

Voltage Control on Non-Inverting Buck-Boost DC-DC Converter with the Digital PI Method

Asep Caca Handika¹, Sofyan Muhammad Ilman^{1*}, Febi Ariefka Septian Putra¹, Yosua Sahat Halomoan¹, Giga Verian Pratama¹, and Muhammad Nuruddin Ar-Rabbani²

¹ Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, INDONESIA

² Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura, Kota Pontianak, INDONESIA

*Corresponding Author, email : sofyan.muhammad@polban.ac.id

Abstract

The need for a stable and efficient power supply is crucial in various modern electronic applications to increase or decrease DC voltage. One solution is a non-inverting buck-boost DC-DC converter that is capable of increasing or decreasing the voltage without reversing the output polarity. However, output voltage stability remains a challenge, especially when there is a change in load or reference value (setpoint). This study aims to design and implement a non-inverting buck-boost converter with a Proportional-Integral (PI) controller to maintain output voltage stability at 30V with a settling time below 0.6 seconds with the output terminal voltage polarity not reversed. PI parameters are determined using the Ziegler-Nichols Type I method to obtain proportional (K_p) and integral (K_i) constants, then refined by a trial and error approach. Digital PI control is implemented through a program on an Arduino Uno microcontroller. Testing is carried out through simulations using PSIM software and hardware realization. The results show that the system is able to maintain an output voltage of 30V from a 15V input with a settling time of 0.1 seconds in the simulation, then 0.5 seconds in the experiment with a maximum overshoot of 22.93% and the voltage polarity at the output terminal is not reversed.

Keywords: *buck-boost non-inverting*; DC-DC converter; Proportional-Integral; Ziegler Nichols

1. Introduction

Perkembangan teknologi modern menuntut sistem catu daya yang efisien dan andal dalam berbagai kondisi beban dan sumber daya. Salah satu solusi utama dalam pengelolaan energi adalah memanfaatkan konverter DC-DC, yang mampu mengatur tegangan keluaran sesuai kebutuhan aplikasi. Di antara berbagai jenis konverter DC-DC, tipe *buck-boost non-inverting* memiliki keunggulan karena dapat menaikkan (*boost*) maupun menurunkan (*buck*) tegangan tanpa membalik polaritas *output*, sehingga sangat cocok diterapkan pada sistem seperti panel surya, kendaraan listrik, dan perangkat portabel [1].

Namun demikian, tantangan signifikan yang dihadapi konverter jenis ini adalah kestabilan tegangan keluaran, khususnya saat terjadi perubahan beban atau nilai referensi (*set point*). Ketidakstabilan tersebut dapat menurunkan efisiensi dan bahkan merusak perangkat yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan [2]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, telah banyak dikembangkan strategi pengendalian, salah satunya adalah pengendali Proportional-Integral (PI), yang memiliki keunggulan dalam mereduksi galat tunak (*steady-state error*) serta meningkatkan waktu respon sistem [3]. Penerapan kendali PI pada sistem konverter juga telah terbukti efektif dalam menjaga kestabilan tegangan, khususnya dalam konfigurasi *multi-loop* [4]. Selain itu, metode penalaan seperti Ziegler-Nichols juga telah digunakan secara luas untuk mengatur parameter kendali guna mencapai kinerja sistem yang optimal [5]. Dalam implementasi kendali *real-time*, penggunaan mikrokontroler

Arduino Uno banyak diaplikasikan karena kemudahan pemrogramannya, fleksibilitas pemrosesan sinyal, serta kompatibilitasnya dengan sensor dan driver pada rangkaian konversi daya [6]. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa kendali PI dapat dikembangkan lebih lanjut dengan pendekatan digital adaptif maupun teknik tuning berbasis model matematis untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi konverter, khususnya pada aplikasi kendaraan listrik [7] dan sistem mikrogrid [8]. Konverter *buck-boost non-inverting* juga terus dikembangkan untuk mendukung sistem distribusi daya cerdas berbasis DC yang lebih fleksibel dan efisien [9].

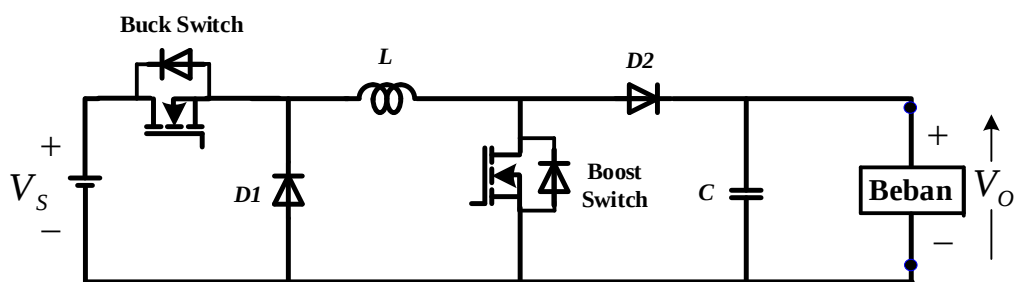
Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan modul konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* dengan sistem pengendalian tertutup (*closed-loop*) berbasis kendali PI digital. Evaluasi difokuskan pada kestabilan tegangan keluaran saat terjadi perubahan *set point* dan gangguan beban. Penalaan parameter PI dilakukan dengan metode Ziegler-Nichols Tipe I yang kemudian disempurnakan melalui pendekatan *trial and error*. Validasi dilakukan melalui simulasi serta pengujian eksperimental berbasis mikrokontroler.

2. Material and methods

Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi modul konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* yang dilengkapi dengan sistem pengendalian tegangan keluaran berbasis Proportional-Integral (PI), yang diuji melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM serta melalui pengujian eksperimen.

2.1 Konverter DC-DC Buck-Boost Non-Inverting

Konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* adalah jenis konverter DC-DC yang dapat menaikkan (*boost*) atau menurunkan (*buck*) tegangan masukan tanpa membalik polaritas keluarannya. Konverter ini berbeda dari *buck-boost* konvensional yang menghasilkan tegangan keluaran terbalik terhadap masukan. Gambar rangkaian *buck-boost non-inverting* ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini.



