REKAYASA
Journal of Science and Technology
https://journal.trunojoyo.ac.id/rekayasa

Rekayasa, 2025; 18(3): 466-482
ISSN: 0216-9495 (Print)
ISSN: 2502-5325 (Online)

Optimasi Kinerja *Buck Converter* Menggunakan *Proportional Integral Controller* untuk Regulasi Tegangan Stabil

Muhammad Rinande Ansutia[1], Jamaluddin[1], Perdana Putera[1*]
Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh
Jl Raya Negara KM 7 Tanjung Pati Lima Puluh Kota Sumatera Barat
*E-mail Korespondensi : perdanaputera81@gmail.com
DOI: https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i3.31524
Submitted August 18th 2025, Accepted November 28th 2025, Published December 19th 2025

Abstrak

Optimalisasi kinerja *Buck Converter* dilakukan melalui penerapan *Proportional-Integral* (PI) *Controller* untuk mencapai regulasi tegangan *output* yang lebih stabil pada sistem elektronik berbasis tegangan searah (DC). *Buck Converter* merupakan konverter DC-DC yang berfungsi menurunkan tegangan *input* menjadi tegangan *output* yang lebih rendah, namun pada konfigurasi *open-loop* kestabilan tegangan sulit dipertahankan ketika terjadi variasi beban atau fluktuasi tegangan *input*. Kondisi ini menyebabkan *error* regulasi, *overshoot*, serta osilasi yang mengurangi akurasi dan keandalan sistem. Dalam penelitian ini, PI *Controller* diterapkan dalam konfigurasi *closed-loop* sebagai solusi untuk meningkatkan performa pengaturan tegangan. Metode penelitian dilakukan sepenuhnya melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PLECS dengan menganalisis respons sistem pada kondisi tanpa PI *Controller* (*open-loop*) dan dengan PI *Controller* (*closed-loop*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem *open-loop* sangat bergantung pada variasi tegangan *input* dan tidak mampu menjaga tegangan *output* pada nilai referensi secara konsisten. Sebaliknya, PI *Controller* mampu menurunkan *steady-state error* secara signifikan dari rata-rata 25,13% menjadi 0,52%, mempercepat waktu stabilisasi, serta menghilangkan *overshoot* berlebih yang sebelumnya muncul pada sistem *open-loop*. Selain itu, tegangan *output* dapat dipertahankan mendekati 12 V dengan deviasi maksimum hanya 0,08 V meskipun terjadi perubahan pada tegangan *input*. Temuan ini menunjukkan bahwa PI *Controller* efektif dalam meningkatkan kestabilan, akurasi, dan keandalan regulasi tegangan pada *Buck Converter*. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem elektronika daya yang membutuhkan kontrol tegangan lebih adaptif dan efisien pada berbagai kondisi operasi.

Kata Kunci: regulasi DC, respons transien, konversi tegangan, stabilitas sistem, sistem umpan balik

Abstract

Optimization of Buck Converter performance is carried out through the application of a Proportional-Integral (PI) Controller to achieve more stable output voltage regulation in direct current (DC)-based electronic systems. The Buck Converter is a DC-DC converter that steps down the input voltage to a lower output voltage; however, in an open-loop configuration, maintaining output voltage stability becomes challenging when load variations or input fluctuations occur. These conditions lead to regulation errors, overshoot, and oscillations that reduce system accuracy and reliability. In this study, the PI Controller is implemented in a closed-loop configuration as a solution to enhance voltage regulation performance. The research method is conducted entirely through simulations using PLECS software, analyzing system responses under both open-loop (without PI Controller) and closed-loop (with PI Controller) conditions. Simulation results show that the open-loop system is highly dependent on input voltage variations and unable to maintain output voltage consistently at the reference value. In contrast, the PI Controller significantly reduces the steady-state error from an average of 25,13% to 0,52%, accelerates stabilization time, and eliminates excessive overshoot observed in the open-loop system. Additionally, the output voltage can be maintained near 12 V with a maximum deviation of only 0,08 V despite changes in input voltage. These findings demonstrate that the PI Controller is effective in improving stability, accuracy, and reliability of voltage regulation in Buck Converters. The results contribute to the development of power electronics systems requiring more adaptive and efficient voltage control under various operating conditions.

***Key words**: DC regulation, transient response, voltage conversion, system stability, feedback control*

PENDAHULUAN

Konversi daya merupakan komponen vital dalam sistem kelistrikan dan elektronik modern yang berfungsi untuk mengubah parameter listrik, seperti tegangan dan arus, agar sesuai dengan kebutuhan sistem atau perangkat yang digunakan. Teknologi ini menjadi kunci utama dalam menjaga efisiensi energi, stabilitas operasional, serta kompatibilitas antara sumber daya dan beban (Arifin & Putri, 2021). Secara umum, konversi daya dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis, yaitu AC-DC, DC-DC, DC-AC, dan AC-AC,

yang masing-masing memiliki peran tersendiri dalam berbagai aplikasi seperti sistem energi terbarukan, perangkat portabel, kendaraan listrik, dan pembangkit listrik (Krismadinata & Husnaini, 2017).

Salah satu bentuk konversi daya yang paling banyak digunakan dalam sistem elektronik adalah konverter DC-DC, khususnya *Buck Converter*. *Buck Converter* digunakan untuk menurunkan tegangan DC dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah dengan efisiensi konversi yang tinggi. Teknologi ini diterapkan secara luas, mulai dari sistem pengisian daya perangkat elektronik, pengaturan catu daya dalam sistem mikroprosesor, manajemen baterai, hingga sistem tenaga dalam kendaraan listrik dan industri otomasi (Kunigar *et al.,* 2023; Jagadeesh & Indragandhi, 2019).

Namun, salah satu tantangan utama dalam implementasi *Buck Converter* adalah kemampuannya dalam mempertahankan regulasi tegangan yang stabil, terutama ketika terjadi variasi beban atau fluktuasi tegangan *input*. Perubahan beban yang cepat atau gangguan dari sumber daya dapat menyebabkan tegangan *output* menjadi tidak stabil, mengalami *overshoot*, atau bahkan osilasi, yang dalam jangka panjang dapat menurunkan efisiensi dan merusak komponen sistem (Hardani *et al.,* 2019). Tegangan *output* yang tidak stabil dapat menyebabkan kerusakan pada perangkat elektronik sensitif, meningkatkan keausan pada sistem, serta menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan (Letsoin, 2019). Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengendalian yang mampu menjaga kestabilan tegangan meskipun terjadi gangguan dari sisi *input*.

Salah satu solusi yang telah banyak digunakan untuk meningkatkan performa sistem konversi daya adalah dengan menerapkan *Proportional-Integral* (PI) *Controller*, yang merupakan bagian dari pengendali klasik. PI *Controller* efektif dalam mengurangi kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) dan memperbaiki respons transien sistem (Chincholkar *et al.,* 2024). Dengan memanfaatkan PI *Controller*, sistem dapat secara dinamis menyesuaikan lebar sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) berdasarkan selisih antara tegangan referensi dan tegangan *output* aktual. Komponen proporsional bertugas mempercepat respons sistem, sedangkan komponen integral berperan dalam menghilangkan kesalahan steady-state, sehingga kombinasi keduanya memberikan respons yang stabil dan presisi (Darajat & Istiqphara, 2021).

PI *Controller* juga unggul karena memiliki desain yang relatif sederhana dan mudah diimplementasikan dalam sistem mikrokontroler seperti ESP32, dibandingkan dengan pengendali PID yang membutuhkan tuning parameter tambahan. Penelitian yang dilakukan oleh Krismadinata & Husnaini (2017) menunjukkan bahwa PI *Controller* cukup efektif dalam menjaga kestabilan tegangan *output* pada *Buck Converter*, terutama dalam lingkungan yang memerlukan regulasi tegangan yang tidak terlalu kompleks namun tetap akurat.

Lebih lanjut, studi oleh Yunta *et al* (2022) menunjukkan efektivitas PI *Controller* pada sistem penyimpanan energi berbasis superkapasitor yang dikombinasikan dengan *Buck* dan *boost converter*. Dalam penelitian tersebut, PI *Controller* tidak hanya mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran tetapi juga memungkinkan transisi yang mulus antara dua mode operasi (*Buck* dan *Boost*), sebuah karakteristik yang sangat dibutuhkan dalam sistem tenaga terbarukan seperti panel surya atau sistem penyimpanan energi hibrida.

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan, namun implementasi dan optimasi PI *Controller* pada *Buck Converter* tetap menjadi topik yang relevan, terutama dengan semakin berkembangnya perangkat mikrokontroler dan kebutuhan konversi daya yang lebih presisi. Dalam banyak kasus, *tuning* parameter PI masih dilakukan secara empiris, sehingga diperlukan pendekatan yang sistematis untuk mendapatkan performa terbaik, termasuk melalui simulasi berbasis perangkat lunak seperti PLECS.

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada penerapan dan evaluasi PI *Controller* pada *Buck Converter* untuk menghasilkan regulasi tegangan yang lebih stabil dan adaptif. Melalui perancangan sistem berbasis mikrokontroler ESP32 serta simulasi menggunakan PLECS, penelitian ini bertujuan memberikan analisis komprehensif mengenai peningkatan performa yang dihasilkan oleh PI *Controller* dibandingkan sistem tanpa PI *Controller*. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode pengendalian yang lebih efektif, terutama pada aplikasi konversi daya yang menuntut akurasi tinggi dan respon dinamis yang cepat.

