

Desain dan Implementasi *Battery Charging* Pada Fotovoltaik dengan Topologi Non-Inverting Cuk Konverter

Rahma Nur Amalia¹, Ika Noer Syamsiana², Aditya Andri Prasajo³, Ahmad Romi Alfa Hidayah Fauzi⁴
e-mail: rahmaamalia@polinema.ac.id, ikanoersyamsiana@polinema.ac.id, adtyandriprasajo@gmail.com,
fauzieahmad27@gmail.com

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 5 Mei 2025
Direvisi 20 Mei 2025
Diterbitkan 31 Mei 2025

Kata kunci:

CUK converter
DC-DC converter
energi surya
energi terbarukan
kontrol PID

Keywords:

CUK converter
DC-DC converter
PID control
renewable energy
solar energy

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengisian baterai 24 V berbasis panel surya menggunakan topologi non-inverting CUK converter yang dikendalikan oleh algoritma PID. Topologi non-inverting CUK dipilih untuk mengatasi masalah polaritas terbalik pada CUK converter konvensional, sehingga tegangan keluaran searah dengan tegangan masukan. Sistem yang dibangun terdiri dari konverter DC-DC dengan Arduino Nano sebagai pengendali PID yang mengatur sinyal PWM berdasarkan pembacaan sensor tegangan dan arus pada sisi panel surya (input) dan baterai (output). Hasil simulasi menunjukkan bahwa tanpa pengendali PID, overshoot tegangan output mencapai sekitar 151%, sedangkan dengan kontrol PID overshoot tersebut turun menjadi sekitar 31%, disertai waktu pemulihan yang lebih cepat. Pengujian prototipe menunjukkan bahwa sistem mampu mengisi baterai 24 V dengan stabil, tanpa osilasi berlebih pada tegangan keluaran, serta mencapai efisiensi konversi daya sekitar 80%.

ABSTRACT

This final project discusses the design and implementation of a 24 V solar panel-based battery charging system using a non-inverting CUK converter topology controlled by a PID algorithm. The non-inverting CUK topology was chosen to overcome the reverse polarity issue present in conventional CUK converters, ensuring the output voltage has the same polarity as the input. The system employs a DC-DC converter with an Arduino Nano microcontroller implementing PID control to adjust the PWM duty cycle based on feedback from voltage and current sensors on the input (solar panel) and output (battery) sides. Simulation results show that without PID control the converter's output voltage overshoot reached around 151%, which was reduced to approximately 31% with the PID controller, along with a faster settling time. Actual prototype testing demonstrated that the system can reliably charge a 24 V battery with a stable output voltage and no significant overshoot or oscillation, achieving a power conversion efficiency of about 80%.

Penulis Korespondensi:

Rahma Nur Amalia, Ika Noer Syamsiana, Aditya Andri Prasajo, Ahmad Romi Alfa Hidayah Fauzi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Malang,
Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia, Kode Pos 65141
Email: rahmaamalia@polinema.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +2182132686112



1. PENDAHULUAN

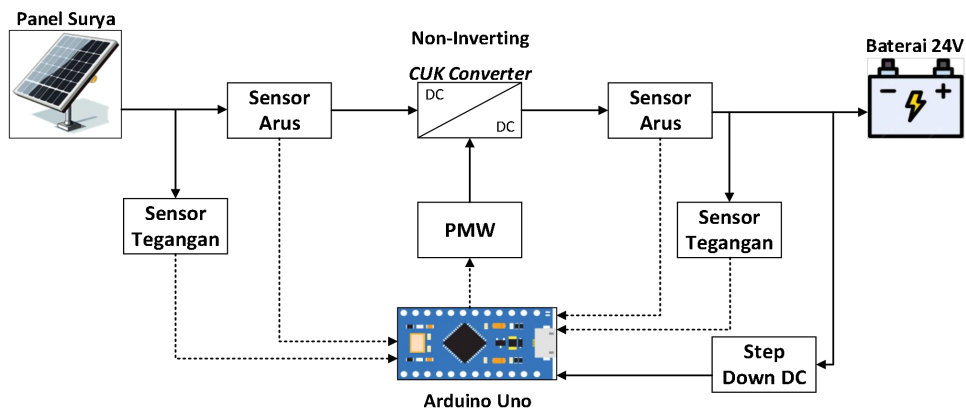
Pada tahun 2018, produksi energi primer Indonesia yang mencakup minyak bumi, gas alam, batubara, dan energi terbarukan mencapai 411,6 juta ton setara minyak (MTOE), dengan sekitar 64% di antaranya diekspor dalam bentuk batubara dan gas alam cair (LNG) [1]. Di sisi lain, Indonesia juga melakukan impor energi, khususnya minyak mentah dan produk bahan bakar minyak (BBM) sebesar 43,2 MTOE untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri [1]. Ketergantungan terhadap energi fosil serta fluktuasi pasar global mendorong perlunya diversifikasi sumber energi.

Sejalan dengan komitmen global dalam pengurangan emisi gas rumah kaca, Pemerintah Indonesia menetapkan target bauran energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar minimal 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050, sebagaimana tercantum dalam Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional [2]. Indonesia memiliki potensi EBT yang besar, salah satunya adalah energi surya, yang sangat sesuai dikembangkan karena posisi geografisnya sebagai negara tropis [2]. Energi surya memiliki sejumlah keunggulan, antara lain bersifat tidak polutif, terbarukan, dan tersedia sepanjang tahun. Namun, salah satu tantangan utamanya adalah sifat intermiten dari iradiasi matahari serta densitas energinya yang relatif rendah, yang memerlukan sistem kolektor berluas permukaan besar untuk efisiensi konversi [3]. Sistem fotovoltaik (PV) memegang peranan penting dalam konversi energi surya menjadi energi listrik.