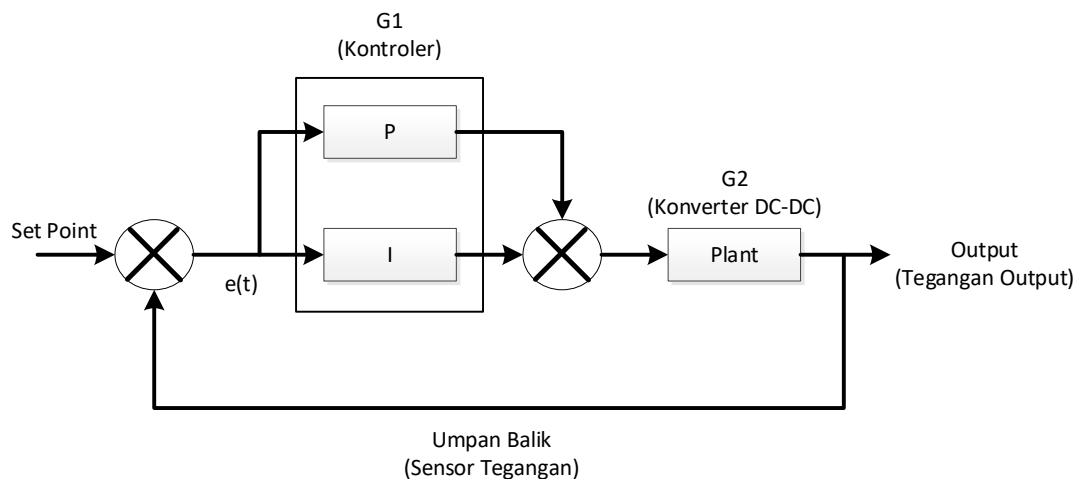
Gambar 1: Rangkaian Konverter *Buck-Boost Non-Inverting*

Rangkaian konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* merupakan gabungan dari topologi *buck* dan *boost* yang dirancang untuk mengatur tegangan keluaran tanpa membalik polaritas terhadap *input*. Konverter ini bekerja dengan dua buah MOSFET yang dikendalikan secara bergantian sesuai dengan kondisi tegangan masukan. Pada mode *buck*, ketika tegangan *input* lebih tinggi dari tegangan *output*, hanya satu MOSFET yang aktif untuk menurunkan tegangan dan menyimpan energi dalam induktor, yang kemudian dilepaskan ke beban melalui dioda saat MOSFET dimatikan. Sebaliknya, pada mode *boost*, saat tegangan *input* lebih rendah dari tegangan *output*, MOSFET pertama mengalirkan arus untuk menyimpan energi dalam induktor, lalu ketika dimatikan, MOSFET kedua aktif untuk mengalirkan energi tersebut ke beban sehingga tegangan meningkat. Jika tegangan *input* mendekati tegangan *output* ($V_{in} = V_{out}$), konverter beroperasi dalam mode transisi di mana kedua mekanisme bekerja bersamaan dalam satu siklus *switching* untuk menjaga kestabilan

output. Pengaturan waktu aktif (*duty cycle*) kedua MOSFET dikendalikan oleh sinyal PWM yang diatur melalui pengendali PI, sehingga tegangan *output* tetap sesuai dengan nilai referensi yang telah ditentukan.

2.2 Pengendali Proportional-Integral (PI)

Pada Gambar 2 pengendali Proportional-Integral (PI) merupakan salah satu jenis pengendali umpan balik yang banyak digunakan dalam sistem otomasi dan kendali, terutama dalam aplikasi industri dan elektronika daya. Pengendali ini mengombinasikan dua aksi kendali utama, yaitu aksi proportional (P) dan aksi integral (I), yang masing-masing memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan dan keakuratan keluaran sistem [10].



Gambar 2: Pengendali PI

Pada Gambar 2 aksi proportional berfungsi untuk memberikan respon cepat terhadap perbedaan (*error*) antara sinyal referensi (*set point*) dan sinyal keluaran aktual dari sistem. Semakin besar *error* yang terjadi, semakin besar pula sinyal kendali yang dihasilkan oleh bagian proportional. Secara matematis, bagian ini dapat dinyatakan sebagai.

$$up(t) = K_p \times e(t) \quad (1)$$

K_p merupakan konstanta proportional, e adalah *error*, dan u merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu (t). Aksi integral bertugas untuk eliminasi kesalahan *steady-state* yang mungkin tidak dapat diselesaikan oleh aksi proportional saja. Bagian integral menghitung akumulasi dari *error* yang terjadi seiring waktu, dan menambahkan hasilnya pada sinyal kendali. Secara matematis, aksi integral dinyatakan sebagai.

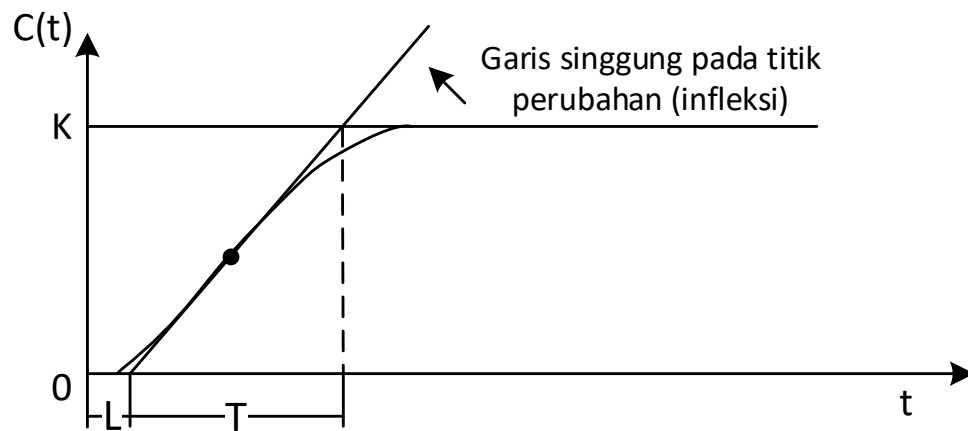
$$ui(t) = K_i \int e(t) dt \quad (2)$$

K_i merupakan konstanta integral, e adalah *error*, dan u merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu (t). Dengan menggabungkan kedua aksi ini, pengendali PI dapat merespons perubahan *error* secara cepat sekaligus mengoreksi kesalahan jangka panjang yang terus berlangsung. Gabungan dari kedua aksi tersebut membentuk persamaan umum pengendali PI sebagai berikut.