METODE PENELITIAN

Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada periode Februari hingga Mei 2025 bertempat di Laboratorium Instrumentasi dan Sistem Kontrol, Program Studi Teknologi Rekayasa Komputer, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh (PPNP). Seluruh proses mulai dari perancangan rangkaian, simulasi, implementasi perangkat keras, hingga pengujian *Buck Converter* dengan dan tanpa PI *Controller* dilakukan selama rentang waktu tersebut.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *multimeter digital* DT-830B untuk membaca tegangan *output*, osiloskop GW Instek GDS-1152A-U untuk mengamati bentuk gelombang PWM dan respon transien, serta perangkat lunak Arduino IDE sebagai alat pemrograman mikrokontroler ESP32 dan PLECS sebagai perangkat simulasi untuk memodelkan sistem *Buck Converter* pada kondisi *open-loop* dan *closed-loop*. Adapun bahan yang digunakan terdiri atas mikrokontroler ESP32, MOSFET D4184, induktor 0,533 mH, kapasitor 93,75 µF, dioda *flyblack*, sensor tegangan, dan sumber tegangan DC sebagai catu daya utama.

Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Dalam penelitian ini, analisis data dilakukan menggunakan uji statistik deskriptif, yang berfokus pada dua parameter utama yaitu *steady-state error* dan rata-rata *steady-state error*. *Steady-state error* dihitung untuk mengetahui seberapa jauh tegangan keluaran berada dari nilai referensi ketika sistem telah mencapai kondisi tunak. Rumus yang digunakan adalah:

$$Steady - State\ Error\ (\%) = \left(\frac{V_{ref} - V_{out}}{V_{ref}}\right) \times\ 100\% \dots\dots\dots\dots . (1)$$

Nilai *steady-state error* yang kecil menunjukkan sistem memiliki akurasi yang tinggi dalam mempertahankan tegangan *output*. Selanjutnya, setiap skenario pengujian diulang beberapa kali, maka dihitung rata-rata steady-state error menggunakan rumus:

$$\overline{\boldsymbol{x}} = \frac{1}{\boldsymbol{n}} \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{x_i} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2)$$

Selain itu, dilakukan juga perbandingan antar parameter dengan cara menghitung selisih mutlak (Δ) antara kondisi *open-loop* dan *closed-loop* untuk mengetahui seberapa besar perbedaan performa keduanya, dengan rumus berikut.

$$\Delta = \ |\boldsymbol{x_1} - \ \boldsymbol{x_2}| \dots\dots\dots\dots\dots\dots . . (3)$$

Tahapan Analisis Data

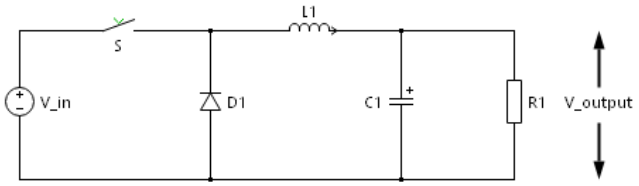
Tahapan analisis data dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data
   Data tegangan *output* dikumpulkan melalui simulasi baik pada kondisi *open-loop* maupun *closed-loop* dengan variasi tegangan *input*.
2. Penentuan Nilai *Steady-State*
   Nilai Vout diambil setelah sistem mencapai kestabilan. Pada tahap ini digunakan nilai rata-rata beberapa sampel pada kondisi tunak.
3. Perhitungan Nilai *Steady-State*
   Setiap data yan diuji akan dihitung nilai *error*-nya.
4. Penghitungan Rata-rata Nilai *Steady-State*
   Jika satu kondisi diuji berulang, dihitung rata-rata *steady-state error* untuk mendapatkan representasi yang lebih akurat.
5. Perhitungan Selisih Mutlak (Δ)
   Nilai *steady-state open-loop* dan *closed-loop* dibandingkan untuk mengetahui peningkatan performa PI.
6. Analisis dan Interpretasi

Hasil dari *steady-state*, rata-rata *steady-state*, dan Δ dianalisis secara deskriptif untuk menilai efektivitas PI *Controller* dalam meningkatkan stabilitas tegangan *output Buck Converter*.

Prinsip Kerja *Buck Converter*

Buck Converter merupakan salah satu jenis konverter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan DC dari nilai tertentu ke tegangan DC yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan *inputnya* (Rajagukguk et al., 2021). Konverter ini bekerja berdasarkan prinsip *switching*, di mana energi dikonversi secara efisien menggunakan saklar elektronik, induktor, kapasitor, dan dioda (Mursid, 2020).

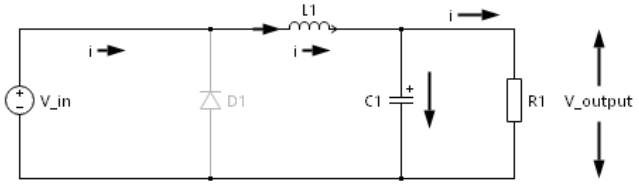


Gambar 1. Rangkaian *Buck Converter*

Secara prinsip, *Buck Converter* beroperasi dengan menggunakan saklar (*switch*) yang bekerja dalam dua kondisi, yaitu menyala (ON) dan mati (OFF). Mekanisme ini dikenal sebagai *Pulse Width Modulation* (PWM). Dalam teknik PWM, terdapat parameter yang disebut *Duty cycle*, yaitu perbandingan antara durasi saklar dalam kondisi ON terhadap total waktu satu siklus. *Duty cycle* ini menentukan seberapa sering saklar aktif, yang secara tidak langsung memengaruhi frekuensi operasi serta jumlah energi yang disalurkan ke *output* (Widodo, 2023).

Mode ON

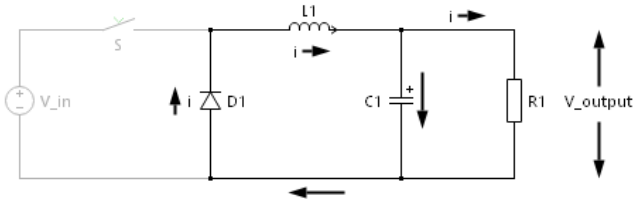
Pada mode ON, *switch* berfungsi sebagai saklar yang menutup, sehingga arus dari sumber tegangan (Vin) mengalir melalui induktor (L), menuju beban, dan kembali ke sumber. Karena tegangan yang diberikan kepada induktor bersifat konstan, arus yang mengalir melalui induktor akan meningkat secara linier seiring waktu (Sodikin *et al.,* 2015). Selama kondisi ini, energi disimpan dalam induktor.



Gambar 2. Rangkaian *Buck Converter* kondisi ON

Mode OFF

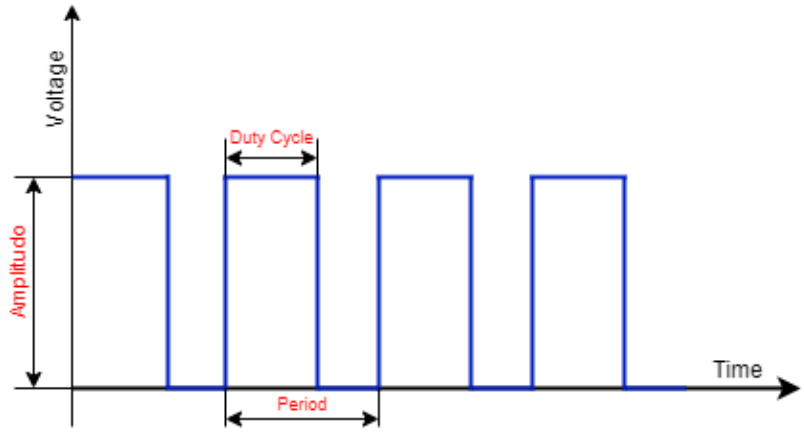
Pada mode OFF, *switch* akan berfungsi sebagai saklar yang terbuka, sehingga arus dari sumber *input* tidak dapat melewati sakelar tersebut. Pada saat ini, tegangan *output* diperoleh dari energi yang tersimpan dalam induktor dan kapasitor, dengan dioda yang menjadi aktif (*forward bias*). Arus akan mengalir dari induktor menuju beban melalui dioda, lalu kembali ke induktor. Karena tegangan pada induktor lebih kecil dibandingkan saat kondisi ON dan tetap konstan, arus yang melewati induktor akan berkurang secara linier seiring waktu (Sodikin *et al.,* 2015).



Gambar 3. Rangkaian *Buck Converter* kondisi OFF

***Pulse Width Modulation* (PWM)**

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mengatur lebar pulsa dalam satu periode sinyal guna menghasilkan tegangan rata-rata yang bervariasi. Teknik ini umumnya diterapkan dalam berbagai bidang, seperti modulasi data pada sistem telekomunikasi, efek dan penguatan audio, pengaturan tegangan pada regulator, serta pengendalian daya atau tegangan yang disuplai ke beban. Dalam konteks mikrokontroler, PWM banyak dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, antara lain pengaturan kecepatan motor DC, pengendalian motor servo, serta pengaturan intensitas cahaya pada LED (Agustini *et al.,* 2019). *Duty Cycle* pada sinyal PWM diperoleh melalui pembangkitan gelombang kotak, di mana nilai siklus kerja (*duty cycle*) dari gelombang tersebut dapat diatur atau dimodifikasi. Dengan mengubah siklus kerja ini, diperoleh variasi tegangan keluaran yang merepresentasikan nilai rata-rata dari bentuk gelombang yang dihasilkan (Irawan *et al.,* 2020).