Karakteristik hubungan arus-tegangan ($I-V$) dari panel PV bersifat nonlinier dan sangat dipengaruhi oleh intensitas iradiasi dan suhu [4]. Untuk memaksimalkan output daya, metode Maximum Power Point Tracking (MPPT) banyak dikembangkan. Salah satu metode MPPT yang paling umum digunakan karena kesederhanaannya adalah Perturb and Observe (P&O), meskipun metode ini rentan terhadap osilasi di sekitar titik daya maksimum [5]. Untuk meningkatkan kestabilan sistem, kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) dapat diterapkan pada algoritma MPPT, terutama untuk karakteristik PV yang bersifat nonlinier. Penggabungan metode P&O dengan pengendali PID diharapkan dapat mengurangi osilasi dan meningkatkan efisiensi daya yang dihasilkan [6].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari rangkaian konverter arus searah tipe non inverting CUK converter. Gambar desain rangkaian converter yang ditunjukkan pada Gambar 1.

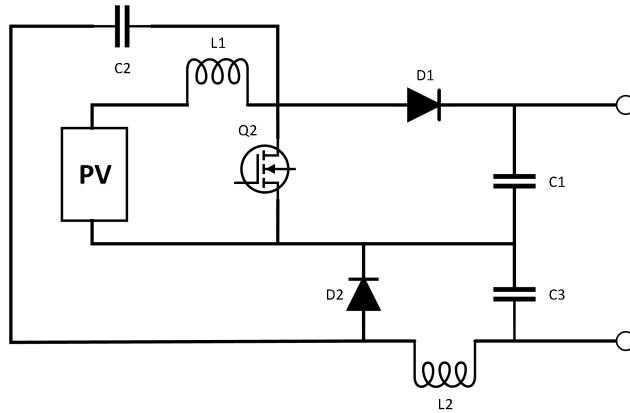


Gambar 1. Blok Diagram Alat



2.1 Konverter Arus Searah Tipe Non Inverting CUK Converter

Gambar 2 adalah desain dari topologi yang diajukan yang mana memerlukan tiga buah kapasitor, dua buah induktor, mosfet, dan dua dioda. Dibutuhkan dua induktor merupakan hasil *merging* dari dua sistem yang sama yakni *cuk converter* dan *boost converter*.



Gambar 2 . Rangkaian Non Inverting CUK Converter

Pada masing – masing topologi, rangkaian yang menghubungkan induktor pertama memiliki persamaan yakni terhubung melalui sumber dan mosfet, sehingga tidak diperlukan untuk menambah induktor lagi. Komponen-komponen utama yang digunakan dalam penyusunan konverter arus searah tipe Buck Converter meliputi:

1. Sumber Tegangan DC

Sumber daya untuk menyuplai konverter dalam sistem ini berasal dari panel surya merek Sunwatt yang memiliki daya maksimum (Pm) sebesar 50 Watt Peak (WP). Panel ini menggunakan teknologi Monocrystalline, yang dikenal memiliki efisiensi tinggi dalam menangkap energi matahari. Berdasarkan spesifikasi teknis, tegangan sirkuit terbuka (Voc) panel ini adalah 22,18 Volt, sementara arus hubung singkat (Isc) mencapai 2,56 Ampere. Pada titik daya maksimum, panel menghasilkan tegangan operasi (Vmp) sebesar 19 Volt. Dimensi fisik panel adalah 570 × 455 × 30 mm, dengan efisiensi konversi energi mencapai 20,70%, yang menunjukkan kinerja optimal dalam menghasilkan listrik dari energi surya [7].

2. Duty Cycle

Duty cycle berfungsi sebagai pengatur tegangan output dari konverter DC-DC. Besarnya duty cycle akan diatur secara otomatis menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM) yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino. Dengan pengaturan ini, output tegangan konverter dapat disesuaikan secara dinamis sesuai kebutuhan sistem [8].

$$D = \frac{V_o - 1}{1 + \frac{V_o}{V_{in}}} = \dots\dots\dots (2 - 1)$$

$$D_{min} = \frac{\frac{24}{10} - 1}{1 + \frac{24}{10}} = 0,411 \dots\dots\dots (2 - 2)$$

$$D_{max} = \frac{\frac{24}{19} - 1}{1 + \frac{24}{19}} = 0,141 \dots\dots\dots (2 - 3)$$



Keterangan:

- D : Duty Cycle
- Vo : Tegangan output
- Vin : Tegangan input
- Dmin : Duty Cycle untuk tegangan input terendah
- Dmax : Duty Cycle untuk tegangan input tertinggi

Dengan tegangan output yang diinginkan yakni 24 V maka $V_O = 24$. Tegangan input (V_{in}) dari panel surya merupakan variabel yang tidak konstan, sehingga diasumsikan untuk tegangan input terendah adalah 10 V dan tertinggi adalah 19 V hal ini dimaksudkan untuk mengetahui nilai dari duty cycle ketika mendapat tegangan sumber yang bervariasi.

