

# ANALISIS KOMPARASI EFISIENSI KONVERTER BOOST KONVENSIONAL DAN SINKRONUS DENGAN KENDALI PI KASKADE PADA PENGISIAN DAYA BATERAI 72 VOLT

Byan Bagas Pradana<sup>1\*</sup>, Haidar Ali Fathin Naufal<sup>2</sup>, Sidiq Budi Perkasa<sup>3</sup>, Aditya Putra Pradinawan<sup>4</sup>, Shafira Adhelia<sup>5</sup>, Astri Wulandari<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Politeknik Negeri Semarang; Jl. Prof. Soedarto, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275; (024) 7472396

## Keywords:

Boost Converter;  
Synchronous Boost  
Converter;  
Cascade PI Controller;  
CC-CV Charging.

## Correspondent Email:

byan.bagas@polines.ac.id

**Abstrak.** Penelitian ini menyajikan analisis komparasi kinerja antara konverter boost konvensional dan boost sinkronus untuk sistem pengisian daya baterai. Kedua topologi tersebut dioperasikan menggunakan strategi kendali *Proportional-Integral* (PI) Kaskade pada mode pengisian *Constant Current - Constant Voltage* (CC-CV). Pengujian dilakukan melalui simulasi perangkat lunak dengan frekuensi pensaklaran 50 kHz. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali memiliki respons transien yang stabil, dibuktikan dengan transisi mode yang mulus, ketiadaan lonjakan arus kejut (*overshoot*), dan waktu penetapan (*settling time*) singkat yakni 0.432 detik. Pada evaluasi komponen, topologi sinkronus terbukti jauh lebih efisien. Penggunaan MOSFET berhasil menurunkan rugi-rugi daya konduksi secara drastis dari 6.3 W menjadi 1.38 W, yang merepresentasikan reduksi disipasi panas hingga 78.1%. Peningkatan efisiensi ini berdampak langsung pada proses transfer energi melalui pengujian berskala pendek yaitu selama 8.4 detik menggunakan metode penskalaan (*scaling down*), topologi sinkronus meminimalisasi pengurasan *State of Charge* (SoC) baterai sumber menjadi 57.86%, memberikan penghematan sebesar 0.81% dibandingkan topologi konvensional yang terkuras hingga 58.67%. Temuan ini memvalidasi bahwa implementasi konverter boost sinkronus sangat krusial untuk meminimalkan rugi daya serta memperpanjang umur operasional baterai pada aplikasi nyata.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

**Abstract.** This study compares the performance of conventional and synchronous boost converters for battery charging systems. Both topologies operate using a Cascade Proportional-Integral (PI) control strategy in Constant Current - Constant Voltage (CC-CV) mode, simulated at a 50 kHz switching frequency. Results demonstrate a stable transient response characterized by smooth mode transitions, zero overshoot, and a rapid settling time of 0.432 seconds. The synchronous topology proved significantly more efficient; utilizing a MOSFET reduced conduction power losses from 6.3 W to 1.38 W, representing a 78.1% reduction in heat dissipation. Consequently, during an 8.4-second scaled-down test, the synchronous topology minimized the source battery's State of Charge (SoC) depletion to 57.86%, yielding a 0.81% energy saving compared to the conventional topology's 58.67%. These findings confirm that synchronous boost converters are crucial for minimizing power loss and extending operational battery life in practical applications.

## 1. PENDAHULUAN

Integrasi antara sistem energi terbarukan dan elektrifikasi transportasi kini menjadi fokus utama dalam transisi energi global, khususnya pemanfaatan dan penyimpanan energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala rumahan untuk pengisian daya kendaraan listrik ringan (*Light Electric Vehicle*) seperti sepeda motor listrik. Tantangan teknis utama dalam integrasi ini terletak pada ketidaksesuaian level tegangan antara baterai penyimpanan energi PLTS yang umumnya beroperasi pada tegangan 48 V dengan kebutuhan sistem penggerak kendaraan listrik yang bekerja pada tegangan nominal 72 V[1], [2]. Kondisi ini menuntut adanya sistem konverter daya DC-DC tipe penaik tegangan (*Boost Converter*) yang tidak hanya andal, tetapi juga memiliki efisiensi yang tinggi guna meminimalisir rugi-rugi daya selama proses transfer energi antar baterai (*battery to battery charging*)[3].

Dalam upaya menjawab kebutuhan tersebut, topologi *Boost Converter* konvensional kerap diaplikasikan karena kesederhanaan rangkaiannya yang hanya menggunakan satu buah komponen pensaklaran dan satu buah dioda. Namun, topologi ini memiliki keterbatasan efisiensi yang signifikan pada aplikasi arus menengah hingga tinggi akibat besarnya rugi-rugi konduksi pada komponen dioda[4], [5]. Sebagai solusi dari permasalahan tersebut, topologi *Synchronous Boost Converter* dapat digunakan untuk mengurangi rugi-rugi daya pada *Boost Converter* konvensional. Topologi ini menggunakan komponen pensaklaran seperti MOSFET untuk menggantikan dioda dikarenakan MOSFET memiliki resistansi *on-state* ( $R_{DS(on)}$ ) sangat rendah sehingga mampu mereduksi disipasi panas dan meningkatkan efisiensi sistem secara substansial[6]. Aspek kendali juga memegang peranan krusial mengingat baterai jenis Lithium-Ion memerlukan pengisian daya dengan metode *Constant Current – Constant Voltage* (CC-CV) yang presisi untuk menjaga performa dari baterai tersebut[7], [8], [9]. Penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa menggunakan kontrol PI dengan *loop* tunggal seringkali menghasilkan respon transien yang lambat dan kurang stabil terhadap perubahan impedansi baterai, sehingga kontrol PI kaskade (*Cascade Control*) diusulkan sebagai

pendekatan yang lebih andal untuk mengatasi kekurangan tersebut[10], [11].

Meskipun studi mengenai topologi sinkronus dan kendali kaskade telah banyak dibahas secara terpisah, terdapat kesenjangan penelitian pada integrasi kedua aspek tersebut untuk aplikasi spesifik transfer daya antar baterai dari 48 V ke baterai 72 V. Mayoritas penelitian yang ada cenderung berfokus pada analisis efisiensi topologi menggunakan beban resistif statis tanpa mempertimbangkan dinamika resistansi baterai, algoritma kendali tanpa melakukan komparasi kuantitatif mengenai efisiensi daya antara topologi konvensional dan sinkronus pada kondisi operasi yang setara[12]. Ketiadaan analisis komparatif yang menyeluruh ini menyulitkan penentuan konfigurasi sistem yang paling optimal untuk aplikasi pengisian daya baterai pada kendaraan listrik.