Gambar 4. Gelombang PWM

Gambar 4 menunjukkan bentuk gelombang PWM yang digunakan dalam pengaturan *duty cycle*. *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan salah satu jenis teknik modulasi yang bekerja dengan cara mengubah lebar pulsa positif terhadap lebar pulsa negatif, atau sebaliknya, pada frekuensi sinyal yang tetap. Dalam PWM, *duty cycle* didefinisikan sebagai rasio antara lebar pulsa aktif (TH) terhadap total periode sinyal (T). Pengaturan tegangan dengan metode PWM umumnya menghasilkan keluaran dengan resolusi sebanyak 256 tingkat variasi, yaitu dari nilai 0 hingga 255, yang merepresentasikan persentase *duty cycle* dari 0% hingga 100%. Nilai 256 tersebut merupakan representasi 8-bit pada sistem pemrograman, yang menunjukkan bahwa nilai maksimum *duty cycle* setara dengan 100% dari lebar pulsa yang tersedia (Sihotang *et al.,* 2023). Dalam proses perancangan *Buck Converter*, penetapan parameter dasar seperti tegangan *input*, tegangan *output*, arus *output*, dan frekuensi *switching* merupakan langkah awal yang sangat penting. Parameter-parameter ini menjadi acuan utama dalam menentukan nilai komponen pasif, yaitu induktor dan kapasitor, yang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

- **Menghitung *Duty cycle*:**

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$

Duty cycle adalah perbandingan antara waktu saat saklar berada dalam kondisi ON terhadap total periode *switching* dalam sistem konversi daya. Peran utama *Duty cycle* adalah mengatur jumlah energi yang ditransfer dari sumber *input* ke *output*.

- Menghitung Nilai Induktor:

$$\Delta I_L = (0.2 \text{ to } 0.4\ A) \times I_{out} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (5)$$

$$L = \frac{V_{out} \times (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L \times f_s \times V_{in}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (6)$$

Induktor berperan menyimpan energi sementara dan menjaga kestabilan arus keluaran, meskipun tetap menghasilkan fluktuasi kecil yang disebut arus riak. Arus riak yang ideal berada pada kisaran 20–40%

dari arus keluaran untuk menjaga keseimbangan antara ukuran dan biaya induktor serta kestabilan sistem. Jika terlalu kecil, dibutuhkan induktor besar dan mahal, sedangkan jika terlalu besar dapat menurunkan kestabilan *output* dan mempercepat keausan komponen.

- Menghitung Nilai Kapasitor:

$$\Delta V_{out} = rv \times V_{out} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (7)$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_S \times \Delta V_{out}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (8)$$

Kapasitor berfungsi menjaga kestabilan tegangan *output* dengan menyerap dan melepaskan muatan saat terjadi perubahan arus akibat proses *switching*. Proses ini membantu mengurangi tegangan riak, di mana semakin besar nilai kapasitansi, semakin efektif kapasitor dalam menahan fluktuasi tegangan karena kemampuannya menyimpan energi lebih besar.

Dimana:

D = *Duty cycle* (%)
V_{out} = Tegangan *output* (V)
V_{in} = Tegangan *input* (V)
I_{out} = Arus *output* (A)
L = Nilai induktor (H)
f_s = Frekuensi (Hz)
C = Nilai kapasitor (F)
ΔI_L = *Ripple* arus (A)

Proportional Integral Controller

PI *Controller* digunakan untuk meminimalkan selisih (*error*) antara nilai aktual suatu proses dan nilai *set point* yang ditargetkan. Mekanismenya dilakukan dengan menghitung *error* tersebut dan menghasilkan sinyal kontrol guna memperbaiki perbedaan tersebut. PI *Controller* terdiri dari dua komponen utama, yaitu proporsional dan integral. Komponen proporsional merespons berdasarkan besarnya *error* saat ini, sedangkan komponen integral mempertimbangkan akumulasi *error* dari waktu sebelumnya. Keduanya bekerja secara bersamaan dengan menjumlahkan hasil perhitungan masing-masing, kemudian menghasilkan sinyal kendali yang mengarahkan sistem menuju nilai yang diinginkan (Ardam, 2023). Pada implementasi konvensional, PI *Controller* bekerja secara kontinu dan dirumuskan melalui hukum kontrol sebagai berikut:

$$y(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \dots\dots\dots\dots\dots (9)$$

Di mana:

$y(t)$ = sinyal keluaran kontroler PI
$e(t)$ = sinyal *error* = referensi – keluaran plant
k_p = *konstanta proporsional*
k_i = *konstanta integral*

Desain Buck Converter

Langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan nilai dan jenis komponen elektronik yang dibutuhkan. Proses ini dimulai dengan menentukan besaran dari setiap komponen utama sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Langkah ini meliputi penentuan nilai komponen seperti induktor, kapasitor, dan komponen pendukung lainnya yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem agar konverter dapat bekerja secara optimal, dengan rincian sebagai berikut:

a. Menghitung *Duty cycle* menggunakan persamaan (4):

$$D = \frac{12}{20} = 0.60$$

b. Pemilihan Induktor

Induktor dipilih untuk menjaga arus *output* stabil dengan *current ripple* ΔI_L sebesar 30% dari arus *output*. Cara menentukan nilai induktor adalah dengan mencari nilai ΔI_L terlebih dahulu, yaitu menggunakan persamaan (5):

$$\Delta I_L = (0.3) \times 3 = 0.9\ A$$

Kemudian menentukan nilai induktor dengan menggunakan persamaan (6):

$$L = \frac{12 \times (20 - 12)}{0.9 \times 10000 \times 20} = \frac{96}{180000} = 0{,}0005333\ H = 0.533\ mH$$

c. Pemilihan Kapasitor

Kapasitor dipilih untuk menjaga tegangan *output* stabil dengan *voltage ripple* ΔV_{out} 1% dari V_{out}. Cara menentukan nilai kapasitor dengan mencari nilai ΔV_{out} terlebih dahulu dengan persamaan (7):

$$\Delta V_{out} = 0.01 \times 12 = 0.12\ V$$

Kemudian menentukan nilai kapasitor dengan persamaan (8):

$$C = \frac{0{,}9}{8 \times 10.000 \times 0{,}12} = \frac{0{,}9}{9.600} = 0{,}00009375\ F = 93.75\ \mu F$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai-nilai komponen yang akan digunakan pada rangkaian *Buck Converter*. Untuk lebih jelasnya komponen yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

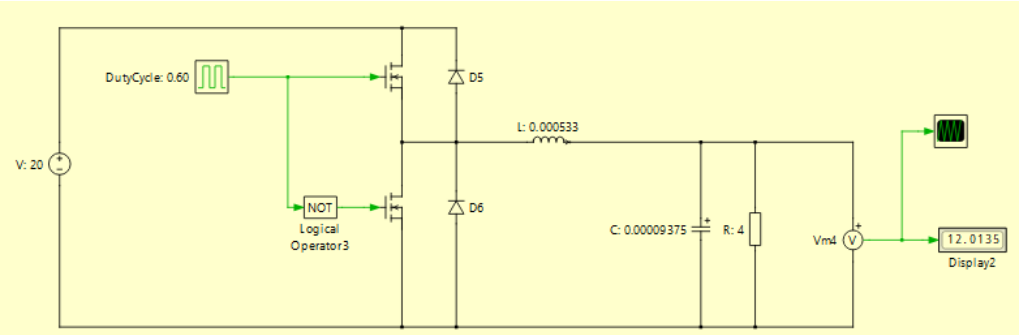
Tabel 1. Komponen yang digunakan

Komponen	Spesifikasi/Peran
ESP32	Mikrokontroler utama untuk menjalankan logika PI dan menghasilkan sinyal PWM
MOSFET D4184	Saklar elektronik untuk *switching* PWM
Induktor	Nilai 0.533mH, berfungsi menyimpan energi dan meredam fluktuasi arus
Kapasitor	Nilai 93.75 µF, berfungsi menyaring tegangan agar lebih stabil
Dioda Flyback	Menghindari arus balik ketika MOSFET OFF
Sensor Tegangan	Memberikan data *feedback* ke mikrokontroler
PLECS (Simulink)	Digunakan untuk simulasi sistem sebelum implementasi fisik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sistem *Buck Converter* dalam dua skenario pengendalian, yaitu tanpa pengendali (*open-loop*) dan dengan penerapan pengendali *Proportional-Integral* (PI) (*closed-loop*). Evaluasi dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PLECS. Parameter utama yang diamati meliputi tegangan *output* V out.