3. Induktor

Penentuan induktor pada komponen

- Induktor L1

$$L_1 = \frac{V_{PV}DT}{\Delta i_{L1}} = \dots\dots\dots(2 - 4)$$

$$L_1 = \frac{19 \times 0,141 \times 1 / 62500}{0,26} = 173,1 \mu H \quad (2 - 5)$$

Keterangan:

- L1 : Nilai Induktansi
- VPV : Tegangan Panel / Tegangan Input
- D : Duty Cycle
- T : Waktu satu siklus penuh ($\frac{1}{\text{frekuensi}}$)
- Δi_{L1} : Ripple arus pada induktor 1

Nilai dari i_{L1} diperoleh dari arus yang melewati induktor L1, dengan persamaan $V_{in}I_{L1} = V_{out}I_{out}$ maka untuk mengetahui nilai nilai dari i_{L1} adalah

$$i_{L1} = \frac{V_{out}I_{out}}{V_{in}} = \dots\dots\dots(2 - 6)$$

Torelasi terhadap ripple arus adalah 10% dari arus nominal sehingga nilai Δi_{L1} adalah $\Delta i_{L1} = 10\% \times i_{L1}$

- Inductor L2

$$L_2 = \frac{V_{C3}(1-D)T}{\Delta i_{L2}} = \dots\dots\dots(2 - 7)$$

$$L_2 = \frac{3,22 \times (1 - 0,141) \times 1 / 62500}{0,19} = 230 \mu H \dots\dots\dots(2 - 8)$$

Keterangan:

- L2 : Nilai Induktansi
- VC3 : Tegangan pada Kapasitor 3
- D : Duty Cycle
- T : Waktu satu siklus penuh ($\frac{1}{\text{frekuensi}}$)
- Δi_{L2} : Ripple arus pada induktor 2

Nilai dari VC3 diperoleh pada persamaan

$$V_{C3} = \frac{D}{1-D} V_{in} \dots\dots\dots(2 - 9)$$

Untuk i_{L2} dapat diperoleh dari dari persamaan



$$i_{L2} = i_{out} - i_{C3} \dots \dots \dots (2 - 10)$$

Sama seperti induktor L1 induktor L2 juga diasumsikan memiliki ripple sebesar 10% dari i_{L2} .

4. Kapasitor

- Kapasitor C1

$$C_1 = \frac{i_{out}DT}{\Delta V_{C1}} \dots \dots \dots (2 - 11)$$

$$C_1 = \frac{1,92 \times 0,141 \times 1/62500}{0,23} = 19,09 \mu F \dots \dots \dots (2 - 12)$$

Keterangan:

- C1 : Nilai Kapasitansi
- Iout : Arus keluaran converter
- D : Duty Cycle
- T : Waktu satu siklus penuh ($\frac{1}{frekuensi}$)
- ΔV_{C1} : Ripple tegangan pada kapasitor 1

Batas ripple tegangan output yang dapat ditoleransi adalah sebesar 1% oleh sebab itu maka

$$\Delta V_{C1} = 1\%V_{C1} \dots \dots \dots (2 - 13)$$

Untuk mencari tegangan pada kapasitor 1 digunakan persamaan

$$V_{C1} = \frac{1}{1-D} V_{in} \dots \dots \dots (2 - 14)$$

-Kapasitor C2

Ripple yang ditoleransi untuk tegangan pada kapasitor adalah sebesar 1%, sehingga diperoleh

$$\Delta V_{C2} = 1\%V_{C2} \dots \dots \dots (2 - 15)$$

Dengan demikian maka nilai kapasitor C3 adalah:

$$C_3 = \frac{T\Delta i_{L2}}{8\Delta V_{C3}} \dots \dots \dots (2 - 21)$$

$$C_3 = \frac{1/62500 \times 0,19}{8 \times 0,032} = 11,94 \mu F \dots \dots \dots (2 - 22)$$

Keterangan:

- C3 : Nilai Kapasitansi pada kapasitor 3
- Δi_{L2} : ripple arus induktor 2
- T : Waktu satu siklus penuh ($\frac{1}{frekuensi}$)
- ΔV_{C3} : Ripple tegangan pada kapasitor 3

5. MOSFET

Daya solar panel sebesar 50Wp dan tegangan keluaran sebesar 17V-19V dengan asumsi efisiensi 100% maka Arus masukan converter

$$I_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{50}{18} = 2,77 A \dots \dots \dots (2 - 23)$$

$$I_{out} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{50}{24} = 2,08 A \dots \dots \dots (2 - 24)$$



Keterangan:

- I_{in} : Arus masukan
- I_{out} : Arus keluaran
- P : Daya yang dihasilkan oleh panel
- V_{in} : Tegangan masukan