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3)$$

Persamaan di atas menyatakan bahwa keluaran $u(t)$ diperoleh dari hasil penjumlahan kontribusi konstanta proportional (K_p), dan konstanta integral (K_i), di mana masing-masing elemen kendali tersebut dipengaruhi oleh nilai *error* (e) pada waktu tertentu (t).

2.3 Penalaan PI dengan Metode Ziegler-Nichols I



Gambar 3: Kurva Transien *Open-Loop*

Gambar 3 merupakan penalaan pada sistem kendali bertujuan untuk menentukan parameter optimal dari pengendali agar sistem mampu merespons secara cepat, stabil, dan akurat. Salah satu metode yang umum digunakan adalah metode Ziegler-Nichols Tipe I, yang merupakan pendekatan eksperimental berdasarkan karakteristik respon sistem terbuka (*open-loop*).

Pada metode ini, proses penalaan dimulai dengan memperoleh kurva respon *open-loop* dari plant. Setelah kurva didapatkan, langkah selanjutnya adalah menggambarkan garis singgung di titik infleksi, yaitu titik perubahan paling tajam pada kurva berbentuk S. Perpotongan antara garis singgung tersebut dengan garis waktu (t) akan menghasilkan dua parameter penting, yaitu L (waktu tunda) dan T (konstanta waktu), yang nantinya digunakan untuk menentukan nilai konstanta kontroler berdasarkan tabel tuning Ziegler-Nichols Tipe I.

Keberhasilan metode ini sangat bergantung pada ketepatan dalam mengidentifikasi titik infleksi dan menggambar garis singgungnya, karena titik potong inilah yang menjadi dasar utama dalam menghitung parameter kontrol PI.

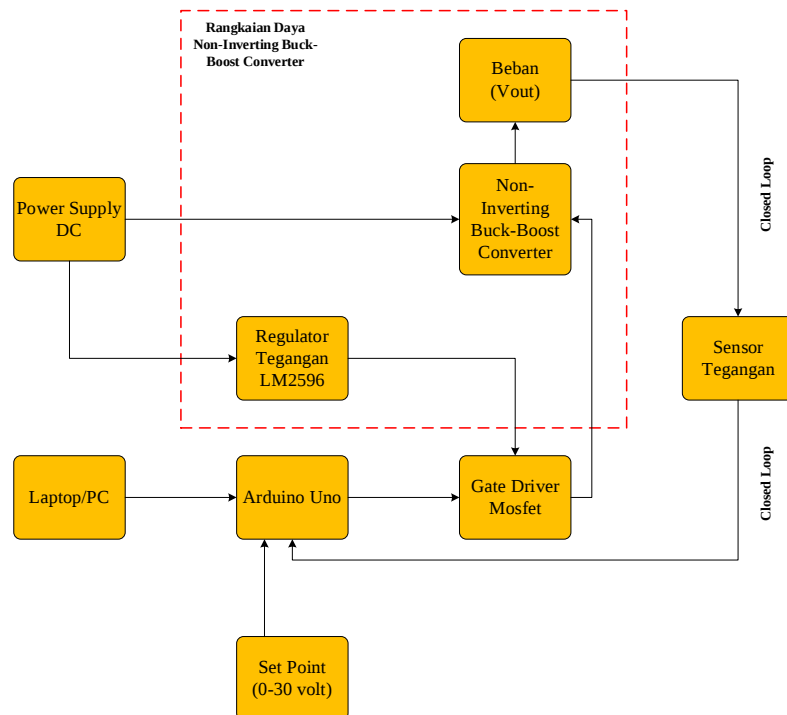
Setelah mendapatkan parameter L dan T , masukkan parameter tersebut pada Tabel 1 aturan *tuning* Ziegler-Nichols Tipe I.

Tabel 1: Aturan *Tuning* Ziegler-Nichols Tipe I

Jenis Pengendalian	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0

Tabel 1 merupakan rumus penentuan parameter kontrol (K_p , T_i , T_d) berdasarkan karakteristik respon sistem *open-loop*.

2.4 Perancangan Konverter DC-DC *Buck-Boost Non-Inverting*



Gambar 4: Blok Diagram Konverter DC-DC *Buck-Boost Non-Inverting*

Gambar 4 menunjukkan blok diagram rancangan dari konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* yang dikendalikan secara tertutup (*closed-loop*). Sistem diawali dengan power supply DC yang berfungsi sebagai sumber energi utama. Daya dari power supply ini disuplai ke dua jalur, satu langsung ke konverter *buck-boost non-inverting* untuk proses konversi tegangan, dan satu lagi ke LM2596, yaitu modul regulator *step-down* yang menghasilkan tegangan lebih rendah untuk menghidupi Arduino Uno.

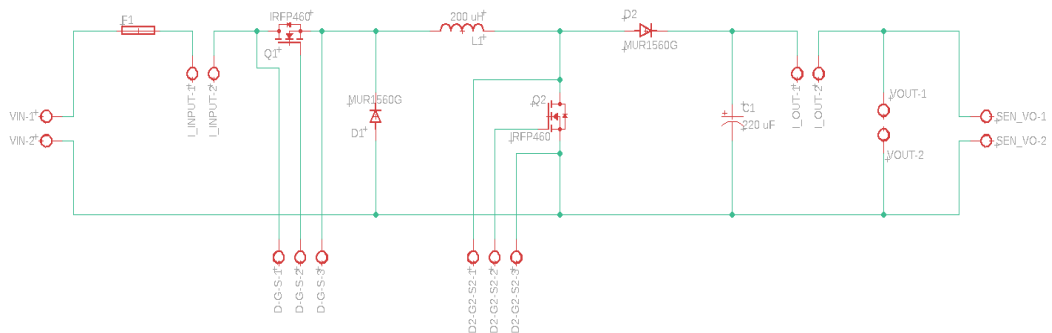
Arduino Uno berperan sebagai pengendali dalam sistem ini. Arduino menerima *input* berupa *set point* 30 volt, yang merupakan referensi tegangan *output* yang diinginkan. Selain itu, arduino juga terhubung ke laptop/PC yang digunakan untuk pemrograman awal, monitoring data, atau penyesuaian parameter secara *real-time*. Keluaran dari konverter *buck-boost non-inverting* dihubungkan ke beban (*Vout*), yakni perangkat atau sistem yang memerlukan pasokan tegangan tertentu. Tegangan *output* ini diukur menggunakan sensor tegangan. Sensor ini kemudian mengirimkan nilai aktual tegangan ke Arduino.