Simulasi Tanpa PI *Controller*

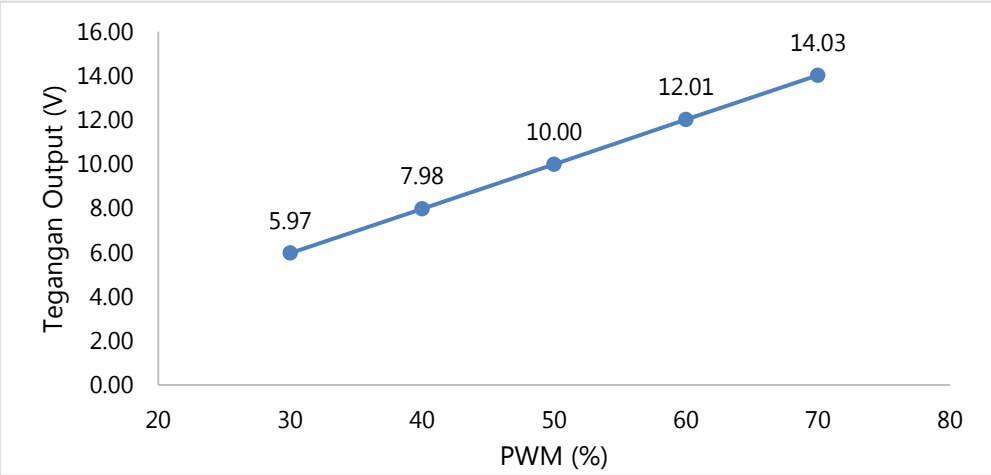


Gambar 5. Rangkaian *Buck Converter* tanpa PI

Sebagai tahap awal, dilakukan simulasi dalam kondisi tanpa pengendalian adaptif untuk mengamati karakteristik dasar sistem. Simulasi ini bertujuan mengevaluasi respons tegangan *output* terhadap tegangan *input* tetap, dengan pengaturan berbasis sinyal PWM ber *duty cycle* tetap tanpa umpan balik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan *output* sepenuhnya ditentukan oleh rasio *duty cycle* dan tidak mampu mengoreksi penyimpangan akibat fluktuasi *input*. Teramati adanya fenomena *overshoot* pada awal operasi, yang menandakan keterbatasan sistem dalam menjaga kestabilan. Dengan demikian, sistem *open-loop* dinilai kurang andal untuk aplikasi yang memerlukan regulasi tegangan presisi. Temuan ini menjadi acuan pembanding untuk analisis performa sistem *closed-loop* dengan PI *Controller*.

Tabel 2. Pengaruh Variasi PWM terhadap Tegangan *Output* (Vin Tetap 20V)

Data Simulasi Tanpa PI (Tegangan *Output* Target 12V)		
Tegangan *Input* (V)	**PWM (%)**	**Tegangan *Output* (V)**
20	30	5,97
20	40	7,98
20	50	10,00
20	60	12,01
20	70	14,03

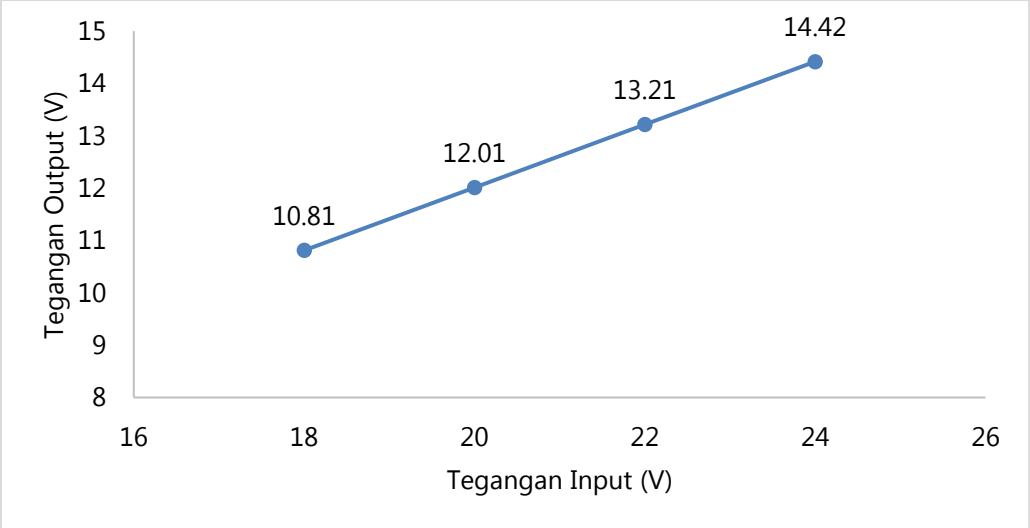


Gambar 6. Grafik Pengaruh Nilai PWM terhadap Tegangan *Output* Tanpa PI pada Simulasi

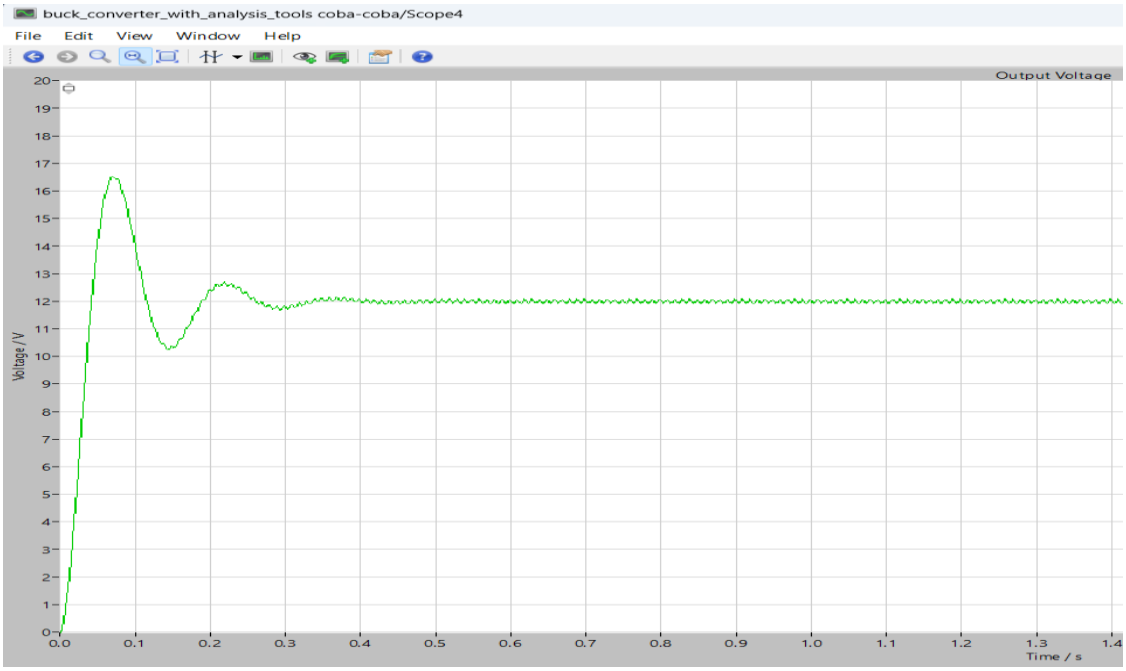
Simulasi selanjutnya mempertahankan PWM sebesar 60% dan memvariasikan tegangan *input* dari 18 V hingga 24 V. Hasil menunjukkan bahwa Vout meningkat seiring Vin, namun tanpa kestabilan terhadap *set point* 12 V. Ketiadaan pengendali menyebabkan Vout sepenuhnya bergantung pada *input* dan tidak adaptif terhadap gangguan. Kurva hasil simulasi menunjukkan adanya *transient overshoot* dan waktu stabilisasi yang cukup lambat. Tidak adanya umpan balik menyebabkan sistem tidak mampu menjaga kestabilan tegangan *output* terhadap gangguan atau variasi *input*, sehingga kurang andal untuk aplikasi yang memerlukan presisi.

Tabel 3. Pengaruh Variasi Tegangan *Input* terhadap Tegangan *Output* (PWM Tetap 60%)

Data Simulasi Tanpa PI (Tegangan *Output* Target 12V)		
Tegangan *Input* (V)	**PWM (%)**	**Tegangan *Output* (V)**
18	60	10,81
20	60	12,01
22	60	13,21
24	60	14,42

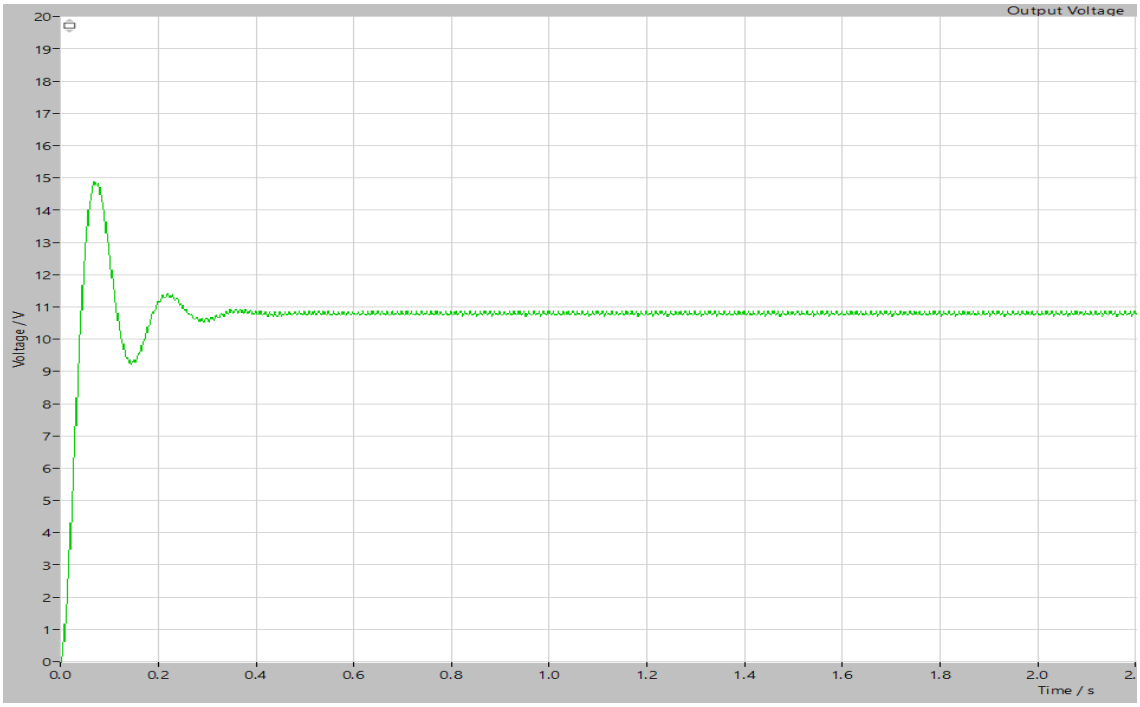


Gambar 7. Grafik Tegangan *Output* dengan PWM tetap pada Simulasi



Gambar 8. Pembacaan V Out dengan *osiloscope* pada Simulasi tanpa PI dengan *input* 20 v

