

Implementasi *CUK Inverting Konverter* Pada *Battery Charging* Terintegrasi Fotovoltaik Berbasis PID

Rahma Nur Amalia^{*a)}, Ika Noer Syamsiana^{a)}, Lingga Ahadian Madani^{a)}, Tri Warisaning Widhi^{a)}

(Received 20 Mei 2025 || Revised 16 Juni 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: This study aims to test the performance of PWM, voltage sensors, ACS712 current sensors, and the efficiency of the inverting CUK converter in an energy conversion system. PWM testing showed a stable output frequency of 31.250 Hz across various duty cycles. Voltage sensor testing resulted in an average error of 1.2% for the solar panel sensor and 2.2% for the battery sensor, indicating good accuracy. ACS712 current sensor testing showed an average error of 1.5% at the solar panel input and 9.7% at the converter output to the battery. The inverting CUK converter achieved a maximum efficiency of 89% at a 14% duty cycle. These results indicate that the developed system has high accuracy and efficiency in power conversion. Paying attention to efficiency and accuracy will bring great benefits, such as cost efficiency, system stability, high energy quality. An important contribution of this research is to improve the efficiency and stability of renewable energy systems, especially those integrated with solar panels and batteries, and to support the development of more environmentally friendly and sustainable energy solutions.

Keywords: PWM, Voltage Sensor, Current Sensor, CUK Converter, PID

1. Pendahuluan

Menurunnya produksi energi fosil serta komitmen global dalam mengurangi emisi gas rumah kaca mendorong pemerintah untuk meningkatkan peran energi terbarukan guna menjaga ketahanan energi. Berdasarkan PP No. 79 Tahun 2014, Indonesia menargetkan bauran energi terbarukan mencapai 23% pada 2025 dan 31% pada 2050. Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi surya [1].

Energi surya memiliki keunggulan tidak polutif, tidak terbatas, dan dapat diandalkan. Namun, sifat intermitennya menuntut penggunaan sistem kolektor luas untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatannya [2]. Dalam hal ini, penggunaan Cuk converter menjadi solusi menarik karena mampu menaikkan atau menurunkan tegangan dengan polaritas terbalik. Fleksibilitas operasionalnya memungkinkan pengendalian kecepatan motor brushless DC, terutama dengan kombinasi sistem kontrol berbasis Fuzzy Logic Controller (FLC) [3].

Konverter DC yang mampu meningkatkan tegangan keluaran dengan riak arus input rendah menjadi kebutuhan utama dalam sistem energi surya. Oleh karena itu, penelitian ini mensimulasikan dan mengimplementasikan CUK konverter dengan induktor terkopling untuk meningkatkan efisiensi sistem fotovoltaik [4].

Efisiensi sistem sering dipengaruhi oleh ketidakmampuan mengidentifikasi *Maximum Power Point* (MPP). Sel surya memiliki karakteristik tegangan dan arus yang tidak linier, bergantung pada iradiasi dan suhu. *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) berperan penting dalam mengoptimalkan daya yang diekstraksi [5].

Namun dalam pengembangannya konverter ini dapat lebih besar atau lebih kecil dari tegangan masukan, tetapi tegangan luaran dari konverter ini memiliki polaritas yang terbalik dari tegangan masukannya [6]. Hal ini dapat menyebabkan gangguan dalam operasi, kerusakan pada komponen, dan kegagalan sistem dalam mengatur tegangan dengan benar, yang berpotensi merugikan sistem secara keseluruhan [7]. Permasalahan lain pada konvensional CUK konverter yaitu terkait dengan polaritas berubah yang mana hal ini bisa memperburuk efisiensi konversi dan meningkatkan biaya produksi [8].