Berdasarkan analisis kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparasi efisiensi secara mendalam antara *Boost Converter* konvensional dan *Synchronous Boost Converter* pada sistem pengisian baterai 72 V dengan sumber baterai 48 V. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan strategi kontrol PI Kaskade pada kedua topologi untuk menjamin transisi mode CC – CV yang mulus, serta evaluasi kuantitatif terhadap mitigasi rugi-rugi daya akibat penggunaan MOSFET pada *Synchronous Boost Converter*. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat dihasilkan validasi kerja sistem yang tidak hanya efisien secara energi, namun juga stabil dalam merespon dinamika pengisian daya baterai kendaraan listrik.

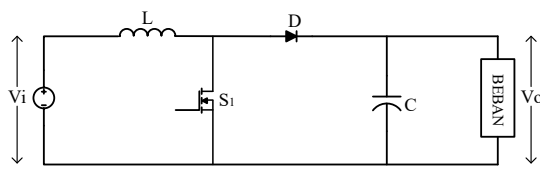
## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Topologi *Boost Converter* dan *Synchronous Boost Converter*

*Boost Converter* merupakan topologi konverter DC-DC yang berfungsi untuk menaikkan tegangan keluaran ( $V_o$ ) menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan masukan ( $V_i$ ). Secara umum, konverter ini bekerja dengan memanfaatkan sifat penyimpanan energi pada komponen induktor (L) saat komponen pensaklaran dalam kondisi tertutup (*on-state*) dan melepaskannya ke beban saat komponen pensaklaran terbuka (*off-state*).

Pada *Boost Converter* konvensional, rangkaian daya terdiri dari satu komponen

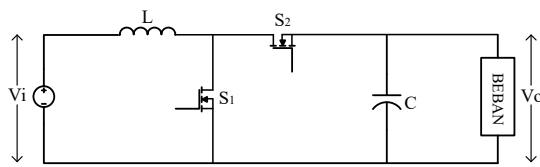
pensaklaran utama ( $S_1$ ) dimana umumnya berupa MOSFET atau IGBT dan satu buah dioda (D) yang berfungsi sebagai penyearah pasif. Pada saat  $S_1$  terbuka, arus induktor akan dipaksa mengalir melewati dioda menuju kapasitor output (C) dan beban. Kekurangan utama pada topologi ini terletak pada tegangan jatuh dioda (*forward voltage drop* ( $V_F$ )) yang berikis antara 0.7 V sampai dengan 1 V, dimana akan menyebabkan rugi-rugi konduksi yang signifikan terutama pada aplikasi arus sedang sampai tinggi[13].



Gambar 2.1 Topologi *boost converter* konvensional

Pada *Synchronous Boost Converter*, topologi konvensional dimodifikasi dengan menggantikan dioda (D) dengan komponen pensaklaran aktif kedua ( $S_2$ ), yang juga dapat berupa MOSFET maupun IGBT.

Dalam topologi sinkronus,  $S_1$  dan  $S_2$  dioperasikan secara komplementer (saling bergantian) dengan menambahkan waktu mati (*dead-time*) untuk mencegah hubung singkat pada rangkaian. Penggunaan MOSFET sebagai pengganti dioda memungkinkan arus mengalir melalui kanal *drain-source* yang memiliki resistansi yang rendah ( $R_{DS(on)}$ ), sehingga tegangan jatuh dapat diminimalkan jauh dibawah nilai  $V_F$  dioda standar[14].



Gambar 2.2 Topologi *synchronous boost converter*

Meskipun topologi antara *boost converter* konvensional dengan *synchronous boost converter* memiliki perbedaan, hubungan rasio tegangan masukan ( $V_i$ ) dan tegangan keluaran ( $V_o$ ) pada kedua topologi tersebut tetap mengikuti persamaan dasar yang sama, yaitu[15]:

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (1)$$

Dimana  $D$  adalah *duty cycle* dari saklar utama ( $S_1$ ),  $V_i$  adalah tegangan masukan konverter, dan  $V_o$  adalah tegangan keluaran konverter. Persamaan ini mengasumsikan komponen ideal, namun pada praktiknya, efisiensi realisasi akan bergantung pada tiap komponen yang digunakan.

## 2.2 Analisis Rugi-Rugi Daya

Efisiensi konverter DC-DC didefinisikan sebagai rasio daya keluaran ( $P_o$ ) terhadap daya masukan ( $P_i$ ), dimana selisih keduanya merupakan rugi-rugi daya total ( $P_{loss}$ ) yang terdisipasi dalam bentuk panas. Pada perbandingan topologi konvensional dan sinkronus, komponen induktor dan saklar utama ( $S_1$ ) diasumsikan identik, sehingga perbedaan efisiensi yang signifikan terletak pada komponen dioda pada topologi konvensional dan digantikan dengan saklar kedua ( $S_2$ ) pada topologi sinkronus pada saat siklus mati (*off-state*)[16].

Pada *Boost Converter* konvensional, rugi-rugi daya didominasi oleh rugi konduksi pada dioda. Tegangan jatuh ( $V_F$ ) pada dioda bersifat relatif konstan terhadap arus beban. Rugi-rugi konduksi pada dioda ( $P_D$ ) dapat dihitung dengan persamaan[17]:

$$P_D = V_F \times I_{avg} \quad (2)$$

Dimana  $I_{avg}$  adalah arus rata-rata yang mengalir melalui dioda, yang nilainya sama dengan arus beban ( $I_o$ ). Karena nilai  $V_F$  pada dioda daya umumnya bernilai 0.7 V, maka rugi-rugi daya akan meningkat secara linear seiring kenaikan arus keluaran dari konverter.