Gambar 8 menunjukkan hasil pembacaan osiloskop terhadap tegangan *output* pada simulasi dengan tegangan *input* sebesar 20 V dan tanpa penerapan PI *Controller*. Grafik tersebut menggambarkan karakteristik sistem *open-loop* yang tidak dilengkapi mekanisme umpan balik. Pada awal aktivasi (0–0,002 detik), sistem menunjukkan respon transien yang cukup signifikan, ditandai dengan *overshoot* tegangan *output* hingga sekitar 16,5 V, diikuti oleh *undershoot* di bawah tegangan referensi 12 V. Osilasi ini mencerminkan ketiadaan mekanisme pengendalian yang mampu meredam dinamika tegangan secara *real-time*. Tanpa PI *Controller*, sistem tidak memiliki kompensasi terhadap gangguan tiba-tiba, sehingga tidak mampu mengoreksi penyimpangan secara adaptif. Seiring waktu, sistem mulai mencapai keadaan stabil, dengan tegangan *output* yang secara bertahap mendekati nilai referensi. Secara teoritis, tegangan *output* mendekati 12 V karna sesuai perhitungan. Namun, tanpa kendali umpan balik, sistem tidak mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan atau gangguan, sehingga respon transien menjadi kurang optimal dan kestabilan *output* sangat tergantung pada kondisi awal operasi.



Gambar 9. Pembacaan V Out dengan *osiloscope* pada Simulasi tanpa PI dengan V *input* 18

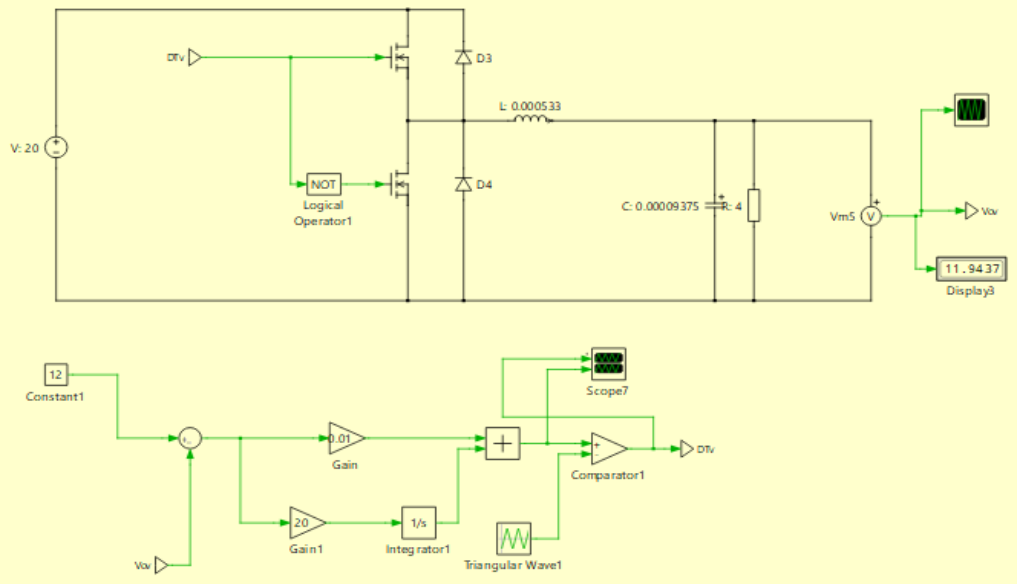
Gambar 9 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan *output* dari rangkaian hasil simulasi dengan tegangan *input* sebesar 18 V dalam kondisi tanpa PI *Controller*. Grafik ini ditampilkan melalui pembacaan osiloskop simulasi dan menggambarkan respon dinamis sistem saat pertama kali diaktifkan. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa tegangan *output* mengalami *overshoot* yang signifikan, yaitu naik hingga sekitar 15 V, jauh di atas nilai *set point* 12 V. Setelah itu, gelombang mengalami *undershoot* di bawah 12 V dan kemudian berosilasi (*ringing*) beberapa kali sebelum akhirnya mendekati kestabilan di sekitar tegangan *output* rata-rata. Proses stabilisasi ini memakan waktu hingga sekitar 1 detik, yang menunjukkan respon transien yang lambat dan ketidakmampuan sistem dalam mengontrol lonjakan awal.

Simulasi dengan PI *Controller*

Rangkaian PI dirancang dengan menetapkan tegangan referensi sebesar 12 V, yang dibandingkan secara kontinu dengan tegangan *output* aktual. Selisih antara keduanya, atau nilai *error*, digunakan sebagai *input* ke dua jalur kendali: proporsional dengan Kp=0,01 dan integral dengan Ki=20. Keluaran dari kedua jalur ini digabungkan untuk menghasilkan sinyal kendali terintegrasi, yang kemudian diproses dalam blok komparator dan dibandingkan dengan sinyal gelombang segitiga (*triangular wave*) untuk menghasilkan sinyal PWM. Sinyal PWM ini selanjutnya digunakan untuk mengatur *duty cycle* saklar MOSFET. Melalui mekanisme pengendalian tertutup ini, sistem mampu melakukan penyesuaian lebar pulsa PWM secara *real-time* berdasarkan kondisi *output*. Ketika terjadi gangguan atau perubahan beban, PI *Controller* secara otomatis memodifikasi *duty cycle* guna mempertahankan tegangan *output* agar tetap mendekati nilai referensi yang telah ditetapkan.

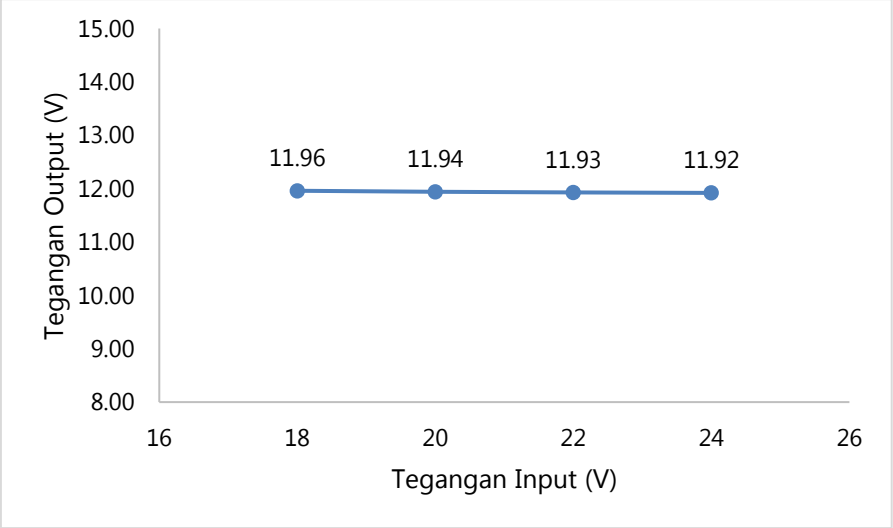
Tabel 4. Pengaruh Variasi Tegangan *Input* terhadap Tegangan *Output* Menggunakan PI

Data Simulasi dengan PI (Tegangan *Output* Target 12V)		
Tegangan *Input* (V)	**Tegangan *Set point* (V)**	**Tegangan *Output* (V)**
18	12	11,96
20	12	11,94
22	12	11,93
24	12	11,92