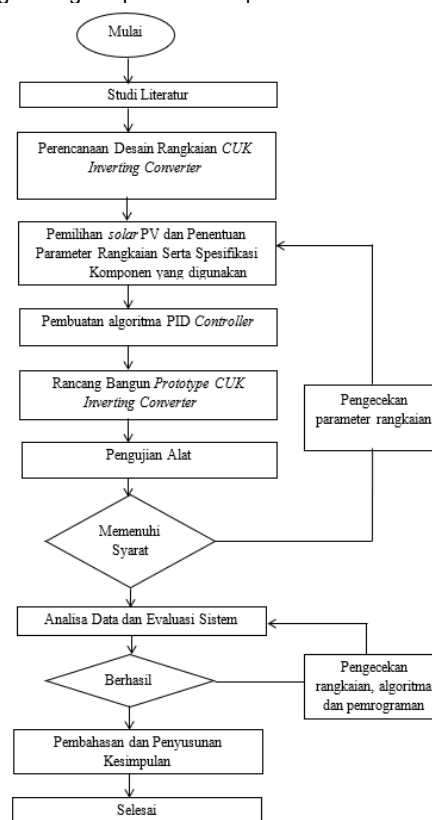
Penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis kinerja *inverting CUK converter* dengan kontrol PID untuk mengatasi masalah polaritas terbalik pada konverter yang sudah pernah dibahas pada penelitian sebelumnya [9]. Kebaruan dari penelitian

ini adalah penerapan kontrol PID pada jenis konverter spesifik (*CUK Inverting Converter*) untuk meningkatkan kinerja sistem pengisian baterai yang langsung terintegrasi dengan sistem panel surya (PV). Permasalahan utama yang dikaji meliputi desain, kinerja, serta perbandingan performa *inverting CUK converter* dengan dan tanpa PID.

2. Metode

2.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini berlangsung dari Januari hingga Juni 2024 di Politeknik Negeri Malang dengan metode pengumpulan data yang mencakup studi literatur, observasi langsung, diskusi, dan analisis data dengan langkah penelitian seperti di Gambar 2.1.



GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR Pengerjaan

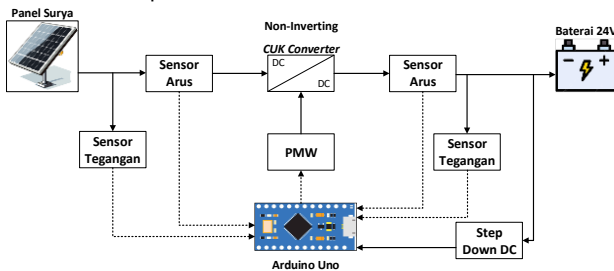
*Korespondensi: rahmaamalia@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

Data yang diperoleh dari hasil diskusi dan referensi digunakan untuk merancang komponen dan rangkaian Non-Inverting CUK Converter. Setelah perancangan selesai, sistem diuji untuk mengevaluasi efisiensi dan kinerjanya. Hasil pengujian kemudian dianalisis guna memastikan optimalisasi konverter sebelum akhirnya disusun dalam laporan penelitian.

2.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem ditunjukkan di Gambar 2.2. Tegangan dan arus input serta output dipantau oleh sensor untuk menentukan daya yang diproses dengan metode MPPT menggunakan Arduino Uno. Inverting CUK Converter menyesuaikan tegangan input guna mencapai daya maksimum melalui pengaturan duty cycle, sementara MOSFET berfungsi sebagai switching berdasarkan frekuensi PWM yang dikontrol oleh Arduino Uno. Sumber daya 5V untuk Arduino diperoleh dari buck converter MP1584.



GAMBAR 2.2 DIAGRAM PERANCANGAN SISTEM CUK CONVERTER

2.3 Perancangan Alat

a. Perancangan Panel Surya

Spesifikasi panel surya yang digunakan seperti pada Tabel 2.1 dengan daya panel adalah 50 WP dan tipe *monocrystalline*.

TABEL 2.1 SPESIFIKASI PANEL SURYA

Merk	Sunwatt
Pm	50 WP
Type	Monocrystalline
Voc	22,18 V
Isc	2,56 A
Vmp	19,56 V
Dimension	(570 x 455 x 30) mm
effisiensi	20.70 %

b. Perancangan Baterai

Baterai yang digunakan merupakan baterai dengan merk G Power memiliki tegangan 12 V dan kapasitas 45Ah.

c. Perancangan Sensor Tegangan

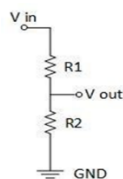
Sensor tegangan menggunakan voltage divider dengan rentang 0-25V. Perhitungan resistor:

$$5 \times (R2 + 30k) = 25 \times R2$$

$$150k = 20R2$$

$$R2 = 7,5 \text{ k} \Omega$$

Nilai $R1 = 30k \Omega$ dan dari hasil perhitungan nilai $R2 = 7,5k \Omega$. Rangkaian sensor tegangan seperti pada Gambar 2.3.