Arduino akan membandingkan antara tegangan aktual dari sensor dengan nilai *set point* yang telah ditentukan. Jika terdapat perbedaan atau kesalahan (*error*), arduino akan mengatur sinyal kendali ke *gate driver* MOSFET. *Gate driver* ini memperkuat sinyal tersebut sehingga cukup kuat untuk mengendalikan *switching* pada MOSFET di dalam konverter *buck-boost non-inverting*. Dengan pengaturan ini, MOSFET bekerja secara optimal untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan, sehingga *output* sistem mengikuti *set point* yang sudah diterapkan. Proses ini berlangsung terus menerus dalam bentuk loop tertutup untuk menjaga kestabilan tegangan *output* terhadap perubahan beban atau gangguan dari luar. Dalam merancang konverter *buck-boost non-inverting* ini menggunakan beberapa nilai parameter seperti pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2: Parameter Konverter DC-DC *Buck-Boost Non-Inverting*

Parameter	Nilai
Tegangan Masukan (V_{in})	15 Volt
Tegangan Keluaran (V_o)	30 Volt
Arus Keluaran (I_{out})	1,5 A
Frekuensi <i>Switching</i> (F_s)	20 kHz
Daya Keluaran (P_{out})	45 Watt

Tabel 2 merupakan parameter dasar rancangan konverter yang digunakan sebagai acuan simulasi dan implementasi perangkat keras.

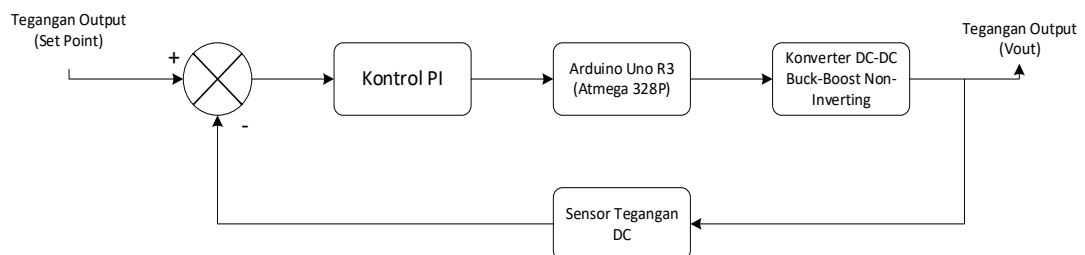


Gambar 5: Skematik Konverter DC-DC *Buck-Boost Non-Inverting*

Gambar 5 merupakan perancangan skematik konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Eagle.

2.5 Perancangan Kendali Tegangan Dengan Metode PI

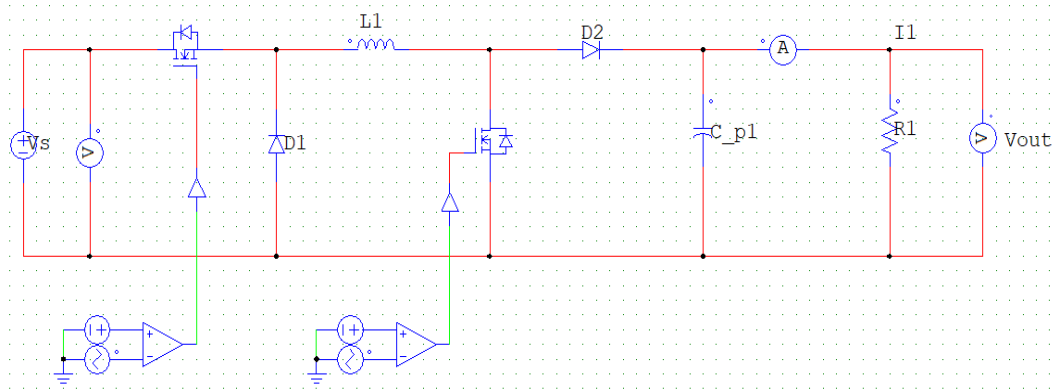
Blok diagram pada gambar 6 menggambarkan sistem kendali Proportional-Integral (PI) yang digunakan untuk mengatur tegangan *output* pada konverter DC-DC *buck-boost non-inverting*. Sistem ini bekerja secara *closed-loop*, di mana tegangan *output* terus dimonitor dan disesuaikan agar sesuai dengan nilai referensi yang diinginkan.



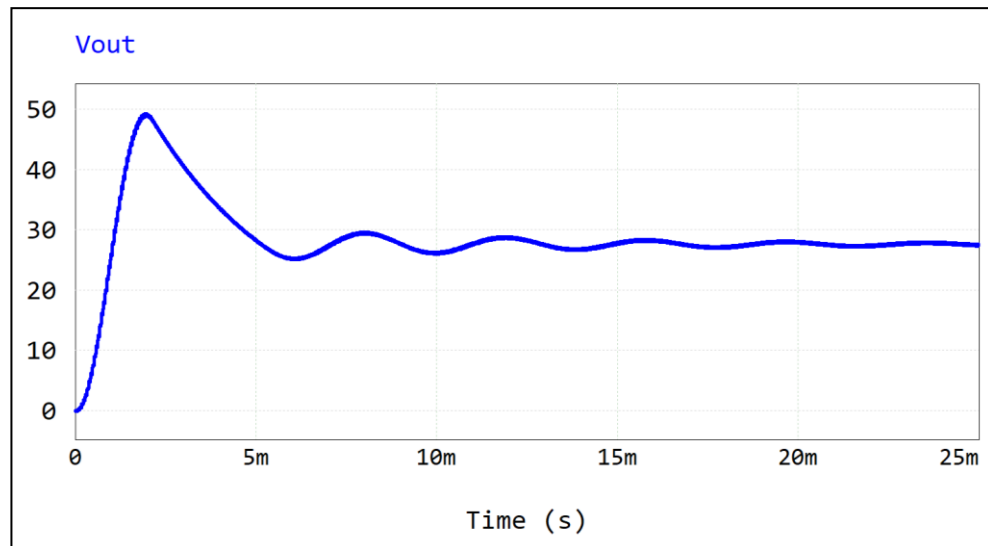
Gambar 6: Blok Diagram Kendali PI

Gambar 6 menunjukkan proses dimulai dengan memasukkan nilai referensi (*set point*) sebesar 30V. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan tegangan *output* aktual yang telah diukur dan diumpkan balik melalui sensor tegangan DC. Selisih antara referensi dan umpan balik menghasilkan sinyal *error*, yang menjadi masukan bagi kontroler PI. Dalam penelitian ini, desain kontrol PI dikembangkan dengan menerapkan metode Ziegler-Nichols Tipe I. Apabila hasil tuning dari Ziegler-Nichols Tipe I masih kurang sesuai dengan respon yang didapatkan, bisa dilakukan *trial and error* untuk mendapatkan parameter konstanta yang diinginkan. Proses perancangan kontrol PI dilakukan menggunakan perangkat lunak PSIM.