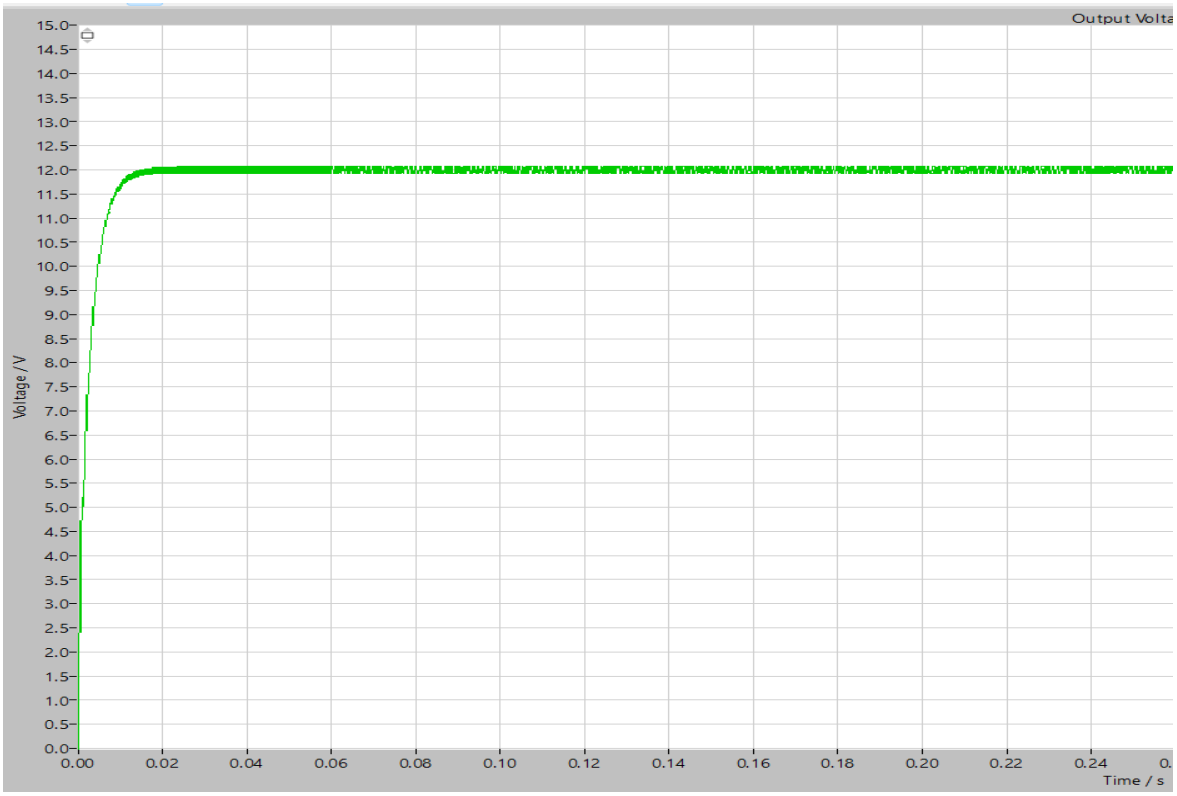
Gambar 10. Rangkaian *Buck Converter* dengan PI

Tabel 4 menunjukkan hasil simulasi dengan PI *Controller*, yang mengevaluasi pengaruh variasi tegangan *input* (18 V hingga 24 V) terhadap kestabilan tegangan *output* dengan referensi 12 V. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa tegangan *output* tetap stabil dalam rentang sempit 11,96 V hingga 11,92 V, dengan deviasi maksimum hanya 0,08 V. Hal ini menunjukkan bahwa PI *Controller* efektif menjaga kestabilan sistem dengan mengoreksi perubahan secara *real-time* melalui penyesuaian *duty cycle* PWM.

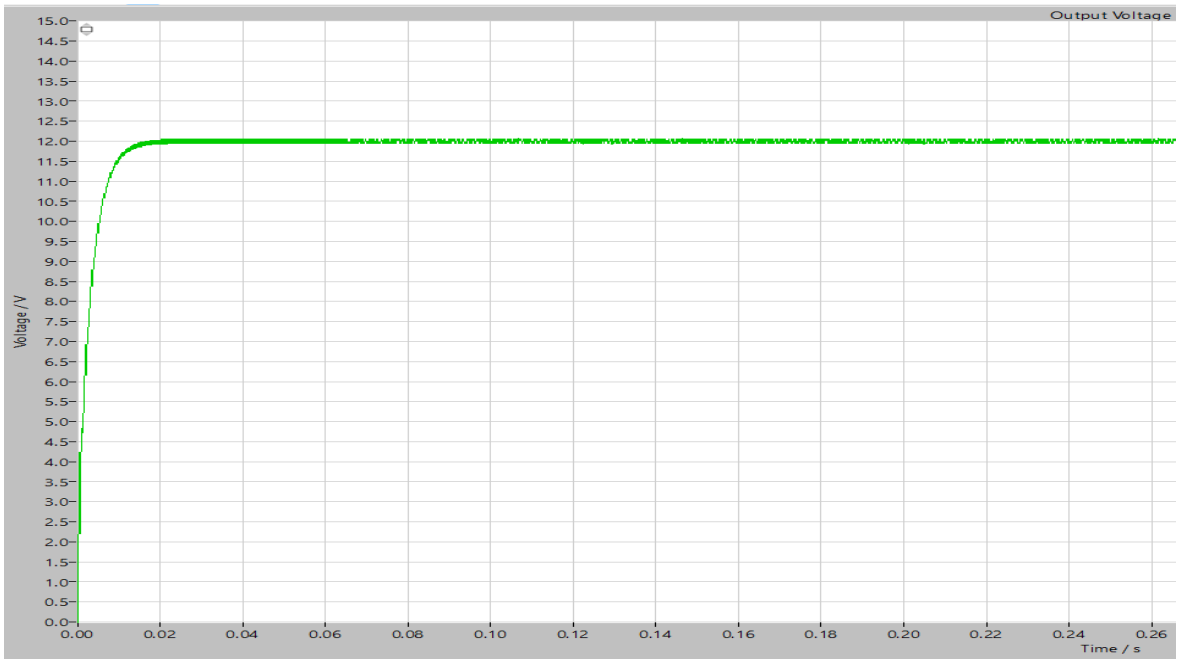


Gambar 11. Grafik Tegangan *Output* vs Tegangan *Input* (dengan PI *Controller*) pada Simulasi dengan *set point* 12 V

Gambar 12 memperlihatkan hasil pembacaan tegangan *output* dari simulasi rangkaian dengan tegangan *input* sebesar 20 V dan PI yang diaktifkan. Pengambilan data dilakukan melalui osiloskop simulasi, dengan tujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mempertahankan tegangan *output* pada nilai referensi sebesar 12 V. Dari hasil grafik, tampak bahwa tegangan *output* mengalami peningkatan secara cepat dan terkendali dari 0 V menuju nilai mendekati 12 V dalam kurun waktu kurang dari 0,03 detik. Respon transien sistem berlangsung secara halus tanpa menunjukkan gejala *overshoot*, yaitu tegangan *output* tidak melebihi nilai referensi. Karakteristik respon sistem ini menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan dengan kondisi tanpa PI *Controller* yang ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 12. Pembacaan V Out dengan *osiloscope* pada Simulasi dengan PI V *input* 20 V



Gambar 13. Pembacaan V Out dengan *osiloscope* pada Simulasi dengan PI V *input* 18 V

Gambar 13 menunjukkan bentuk gelombang tegangan *output* dari hasil simulasi dengan tegangan *input* sebesar 18 V dan menggunakan PI *Controller* sebagai sistem kendali. Hasil ini ditampilkan melalui osiloskop simulasi dan menggambarkan kinerja sistem *closed-loop* dalam menjaga kestabilan tegangan *output* terhadap variasi *input*. Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa tegangan *output* mengalami kenaikan tajam namun terkendali, dari 0 V menuju nilai mendekati 12 V, tanpa menunjukkan *overshoot* yang berlebihan. Kenaikan ini berlangsung sangat cepat, dengan waktu stabilisasi kurang dari 0,03 detik. Setelah stabil, tegangan *output* tetap berada pada kisaran 11,96 V, yang sangat dekat dengan nilai referensi 12 V.

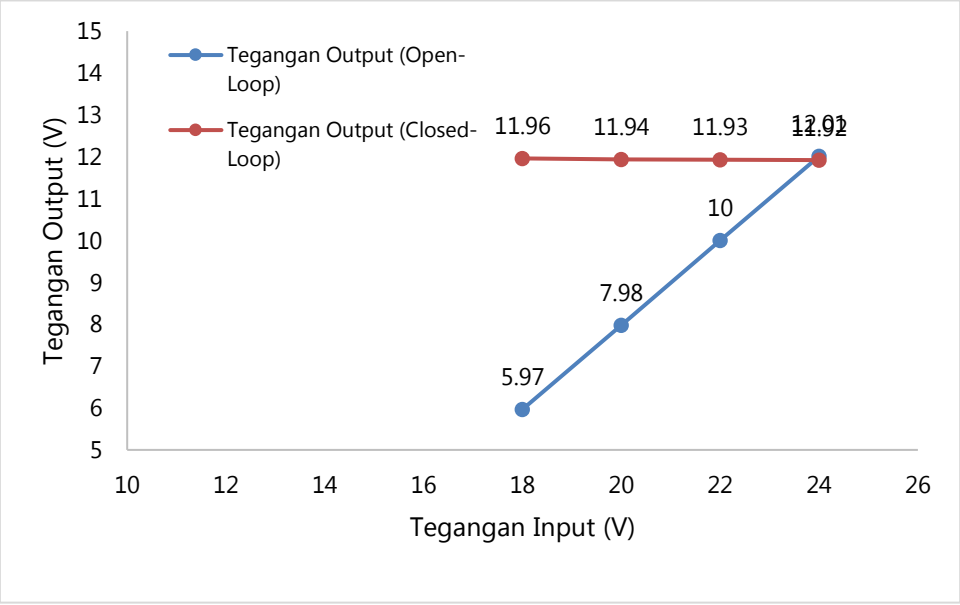
Perbandingan Pengaruh Kontrol *Buck Converter Open-Loop* dan *Closed-Loop*

Tabel 5 menunjukkan hasil simulasi dari rangkaian *Buck Converter* ketika nilai PWM dijaga tetap sebesar 60%, sementara tegangan *input* (Vin) divariasikan dari 18 V hingga 24 V. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengamati sejauh mana sistem tanpa pengendalian (*open-loop*) mampu mempertahankan tegangan *output* agar tetap mendekati target 12V hanya dengan mengandalkan *duty cycle* tetap.