Sebaliknya, pada *Synchronous Boost Converter*, dioda digantikan oleh MOSFET ( $S_2$ ) yang beroperasi sebagai resistor variabel saat kondisi *on*. Rugi-rugi konduksi pada MOSFET sinkronus ( $P_{S2}$ ) ditentukan oleh resistansi *drain-source on-state* ( $R_{DS(on)}$ ) yang bersifat resistif murni:

$$P_{S2} = I_{rms} \times R_{DS(on)} \quad (3)$$

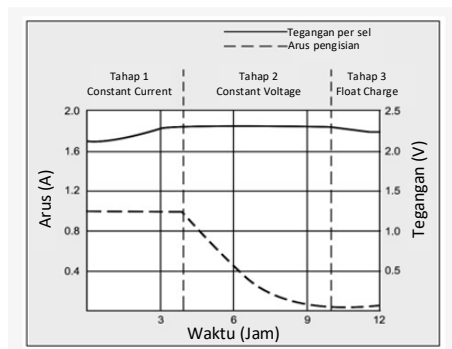
Dimana  $I_{rms}$  adalah arus RMS yang mengalir melewati saklar  $S_2$ . MOSFET daya modern memiliki nilai  $R_{DS(on)}$  yang sangat rendah (dalam orde  $m\Omega$ ). Hal ini menyebabkan tegangan jatuh pada MOSFET umumnya lebih

kecil dibandingkan  $V_F$  dioda pada tingkat arus yang sama.

### 2.3 Pengisian Daya Baterai Metode CC-CV (Constant Current – Constant Voltage)

Metode *Constant Current – Constant Voltage* (CC-CV) merupakan standar industri yang digunakan untuk pengisian daya baterai guna menyeimbangkan kecepatan pengisian dan perlindungan terhadap *over-voltage* yang dapat merusak sel baterai[18]. Proses pengisian ini terbagi menjadi dua fase utama yang bekerja secara berurutan.

Pada tahap awal (Mode CC), konverter beroperasi untuk mempertahankan arus pengisian pada nilai konstan ( $I_{set}$ ) yang telah ditentukan, terlepas dari perubahan tegangan baterai. Pada fase ini *State of Charge* (SoC) baterai naik secara linear dan tegangan terminal baterai meningkat perlahan seiring dengan terisinya kapasitas. Mode ini dominan saat baterai dalam kondisi kosong hingga mendekati penuh (80 – 90 % SoC)[19].



Gambar 2.3 Grafik kurva standar CC-CV

Tahap kedua (Mode CV) dimulai ketika tegangan terminal baterai mencapai batas tegangan penuh (*cut-off voltage*). Saat titik ini tercapai, sistem kendali harus secara otomatis beralih fungsi untuk menjaga tegangan tetap stabil di nilai tegangan pengisiannya. Akibatnya, arus pengisian akan turun secara eksponensial mendekati nol saat resistansi baterai internal meningkat sampai dengan baterai terisi penuh (100 % SoC)[20].

Transisi yang baik antara mode CC dan CV sangat krusial. Kegagalan dalam membatasi tegangan pada fase CV dapat menyebabkan *thermal runaway* atau ledakan, sedangkan kegagalan menjaga arus pada fase CC dapat

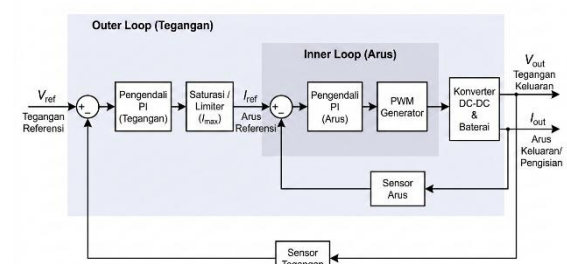
memperlambat proses pengisian secara signifikan.

### 2.4 Kontrol PI Kaskade

*Boost Converter* memiliki karakteristik *non-minimum phase* (NMP), di mana respon tegangan keluaran cenderung mengalami penurunan sesaat sebelum naik ketika *duty cycle* ditingkatkan secara mendadak. Hal ini menyulitkan sistem *single loop* untuk mencapai kestabilan yang cepat tanpa berosilasi[21]. Untuk mengatasi hal tersebut, diterapkan sistem kendali kontrol PI Kaskade yang memisahkan dinamika sistem menjadi dua buah *loop* terpisah yang bekerja secara simultan.

*Inner Loop* (*Loop Dalam*) digunakan sebagai kendali arus. *Loop* ini bertugas mengendalikan arus keluaran dari *boost converter*. *Loop* ini dirancang dengan respon yang cepat untuk menangani gangguan pada sisi masukan dan melindungi saklar daya dari lonjakan arus (*overcurrent*). Keluaran dari pengendali arus ini adalah sinyal PWM (*Duty Cycle*).

*Outer Loop* (*Loop Luar*) digunakan sebagai kendali tegangan. *Loop* ini bertugas menjaga tegangan keluaran agar sesuai dengan referensi tegangan pengisian baterai. *Loop* ini memiliki respon yang lebih lambat dibandingkan dengan *loop* arus. Keluaran dari pengendali tegangan ini akan digunakan sebagai sinyal referensi arus untuk *inner loop*.



Gambar 2.4 Kontrol PI Kaskade

## 3. METODE PENELITIAN

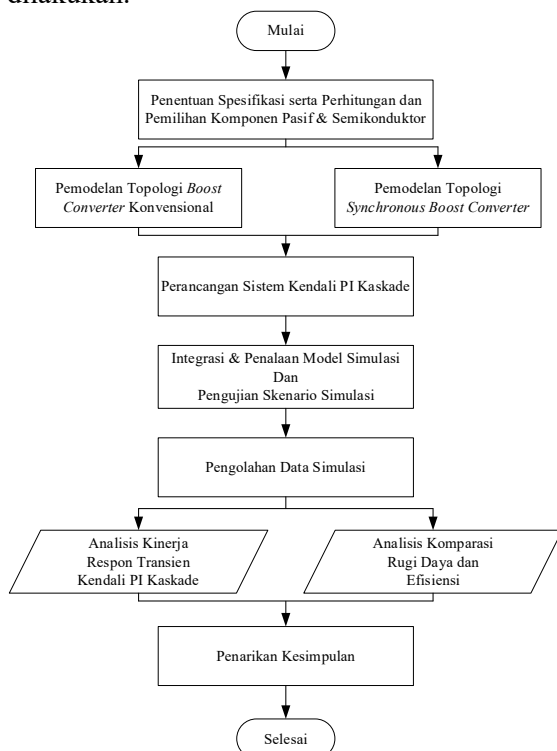
### 3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang dilakukan melalui pemodelan dan simulasi komputasi menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink. Pendekatan simulasi dipilih untuk mengevaluasi kinerja dinamis, memvalidasi algoritma kendali, dan melakukan komparasi

efisiensi daya secara presisi pada lingkungan yang terkontrol.

