JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia, Vol. 7, No. 2, pp. 293-307, 2026
e-ISSN 2723-0589

Design And Implementation Of Voltage Control In Cascade Buck DC-DC Converter Using PI Method

Trias Wulandari[1], Sofyan Muhammad Ilman[1]*, Febi Ariefka Septian[1], Dini Hariani Fitri Lubis[1], Yosua Sahat Halomoan[1], Giga Verian Pratama[1], and Annisa Izaty[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

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

Abstract

DC power supply systems require a stable output voltage to meet load requirements. This study aims to design and implement a regulated DC power supply using a non-isolated cascade buck DC-DC converter with an input voltage of 30 VDC and an output voltage of 15 VDC. The non-isolated cascade buck DC-DC converter is a type of converter that lacks galvanic isolation between the input and output sides. The research methodology encompasses converter design, component parameter calculation, the design of a Proportional-Integral (PI) control system using the Ziegler-Nichols method, simulation using PSIM software, and hardware implementation and testing. A PI controller is employed to regulate the PWM duty cycle at the converter's second stage based on the difference between the output voltage and the setpoint value. Test results demonstrate that the system successfully produces an output voltage of 15 V, matching the setpoint. During load change tests, the output voltage exhibits an overshoot of 15.3–15.5 V (approximately 3%) before returning to the 15 V setpoint with a steady-state error approaching 0%. In setpoint change tests, the system effectively tracks reference voltage changes from 10 V to 15 V and vice versa with minimal steady-state error. These results indicate that the PI controller is capable of maintaining the output voltage close to the setpoint value despite variations in load and setpoint.

Keywords: Converter DC-DC; Cascade Buck; PI

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. Introduction

Perkembangan sistem konversi energi listrik modern menuntut adanya perangkat elektronik daya yang efisien, stabil dan mampu bekerja pada berbagai kondisi beban. Konverter DC-DC tipe *boost* banyak digunakan pada sistem energi terbarukan seperti panel surya, kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi karena kemampuannya menaikkan tegangan keluaran[1]. Namun, permasalahan umum yang masih sering ditemui adalah fluktasi tegangan akibat variasi masukan maupun beban yang dapat mengurangi efisiensi sistem [2]. Oleh karena itu, teknik kendali yang tepat sangat penting untuk menjaga kestabilan tegangan. Beberapa penelitian internasional melaporkan bahwa penggunaan pengendali cerdas dan metode optimasi pada konverter mampu meningkatkan performa sistem daya secara signifikan [3], [4].

Berdasarkan hal-hal diatas, penelitian ini menganalisis dan menverifikasi kriteria kontrol tegangan pada konverter DC-DC *cascade buck* menggunakan metode PI yang tepat agar sistem mencapai respon transien optimal tanpa *overshoot* berlebihan [5]. Penelitian mengenai konverter DC-DC *buck* dengan pengendalian *Proportional-Integral* (PI) di Indonesia terus berkembang, seiring meningkatnya kebutuhan sistem tenaga listrik yang efisien dan stabil terutama pada aplikasi kendaraan listrik, sistem fotovoltaik dan perangkat elektronika daya. *Buck converter* dipilih karena kemampuannya menurunkan tegangan masukan menjadi level yang sesuai dengan beban secara efisien, sementara kontrol PI

banyak digunakan karena struktur yang sederhana namun mampu memberikan kinerja - *steady-state* yang baik [6].

Merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Purwandianto, Dieta dan Feri Siswoyo Hadi dalam jurnal "Desain dan Simulasi Rangkaian *DC to DC Chopper* Tipe Buck dengan Pengendali PI", bahwa "b*uck converter* sebagai salah satu jenis DC *Chopper* yang digunakan untuk menurunkan tegangan DC agar sesuai dengan kebutuhan beban. Dalam implementasinya, pengendalian dilakukan dengan metode PWM yang memungkinkan efisiensi tinggi." Dalam jurnal juga disebutkan bahwa pengaturan TON dibutuhkan dengan menjaga frekuensi serta pengaturan lebar pulsa [7]. Penelitian oleh Sivakuamar Kumaraguruparan dan Konguvel Elango (2024) dalam jurnal Heliyon berjudul "*Optimal Control Strategies for High-Efficiency Non-Isolated DC-DC Buck Converter in IoT Applications: A Comparative Study*" membahas penerapan berbagai metode pengendalian pada *buck converter non-isolated* untuk meningkatkan efisiensi dan kestabilan tegangan pada sistem catu daya. Beragam strategi control seperti PWM, PFM, PSM dan AOT kontrol dibandingkan untuk menentukan metode paling optimal dalam menjaga tegangan keluaran dan tetap stabil terhadap perubahan beban dan sumber. Meskipun tidak secara langsung menggunakan metode PI maupun struktur *cascade control*, penelitian ini memiliki relevansi dengan sistem kontrol tegangan *cascade buck non-isolated* karena sama-sama bertujuan menjaga kestabilan tegangan dan meningkatkan respon dinamis [8].

Penelitian oleh Mostafa Jabari dkk. (2024) dalam jurnal *Scientific Reports* memperkenalkan metode kontrol multi-tahap (*multi-stage*) pada DC-DC *buck converter* dengan menggabungkan PIDn *controller* dan (1+PD) *cascade structure* yang optimasi menggunakan *Golden Eagle Optimization* (GEO) *algorithm*. Pendekatan ini dikembangkan untuk meningkatkan kecepatan respon, mengurangi *overshoot* serta memperkuat kestabilan sistem terhadap konfigurasi *non-isolated buck converter*, yang umum digunakan pada perangkat IoT, kendaran listrik dan sistem tenaga terbarukan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali PIDn(1+PD) memberikan performa lebih unggul dibandingkan kontrol konvensional seperti PID dan FORID, baik dalam domain maupun frekuensi. Struktur kontrol berlapis ini memiliki prinsip serupa dengan kontrol tegangan *cascade* berbasis PI, dimana *loop* dalam mengatur arus dan *loop* luar mengatur tegangan, sehingga menghasilkan respon dinamis yang cepat dan stabil. Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi metode kontrol bertingkat dengan optimasi algotirmik dapat meningkatkan kerja sistem catu daya *buck converter non-isolated* secara signifikan [9]. Penelitian yang dilakukan oleh Safa Aulia Zerlinna dkk. (2020) membahas tentang pengembangan kontroler *Proporsional-Integral* (PI) pada *SEPIC Converter (Single Ended Primary Inductance Converter*) menggunakan perangkat lunak PSIM. *SEPIC Converter* merupakan turunan dari *buck-boost converter* yang mampu menaikkan atau menurunkan tegangan tanpa mengubah polaritas tegangan keluarannya. Dalam penelitian tersebut, metode Ziegler-Nichols digunakan untuk melakukan *tunning* parameter kontroler PI agar sistem memiliki respon transien dan *steady-state* yang lebih baik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendalian PI efektif dalam menjaga kestabilan tegangan keluaran, tetapi memiliki keterbatasan dalam menangani respon dinamis yang cepat [10].

Beberapa penelitian lain seperti Masramdhani Saputra dkk. (2021) juga mengimplementasikan kontrol PI pada *buck converter* yang menggunakan Arduino Mega, dengan hasil efisiensi diatas 90% dan kestabilan tegangan yang baik pada sistem *loop* tertutup [11]. Sementara itu, penelitian oleh Amirhosein Mansouri dkk. (2023) mengembangkan metode kontrol *cascade nonlinear* pada *boost converter*, yang terbukti lebih Tangguh terhadap perubahan beban dan tegangan masukan disbanding kontrol linear [12]. Untuk tambahan perpesktif global, Chincholkar mengusulkan *normalized error-based PI controller* yang diterapkan pada DC-DC *buck*, dengan klaim memperluas rentang pemilihan *gain* pengendali dan meningkatkan kestabilan selama perubahan beban maupun *input*. Temuan ini relevan sebagai acuan peningkatan kinerja kontrol PI pada aplikasi tegangan menengah [13]. *Buck converter* memiliki beberapa keunggulan, antara lain

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

efisiensi yang tinggi, rangakain yang sederhana, serta tidak memerlukan transformator. Selain itu, tegangan keluarannya memiliki *ripple* yang relatif rendah sehingga hanya membutuhkan filter berukuran relatif kecil [14].

Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Rinande Ansutia dkk. (2025) membahas tentang optimasi kinerja *buck converter* mengunakan kontrol PI untuk menghasilkan regulasi tegangan yang stabil. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan peforma sistem konverter DC-DC dalam menjaga tegangan *output* agar tetap konstan meskipun terjadi perubahan pada tegangan *input* maupun beban. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penerapan sistem kontrol. Parameter kontrol, yaitu konstanta Kp dan Ki, ditentukan melalui proses *tunning* untuk mendapatkan respon sistem optimal. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PI mampu mengurangi *error steady-state* serta meningkatkan kestabilan tegangan *output* dibandingkan sistem tanpa kontrol [15]. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Salah Hilo Mohammed dkk (2024) membahas perbadingan metode control PI dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada rangkaian *buck-boost converter.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua metode mampu menjaga kestabilan tegangan *output*, namun kontrol PI memiliki kelebihan dalam implementasi yang lebih sederhana serta mudah dalam proses perancangan dan *tunning* parameter. Kontrol PI tetap menjadi pilihan yang efektif dan banyak digunakan dalam apliaksi *buck converter* karena kestabilan dan kemudahan implementasinya [16].

Buck converter merupakan salah satu regulator mode sakelar yang digunakan untuk menghasilkan tegangan DC keluaran dengan nilai yang lebih rendah dibandingkan tegangan masukannya. Proses konversi dilakukan melalui sakelar daya, seperti MOSFET yang bekerja dengan kondisi *ON* dan *OFF* pada frekuensi *switching* tertentu. Pengaturan tegangan keluaran dilakukan dengan mengendalikan durasi kondisi *ON* sakelar melalui teknik modulasi lebar pulsa. Pada konfigurasi dasarnya, *buck converter* tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu sumber tegangan DC, sakelar daya, dioda, induktor, kapasitor dan beban [17]. Ketika sakelar dalam kondisi *off,* tegangan masukan Vin terputus dari induktor. Arus dari tegangan masukan terhenti. Induktor melepaskan energi yang tersimpan ke beban. Induktor mengalirkan arus ke beban. Selama kondisi ini arus induktor menurun secara linear. Dioda diberi bias maju dan mengalirkan arus dari beban kembali kepada induktor [18]. *Cascade buck converter* merupakan rangkaian konverter DC-DC yang terdiri dari 2 atau lebih tahap *buck converter* yang disusun secara seri. Prinsip kerja konverter ini dilakukan dengan menurunkan tegangan masukan secara bertahap pada setiap tahap konversi. Konfigurasi tersebut menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah dan stabil serta dapat menghasilkan *ripple* yang lebih kecil dibandingkan penggunaan satu tahap *buck converter*. Pada setiap tahap, komponen utama yang bekerja adalah saklar (MOSFET), dioda, induktor dan kapasitor. Struktur dua tahap ini dirancang agar tiap *switch* dan komponen induktif/kapasitif bekerja dalam rentang tegangan dan arus yang lebih kecil sehingga tegangan stress dan kerugian *switching* dapat dikurangi. Hal ini sejalan dengan pendekatan yang dibahas dalam *simplified cascade multiphase DC-DC buck converter* yang memodelkan tiap tahap dan merancang parameter kontrol untuk memastikan respon dinamis yang memadai dan margin stabilitas yang cukup [19].

Tegangan keluaran diukur, dibandingkan dengan referensi, menghasilkan *error*, kemudian melalui kontroler PI akan menghasilkan sinyal *duty* PWM untuk mengendalikan MOSFET ditahap 2. Untuk kestabilan sistem dan respon terhadap gangguan perubahan), diperlukan analisis sinyal kecil dan desain *loop* kontrol (*outer loop* untuk tegangan, *inner loop* untuk arus) seperti yang dilakukan dalam artikel *output current controller* dari konverter *cascade multiphase* [20].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan konverter DC-DC *cascade buck* dengan sistem pengendalian *close loop* berbasis kendali PI digital. Evaluasi difokuskan pada kestabilan tegangan keluaran saat terjadi perubahan *set point* dan perubahan beban. Penalaan parameter PI dilakukan dengan metode Ziegler Nichols Tipe I