GAMBAR 2.3 RANGKAIAN SENSOR TEGANGAN

d. Perancangan Sensor Arus

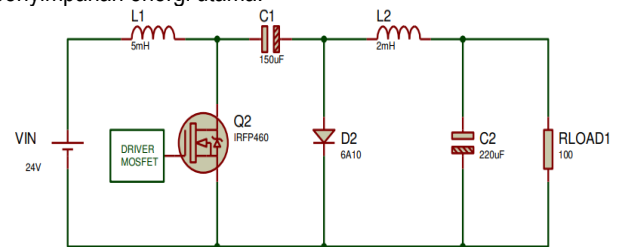
Sensor ACS712 dengan rating 5A digunakan karena arus maksimum sistem sekitar 3A. Sensor ini mengonversi sinyal analog menjadi data digital melalui ADC mikrokontroler.

e. Perancangan Step Down 5V

Modul step down MP1584 digunakan untuk menyediakan daya 5V bagi Arduino, sensor, dan LCD. Modul ini menurunkan tegangan input 7-28V menjadi keluaran stabil 5V dengan arus maksimal 3A.

2.4 Perancangan Inverting CUK Converter

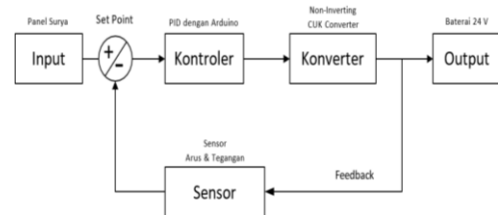
Rancangan inverting CUK converting dapat dilihat di Gambar 2.4. Topologi converter terdiri dari sumber tegangan DC, induktor input (L1), kapasitor input (C1), MOSFET sebagai switch, dioda, induktor output (L2), kapasitor output (C2), dan beban. L1 mengurangi riak tegangan input, sementara C1 menjadi elemen penyimpanan energi utama.



GAMBAR 2.4 DESAIN INVERTING CUK CONVERTER

2.5 Perancangan Kontrol PID

Sedangkan rancangan kontrol PID yang digunakan seperti pada Gambar 2.5.



GAMBAR 2.5 DIAGRAM PERANCANGAN PID

Kombinasi ketiga gain PID ini disesuaikan dengan kebutuhan respon system [10]. Selain itu pendekatan dengan menggunakan PID dalam MPPT telah dilakukan, menghasilkan hasil pendekatan yang lebih unggul dibandingkan dengan teknik alternatif di berbagai domain [11].

Kontrol P meningkatkan kecepatan respon tetapi tidak menghilangkan error dengan Persamaan (2-1).

$$Gc(s) = KP \quad (2-1)$$

Kontrol PI mengurangi error steady-state dengan Persamaan (2-2).

$$Gc(s) = KP + \frac{KI}{s} = \frac{Kps + KI}{s} \quad (2-2)$$

Kontrol PD: Memperbaiki tanggapan transient dengan Persamaan (2-3)

$$Gc(s) = KP + KDs = KP \left(s + \frac{KP}{KD} \right) \quad (2-3)$$

Kontrol PID menggabungkan ketiga elemen untuk memperoleh keseimbangan optimal antara kecepatan respon dan akurasi sistem dengan Persamaan (2-4)

$$Gc(s) = KP + KDs + \frac{KI}{s} = \frac{KDs^2 + Kps + KI}{s} \quad (2-4)$$

Kontrol PID digunakan untuk mencapai kestabilan sistem dengan parameter Kp , Ki , dan Kd yang disesuaikan secara manual atau menggunakan metode *trial and error*. Langkah-langkah

metode *trial and error* sebagai berikut.

- Mengatur nilai awal K_i dan K_d menjadi nol.
- Meningkatkan K_p hingga sistem mencapai setpoint dengan respon berosilasi.
- Menyesuaikan K_i untuk meredam osilasi.
- Mengoptimalkan K_d guna mengurangi *overshoot*.

3. Hasil dan Analisis

3.1 Perencanaan Spesifikasi Komponen

Pemilihan serta perhitungan komponen dalam sistem ini dilakukan untuk memastikan kinerja optimal. Beberapa komponen utama yang diperhitungkan seperti uraian berikut.