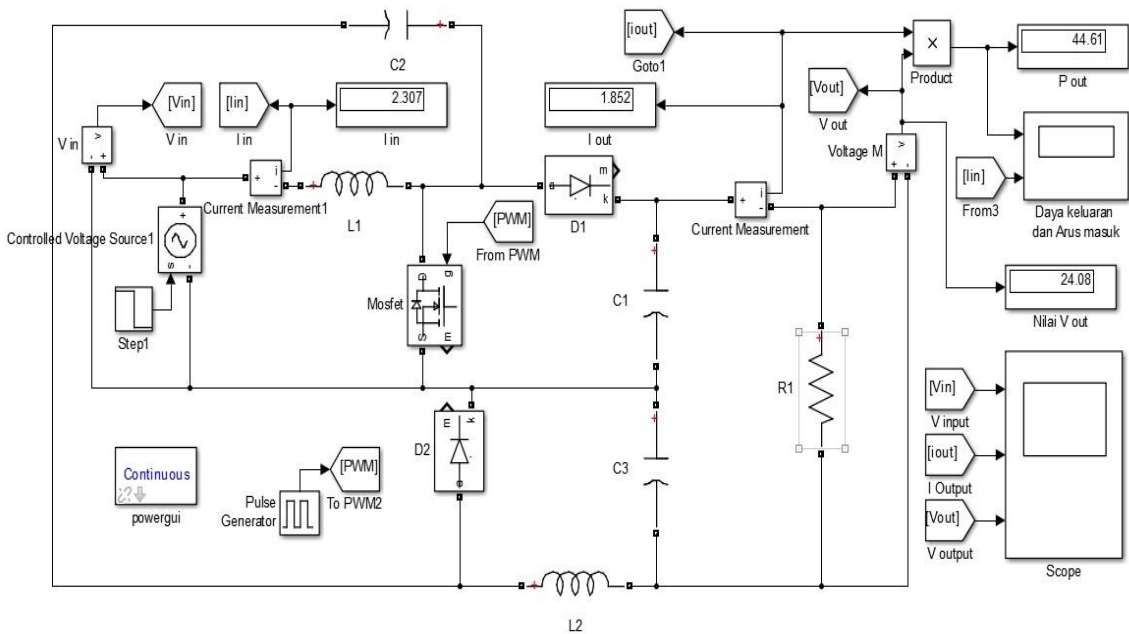
Untuk keandalan dan keamanan rangkaian dipilih rating yang tinggi hingga sama dengan tiga kalinya serta menyesuaikan pasar.

6. Dioda

Pemilihan dioda dapat menggunakan referensi tegangan maximum dan arus forward-bias, sehingga dioda yang dipilih adalah 30 V 5 A.

2.2 Simulasi Pada Software MATLAB

Simulasi sistem menggunakan software Simulink dari MATLAB yang terdiri dari sumber tegangan DC (VDC), non – inverting CUK Converter, dan baterai yang diasumsikan sebagai beban resistif. Parameter pada rangkaian non – inverting CUK Converter merupakan hasil dari perhitungan yang telah dilakukan.



Gambar 3. Rangkaian Simulasi pada Software MATLAB

Dengan fix duty cycle sebesar 0,141 dan tegangan input yang konstan sebesar 19,56 V sehingga converter dapat mencapai output yang diharapkan yaitu 24V.

2.3 Analisis Hasil Software Simulasi

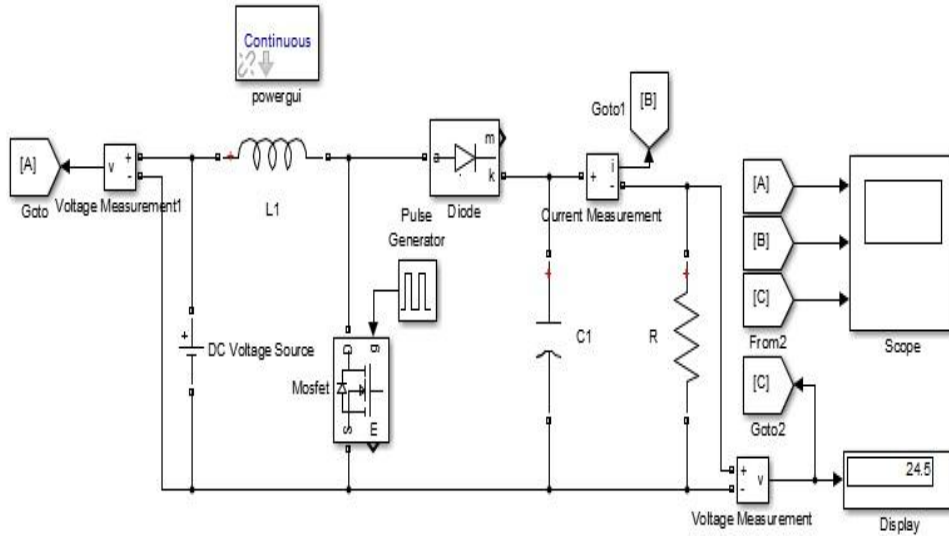
Untuk dapat menunjukan keunggulan / kelebihan dari non-inverting CUK converter tentunya diperlukan data pembandingan dari topologi yang berbeda. Berikut merupakan data simulasi dari CUK converter, Boost converter, dan non-inverting CUK converter pada software Simulink MATLAB dengan tegangan input dan tegangan output yang sama.

2.3.1 Boost Converter

Boost Converter adalah konverter DC-DC yang berfungsi untuk menaikkan tegangan input ke tegangan output yang lebih tinggi. Prinsip kerjanya menggunakan induktor yang menyimpan energi saat switch ON dan



melepaskan energi ke beban saat switch OFF sehingga tegangan output lebih besar dari tegangan input [9]. Untuk mendapatkan tegangan output sebesar 24 V dengan input 19,56 V yang dihasilkan oleh solar PV, topologi boost converter memerlukan duty cycle sebesar 18,5%.