Rangkaian skematik konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* merupakan representasi dari plant yang akan dirancang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Simulasi dilakukan dalam kondisi *open-loop* dengan pemberian sinyal *duty cycle* sebesar 66%. Nilai *duty cycle* ini diperoleh dari hasil perhitungan dari perancangan konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* yang akan direalisasikan.

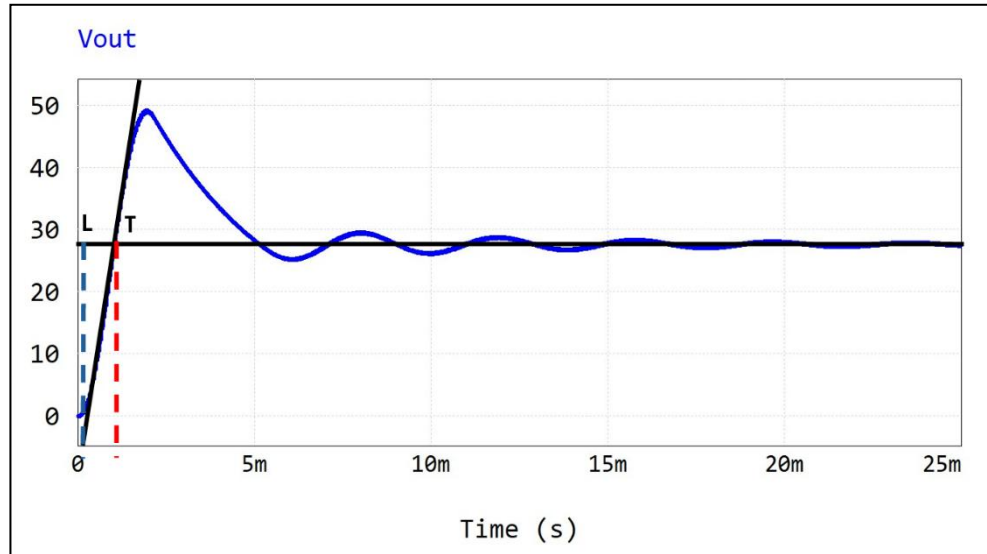


Gambar 7: Konverter DC-DC Buck-Boost Non-Inverting



Gambar 8: Respon *Open-Loop*

Gambar 8 merupakan respon kurva dari sistem dalam kondisi *open-loop*, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis kurva dengan menambahkan garis bantu (gradien) pada kurva respon. Tentukan waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T).



Gambar 9: Respon *Open-Loop* dengan Garis Bantu

Gambar 9 merupakan respon sistem konverter dalam kondisi *open-loop*, dimana besarnya nilai L adalah 0,12 detik dan nilai T sebesar 0,7 detik. Setelah didapatkan parameter PI, maka simulasikan dalam kondisi *closed-loop* pada perangkat lunak PSIM.

Tabel 3: Hasil Awal Parameter PI Menggunakan Metode Ziegler-Nichols Tipe I

Parameter	Nilai	Keterangan
L	0,12 s	Delay time dari kurva S respon <i>open-loop</i> sistem
T	0,7 s	Time constant dari kurva S

Tabel 3 menunjukkan hasil awal parameter PI menggunakan metode Ziegler-Nichols Tipe I, sebelum dilakukan penyempurnaan melalui pendekatan *trial and error* untuk mendapatkan parameter konstanta yang diinginkan.

Tabel 4: Hasil *Tunning* Ziegler-Nichols Tipe I

Jenis Pengendalian	Kp	Ti	Td	Ki	Kd
P	5,81	∞	0	-	-
PI	5,23	0,4	0	12,90	-

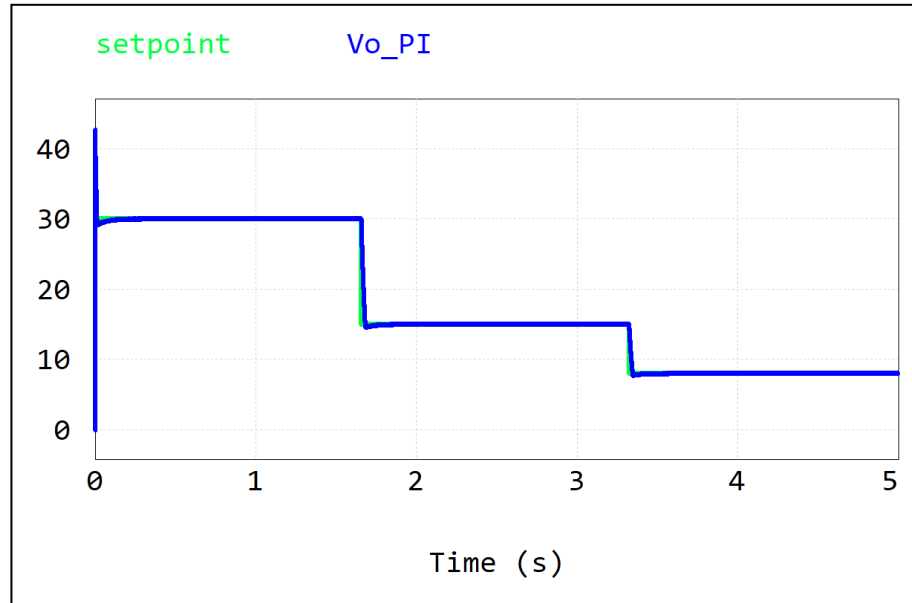
Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan dari *tunning* menggunakan metode Ziegler-Nichols Tipe I. Setelah didapatkan parameter tersebut, nilai dari parameter disubstitusikan ke dalam Persamaan (3).