3.1.1 Duty Cycle

Duty cycle berfungsi untuk mengatur tegangan output dari konverter melalui PWM dengan Persamaan (3-1).

$$V_o = V_{in} \frac{D}{1-D} \quad (3-1)$$

$$D = 0,571$$

Dengan tegangan output 24V dan tegangan input dari panel surya yang bervariasi antara 10 V hingga 19 V, dilakukan perhitungan untuk menentukan *duty cycle* pada berbagai kondisi tegangan sumber.

3.1.2 Induktor

Pemilihan induktor didasarkan pada nilai arus dan tegangan. Perhitungan untuk induktor pertama (L_1) menggunakan Persamaan (3-2).

$$L_1 = \frac{D \times V_{in}}{\Delta I_L \times f_s} \quad (3-2)$$

$$L_1 = \frac{0,571 \times 18}{2,248 \times 30000}$$

$$L_1 = 152,5 \mu H$$

Untuk induktor kedua (L_2) menggunakan Persamaan (3-3).

$$L_2 = \frac{(1-D) \times V_{dc}}{\Delta I_{Lo} \times f_s} \quad (3-3)$$

$$\Delta I_{Lo} = 0,25 \times 3 A = 0,75$$

$$L_2 = \frac{(1 - 0,57) \times 24V}{0,75 A \times 30000Hz}$$

$$L_2 = 459 \mu H$$

Sama seperti induktor L_1 , induktor L_2 juga diasumsikan memiliki *ripple* sebesar 10% dari iL_2 .

3.1.3 Kapasitor

Kapasitor digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan sistem. Perhitungan kapasitor pertama (C_1) menggunakan Persamaan (3-4).

$$C_1 = \frac{D \times I_{dc}}{\Delta V_{ci} \times f_s} \quad (3-4)$$

$$\Delta V_{ci} = 0,035 \times 24 = 0,84 V$$

$$C_1 = \frac{0,571 \times 5,62}{0,84 V \times 30000 Hz} = 127,3 \mu F$$

Untuk kapasitor kedua (C_2) menggunakan Persamaan (3-5).

$$C_2 = \frac{I_{dc}}{\Omega \Delta V_{cd}} \quad (3-5)$$

$$\Delta V_{cd} = 0,15 \times V_{out}$$

$$\Delta V_{cd} = 0,15 \times 24V = 0,36V$$

$$\Omega = 0,01 \times 24V - 0,24V$$

$$C_2 = \frac{3A}{0,24V \times 0,36V} = 34,7 \mu F$$

3.1.4 Mosfet

Daya solar panel sebesar 50Wp dan tegangan keluaran

sebesar 17V – 19V dengan asumsi efisiensi 100% maka arus masukan konverter adalah seperti pada Persamaan (3-6).

$$I_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{50}{18} = 2,77 A \quad (3-6)$$

Arus keluaran konverter adalah seperti pada Persamaan (3-7).

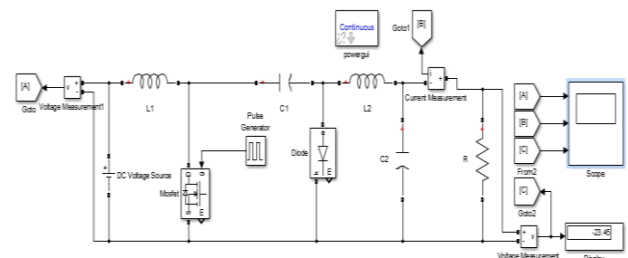
$$I_{out} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{50}{24} = 2,08 A \quad (3-7)$$

3.1.5 Dioda

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

3.2 Simulasi Pada Software MATLAB

Simulasi menggunakan MATLAB Simulink terdiri dari sumber tegangan DC, non-inverting CUK Konverter, dan baterai yang diasumsikan sebagai beban resistif. Dengan *duty cycle* tetap sebesar 0,571 dan tegangan input konstan 18V, konverter mencapai output 24V sesuai perhitungan topologi CUK Konverter. Berikut adalah simulasi rangkaian konverter CUK seperti pada Gambar 3.1.



GAMBAR 3.1 RANGKAIAN CUK KONVERTER PADA SOFTWARE SIMULASI MATLAB

Tabel 3.1 menjelaskan spesifikasi komponen yang digunakan.