Tahapan pelaksanaan penelitian dirancang secara sistematis sesuai dengan diagram alir sistem yang dapat dilihat pada Gambar 3.1. Penelitian diawali dengan penentuan spesifikasi dasar dan perhitungan parameter komponen pasif serta pemilihan karakteristik saklar semikonduktor yang beroperasi pada frekuensi tinggi.

Setelah parameter kelistrikan ditetapkan, tahap selanjutnya adalah perancangan arsitektur rangkaian untuk kedua topologi, yaitu *boost converter* konvensional dan *synchronous boost converter*. Bersamaan dengan itu, dilakukan pemodelan sistem kendali tertutup (*closed loop*) berbasis kontrol PI Kaskade yang diintegrasikan dengan logika transisi *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)*. Kedua model konverter tersebut kemudian diuji secara menggunakan skenario pengujian yang dilakukan.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Tahap akhir dari penelitian ini adalah analisis data hasil simulasi. Analisis difokuskan pada dua matriks utama yaitu: (1) evaluasi stabilitas respon transien tegangan dan arus saat terjadi perpindahan mode pengisian, serta (2) perhitungan komparasi rugi-rugi daya total untuk membuktikan peningkatan efisiensi yang

dihasilkan oleh topologi sinkronus secara kuantitatif.

### 3.2 Parameter Sistem

Untuk memastikan validitas komparasi dari penelitian ini, kedua topologi konverter dirancang dan disimulasikan menggunakan spesifikasi komponen pasif dan kondisi operasi kelistrikan yang identik. Perbedaan sistem hanya terletak pada penggunaan saklar semikonduktor sebagai pengganti dioda pada rangkaian *synchronous boost converter*.

Sistem dirancang untuk mentransfer daya dari sumber baterai penyimpanan energi bertegangan nominal 48 V menuju baterai kendaraan listrik bertegangan nominal 72 V. Mengingat karakteristik baterai lithium-ion, tegangan target maksimum pada fase *constant voltage* ditetapkan sebesar 84 V sebagai tegangan pengisian. Seluruh parameter simulasi kelistrikan yang digunakan dalam pemodelan ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

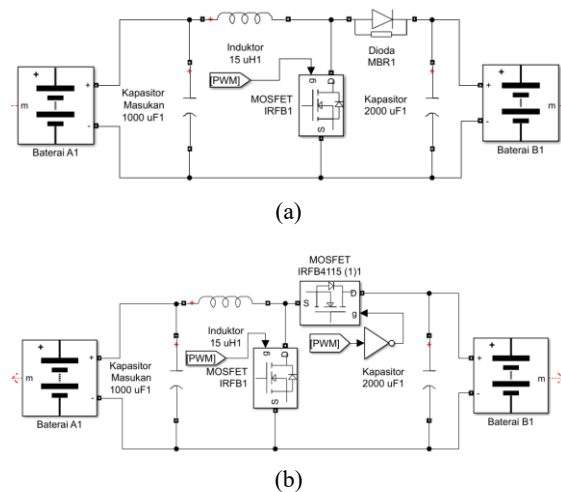
Tabel 3.1 Parameter simulasi kelistrikan

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Tegangan Baterai Input	$V_{in}$	48	V
2	Tegangan Baterai Output	$V_{out}$	72	V
3	Tegangan Pengisian	$V_{ref}$	84	V
4	Arus Pengisian	$I_{ref}$	8	A
5	Frekuensi Pensaklaran	$f_s$	50	kHz
6	Induktor	$L$	15	$\mu H$
7	Kapasitor	$C$	2000	$\mu F$
8	Resistansi Internal Baterai	$R_{int}$	0.12	$\Omega$

Selain parameter pasif pada Tabel 3.1, karakteristik komponen semikonduktor menjadi variabel kunci dalam analisis rugi-rugi daya. Pada *boost converter* konvensional, dioda yang digunakan memiliki tegangan jatuh ( $V_F$ ) sebesar 0.8 V. Sementara itu, pada topologi *synchronous boost converter*, dioda digantikan dengan MOSFET daya dengan nilai resistansi *on-state* ( $R_{DS(on)}$ ) sebesar 11 m $\Omega$ . Pengaturan parameter komponen yang identik bertujuan untuk membuktikan bahwa perbedaan efisiensi murni dihasilkan oleh substitusi komponen pensaklaran sinkronus.

Pemodelan perangkat keras untuk kedua topologi konverter direalisasikan menggunakan

library Simscape Electrical pada MATLAB Simulink. Gambar 3.2 mengilustrasikan skema rangkaian daya hasil pemodelan, di mana dapat dilihat secara jelas substitusi komponen penyearah dari dioda pada topologi konvensional (Gambar 3.2 (a)) menjadi MOSFET pada topologi sinkronus (Gambar 3.2(b)).



Gambar 3.2 Rangkaian daya simulasi  
(a) *Boost converter* konvensional  
(b) *Synchronous boost converter*

### 3.3 Perancangan Sistem Kendali PI Kaskade

Sistem kendali pada konverter dirancang menggunakan kontrol PI Kaskade untuk mengakomodasi profil pengisian *constant current* (CC) dan *constant voltage* (CV) secara otomatis. Kontrol ini terdiri dari dua buah *loop* umpan balik dimana terdiri dari *outer loop* yang berfungsi sebagai pengendali tegangan keluaran, dan *inner loop* yang berfungsi sebagai pengendali arus pengisian.

Transisi antara mode pengisian CC dan CV direalisasikan melalui pembatasan nilai referensi menggunakan blok saturasi pada keluaran *outer loop*. Saat tegangan baterai masih berada di bawah target, *error* tegangan yang besar akan emmbuat keluaran kendali PI tegangan mencapai batas atas saturasi. Batas ini bertindak sebagai referensi arus konstan ( $I_{ref}$ ) bagi *inner loop*, sehingga sistem beroperasi pada mode CC. Ketika tegangan baterai mencapai batas CV, *error* tegangan mengecil dan nilai keluaran PI tegangan akan turun dibawah batas saturasi. Pada titik ini, sistem secara mulus beralih ke mode CV dimana arus akan menurun secara perlahan.