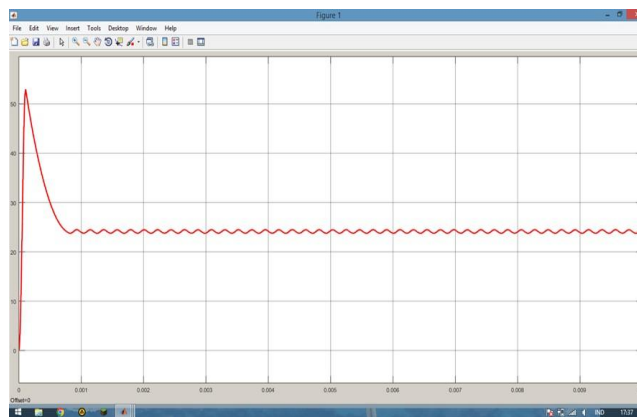


Gambar 4. Boost convertner pada software simulasi Matlab

Tabel 1. Spesifikasi komponen berdasarkan rumus sesuai dengan topologi boost converter.

NO.	Komponen	Spesifikasi
1.	Indukator L_1	12,2 μH
2.	Kapasitor C_1	59,2 μF

Berdasarkan simulasi tersebut, dihasilkan bentuk gelombang pada topologi boost converter sebagai berikut:



Gambar 5. Bentuk Gelombang Bost convertner



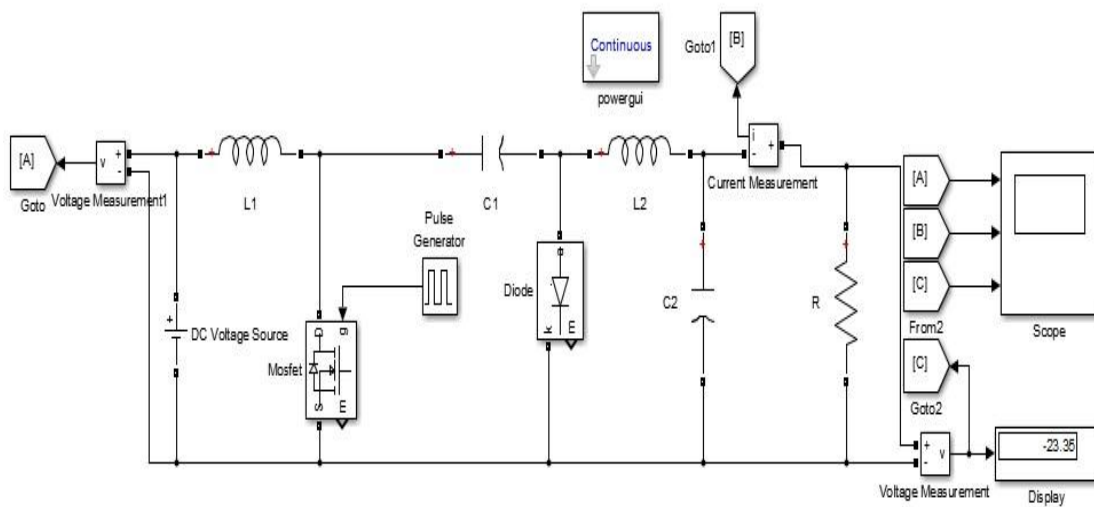
Dalam simulasi tersebut dapat diketahui parameter Rise Time, Setting Time dan Overshoot sebagai berikut:

Tabel 2. Parameter Boost Converter

NO	Parameter	Data
1	Rise Time	8.934 μ s
2	Settling Time	993.807 μ s
3	Overshoot	135.409%

2.3.2 CUK Converter Konvensional

Cuk Converter Konvensional adalah konverter DC-DC yang mampu menghasilkan tegangan output dengan polaritas terbalik dari tegangan input. Konverter ini menggunakan dua induktor dan satu kapasitor untuk mentransfer energi secara kontinu dengan ripple tegangan yang rendah [10]. Pada topologi ini memakai duty cycle sebesar 55% dan memiliki polaritas output yang terbalik.



Gambar 6. Rangkaian CUK convertner pada Software Simulasi MATLAB

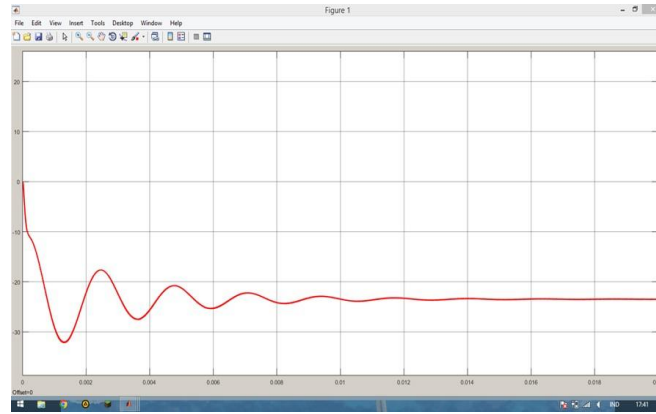
Dengan menggunakan perhitungan sesuai dengan topologi yang tertera pada Gambar 6 maka dapat diperoleh :

Tabel 3. Komponen CUK converter

NO.	Komponen	Spesifikasi
1.	Induktor L_1	665 μ H
2.	Induktor L_2	803 μ H
3.	Kapasitor C_1	42,6 μ F
4.	Kapasitor C_2	1,79 μ F