TABEL 2.1. KOMPONEN CUK KONVERTER

No	Komponen	Spesifikasi
1	Induktor L_1	152,5 μH
2	Induktor L_2	459 μH
3	Kapasitor C_1	127,3 μF
4	Kapasitor C_2	34,7 μF

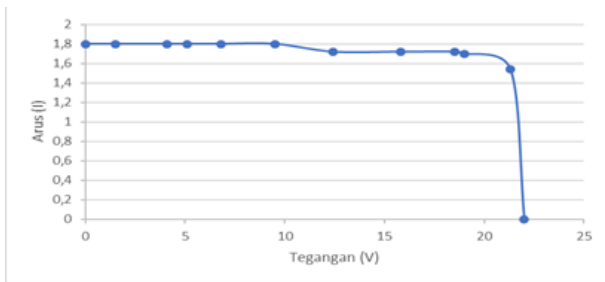
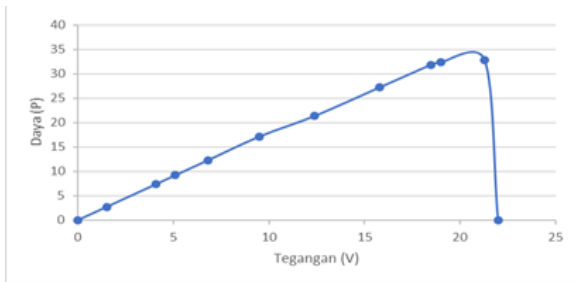
3.3 Pengujian Komponen

Pengujian komponen dilakukan untuk memastikan kelayakan setiap bagian sebelum pengujian sistem keseluruhan. Pengujian meliputi seperti penjelasan di bawah ini.

3.3.1 Pengujian Panel Surya

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan panel surya ke beban berupa rheostat, lalu memantau nilai tegangan dan arus menggunakan voltmeter dan amperemeter. Uji hubung buka dan hubung singkat dilakukan untuk mendapatkan tegangan hubung buka (V_{oc}) dan arus hubung singkat (I_{sc}).

Gambar 3.2 menunjukkan grafik hasil pengujian panel menggunakan rheostat dengan radiasi matahari 994,7 W/m² dan pada suhu panel 49 °C. Tegangan dengan nilai tertinggi merupakan tegangan hubung buka (V_{oc}) yakni sebesar 22 V dan arus hubung singkat (I_{sc}) pada 1,8 A. Sedangkan Gambar 3.3 menunjukkan kurva daya terhadap tegangan. Nilai daya maksimum (P_{mp}) yang dihasilkan dari panel tersebut berada pada tegangan 21,3 V yang menghasilkan daya sebesar 32,8 W dengan arus yang mengalir sebesar 1,8 A.


GAMBAR 3.2 GAMBAR KURVA V-I

GAMBAR 3.3 GAMBAR KURVA P - V

Untuk mendapatkan nilai dari *Fill Factor*, P_{max} (Daya maksimum) dan efisiensi menggunakan Persamaan (3-5) sebagai berikut [12].

a. Nilai *Fill Factor*

Nilai fill faktor berada pada angka 0,7 – 0,85. Efisiensi kinerja dari panel surya sebanding dengan besarnya nilai FF. Perhitungan nilai FF didapat dari persamaan berikut.

$$FF = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3-5)$$

$$FF = \frac{1.54 \times 21.3}{1.8 \times 22} = 0.828$$

Keterangan:

I_{mp} : Arus maksimum (A)

I_{sc} : Arus hubung singkat (A)

V_{mp} : Tegangan maksimum (V)

V_{oc} : Tegangan short circuit (V)

FF : *Fill Factor*

b. Daya Output

Nilai dari Daya Output didapatkan dari Persamaan (3-6).

$$P_{mp} = V_{oc} \times FF \times I_{sc} \quad (3-6)$$

$$P_{mp} = 22 \times 0.828 \times 1.8 = 32.78 \text{ W}$$

Keterangan :

P_{mp} : Daya maksimum (P)

c. Efisiensi Panel

Nilai efisiensi dapat diperoleh dari Persamaan (3-7).

$$\eta = \frac{P_{mp}}{G \times A} \times 100\% \quad (3-7)$$

$$\eta = \frac{32.78}{994.7 \times 0.26} \times 100\% = 12\%$$

Keterangan :

η : efisiensi (%)

G : irradiance (W/m^2)

A : Luas penampang PV (m^2)

3.3.2 Pengujian Induktor dan Kapasitor

Pengujian induktor menggunakan LCR Meter menunjukkan

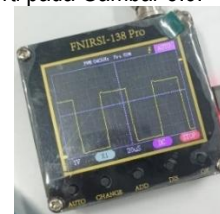
nilai induktansi pada induktor 1 sebesar $0.03 \mu\text{H}$ sementara induktor 2 sebesar $0.04 \mu\text{H}$. Gambar 3.4 dan Gambar 3.5 menunjukkan hasil pengujian kapasitor untuk memastikan nilai kapasitansi sesuai dengan spesifikasi.