Penentuan nilai parameter penguatan proporsional ( $K_p$ ) dan integral ( $K_i$ ) untuk kedua

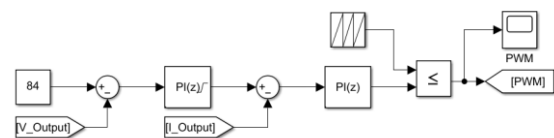
*loop* kendali dilakukan melalui metode empiris iteratif. Penalaan difokuskan pada pengamatan kurva respon transien sistem terhadap perubahan beban, dengan tujuan utama meminimalkan lonjakan tegangan (*overshoot*), mempercepat waktu penetapan, dan menghilangkan *steady-state error* tanpa menimbulkan osilasi.

Berdasarkan hasil penalaan tersebut, parameter kendali optimal yang digunakan dalam simulasi sistem ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter sistem kendali

No	Parameter	Simbol	Nilai
<b>Outer Loop (Tegangan)</b>			
1	Proporsional	$K_{pv}$	0.1
2	Integral	$K_{iv}$	5
3	Batas Saturasi Arus Maksimal	$I_{limit}$	8 A
<b>Inner Loop (Arus)</b>			
1	Proporsional	$K_{pc}$	0.05
2	Integral	$K_{ic}$	10

Implementasi algoritma kendali PI Kaskade pada Simulink direpresentasikan pada Gambar 3.3. Blok saturasi ditempatkan di antara *outer loop* dan *inner loop* untuk menjamin batas arus pengisian aman selama fase CC beroperasi.



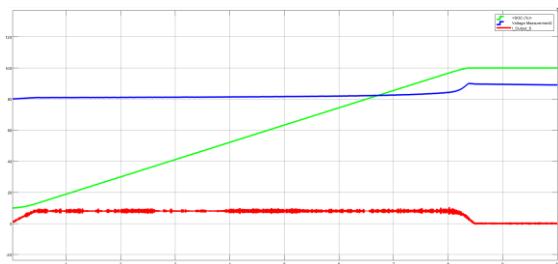
Gambar 3.3 Rangkaian PI Kaskade simulasi

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

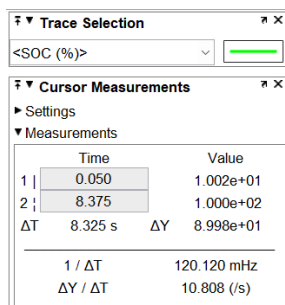
### 4.1 Kinerja Sistem Kendali PI Kaskade pada Mode CC-CV

Pengujian pertama difokuskan pada evaluasi kinerja dinamis dari algoritma kendali PI Kaskade dalam meregulasi proses pengisian daya baterai. Untuk merepresentasikan implementasi kendali digital yang realistis pada mikrokontroler perangkat keras, simulasi dijalankan menggunakan metode komputasi diskrit (*fixed-step solver*) dengan waktu cuplik sebesar  $0,5 \mu s$ . Karena kedua topologi menggunakan parameter penalaan kendali proporsional dan integral yang identik, analisis profil pengisian daya ini direpresentasikan melalui hasil ekstraksi data dari topologi *synchronous boost converter*.

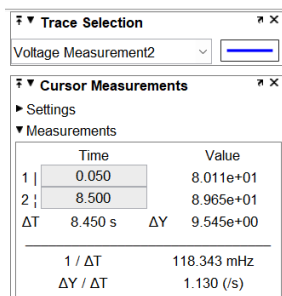
Gambar 4.1 (a) menampilkan profil keseluruhan tegangan dan arus keluaran selama siklus pengisian daya berlangsung. Berdasarkan grafik tersebut, sistem kendali terbukti mampu mengeksekusi transisi pengisian standar, yaitu dari *Constant Current* (CC) menuju *Constant Voltage* (CV). Pada saat tegangan baterai beban masih berada di bawah target penuhnya, sistem beroperasi pada mode CC. *Inner loop* kendali arus bekerja menstabilkan arus keluaran ( $I_{out}$ ) tepat pada nilai referensi nominalnya sebesar 8 A. Seiring berjalannya waktu, tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) sistem terlihat meningkat secara linear. Ketika tegangan menyentuh nilai referensi pemutusan sebesar 84 V pada waktu simulasi 8.5 detik, *outer loop* mulai mengambil alih dominasi regulasi kendali.



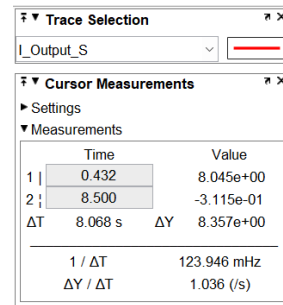
(a)



(b)



(c)



(d)

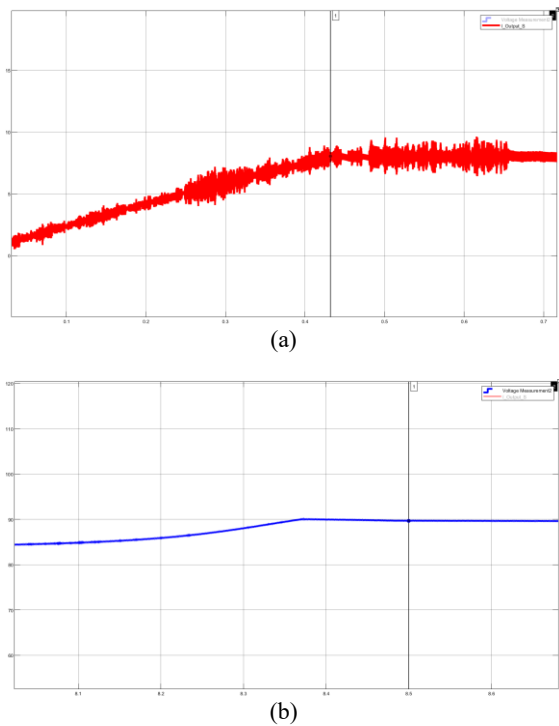
Gambar 4.1 Hasil pengujian sistem kendali PI Kaskade  
 (a) Grafik hasil pengujian  
 (b) Nilai SoC Baterai (%)  
 (c) Nilai tegangan pengisian  
 (d) Nilai arus pengisian

Pada fase CV ini, kurva arus menurun secara eksponensial mendekati nol. Namun, dapat diamati bahwa tegangan keadaan tunak (*steady-state*) pada akhirnya menetap di angka 89 V. Terjadinya galat keadaan tunak (*steady-state error*) sebesar 5 V ini merupakan fenomena yang wajar pada implementasi kendali PI kaskade tanpa mekanisme *anti-windup* yang agresif. Hal ini diakibatkan oleh terakumulasinya nilai galat pada blok integral ( $K_{ic}$ ) di *outer loop* selama fase CC berlangsung panjang. Selain itu, sifat dasar konverter boost yang searah (*unidirectional*) membuatnya tidak mampu menyerap kembali sisa energi saat tegangan terminal telah melampaui titik referensi 84 V. Meskipun terdapat deviasi nilai akhir, transisi mode pengisian tetap berlangsung dengan sangat mulus dan stabil tanpa memicu osilasi sistem yang merusak.