Berdasarkan simulasi dengan spesifikasi komponen tersebut diperoleh bentuk gelombang sebagai berikut:





Gambar 7. Bentuk Gelombang CUK converter

Dalam simulasi tersebut dapat diketahui parameter dari CUK converter sebagai berikut:

Tabel 4. Parameter CUK converter

NO	Parameter	Data
1	Rise Time	656.346 μ s
2	Settling Time	11.696 ms
3	Overshoot	25.885%

Pada Gambar 7 dapat diketahui bahwa tegangan output turun dari 0. Hal ini dikarenakan kinerja dari topologi itu sendiri. Pada Tabel 4 nilai Rise Time diambil dari nilai Fall Time karena topologi ini memiliki inverting polarity mengakibatkan output tegangan memiliki nilai negatif pada software simulasi.

2.3.3 Non – inverting CUK Converter

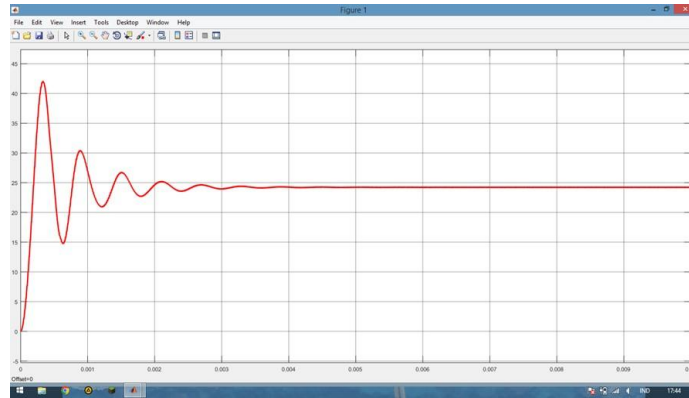
Konverter non-inverting Cuk merupakan topologi hybrid yang menggabungkan konverter Cuk dan boost untuk menghasilkan tegangan output tinggi tanpa membalik polaritas input. Dengan satu saklar daya, topologi ini menawarkan efisiensi tinggi dan kesederhanaan rangkaian, cocok untuk aplikasi fotovoltaik [11]. Dengan perhitungan komponen yang telah dilakukan pada non – inverting CUK converter diperoleh data sebagai berikut :

Tabel 5. Komponen non - inverting CUK converter

NO.	Komponen	Spesifikasi
1.	Induktor L_1	173,1 μ H
2.	Induktor L_2	230 μ H
3.	Kapasitor C_1	19,09 μ F
4.	Kapasitor C_2	19,09 μ F
5.	Kapasitor C_3	11,94 μ F

Hasil simulasi MATLAB seperti pada Gambar 3 diperoleh hasil respon grafik sebagai berikut:





Gambar 8. Bentuk Gelombang non-inverting CUK converter

Dalam simulasi tersebut dapat diketahui parameter Rise Tme, Setting Time dan Overshoot sebagai berikut:

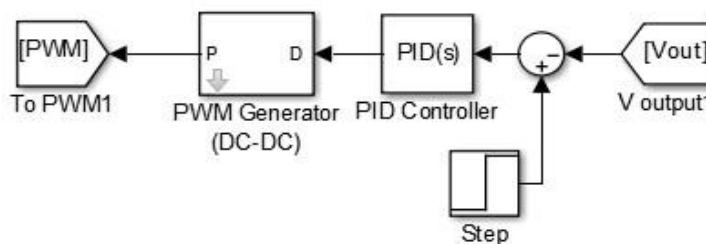
Tabel 6. Parameter non - inverting CUK converter

NO	Parameter	Data
1	Rise Time	48.301 μ s
2	Settling Time	19.997 ms
3	Overshoot	151.429%

Data pada Tabel 4 – Tabel 5 menjelaskan bahwa sistem dari non – inverting CUK converter memiliki nilai Rise Time yang lebih cepat yakni 48.301 μ s dibandingkan dengan topologi konvensional nya dengan nilai 608,346 μ s dan tentunya memiliki polaritas yang tidak terbalik dengan nilai 24V, dengan settling time yang tidak begitu berbeda yaitu 11.696 ms dan 19.997ms. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa rangkaian simulasi pada Gambar 3 yang merupakan rangkaian yang di gunakan memiliki keunggulan dibandingkan topologi konvensional nya dalam hal rise time dan polaritasnya. Namun konverter ini memiliki kelemahan yaitu Overshoot yang masih tinggi sebesar 151.429% dimana masih diperlukan perbaikan. Hal ini ditunjukkan pada bentuk gelombang yang dihasilkan pada Gambar 8. Masalah Overshoot ini dapat diperbaiki dengan menggunakan kontrol PID.

2.4 Kontrol PID pada Non – inverting CUK converter

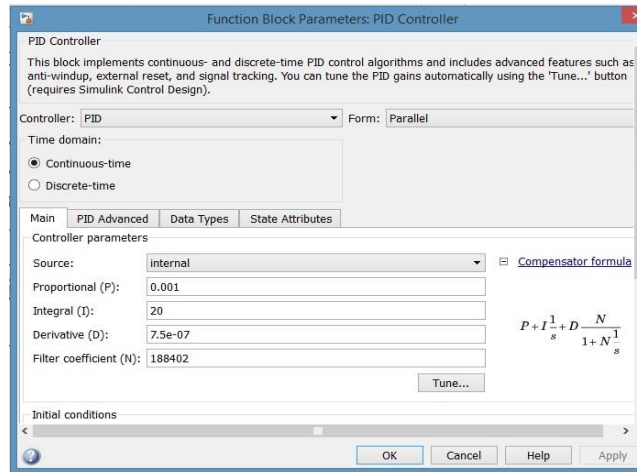
Dengan memberikan kontrol PID pada rangkaian simulasi seperti pada Gambar 9, output yang dihasilkan dari konverter dapat stabil pada set point yang diinginkan sebesar 24 V dengan cara mengubah duty cycle sinyal PWM.