GAMBAR 3.4 HASIL PENGUJIAN INDUKTOR 1 MENGGUNAKAN LCR METER

GAMBAR 3.5 HASIL PENGUJIAN INDUKTOR 2 MENGGUNAKAN LCR METER

3.3.2 Pengujian *Pulse Width Modulator* (PWM) dan Sensor Tegangan

Pengujian PWM menunjukkan frekuensi output 31.250 Hz pada duty cycle 20% seperti pada Gambar 3.6.


GAMBAR 3.6 GRAFIK PWM

Sensor tegangan menggunakan prinsip pembagi tegangan dan diuji menggunakan multimeter SANWA CD800A untuk memastikan akurasi pengukuran dan kalibrasi nilai resistansi. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan sensor terhadap voltmeter untuk menghitung error (%). Hasilnya disajikan dalam Tabel 3.2.

TABEL 3.2 PENGUJIAN SENSOR TEGANGAN

NO	Tegangan (V)		Error (%)
	Sensor	Voltmeter	
1	15	15,3	1,96%
2	17	17,2	1,16%
3	19	19,1	0,52%
4	21	20,7	1,43%
5	23	22,8	0,87%
Rata - rata			1,2%

Hasil menunjukkan sensor tegangan memiliki error rata-rata 1,2%, masih dalam batas yang dapat diterima. Kedua sensor tegangan layak digunakan karena error rendah dan hasil pengukurannya cukup stabil. Hal ini disebabkan beberapa faktor seperti kalibrasi yang tepat, linearitas respons, stabilitas

operasional, serta desain sirkuit amplifier yang berkualitas.

3.3.3 Pengujian Sensor Arus ACS712

Pengujian sensor arus ACS712 bertujuan untuk mengukur tingkat akurasi terhadap amperemeter dan memastikan kesesuaian spesifikasi pada *datasheet*. Hasil pengujian dibandingkan dengan amperemeter digital SANWA DCM 400AD, dengan data yang ditampilkan dalam Tabel 3.3.

TABEL 3.3 PENGUJIAN SENSOR ARUS

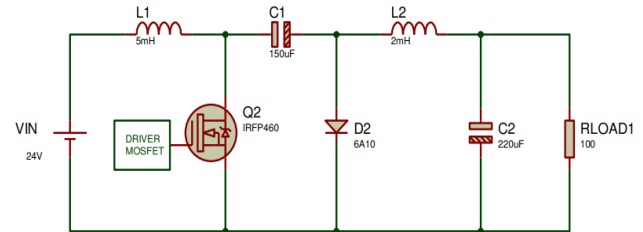
NO	Arus (A)		Error (%)
	Sensor	Amperemeter	
1	0,34	0,39	13%
2	0,32	0,34	6%
3	0,4	0,48	17%
4	0,42	0,46	9%
5	0,45	0,47	4%
Rata - rata			9,75%

Sensor arus memiliki error rata-rata 9,7%, dengan error tertinggi pada 17% (arus 0,4A). Hal ini disebabkan karena beberapa faktor

kalibrasi yang tepat, pemilihan tegangan referensi, pengujian rentang arus yang sesuai dan pengujian dengan beban yang konsisten. Sensor arus 2 memiliki error rata-rata 9,7%, dengan error tertinggi pada 17% (arus 0,4A).

3.3.4 Pengujian Inverting CUK Konverter

Pengujian ini mengukur efisiensi non-inverting CUK converter dengan variasi duty cycle. Rangkaian pengujian dilakukan seperti pada Gambar 3.7 dan hasil pengujian ditampilkan dalam Tabel 3.4.