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

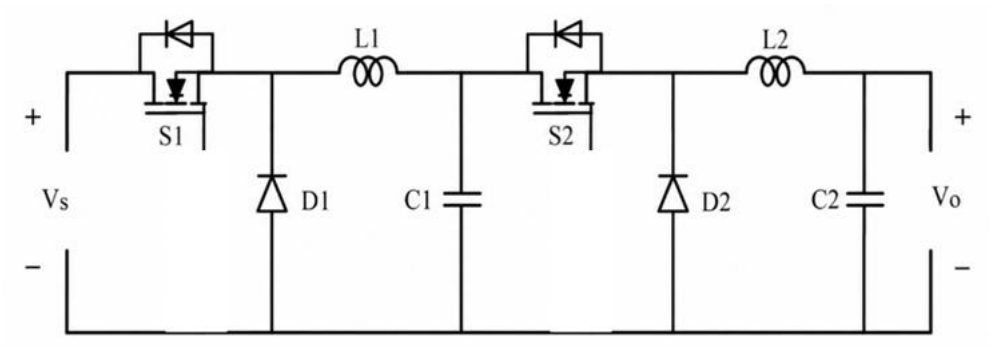
yang kemudian disempurnakan melalui pendekatan *trial and error.* Validasi dilakukan melalui simulasi serta pengujian eksperimental berbasis mikrokontroler.

2. Material and methods

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

2.1 Konverter DC-DC *Cascade Buck*

Cascade buck converter merupakan rangkaian konverter DC-DC yang terdiri dari 2 tahap *buck converter* yang disusun secara bertingkat. Gambar rangkaian *cascde buck converter* ditunjukkan pada gambar 1 di bawah ini.



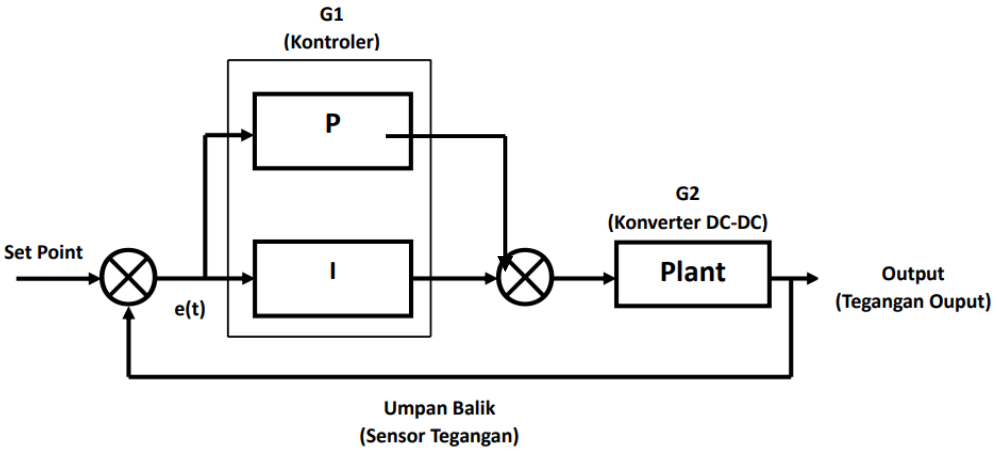
Gambar 1: Rangkaian Konverter Cascade Buck

Cascade buck converter merupakan rangkaian konverter DC-DC yang terdiri dari 2 atau lebih tahap *buck converter* yang disusun secara seri (bertingkat). Prinsip kerjanya adalah menurunkan tegangan *input* secara bertahap melalui setiap tingkat konverter, sehingga menghasilkan tegangan *output* yang lebih rendah, stabil dan memiliki *ripple* yang lebih kecil dibandingkan dengan 1 tahap *buck converter* saja. Pada setiap tahap, komponen utama yang bekerja adalah saklar (MOSFET), diode, induktor dan kapasitor. Struktur dua tahap ini dirancang agar tiap *switch* dan komponen induktif/kapasitif bekerja dalam rentang tegangan dan arus yang lebih kecil sehingga tegangan stress dan kerugian *switching* dapat dikurangi.