Tabel 5. Perbandingan *Open-Loop* dan *Closed-Loop* (Target 12V)

Tegangan *Input* (V)	Tegangan *Output* (*Open-Loop*)	Tegangan *Set Point* (*Closed-Loop*)	Tegangan *Output* (*Closed-Loop*)
18	5,97	12	11,96
20	7,98	12	11,94
22	10,00	12	11,93
24	12,01	12	11,92

Berdasarkan data pada Tabel 4.3, dapat diamati bahwa sistem *open-loop* menghasilkan tegangan *output* yang sangat dipengaruhi oleh variasi tegangan *input*. Meskipun *duty cycle* dijaga konstan pada 60%, perubahan pada nilai *input* menyebabkan tegangan *output* berubah secara proporsional. Sebagai contoh, pada tegangan *input* sebesar 18 V, *output* yang dihasilkan hanya sebesar 10,81 V, sedangkan saat *input* ditingkatkan menjadi 24 V, tegangan *output* naik menjadi 14,42 V. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tanpa kendali umpan balik tidak memiliki kemampuan adaptif terhadap gangguan atau fluktuasi *input*, sehingga kestabilan tegangan *output* tidak dapat terjamin. Sebaliknya, sistem *closed-loop* yang dilengkapi dengan PI *Controller* mampu menjaga tegangan *output* agar tetap mendekati nilai *set point* sebesar 12 V meskipun tegangan *input* mengalami perubahan. Pada variasi *input* dari 18 V hingga 24 V, tegangan *output* tercatat berada pada rentang 11,96 V hingga 11,92 V. Deviasi maksimum terhadap nilai referensi hanya sebesar 0,08 V atau sekitar 0,7% dari tegangan target 12 V. Hal ini menunjukkan bahwa PI *Controller* mampu melakukan kompensasi secara *real-time* terhadap *error* yang terjadi melalui penyesuaian sinyal kendali PWM, sehingga sistem dapat merespons perubahan *input* dengan tetap mempertahankan kestabilan tegangan *output*.



Gambar 14. Grafik Perbandingan *Open-Loop* dan *Closed-Loop*

Gambar 14 memperlihatkan grafik perbandingan antara tegangan *output* yang dihasilkan oleh sistem dalam konfigurasi *open-loop* dan *closed-loop* terhadap variasi tegangan *input* dari 18 V hingga 24 V. Terlihat bahwa pada sistem *open-loop*, tegangan *output* meningkat secara linear seiring dengan peningkatan tegangan *input*. Hal ini merupakan konsekuensi dari tidak adanya mekanisme pengendalian dalam sistem *open-loop*, sehingga ketika tegangan *input* meningkat, tegangan *output* ikut naik secara

proporsional karena *duty cycle* yang digunakan tetap. Sebaliknya, pada sistem *closed-loop* yang dilengkapi dengan PI *Controller*, tegangan *output* tetap berada dalam rentang yang sangat dekat dengan nilai *set point*, yaitu 12 V. Meskipun terdapat variasi pada tegangan *input*, sistem *closed-loop* mampu mengoreksi *error* dengan cepat dan menjaga kestabilan tegangan *output*. Hal ini membuktikan efektivitas PI *Controller* dalam meregulasi tegangan pada *Buck Converter* dan meningkatkan performa sistem dalam menghadapi gangguan eksternal seperti fluktuasi *input*.

Evaluasi Kinerja Hasil Pengujian Tanpa PI *Controller*

Tabel 6. Nilai *Steady-State Error* (%)

Tegangan *Input* (V)	Tegangan *Output* Aktual (V)	Tegangan Output Teori (V)	*Steady-State Error* (%)
18	5,97	12	50,25
20	7,98	12	33,50
22	10,00	12	16,67
24	12,01	12	0,083

Tabel tersebut menunjukkan hasil pengujian *Buck Converter* tanpa PI *Controller* (*open-loop*) pada empat variasi tegangan *input*, yaitu 18 V, 20 V, 22 V, dan 24 V. Berdasarkan data, terlihat bahwa tegangan *output* aktual sangat dipengaruhi oleh perubahan tegangan *input*, sehingga menghasilkan nilai *steady-state error* yang cukup besar pada sebagian besar kondisi. Pada *input* 18 V, tegangan *output* hanya mencapai 5,97 V dengan *error* sebesar 50,25%, sedangkan pada *input* 20 V tegangan *output* meningkat menjadi 7,98 V dengan *error* 33,50%. Ketika *input* dinaikkan ke 22 V, tegangan *output* mendekati nilai referensi dengan nilai 10,00 V dan *error* 16,67%. Hasil terbaik terjadi pada *input* 24 V, di mana tegangan *output* mencapai 12,01 V dengan *error* sangat kecil yaitu 0,083%. Secara keseluruhan, data pada tabel menunjukkan bahwa tanpa PI *Controller*, *Buck Converter* belum mampu menjaga kestabilan tegangan *output* pada berbagai kondisi *input*, sehingga diperlukan sistem kendali untuk menjaga agar tegangan *output* tetap berada pada nilai referensi 12 V. Selanjutnya rata-rata *steady-state* error tanpa PI *Controller* dihitung menggunakan Persamaan berikut.

$$\bar{x} = \frac{50{,}25 + 33{,}50 + 16{,}67 + 0{,}083}{4} = 25{,}13\ \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan *steady-state error* pada keempat variasi tegangan *input*, diperoleh rata-rata *steady-state error* sebesar 25,13%. Nilai ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan *Buck Converter* dalam kondisi *open-loop* memiliki penyimpangan yang cukup besar terhadap tegangan referensi 12 V. Error yang tinggi ini disebabkan karena sistem tidak memiliki mekanisme pengendalian yang mampu mengoreksi perubahan tegangan *input* maupun fluktuasi beban, sehingga tegangan *output* cenderung berubah-ubah dan tidak stabil. Dengan rata-rata error yang mencapai seperempat dari nilai referensi, dapat disimpulkan bahwa kinerja *Buck Converter* tanpa PI *Controller* masih jauh dari optimal dan memerlukan sistem kendali agar tegangan keluaran dapat dipertahankan pada nilai yang diinginkan secara konsisten.

Evaluasi Kinerja Hasil Pengujian dengan PI *Controller*

Tabel 7. Nilai *Steady-State Error* (%)

Data Simulasi dengan PI (Tegangan *Output* Target 12V)			
Tegangan *Input* (V)	Tegangan *Set point* (V)	Tegangan *Output* (V)	Steady-State Error (%)
18	12	11,96	0,333
20	12	11,94	0,500
22	12	11,93	0,583
24	12	11,92	0,667

Terlihat bahwa sistem mampu menjaga tegangan *output* sangat dekat dengan nilai *set point* 12 V pada berbagai variasi tegangan *input*. Nilai *steady-state error* yang dihasilkan sangat kecil, yaitu 0,333% pada *input* 18 V, 0,500% pada 20 V, 0,583% pada 22 V, dan 0,667% pada 24 V. Nilai *error* yang berada di

bawah 1% pada seluruh skenario menunjukkan bahwa PI *Controller* bekerja efektif dalam memperbaiki akurasi dan kestabilan tegangan *output*. Hal ini menandakan bahwa sistem kendali mampu mengoreksi perubahan input secara cepat dan menjaga tegangan keluaran tetap berada dalam rentang yang sangat dekat dengan tegangan referensi, sehingga performanya jauh lebih baik dibandingkan kondisi *open-loop*.

Selanjutnya rata-rata *steady-state* error dengan PI *Controller* dihitung menggunakan Persamaan berikut.

$$\bar{x} = \frac{0{,}333 + \ 0{,}500 + 0{,}583 + 0{,}667}{4} \ = \ 0{,}52\ \%$$

Berdasarkan hasil perhitungan terhadap empat variasi tegangan *input*, diperoleh nilai rata-rata *steady-state error* sebesar 0,52%, yang menunjukkan bahwa PI *Controller* mampu menjaga tegangan *output Buck Converter* tetap berada sangat dekat dengan nilai referensi 12 V. Nilai rata-rata *error* yang berada jauh di bawah 1% ini menegaskan bahwa PI *Controller* bekerja secara efektif dalam meminimalkan penyimpangan tegangan *output*, meskipun terjadi perubahan tegangan *input*. Performa ini jauh lebih baik dibandingkan kondisi *open-loop*, di mana penyimpangan tegangan rata-rata mencapai lebih dari 25%. Dengan demikian, penerapan PI *Controller* memberikan peningkatan signifikan terhadap akurasi dan kestabilan tegangan *output*, sehingga sistem mampu merespons perubahan kondisi dengan lebih cepat dan stabil.