3. Results and discussion

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap yaitu, melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM dan melalui percobaan eksperimen. Pengujian simulasi meliputi pengujian dengan skema perubahan *set point*, dan skema dengan gangguan (berbeban). Sementara itu, pengujian eksperimen mencakup pengujian pengendalian tegangan menggunakan kontrol PI.

3.1 Skema Perubahan *Set Point*

Pengujian dilakukan dengan menjaga tegangan *input* (V_{in}) tetap, sementara nilai *set point* divariasikan. Tujuannya untuk mengevaluasi kinerja parameter kendali PI yang telah dirancang serta mengamati respon tegangan *output* (V_{out}). Dalam pengujian ini, tegangan *input* pada konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* ditetapkan sebesar 15 volt. Nilai *set point* tegangan *output* diatur sebesar 30 volt kemudian pada detik 1,7 diubah menjadi 15 volt, dan pada detik 3,4 menjadi 8 volt. Waktu pengambilan sampel dalam pengujian ini berlangsung selama 5 detik.



Gambar 10: Respon Pengujian *Set Point* Berubah Sistem *Closed-Loop*

Gambar 10 menunjukkan respon sistem *closed-loop* terhadap perubahan *set point* secara bertahap dari 30V hingga 8V. Terlihat bahwa sistem mampu mengikuti perubahan *set point* dengan cepat dan stabil tanpa *overshoot* yang signifikan, menandakan pengendali PI bekerja secara efektif.

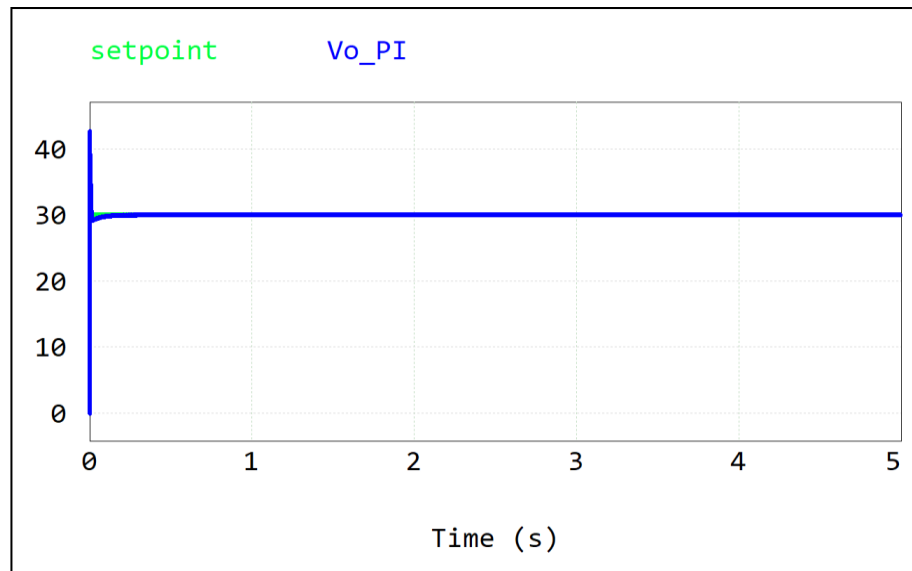
Tabel 5: Hasil Pengujian Perubahan *Set Point*

Jenis Kendali	<i>Set Point</i> (Volt)	Mode Pengujian	<i>Settling Time</i> (s)	<i>Vout</i> (Volt)	<i>Overshoot</i> (%)	Error (e)
PI	30	Boost	0,1	29,91	33,4%	0,3%
	15	$V_{in} = V_{out}$	0,1	14,98		0,13%
	8	Buck	0,1	8,00		0%

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 10 respon *closed-loop* dari hasil pengujian sistem kendali PI pada konverter DC-DC *buck-boost non-inverting*, didapatkan bahwa sistem mampu mengikuti perubahan *set point* dengan waktu *settling time* selama 0,1 detik dan nilai *error* masing-masing sebesar 0,3%; 0,13%; dan 0% untuk mode *boost*, $V_{in} = V_{out}$, dan *buck*. Namun, pada ketiga mode pengujian terjadi *overshoot* sebesar 33,4% yang menunjukkan bahwa sistem merespon perubahan dengan cukup agresif. Parameter kendali PI yang digunakan dalam pengujian ini yaitu $K_p = 0,56$ dan $K_i = 0,059$. Nilai K_p awal diperoleh dari persamaan pada tabel 3 hasil *tunning* Ziegler-Nichols Tipe I. Namun, nilai parameter K_p dan K_i nya berbeda dengan tabel 3 karena dilakukan *tunning* ulang dengan metode *trial and error* karena hasil respon tegangan keluarannya yang lebih optimal.

3.2 Skema dengan Gangguan (Berbeban)

Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan *input* (V_{in}) tetap, dan beban (R_{load}) bervariasi, hal ini dilakukan untuk menguji parameter kendali PI yang telah dirancang, dan ingin mengetahui respon tegangan *output* (V_{out}). Pada pengujian ini, tegangan *input* (V_{in}) diberikan sebesar 15 volt, dan beban (R_{load}) diatur sebesar 180Ω dan 160Ω serta diberikan sampel waktu selama 5 detik.



Gambar 11: Respon Pengujian Perubahan Beban Sistem *Closed-Loop*

Gambar 11 menunjukkan respon sistem *closed-loop* terhadap perubahan beban dari 180Ω menjadi 160Ω dengan tegangan masukan tetap sebesar 15V. Dari grafik terlihat bahwa meskipun terjadi perubahan beban, tegangan keluaran tetap stabil dan mampu mempertahankan nilai referensi, yang menandakan performa pengendali PI cukup baik dalam menjaga kestabilan sistem terhadap gangguan beban.