GAMBAR 3.7 PENGUJIAN INVERTING CUK CONVERTER DENGAN POWER SUPPLY

TABEL 3.4 PENGUJIAN CUK INVERTING 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	35,216	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	25,224	84%
40	10	2,3	23	19,6	0,97	19,012	83%

Efisiensi tertinggi (89%) dicapai pada $V_{in} = 18V$ dan *duty cycle* 14%. Hal ini menunjukkan *duty cycle* yang kecil, yaitu 14%, menunjukkan bahwa konverter bekerja dengan pengaturan *switching* yang lebih cepat. Stres tegangan dan arus pada komponen berkurang sehingga kerugian daya pada saklar dan dioda sangat rendah serta *Duty cycle* yang rendah menghasilkan pemanasan komponen yang minimal, mengurangi resistansi internal seperti pada MOSFET yang meningkat jika komponen menjadi panas. Hal ini menyebabkan efisiensi keseluruhan meningkat.

Hal ini juga sejalan dengan penelitian [13] bahwa Efisiensi Inverting Cuk Converter biasanya lebih tinggi dibandingkan konverter Non-Inverting Cuk Converter karena lebih sederhana secara topologi dan minim kerugian *switching* serta konduksi.

Seperti pada penelitian [14] yang membahas tentang *Duty cycle* tinggi pada Cuk converter konvensional dapat meningkatkan tegangan keluaran dan efisiensi hingga titik tertentu. Namun, jika tidak dirancang dengan tepat, dapat menyebabkan overcurrent dan kerusakan pada komponen, terutama pada beban induktif.

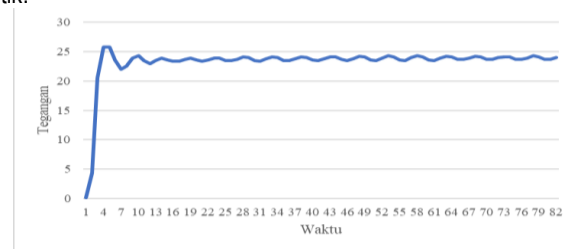
Dengan data pengujian pada tabel 3.5 maka untuk durasi pengisian baterai dengan kapasitas 45Ah pada setiap variabel tegangan input seperti pada Tabel 3.5.

TABEL 3.5 DURASI PENGISIAN BATERAI PADA SETIAP VARIABEL INPUT

No	Vin (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

3.4 Pengujian PID

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kecepatan sistem dalam mencapai daya maksimum menggunakan kontroler PID. Nilai $K_p = 28.0$, $K_i = 1$, $K_d = 1.5$ digunakan dengan 80 sampel per detik menggunakan Arduino IDE + Arduinosheet untuk hasil akurat dengan hasil ditampilkan di Gambar 3.8. Data mencakup respon sistem, daya maksimum, dan energi yang diperoleh selama 80 detik.



GAMBAR 3.8 RESPON DAYA MASUKAN SISTEM DENGAN PID

Dengan kontroler PID sistem memiliki transien dengan delay time 1s dan rise time 3s. Meskipun pencapaian daya maksimum lebih lambat, respon *steady state* lebih stabil dengan grafik perubahan daya yang halus dan minim osilasi. Sistem juga lebih adaptif terhadap perubahan radiasi panel surya. Hal ini memperkuat penelitian sebelumnya [15], [16] bahwa Kontrol PID secara signifikan mengurangi osilasi tegangan output, mempercepat respons dinamik, serta menjaga stabilitas keluaran secara konsisten terhadap variasi beban.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh hasil *tuning* yang terbaik yakni $K_p=28$ $K_i=1$ $K_d=1,5$. Penggunaan *closed loop boost converter* (Menggunakan *PID Controller*) terbukti dapat menaikkan tegangan input (*Vinput*) dari solar PV bervariasi dari 80 sample data yang diambil rata-ratanya yakni dari 18,63 Volt menjadi 22,01 dengan efisiensi *boost converter* sebesar 89%. Kontrol PID dapat memperbaiki respon transien yakni dengan mempercepat nilai *rise time* (*tr*) menjadi 1,62 ms, delay time 1s dan *rise time* 3s. Meskipun pencapaian daya maksimum lebih lambat, respon *steady state* lebih stabil dengan grafik perubahan daya yang halus dan minim osilasi hal ini mendukung penelitian sebelumnya bahwa Kontrol PID secara signifikan mengurangi osilasi tegangan output, mempercepat respons dinamik, serta menjaga stabilitas output secara konsisten terhadap variasi beban. Potensi pengembangan dapat dilakukan pada ranah kontrol adaptif berbasis kecerdasan buatan, desain modular hardware, penyimpanan energi secara hybrid dan desain multi level konverter

