbagai temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa struktur multi-tahap mampu meningkatkan kualitas daya pada aplikasi energi terbarukan. Namun, penelitian ini memberikan nilai tambah dengan menampilkan evaluasi kinerja sistem secara terpadu, melibatkan analisis distribusi rugi daya antartahap serta respons dinamis terhadap perubahan beban, yang jarang diulas secara komprehensif dalam penelitian terdahulu.

Meskipun memiliki keunggulan, struktur multi-tahap juga menunjukkan tantangan berupa kompleksitas rangkaian yang lebih tinggi serta kebutuhan kontrol yang lebih presisi. Hal ini berpotensi meningkatkan biaya implementasi awal dibandingkan konverter satu tahap. Akan tetapi, peningkatan efisiensi energi dan keandalan sistem yang diperoleh dinilai mampu mengimbangi biaya tambahan tersebut, terutama pada aplikasi energi terbarukan skala menengah hingga besar yang membutuhkan performa tinggi dan stabilitas jangka panjang.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menganalisis kinerja dan efisiensi konverter DC–DC multi-tahap pada aplikasi energi terbarukan melalui pendekatan simulasi sistem konversi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur multi-tahap mampu mempertahankan stabilitas tegangan keluaran secara efektif meskipun terjadi variasi tegangan masukan maupun perubahan beban. Tegangan keluaran yang dihasilkan tetap berada dalam batas toleransi operasional dengan riak tegangan yang relatif kecil, sehingga dapat memenuhi kebutuhan peralatan listrik berbasis daya rendah hingga menengah yang memerlukan suplai tegangan stabil. Distribusi kerja konversi ke beberapa tahap terbukti mengurangi beban kerja pada satu rangkaian tunggal, yang secara langsung berdampak pada peningkatan keandalan sistem dan pengurangan risiko gangguan termal pada komponen semikonduktor daya. Hasil analisis efisiensi menunjukkan bahwa konverter multi-tahap mampu menghasilkan tingkat efisiensi konversi yang relatif tinggi pada berbagai kondisi operasi, khususnya saat bekerja pada beban nominal. Peningkatan efisiensi ini dipengaruhi oleh pembagian proses konversi tegangan secara bertahap yang menekan rugi daya switching dan konduksi. Analisis rugi daya memperlihatkan bahwa kerugian energi terdistribusi secara lebih merata di setiap tahapan konverter, sehingga tidak menimbulkan konsentrasi panas pada titik tertentu dan membantu menjaga kestabilan performa sistem secara keseluruhan. Selain itu, pengujian terhadap perubahan beban menunjukkan respons dinamis yang cepat dan stabil, di mana sistem dapat segera menyesuaikan kondisi operasi untuk mengembalikan tegangan keluaran ke nilai nominal. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konverter DC–DC multi-tahap merupakan solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan keandalan sistem konversi daya pada aplikasi energi terbarukan. Meskipun memiliki tingkat kompleksitas rangkaian yang lebih tinggi dibandingkan konverter satu tahap, manfaat performa yang diperoleh dinilai sebanding dengan kebutuhan sistem energi terbarukan modern. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan pengujian eksperimental skala laboratorium serta kajian terhadap implementasi sistem kendali cerdas untuk semakin mengoptimalkan kinerja konverter multi-tahap.