Selisih Performa

Untuk mengetahui efektivitas PI *Controller*, dilakukan perbandingan antara kondisi *open-loop* dan *closed-loop*. Tabel tersebut menunjukkan perbandingan performa *Buck Converter* antara kondisi tanpa pengendalian (*open-loop*) dan dengan PI *Controller* (*closed-loop*) melalui perhitungan selisih mutlak *error* (Δ). Pada tegangan *input* 18 V, *error* pada *open-loop* sangat besar yaitu 50,25%, sementara *closed-loop* hanya 0,333%, sehingga menghasilkan selisih performa sebesar 49,917%. Hal serupa terlihat pada *input* 20 V dan 22 V, di mana PI *Controller* mampu menurunkan error secara signifikan, masing-masing dengan selisih 33,000% dan 16,087%. Bahkan pada *input* 24 V, saat sistem *open-loop* sebenarnya sudah mendekati nilai referensi dengan error 0,083%, PI *Controller* tetap memberikan perbaikan dengan selisih 0,584%. Secara keseluruhan, tabel ini menunjukkan bahwa PI *Controller* secara konsisten meningkatkan akurasi dan kestabilan tegangan *output*, sehingga sistem *closed-loop* mampu menghasilkan performa yang jauh lebih baik dibandingkan sistem tanpa kendali.

Tabel 8. Tabel Selisih Performa

Selisih Performa			
Tegangan *Input* (V)	Error Open-Loop (%)	Error Closed-Loop (%)	Δ (%)
18	50,25	0,333	49,917
20	33,50	0,500	33,000
22	16,67	0,583	16,087
24	0,083	0,667	0,584

Pembahasan

Hasil pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa penerapan *Proportional-Integral* (PI) pada *Buck Converter* secara signifikan meningkatkan kestabilan tegangan *output* terhadap variasi tegangan *input*. Sistem mampu menjaga tegangan *output* tetap mendekati nilai referensi sebesar 12 V meskipun tegangan *input* divariasikan dalam rentang 18 V hingga 24 V. Rata-rata *steady-state error* tercatat sebesar 0,52 % yang mengindikasikan bahwa PI *controller* memiliki kemampuan kompensasi kesalahan yang cukup baik. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Krismadinata dan Husnaini (2017) yang menyimpulkan bahwa PI *Controller* memiliki keunggulan dalam menjaga kestabilan tegangan dan mudah diimplementasikan. Penelitian ini juga sejalan dengan studi Yunta *et al.* (2022) yang menunjukkan bahwa PI *Controller* mampu mengkompensasi perubahan tegangan *input* secara efektif dalam sistem penyimpanan energi berbasis superkapasitor.

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu seperti Garg *et al.* (2015) dan Chincholkar *et al.* (2024), meskipun penggabungan PI dengan kompensator atau algoritma normalisasi error memberikan

peningkatan pada respons transien, penelitian ini menekankan bahwa PI konvensional dengan penyetelan manual sudah cukup memberikan kestabilan yang baik untuk aplikasi pengaturan tegangan DC sederhana. Penggunaan PI yang lebih sederhana dalam penelitian ini juga terbukti efektif dibandingkan metode self-tuning seperti yang dilakukan oleh Anwari (2017) atau metode optimasi berbasis genetika oleh Chayinthu (2022), yang meskipun lebih canggih, memerlukan proses tuning dan komputasi yang lebih kompleks. Secara umum, keberhasilan PI *Controller* dalam penelitian ini diperkuat oleh literatur dan eksperimen terdahulu yang menunjukkan bahwa meskipun PI adalah pengendali klasik, ia tetap relevan untuk aplikasi *real-time*. Efektivitasnya dalam menstabilkan *output* bahkan saat tegangan *input* divariasikan dari 18 V hingga 24 V, menunjukkan respons adaptif sistem yang layak untuk diterapkan dalam sistem daya praktis berskala kecil hingga menengah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan *Proportional-Integral* (PI) *Controller* pada *Buck Converter* mampu meningkatkan kestabilan tegangan *output* dibandingkan dengan sistem *open-loop*. Berdasarkan hasil simulasi, tegangan *output* dapat dijaga tetap mendekati nilai referensi 12 V meskipun terjadi perubahan pada tegangan *input*, dengan penyimpangan maksimum hanya sebesar 0,08 V. Temuan ini menunjukkan bahwa PI *Controller* efektif dalam memperbaiki respon transien sekaligus menjaga regulasi tegangan agar tetap stabil dan akurat.

Saran

Penelitian ini masih terbatas pada tahap simulasi, sehingga pada penelitian selanjutnya disarankan untuk dilakukan implementasi langsung pada perangkat keras guna memvalidasi hasil yang diperoleh. Selain itu, parameter PI dapat dioptimalkan melalui metode *autotuning*, seperti Ziegler–Nichols atau algoritma optimasi, agar respon sistem menjadi lebih optimal. Pengujian juga sebaiknya diperluas pada kondisi beban dinamis maupun saat terintegrasi dengan sumber energi terbarukan, sehingga kinerja *Buck Converter* dengan PI *Controller* dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh pada berbagai kondisi nyata.

DAFTAR PUSTAKA

Agustini, M., Oktaviani, S., Muhammad, F., & Mozef, E. (2019). Perancangan dan Realisasi Sistem Komunikasi Suara dengan Penjelasan Suara yang Ditransmisikan dari Cahaya Lampu Penerangan LED. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, *10*(1).

Ardam, A. B. R. W. (2023). Pengendali *Proportional Integral* (PI) Berbasis *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) Untuk Pengendalian Kecepatan Motor *Brushless Direct Current (BLDC)*. Universitas Hasanuddin.

Arifin, M. Z., & Putri, R. I. (2021). Implementasi Kontroler PI Pada *Buck Converter* Sebagai Pengaturan Tegangan Konstan Di Sistem Turbin Angin Permanent *Magnet Schronous Generator* (PMSG) Dilengkapi Sistem *Monitoring* Berbasis IoT. *Journal of Applied Smart Electrical Network and Systems*, *2*(2), 43–48. https://doi.org/10.52158/jasens.v2i2.193

Chincholkar, S., Tariq, M., Poshtan, M., & Sharaf, M. (2024). *Normalized Error-Based PI Controller and Its Application to the DC–DC Buck Converter*. *Mathematics*, *12*(2), 240. https://doi.org/10.3390/math12020240

Darajat, A. U., & Istiqphara, S. (2021). Sistem Kontrol Ketinggian Air pada Sistem Dua Tanki dengan Menggunakan Metode *Proporsional Integral* (PI) Adaptif. JTEV (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional), *7*(1), 37. https://doi.org/10.24036/jtev.v7i1.111893

Hardani, D. N. K., Triyanda, A. A., & Winarso, W. (2019). *Monitoring* Stabilitas Transien Pada Sistem Tenaga Listrik. JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi), *3*(2), 69. https://doi.org/10.30595/jrst.v3i2.4686

Irawan, D., Setiawan, D., & Yetri, M. (2020). Simulasi Alat Treadmill Elektrik Untuk Kebugaranba Dan dengan Teknik PWM Berbasis Mikrokontroler. *Journal Of Science And Social Research*, *3*(2), 128–137.

Jagadeesh, I., & Indragandhi, V. (2019). *Review and comparative analysis on dc-dc converters used in electric vehicle applications. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 623*(1), 012005. https://doi.org/10.1088/1757-899X/623/1/012005

Krismadinata, K., & Husnaini, I. (2017). Komparasi Pengendali PI Dan PID untuk Tegangan Keluaran Konverter Buck. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, *6*(3), 143. https://doi.org/10.25077/jnte.v6n3.387.2017

Kunigar, R., Tahtawi, A. R. Al, & Ilman, S. M. (2023). Desain dan Implementasi Modul Konverter DC-DC Buck Boost Dengan Pengendali PID. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, *4*(1), 404–415. https://doi.org/10.24036/jtein.v4i1.414

Letsoin, V. (2019). Pengaruh Tegangan AC Terhadap Perangkat Elektronika. *Musamus Journal of Electro & Mechanical Engineering*, *2*(01). https://doi.org/10.35724/mjeme.v2i01.2487

Rajagukguk, A., Simamora, J. F., & Ervianto, E. (2021). Rancang Bangun Pengendali Sistem Pompa Otomatis Pada Penyiraman Tanaman Berbasis Sensor Kelembaban dengan Kendali Arduino. *PROtek : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *8*(2), 76. https://doi.org/10.33387/protk.v8i2.3122

S P Mursid. (2020). TEKNIK SWITCHING UNTUK KONVERSI ENERGI DC EFISIENSI TINGGI. *Jurnal Teknik Energi*, *1*(1), 39–43. https://doi.org/10.35313/energi.v1i1.1806

Sihotang, R. R. P. A., Suherdi, D., Suryanata, M. G., & Ramadhan, M. (2023). Implementasi Pembuka Jembatan Otomatis Menggunakan Teknik Pulse Width Modulation (PWM) . *JURNAL SISTEM KOMPUTER TGD*, *2*(1), 53–59.

Sodikin, N. H., Samosir, A. S., & Komalasari, E. (2015). Rancang Bangun Prototipe Emulator Sel Surya Menggunakan Buck Converter Berbasis Arduino. *Electrician : Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, *9*(3). https://doi.org/https://doi.org/10.23960/elc.v9n3.182

Widodo, T. R. (2023). Rancang bangun mppt solar charge controller menggunakan buck converter pada photovoltaic berbasis mikrokontroler. Universitas Tidar.