Referensi

- [1] Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Indonesia Energy Outlook 2019," *J Chem Inf Model*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [2] B. K. Susanto, "Desain dan Implementasi Konverter Cuk Dengan Induktor Terkopel Untuk Reduksi Ripple Arus Masukan," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [3] H. Suryatmojo, A. P. Nandiwardhana, S. A. N. R. Arsyah, H. P. Putra, R. Mardiyanto, and M. Ashari, "Comparisons of Cuk, SEPIC and Zeta converter performance for harmonics mitigation and PFC in BLDC speed control," *In Proceeding - 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2016*, pp. 681–686, 2016, doi: 10.1109/ISITIA.2016.7828742.
- [4] A. Pradipta, D. C. Riawan, and S. Soedibyo, "Kontrol Aliran Daya Sistem Manajemen Baterai Dengan Kontrol Droop Pada Sistem Pembangkit Hibrid PLTS-PLTB," INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA, 2018.
- [5] S. UTAMI, S. SAODAH, and A. PUDIN, "Penggunaan Algoritma Incremental Conductance pada MPPT dengan Buck Converter untuk Pengujian Indoor dan Outdoor," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 6, no. 1, p. 97, 2018, doi: 10.26760/elkomika.v6i1.97.
- [6] H. Suryatmojo, A. P. Nandiwardhana, S. A. N. R. Arsyah, H. P. Putra, R. Mardiyanto, and M. Ashari, "Comparisons of Cuk, SEPIC and Zeta converter performance for harmonics mitigation and PFC in BLDC speed control," *In Proceeding - 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2016*, pp. 681–686, 2016, doi: 10.1109/ISITIA.2016.7828742.
- [7] V. Siva Prasad and D. Kumar Jena, "Improvement in Pre-Regulation for Power Factor Using CUK Converter," *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES) ISSN*, vol. 3, no. 9, pp. 51–56, 2015, [Online]. Available: www.ijres.org
- [8] K. A. Mahafzah, A. Q. Al-Shetwi, M. A. Hannan, T. S. Babu, and N. Nwulu, "A New Cuk-Based DC-DC Converter with Improved Efficiency and Lower Rated Voltage of Coupling Capacitor," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/su15118515.
- [9] H. Gholizadeh, S. A. Gorji, E. Afjei, and D. Sera, "Design and implementation of a new cuk-based step-up dc-dc converter," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/en14216975.
- [10] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications," 2021. doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [11] I. N. Syamsiana, R. N. A. Wijaya, A. D. W. Sumari, R. N. Amalia, and H. Sungkowo, "Maximization of battery charging efficiency in photovoltaic systems through PI Controlled SEPIC Converter with P&O MPPT," *Results in Engineering*, vol. 26, no. May, p. 105469, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105469.
- [12] C. M. Coman, A. Florescu, and C. D. Oancea, "Improving the efficiency and sustainability of power systems using distributed power factor correction methods," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 8, 2020, doi: 10.3390/SU12083134.
- [13] Rahma Nur Amalia, Ika Noer Syamsiana, Aditya Andri Prasjo, and Ahmad Romi Alfa Hidayah Fauzi, "Desain dan Implementasi Battery Charging pada Fotovoltaik dengan Topologi Non-Inverting Cuk Konverter," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 12, no. 1, pp. 19–32, 2025, doi: 10.33795/elkolind.v12i1.7370.
- [14] T. Berliana et al., "Analisis Perbandingan Efisiensi Buck-Boost Converter Dengan Cuk Converter Pada Panel Surya," *KOLONI: Jurnal Multidisiplin Ilmu*, vol. 3, no. 2, pp. 2828–6863, 2024.
- [15] D. Sevim and V. Gider, "Designing a Control Interface and PID Controller of CUK Converter," vol. 11, no. 1, p. 2021, 2021, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejtEuropeanJournalofTechniquejournalhomepage:https://dergipark.org.tr/en/pub/>
- [16] R. N. Amalia and Wijaya Kusuma, "Desain Simulasi dan Analisa Closed Loop Boost Converter Terintegrasi Solar PV Berbasis PID," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.33795/elposys.v10i1.1078.