Untuk meninjau lebih detail mengenai keandalan sistem kendali pada saat penyalaan awal (*start-up*), Gambar 4.2 (a) menyajikan perbesaran (*zoom-in*) dari kurva arus keluaran pada fase awal simulasi dan (b) menyajikan perbesaran (*zoom-in*) dari kurva tegangan keluaran pada saat perubahan metode dari CC ke CV. Gambar 4.2 (a) membuktikan bahwa sistem memiliki respon transien yang sangat baik. Waktu penetapan (*settling time*) untuk mencapai arus nominal dicapai dalam waktu yang sangat singkat, yakni sekitar 0.432 detik. Lebih lanjut, kurva arus tidak menunjukkan adanya lonjakan signifikan yang melebihi batas referensi (*overshoot*). Hal ini memvalidasi bahwa penalaan parameter pada sistem kendali kaskade telah optimal, sehingga baterai terlindungi secara maksimal dari risiko

kerusakan atau degradasi umur pakai akibat arus kejut awal (*inrush current*).

Sementara itu, Gambar 4.2 (b) mengilustrasikan dinamika tegangan pada saat titik kritis peralihan mode pengisian. Terlihat bahwa ketika kendali tegangan (*outer loop*) mengambil alih sistem, transisi dari fase kenaikan linear menuju kondisi tunak (*steady-state*) berlangsung secara mulus. Tidak teramati adanya lonjakan tegangan kejut (*voltage spike*) yang ekstrem maupun osilasi yang tidak stabil selama proses peralihan tersebut. Kehalusan profil tegangan ini sangat krusial dalam sistem pengisian daya, karena fluktuasi tegangan yang tajam pada terminal dapat memicu tegangan lebih sesaat (*transient overvoltage*) yang berpotensi merusak struktur kimia internal baterai beban.

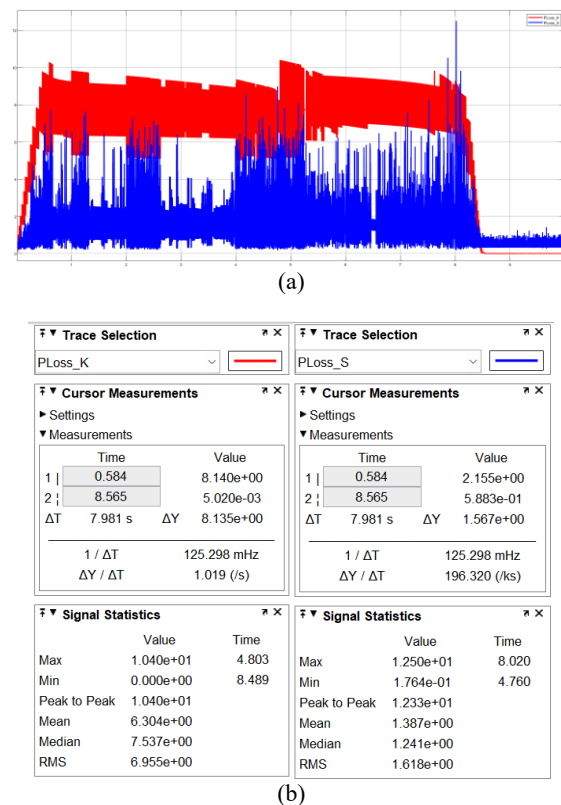


Gambar 4.2 Grafik transisi CC-CV dengan PI Kaskade  
(a) Arus (Mode CC)  
(b) Tegangan (Mode CV)

#### 4.2 Analisis Komparasi Rugi-Rugi Daya

Evaluasi performansi selanjutnya difokuskan pada analisis rugi-rugi daya ( $P_{loss}$ ) yang terdisipasi pada komponen semikonduktor pasif di kedua topologi. Pada *boost converter* konvensional, komponen yang paling banyak menyumbang rugi-rugi daya adalah dioda penyearah. Saat dioda berada pada kondisi bias

maju (*forward bias*) untuk mengalirkan arus ke beban, terdapat tegangan jatuh bawaan ( $V_F$ ) yang memicu disipasi daya dalam bentuk panas. Untuk mengatasi kelemahan ini, topologi *synchronous boost converter* mengganti peran dioda dengan sebuah saklar aktif berupa MOSFET ( $S_2$ ). Keuntungan utama dari pendekatan ini adalah penurunan nilai resistansi saat komponen berkonduksi, di mana MOSFET hanya memiliki resistansi on-state ( $R_{DS(on)}$ ) yang nilainya sangat kecil.



Gambar 4.3 Komparasi rugi-rugi daya  
(a) Grafik komparasi rugi-rugi daya  
(b) Data komparasi rugi-rugi daya