Gambar 9. Rangkaian PID pada software simulasi

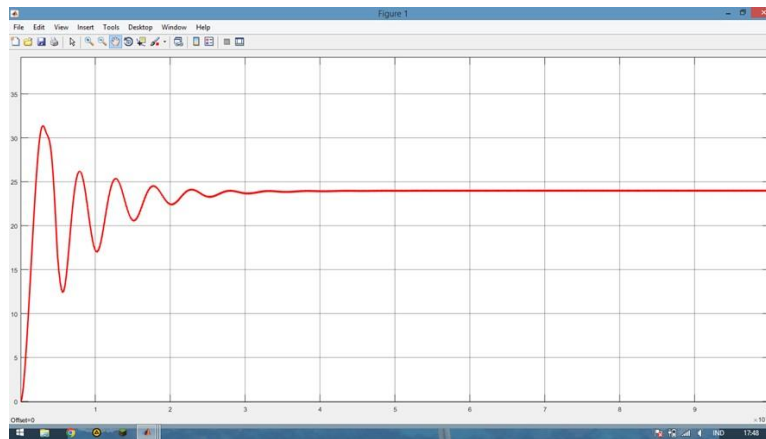
Pemilihan parameter dari PID ditunjukkan pada Gambar 10.





Gambar 10. Parameter PID

Gambar 11 merupakan bentuk gelombang setelah ditambahkan rangkaian kontrol PID pada rangkaian yang digunakan.



Gambar 11. Bentuk Gelombang dengan PID

Dalam simulasi tersebut dapat diketahui

Tabel 7. Parameter non - inverting CUK converter

NO	Parameter	Data
1	Rise Time	135.351 μ s
2	Settling Time	2.536 ms
3	Overshoot	30.921%

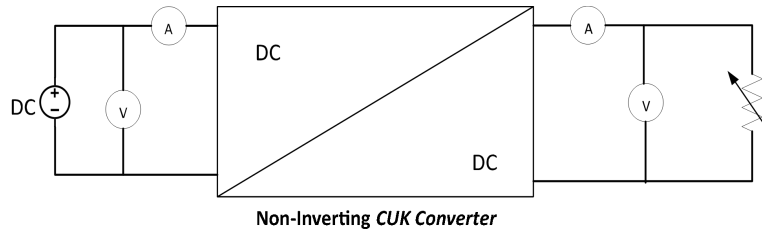
Berdasarkan Tabel 7 simulasi tersebut nilai overshoot sudah dapat diperbaiki oleh kontrol PID dengan nilai sebesar 30,921% dari yang sebelumnya yaitu 151,429%.



3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian non – inverting CUK converter

Dilakukannya pengujian ini adalah untuk mengetahui efisiensi dari non – inverting CUK converter dengan mengukur tegangan dan arus pada input dan output.



Gambar 12. Pengujian non - inverting CUK converter dengan Power Supply

Dengan memvariasikan duty cycle maka tegangan, arus, daya, dan efisiensi dapat diperoleh.

Tabel 8. Pengujian Converter dengan Power Supply

Duty Cycle (%)	Vin (V)	Iin (A)	Pin (W)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (W)	Effisiensi (%)
14	18	2,2	39,6	22,01	1,6	35,21	89%
20	16	2,4	38,4	22,3	1,4	31,22	81%
25	14	2,3	32,2	20,8	1,3	27,04	84%
30	12	2,5	30	21,02	1,2	25,22	84%
40	10	2,3	23	19,6	0,97	19,01	83%

Effisiensi tertinggi didapat pada tegangan input 18V dan duty cycle sebesar 14%. Saat tegangan input mengalami penurunan maka duty cycle akan otomatis naik sehingga output dapat mendekati set point. Dengan data pengujian pada Tabel 8 maka untuk durasi pengisian baterai dengan kapasitas 45Ah pada setiap variabel tegangan input adalah

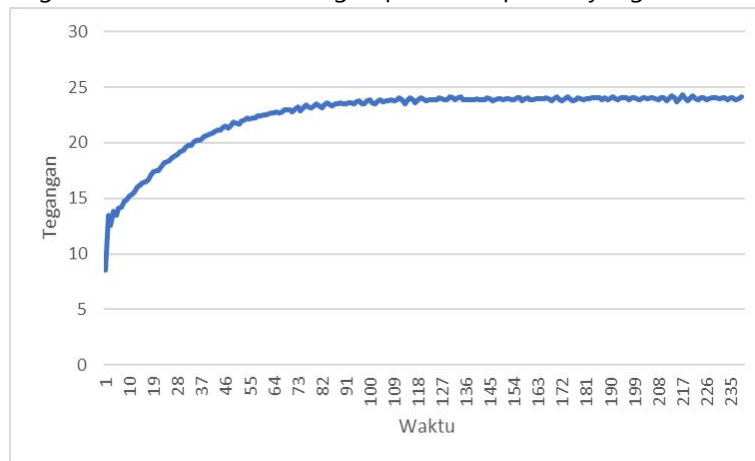
Tabel 9. Durasi pengisian baterai pada setiap variabel input