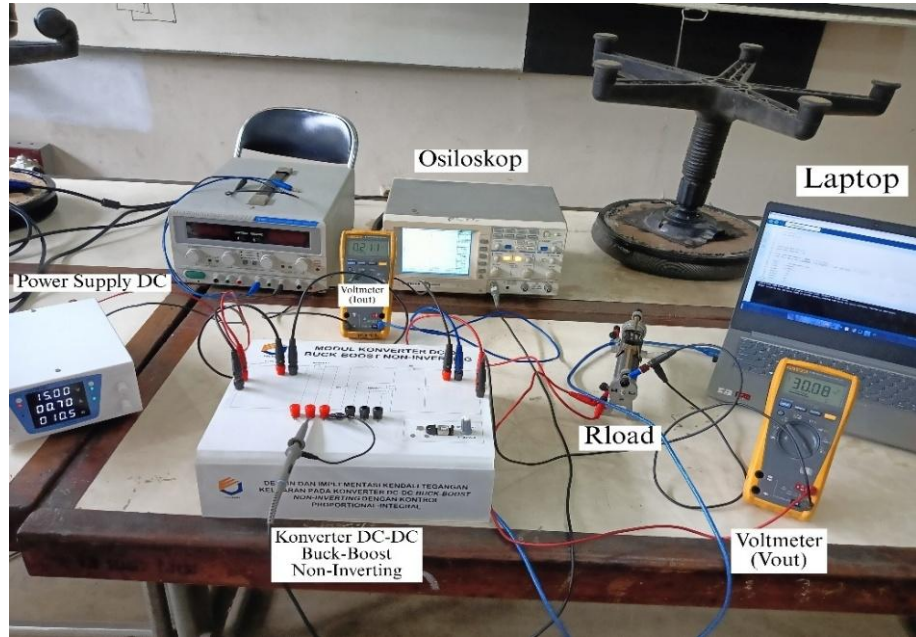
Tabel 6: Hasil Pengujian Perubahan Beban (R_{load})

Jenis Kendali	V_{in} (Volt)	Set Point (Volt)	Beban (R_{load})	V_{out} (Volt)	Error (e)
PI	15	30	180Ω	29,96	0,13%
	15	30	160Ω	29,98	0,06%

Berdasarkan Gambar 11 dan Tabel 6 didapatkan bahwa konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* ketika terjadi perubahan beban dari 160Ω hingga 180Ω , parameter kendali tegangan dapat mempertahankan tegangan keluarannya (V_{out}) ketika terjadi perubahan beban.

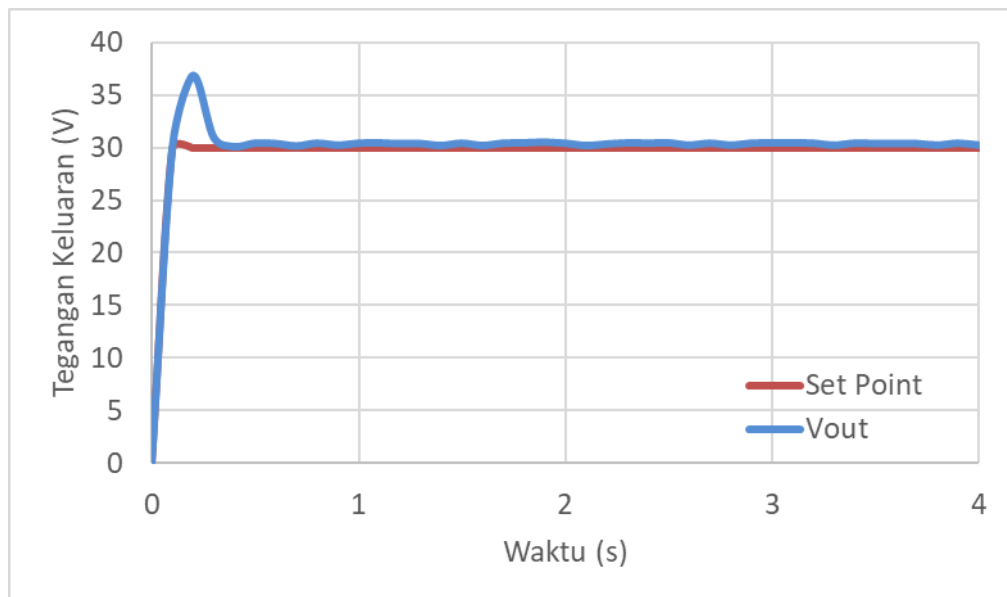
3.3 Pengujian Kendali Tegangan (Skema Setpoint Tetap)

Pengujian *closed-loop* konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* dilakukan secara eksperimen menggunakan modul konverter yang telah dirancang dan direalisasikan. Tegangan masukan ditetapkan sebesar 15V, dengan *set point* tegangan keluaran 30V. Proses pengujian ini menggunakan Arduino Uno sebagai pengendali, dan data dicatat menggunakan fitur *Data Streamer*. Konfigurasi alat uji secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12: Realisasi Alat dan Pengujian Secara Eksperimen

Gambar 12 menunjukkan konfigurasi lengkap peralatan yang digunakan dalam pengujian, yang terdiri dari *power supply* DC, osiloskop untuk memantau bentuk gelombang, voltmeter untuk mengukur tegangan keluaran (V_{out}) dan arus keluaran (I_{out}), serta laptop untuk pemrograman dan pemantauan sistem. Gambar 13 menunjukkan pengujian respon kendali tegangan secara eksperimen dengan nilai parameter $K_p = 0,56$ dan $K_i = 0,059$.



Gambar 13: Respon *Closed-Loop* Secara Eksperimen *Setpoint* Tetap

Gambar 13 menunjukkan kurva respon *close loop* dengan kendali PI untuk tegangan keluaran yang diperoleh dari eksperimen. Garis berwarna merah merupakan *set point* sebesar 30V, dan garis berwarna biru merupakan respon kendali tegangan. Sistem menunjukkan respon awal mencapai 0,4 detik, di mana tegangan *output* (V_{out}) segera naik mendekati nilai referensi. Tegangan keluaran pada konverter tersebut yang di sensing melalui sensor tegangan yang kemudian di bandingkan dengan nilai referensi atau *setpoint*. Dari kurva respon tersebut terlihat bahwa pada transien awal terjadi *overshoot* sebesar

36,88 volt, atau sebesar 22,93% terhadap *set point* yang telah di tetapkan dan memiliki *steady state error* sebesar 3,33%. Nilai ini termasuk lebih rendah jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Pada penelitian sebelumnya oleh Kunigar et al. [5] melaporkan *overshoot* >30% dengan *steady state error* sebesar 17,4% pada konverter *buck-boost* dengan pengendali PID dan secara cara kerja rangkaian konverter tersebut polaritas tegangan pada sisi terminal keluaran terbalik. Perbedaan ini menunjukkan bahwa parameter PI yang digunakan cukup optimal pada penerapan kendali tegangan keluaran.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali tegangan keluaran pada konverter DC-DC *buck-boost non-inverting* menggunakan pengendali PI berbasis mikrokontroler. Metode penalaan Ziegler-Nichols Tipe I digunakan untuk mendapatkan parameter awal pengendali PI, yang kemudian dioptimasi dengan pendekatan *trial and error* untuk meningkatkan respon sistem. Hasil simulasi dan pengujian eksperimen menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran pada nilai 30V dari tegangan masukan 15V. Sistem menunjukkan respon cepat dengan waktu pemulihan 0,1 – 0,5 detik dengan *overshoot* mencapai 22,93%, sistem mampu menjajaki *set point* ketika skema pengujian *set point* berubah maupun variasi beban dengan polaritas tegangan pada terminal keluaran tidak terbalik. Sebagai pengembangan lebih lanjut penerapan PI *anti-windup* dapat diterapkan guna memperkecil *overshoot* dan meminimalisir efek saturasi.