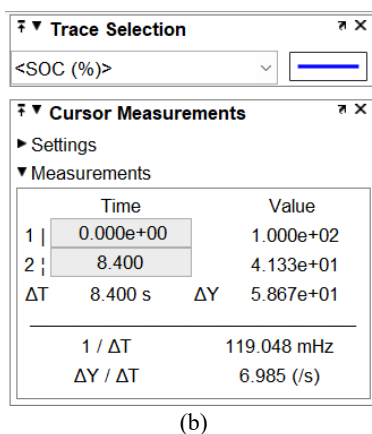
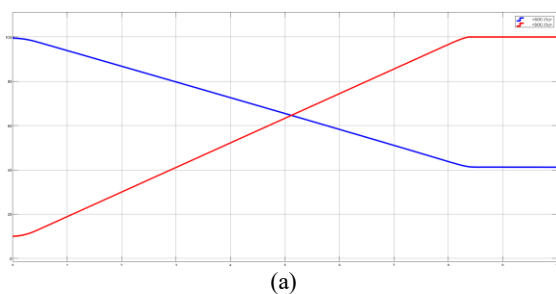
Gambar 4.3 menyajikan grafik komparasi daya yang hilang ( $P_{loss}$ ) antara dioda pada topologi konvensional dan MOSFET  $S_2$  pada topologi sinkronus selama proses pengisian daya berlangsung. Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat perbedaan disipasi daya yang sangat signifikan antara kedua topologi. Pada topologi konvensional, dioda menghasilkan rugi-rugi daya rata-rata sebesar 6.3 Watt. Tingginya angka ini mengindikasikan banyaknya energi dari sumber yang terbuang menjadi panas alih-alih ditransfer ke baterai beban. Sebaliknya, pada topologi sinkronus, penggunaan MOSFET

S<sub>2</sub> berhasil menekan rugi-rugi daya hingga hanya berada di nilai 1.38 Watt.

Reduksi rugi-rugi daya rata-rata sebesar 4.92 Watt ini membuktikan bahwa penyearah sinkronus bekerja jauh lebih optimal. Penurunan disipasi panas ini tidak hanya meringankan beban kerja sistem pendingin (*heatsink*), tetapi juga secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi transfer energi secara makroskopis, yang akan dibahas lebih lanjut pada evaluasi profil State of Charge (SoC) baterai.

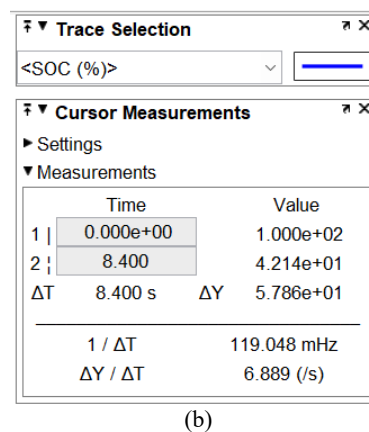
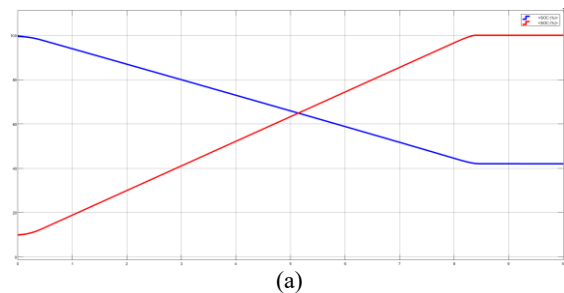
### 4.3 Analisis Efisiensi Transfer Energi Berdasarkan State of Charge (SoC)

Selain analisis rugi-rugi daya rata-rata, evaluasi kinerja konverter juga ditinjau dari perspektif efisiensi transfer energi makroskopis secara keseluruhan. Hal ini direpresentasikan melalui tingkat pengurusan kapasitas atau *State of Charge* (SoC) pada baterai sumber (Baterai A) untuk mencapai target pengisian daya penuh pada baterai beban (Baterai B). Pengujian ini dilakukan dengan menyamakan parameter kendali dan durasi waktu simulasi pada kedua topologi untuk memastikan parameter komparasi yang setara dan adil.



Gambar 4.4 Profil transfer energi topologi konvensional  
 (a) Grafik SoC Baterai A dan Baterai B  
 (b) Data SoC Baterai A

Gambar 4.4 memperlihatkan profil transfer energi pada topologi *boost converter* konvensional. Pada rentang waktu simulasi 8.4 detik, Baterai B berhasil diisi daya dari kapasitas awal 10% menjadi penuh 100%, yang berarti terdapat penambahan SoC sebesar 90%. Namun, untuk memindahkan energi dan mencapai target pengisian tersebut, SoC Baterai A mengalami degradasi yang sangat signifikan, yakni terkuras dari kapasitas awal 100% turun menjadi 41,33% (mengalami pengurangan sebesar 58,67%).



Gambar 4.5 Profil transfer energi topologi sinkronus  
 (a) Grafik SoC Baterai A dan Baterai B  
 (b) Data SoC Baterai A

Sebagai perbandingan, Gambar 4.5 mengilustrasikan dinamika SoC pada topologi *synchronous boost converter* dengan durasi waktu yang sama. Karena sistem kendali Kaskade PI pada kedua topologi diatur untuk menyalurkan profil arus keluaran yang identik, Baterai B pada sistem sinkronus juga mencapai kapasitas 100% pada detik ke-8.4 (bertambah sebesar 90%). Perbedaan mendasar terlihat pada kurva SoC Baterai A. Untuk memindahkan jumlah energi yang persis sama ke Baterai B, Baterai A pada sistem sinkronus hanya terkuras dari 100% menjadi 42,14% (mengalami pengurangan sebesar 57,86%).

Terdapat selisih efisiensi pengurusan kapasitas sebesar 0,81% antara kedua topologi. Meskipun secara persentase numerik terlihat kecil, angka ini sangatlah signifikan mengingat pengujian dilakukan dalam waktu simulasi yang sangat singkat (8,4 detik) dengan menerapkan metode penskalaan kapasitas (*scaling down*) pada baterai beban guna mempercepat proses komputasi perangkat lunak. Jika sistem ini diimplementasikan pada skala nyata dengan kapasitas baterai aktual (dalam satuan Ampere-hour yang besar) dan durasi pengisian yang memakan waktu berjam-jam, selisih penghematan energi sebesar 0,81% per siklus pendek ini akan terakumulasi menjadi penghematan daya yang sangat masif. Komparasi degradasi SoC ini secara gamblang mengonfirmasi hasil analisis rugi-rugi daya pada subbab sebelumnya. Topologi konvensional menguras lebih banyak kapasitas Baterai A karena sebagian energi terdisipasi menjadi panas akibat tegangan jatuh ( $V_F$ ) pada dioda. Sebaliknya, topologi sinkronus dengan MOSFET terbukti meminimalisasi resistansi konduksi ( $R_{DS(on)}$ ), sehingga proses transfer energi menjadi jauh lebih efisien dan usia pakai Baterai A dapat diperpanjang.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, topologi *synchronous boost converter* terbukti secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem pengisian daya baterai dibandingkan topologi konvensional. Penggantian dioda dengan sakelar aktif MOSFET mampu menekan rugi-rugi daya konduksi secara drastis dari rata-rata 6.3 W menjadi hanya 1.38 W. Penurunan sebesar 4,92 W ini merepresentasikan reduksi rugi-rugi daya panas hingga mencapai 78.1%. Keunggulan pada tingkat komponen ini berimplikasi langsung pada efisiensi transfer energi. Terbukti, untuk mengisi baterai beban hingga penuh selama waktu 8.4 detik, topologi sinkronus hanya menguras kapasitas baterai sumber (*State of Charge*) sebesar 57.86%, lebih rendah dibandingkan topologi konvensional yang menguras hingga 58.67%. Adanya penghematan kapasitas sebesar 0.81% dalam siklus simulasi yang sangat singkat ini membuktikan bahwa penyearah sinkronus mampu mencegah terbuangnya energi sumber secara sia-sia, yang mana jika diakumulasikan