No	V in (V)	I out (A)	Durasi Pengisian Baterai (Jam)
1	18	1,6	28
2	16	1,4	32
3	14	1,3	35
4	12	1,2	38
5	10	0,97	46



3.2 Pengujian PID

Pengujian ini dilakukan mencari kecepatan sistem menuju titik daya maksimum dan pengujian mengukur besar energi yang didapatkan dengan menggunakan kontroler PID. Dalam pengambilan data digunakan 100 sample data dengan interval 1 detik. Data yang diambil berupa respon sistem, daya maksimal yang didapatkan serta energi yang diperoleh selama 100 detik. Data diambil dari serial monitor pada Arduino IDE dengan penambahan tool ArduSheet pada Arduino IDE memungkinkan data diambil dengan presisi tanpa ada yang terlewatkan.



Gambar 13. Grafik respon PID Tegangan - waktu

Grafik respon daya input sistem dengan kontroler PID terlihat sistem memiliki respon Rise time (T_r) sebesar 82/5ms. Sistem mencapai daya maksimum pada waktu 91/5ms. Osilasi tidak terlihat pada grafik respon. Hal ini merupakan yang diharapkan, sistem lebih stabil pada keadaan steady state .

4. KESIMPULAN

Desain dan implementasi sistem pengisian baterai 24V berbasis panel surya dengan topologi non-inverting CUK converter dapat berjalan dengan baik. Topologi ini berhasil mengatasi masalah polaritas terbalik yang ada pada CUK converter konvensional, sehingga menghasilkan output yang sesuai dengan input, yaitu tegangan positif yang stabil. Keunggulan Topologi Non-Inverting CUK Converter yaitu Topologi non-inverting CUK converter yang digunakan dalam sistem ini menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan topologi CUK converter konvensional. Sistem ini memiliki kelebihan dalam hal kestabilan output dan pengurangan overshoot tegangan. Penggunaan kontrol PID (Proporsional, Integral, Derivatif) terbukti efektif dalam mengurangi overshoot pada output sistem. Tanpa pengendalian PID, overshoot tegangan mencapai 151%, sedangkan dengan kontrol PID, overshoot dapat dikurangi menjadi sekitar 31%, dengan waktu pemulihan yang lebih cepat dan respon yang lebih stabil. **Efisiensi** Sistem yang dikembangkan memiliki efisiensi konversi daya yang memadai, yaitu sekitar 80%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja secara efektif dalam mengoptimalkan penggunaan energi dari panel surya untuk pengisian baterai. **Saran untuk Pengembangan Lebih Lanjut.** Meskipun sistem ini sudah berfungsi dengan baik, masih terdapat potensi untuk peningkatan efisiensi, seperti dengan mengganti komponen-komponen tertentu, misalnya dioda dengan drop tegangan yang lebih kecil atau meningkatkan kapasitas induktor. Selain itu, tuning PID lebih lanjut dapat meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Politeknik Negeri Malang sebagai pemberi dana penelitian atau donator. Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian mulai dari rekan-rekan dosen Teknik Listrik sampai bagian admin Prodi Teknik Listrik.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian ESDM, Outlook Energi Indonesia 2019, Jakarta: KESDM, 2019.
- [2] Pemerintah Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, 2014.
- [3] I. G. Widayana, "Peningkatan Pemanfaatan Energi Surya sebagai Energi Alternatif," *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, vol. 4, no. 1, pp. 25–30, 2016.
- [4] T. M. Asyadi, "Analisis Karakteristik Panel Surya Terhadap Variasi Iradiasi dan Temperatur," *Jurnal Teknologi Energi*, vol. 3, no. 2, pp. 45–51, 2021.
- [5] B. Azmi, "Analisis dan Implementasi Berbagai Metode MPPT pada Sistem PV," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 13–20, 2019.
- [6] E. Emmanuel, "Kombinasi MPPT dan PID untuk Meningkatkan Kinerja Sistem PV," *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, vol. 5, no. 2, pp. 34–40, 2016.
- [7] Sunwatt Solar, "Datasheet Solar Panel Monocrystalline 50WP," Sunwatt Solar, Jakarta, Indonesia, 2020.
- [8] S. R. Saravanamoorthi, P. Rathinavel, E. Sandhya, dan M. K. Manu, "Arduino Based PWM Output Voltage Control of a DC-DC Boost Converter," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 3, pp. 348–352, Mar. 2017.
- [9] A. F. Putra, "Analisis dan Implementasi Boost Converter untuk Pengisian Baterai," Skripsi, Dept. Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2018.
- [10] R. H. Nugroho, "Perancangan Cuk Converter pada Sistem Energi Terbarukan," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2020.
- [11] M. Karthikeyan, R. Elavarasu, P. Ramesh, C. Bharatiraja, P. Sanjeevikumar, L. Mihet-Popa, dan M. Mitolo, "A Hybridization of Cuk and Boost Converter Using Single Switch with Higher Voltage Gain Compatibility," *Energies*, vol. 13, no. 9, pp. 2312, 2020.