#### REFERENCES

- [1] V. Dwisari, S. Sudarti, and Y. Yushardi, “Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan,” *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 7, no. 2, pp. 376–384, 2023, doi: 10.37478/optika.v7i2.3322.
- [2] J. H. Hefni, L. R. Ozzora, F. V Ferdinand, and ..., “Analisis Korelasi Antara Konsumsi Energi Dan Urbanisasi Terhadap Pertumbuhan Manufaktur,” ... *Bisnis dan Inov.* ..., vol. 12, no. 1, pp. 378–390, 2025, [Online]. Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmbi/article/view/61312%0Ahttps://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmbi/article/download/61312/49309>
- [3] R. Effendi, “Integrasi Sistem Energi Terbarukan dan Penyimpanan untuk Meningkatkan Efisiensi Konversi Energi pada Mikrogrid,” *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 1, pp. 255–264, 2023, doi: 10.33379/gtech.v8i1.3682.
- [4] F. M. Noor and A. F. Rahman, “Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA,” in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 2023, pp. 526–532. doi: 10.35313/irwns.v14i1.5440.
- [5] T. Taryana, Y. Suprihartini, and R. Soebiantoro, “Penggunaan Prototype DC Converter Untuk Peningkatan Kinerja Panel Surya 1000 Watt,” *J. Ilm. Glob. Educ.*, vol. 5, no. 2, pp. 922–936, 2024, doi: 10.55681/jige.v5i2.2635.
- [6] E. Syah, A. Asri, and A. Bintoro, “ANALISA PENGARUH PERUBAHAN SUHU TERHADAP TEGANGAN PANEL SURYA JENIS MONO CHRYSTALLINE KAPASITAS DAYA 50 Wp,” *J. Energi Elektr.*, vol. 11, no. 1, p. 22, 2022, doi: 10.29103/jee.v11i1.8260.
- [7] Dwi Risdianto, Nurry Widya Hesty, Toha Zaky, Rudi Purwo Wijayanto, Agustina Putri Mayasari, and Ario Witjakso, “Pemilihan Turbin Angin Skala Kecil Berdasarkan Analisis Potensi Energi Angin Menggunakan Windographer,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 13, no. 4, pp. 290–296, 2024, doi: 10.22146/jnteti.v13i4.8753.
- [8] O. P. Sidabutar, P. Siagian, and P. Wibowo, “Optimalisasi kapasitas baterai 110 Volt DC di Gardu Induk 150 kV Dawuan : studi kualitatif berdasarkan pengujian lapangan,” *J. Serambi Eng.*, vol. X, no. 3, pp. 14100–14112, 2025, [Online]. Available:

<https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/982?articlesBySimilarityPage=1>

- [9] D. P. Andini, D. Saefudin, P. Handayani, Y. G. Sugiarta, F. Vauzia, and S. Suyanto, "Desain dan implementasi rangkaian konverter jenis non-isolated buck and boost DC-DC," *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 3, no. 3, pp. 247–254, 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i3.2023.247-254.
- [10] A. D. Wardani, A. U. Krismanto, and R. P. D. Labib, "Sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) Menggunakan Metode Fuzzy Type 2 dengan Buck Boost Converter Berbasis Arduino pada PLTS," *Magnetika*, vol. 08, no. 2, pp. 12–22, 2024.
- [11] F. Ibnu and A. Endang, "Pengaruh Variasi Kapasitor Terhadap Perbaikan Faktor Daya dan Stabilitas Tegangan Pada Sistem Elektronika," *J. homepage AKIRATECH J. Comput. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 71–77, 2025, [Online]. Available: <https://journal.ajbnews.com/index.php/akiratech>
- [12] M. R. R. Liesanto, A. U. Krismanto, and N. P. Agustini, "Desain Sistem Analisa Kestabilan Sistem Tegangan Tenaga Listrik Dengan Memperhitungkan Ketidak Pastian Renewable Energi Sources (Res) Dan Beban Pada Sistem Kelistrikan," 2025, *Institut Teknologi Nasional Malang*.
- [13] G. Sihombing and M. W. Pratama, "Analisis Pengaruh Fluktuasi Sumber Daya Listrik Terhadap Keakuratan Pengukuran Daya Dengan Teknik Pembobotan Di Jaringan Distribusi," *J. Media Inform.*, vol. 6, no. 3, pp. 1960–1965, 2025.
- [14] F. Imansuri, "Perancangan Model Simulasi Dan Perbaikan Sistem: Studi Kasus Pelayanan Perbankan," *Ina. J. Ind. Qual. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2022, doi: 10.34010/iqe.v10i1.5315.
- [15] Muhammad Rifaldi, N. R. Alham, N. Izzah, M. N. Ihsan, and M. Sugianto, "Analisis Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan," *J. Rekayasa Trop. Teknol. dan Inov.*, vol. 1, no. 1, pp. 16–24, 2023, doi: 10.30872/retrotekin.v1i1.919.