pada implementasi kapasitas nyata dengan durasi yang lebih panjang, akan sangat krusial dalam memperpanjang ketahanan operasional dan umur pakai baterai sumber.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Pratama, J. Jamaaluddin, I. Sulistiyowati, and I. Anshory, "Electric Bicycle Battery Charging System Design Using Solar Panel," *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 8, no. 2, pp. 71–81, Oct. 2024.
- [2] W. Alamsyah and A. A. Nasution, "Rancang Bangun Pembuatan Sistem Charger Menggunakan Buck Boost Konverter pada Sistem PLTS," *Jurnal Simetri Rekayasa*, vol. 3, no. 1, pp. 144–151, Apr. 2021.
- [3] J. W. Sukmasae and S. R. Akbar, "Simulasi Buck Converter Pada Perancangan Alat Pengisian Daya Baterai LiPO," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 1, no. 1, Jan. 2017.
- [4] Aldifa Amendra Makruf, Andi M. Nur Putra, and Sepannur bandri, "Pengaruh Penggunaan Boost Konverter Sebagai Pengatur Tegangan Terhadap Daya Keluaran Sistem Plts 1.5 Kw," *Elkom: Jurnal Elektronika dan Komputer*, vol. 17, no. 2, pp. 526–540, Dec. 2024.
- [5] I. Yuwandra, S. Handoko, and D. Darjat, "PERANCANGAN KONVERTER ARUS SEARAH TIPE BOOST DENGAN TEGANGAN KELUARAN TERKONTROL BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO NANO," *TRANSIENT: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 26–32, 2021.
- [6] A. N. Ramadhan, N. A. Windarko, and Irianto, "PI Fuzzy Controller of Synchronous Boost Converter for Drug Storage Thermoelectric Cooler," *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering*, vol. 5, no. 1, 2021.
- [7] A. Zidan Falih, M. Zaenal Efendi, and F. Dwi Murdianto, "CC-CV Controlled Fast Charging Using Type-2 Fuzzy for Lithium-Ion Battery," *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 135–141, Oct. 2021.
- [8] I. Gusti Agung Ayu Devi Anjani, M. Zaenal Efendi, and O. Asrarul Qudsi, "Design of Battery Charging System with CC-CV Method Using Interleaved Buck-Boost Converter," *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, vol. 7, no. 1, pp. 38–47, Jun. 2023.
- [9] V. Kalyanasundaram, S. George Fernandez, K. Vijayakumar, and S. Vidyasagar, "A two stage battery charger for EV charging applications," *Indonesian Journal of Electrical Engineering*

- and *Computer Science*, vol. 19, no. 2, pp. 593–599, Aug. 2020.
- [10] A. Hariyadi, A. Nugroho, and Suwarno, “The origin of cycle life degradation of a lead-acid battery under constant voltage charging,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 986–993, Jun. 2021.
- [11] M. Nizam, H. Maghfiroh, A. Ubaidilah, Inayati, and F. Adriyanto, “Constant current-fuzzy logic algorithm for lithium-ion battery charging,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 926–937, Jun. 2022.
- [12] M. Zerouali, A. El Ougli, and B. Tidhaf, “A robust fuzzy logic PI controller for solar system battery charging,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 384–394, Mar. 2023.
- [13] S. Muhammad Ilman and F. A. Septian Putra, “Kendali arus dan tegangan pada konverter DC-DC boost dengan metode kaskade proportional integral derivative,” *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 3, pp. 191–202, Sep. 2023.
- [14] Suroso *et al.*, “Power converter for battery charger of electric vehicle with controllable charging current,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 968–977, Jun. 2024.
- [15] B. Waruwu, E. M. Silalahi, and B. Widodo, “ANALISIS ENERGI LISTRIK PLTS ON-GRID DENGAN BOOST CONVERTER DAN INVERTER BERBASIS MATLAB/SIMULINK,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 1, pp. 1445–1454, Jan. 2025.
- [16] M. W. N. Okta, A. Murtono, and Y. Yulianto, “Analisa Rancang Bangun Buck-Boost Converter Untuk Sistem Charging Battery,” *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 8, no. 1, p. 34, May 2021.
- [17] A. Hassoune, M. Khafallah, A. Mesbahi, A. Nouaiti, and T. Bouragba, “Experimental implementation of a smart battery charger for electric vehicles charging station,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1689–1699, Dec. 2020.
- [18] I. Muslimin, ; Muhammad Farid, and M. A. S. Mandra, “Analisis Kinerja Battery Charging Menggunakan Tenaga Surya Untuk Kendaraan Roda Dua,” *Jurnal Pendidikan Vokasi Otomotif*, vol. 7, Nov. 2024.
- [19] R. Kristiyono, B. Nugroho, and B. Supriyanto, “AUTOMATIC CHARGING BATTERY LITHIUM UNTUK KENDARAAN LISTRIK,” *Jurnal Teknika*, vol. 7, no. 4, pp. 236–242, 2022.
- [20] R. Rakhmawati, D. S. Yanaratri, and H. Saifullah, “Design and Build a Battery Charging Station for Electric Vehicles,” *International Journal of Engineering and Emerging Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 52–58, Dec. 2021.
- [21] S. Muhammad Ilman and F. A. Septian Putra, “Pemodelan dinamis dan kendali multi-loop konverter DC-DC boost dengan pengendali PI,” *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 1, pp. 47–56, Mar. 2023.