Acknowledgements

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas bantuan pendanaan yang diberikan dalam pelaksanaan tugas akhir/penelitian ini berdasarkan Surat Keputusan Direktur Politeknik Negeri Bandung Nomor 317 /PL1 /HK.02/2025 kelompok pembiayaan A2.

References

- [1] R. Maulidin, P. Jiwa, P. Yunta, and L. Indriyani, "Rancang Buck Boost Converter Untuk Mengatur Energi Pada Baterai," *Jurnal Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 1, no. 1, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.26877/jeti.v1i1.47>.
- [2] R. Hakim, I. K. Wiryajati, and I. B. F. Citarsa, "Evaluasi Kinerja Buck-Boost Konverter Berbasis Kontroler Konvensional," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i2.4262.
- [3] M. Z. Arifin, R. I. Putri, T. Elektronika, T. Elektro, and P. N. Malang, "Implementasi Kontroler PI Pada Buck Converter Sebagai Pengaturan Tegangan Konstan Di Sistem Turbin Angin Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Dilengkapi Sistem Monitoring Berbasis IoT," vol. 2, no. 2, pp. 43–48, 2021, [Online]. Available: <http://journal.isas.or.id/index.php/JASENS>
- [4] S. Muhammad Ilman and F. A. Septian Putra, "Pemodelan dinamis dan kendali multi-loop konverter DC-DC boost dengan pengendali PI," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 1, pp. 47–56, Mar. 2023, doi: 10.35313/jitel.v3i1.2023.47-56.
- [5] R. Kunigar, A. R. Al Tahtawi, and S. M. Ilman, "Desain dan Implementasi Modul Konverter DC-DC Buck Boost Dengan Pengendali PID," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 1, pp. 404–415, Jul. 2023, doi: 10.24036/jtein.v4i1.414.
- [6] M. Saputra, S. Djulihenanto, and I. Fadlika, "Implementasi Kendali Tegangan Lup Tertutup Buck Converter dengan ArduinoMega," *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 8, no. 1. Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.33795/elposys.v8i1.623>.

- [7] P. Jiwa, P. Yunta, L. Indriyani, and R. Maulidin, "Sistem Penyimpanan Energi Menggunakan Superkapasitor Dengan Buck Converter Dan Boost Converter," *Jurnal Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 1, no. 1, pp. 13-18, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.26877/jeti.v1i1.48>.
- [8] R. J. Yuniar, C. Ashari, and A. C. Nugraha, "How to cite: Pengendalian Tegangan Output Pada Buck-Boost Converter Dengan Metode Fuzzy Logic," vol. 7, no. 12, 2022, doi: 10.36418/syntax-literate.v7i12.11550.
- [9] R. Nurul Huda, Jlp. Hamka, and K. UNP Air Tawar Padang, "Desain dan Simulasi Non-Inverting Buck-Boost Konverter." *MSI Transaction on Education*, vol. 3, no. 4, pp. 187-198, doi: <https://doi.org/10.46574/mted.v3i4.98>.
- [10] I. Ferdiansyah, E. Sunarno, P. Elektronika, and N. Surabaya, "Penerapan Kontrol PI Pada Alat Pengaduk dan Pengukus Adonan Puduk untuk Meningkatkan Hasil Produksi Industri Rumah Tangga di Gresik." *JTT: Jurnal Teknologi Terpadu*, vol. 8, no. 2, pp. 134-143, Oct 2020, doi: <https://doi.org/10.32487/jtt.v8i2.935>.
- [11] Z. Efendi, D. Mursyida, and D. Jurusan Teknik Elektro Industri, "Rancang Bangun Modul DC-DC Converter Dengan Pengendali PI." *Politeknik Elektronika Negeri Surabaya - ITS*, pp. 1-5
- [12] D. P. Andini, D. Saefudin, P. Handayani, Y. G. Sugiarta, F. Vauzia, and S. Suyanto, "Desain dan implementasi rangkaian konverter jenis non-isolated buck and boost DC-DC," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 3, pp. 247-254, Oct. 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i3.2023.247-254.
- [13] R. Salman Dirgantara, A. Rafi Al Tahtawi, and S. Muhammad Ilman, "Desain dan Implementasi Konverter DC-DC Buck-Boost Dengan Kendali Modulasi Lebar Pulsa." *IRWNS: Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 14, no. 1, Agustus (2023). doi: <https://doi.org/10.35313/irwns.v14i1>
- [14] W. Aldi and H. Abil, "Rancang Bangun Buck-Boost Converter Sebagai Charger Baterai Controller Berbasis Pwm Dengan Sumber Photovoltaic," *Jurnal: ElektriKA Borneo (JEB)*, vol. 10, no. 1, pp. 20-27, 2024.
- [15] R. Noor Prasetyono, S. Suyudi, N. Mega Saraswati, and F. Haris Arsiandro, "Konverter Buck-Boost dengan Sistem Close Loop untuk Panel Surya menggunakan Kontrol Arduino," *TEKNIKA: Jurnal Ilmiah Bidang Ilmu Rekayasa*, vol. 18, No. 2, pp. 477-488, 2024.
- [16] M. W. N. Okta, A. Murtono, and Y. Yulianto, "Analisa Rancang Bangun Buck-Boost Converter Untuk Sistem Charging Battery," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 8, no. 1, p. 34, May 2021, doi: 10.33795/elk.v8i1.225.
- [17] Katsuhiko. Ogata, *Modern control engineering*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [18] M. H. . Rashid, *Power electronics : devices, circuits, and applications*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2014.
- [19] D. W Hart, *Power Electronics: Principles and Applications*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010.