2.2 Pengendali *Proportional-Integral* (PI)

Pada Gambar 2 kontrol PI bertujuan untuk menjaga agar nilai keluaran sistem, seperti tegangan *output,* tetap sesuai dengan nilai referensi yang diinginkan dengan cara meminimalkan *error*. Secara prinsip kontrol PI terdiri dari dua komponen utama, yaitu aksi proporsional (P) dan aksi integral (I).

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



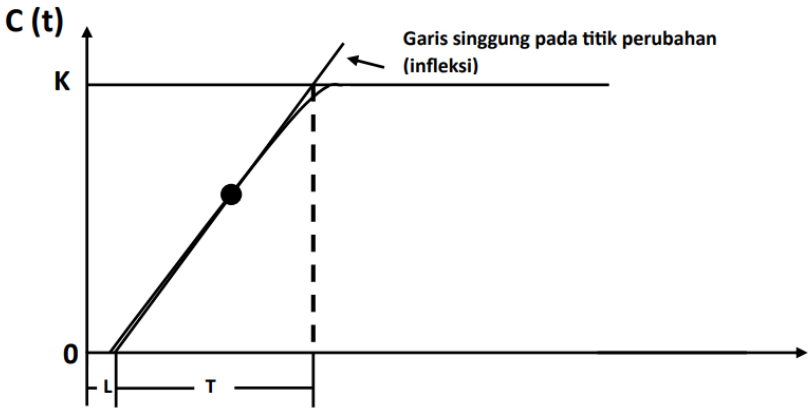
Gambar 2: Pengendali PI

Aksi proporsional bekerja dengan memberikan respon yang sebanding dengan error yang terjadi, sehingga mampu mempercepat respon sistem terhadap perubahan. Sementara itu, aksi integral berfungsi untuk mengakumulasi error terhadap waktu, sehingga dapat menghilangkan error steady state yang biasanya masih tersisa jika hanya menggunakan kontrol proporsional saja. Keluaran dari kontrol PI dapat dinyatakan sebagai:

$$u(t) = K_P\, e(t) + K_i \int e(t)dt \qquad (1)$$

Dimana $u(t)$ adalah sinyal kendali, $e(t)$ adalah *error* (selisih antara referensi dan *output*), K_p adalah konstanta proporsional dan K_i adalah konstanta integral. Nilai dari kedua parameter ini sangat berpengaruh terhadap performa sistem, sperti kecepatan respon, kestabilan dan overshoot.

2.3 Penalaan PI dengan Metode Ziegler-Nichols I



Gambar 3: Kurva Transien *Open Loop*

Gambar 3 merupakan salah satu metode penalaan kontroler yang digunakan untuk menentukan parameter kontroler berdasarkan karakteristik respons transien sistem *open loop*. Berdasarkan Gambar 3, respons sistem terhadap masukan berbentuk tangga menghasilkan kurva berbentuk **S (*sigmoid*)**. Pada kurva tersebut ditentukan titik perubahan kemiringan atau **titik infleksi**, kemudian dibuat garis singgung (*tangent line*) pada titik tersebut. Garis singgung digunakan untuk menentukan parameter **L** dan **T**, yaitu waktu tunda (*delay time*) dan konstanta waktu (*time constant*) yang diperoleh dari karakteristik respons sistem.

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Parameter **L** ditentukan sebagai waktu tunda antara pemberian masukan hingga garis singgung mulai memotong sumbu waktu, sedangkan **T** merupakan konstanta waktu yang diperoleh berdasarkan perpotongan garis singgung dengan garis nilai akhir respons sistem. Nilai **K** menunjukkan penguatan (*gain*) sistem yang diperoleh dari perbandingan perubahan keluaran terhadap perubahan masukan. Nilai **K**, **L**, dan **T** yang diperoleh dari kurva respons *open loop* selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter kontroler **PI**, yaitu Kp dan Ki, berdasarkan aturan penalaan Ziegler-Nichols I.

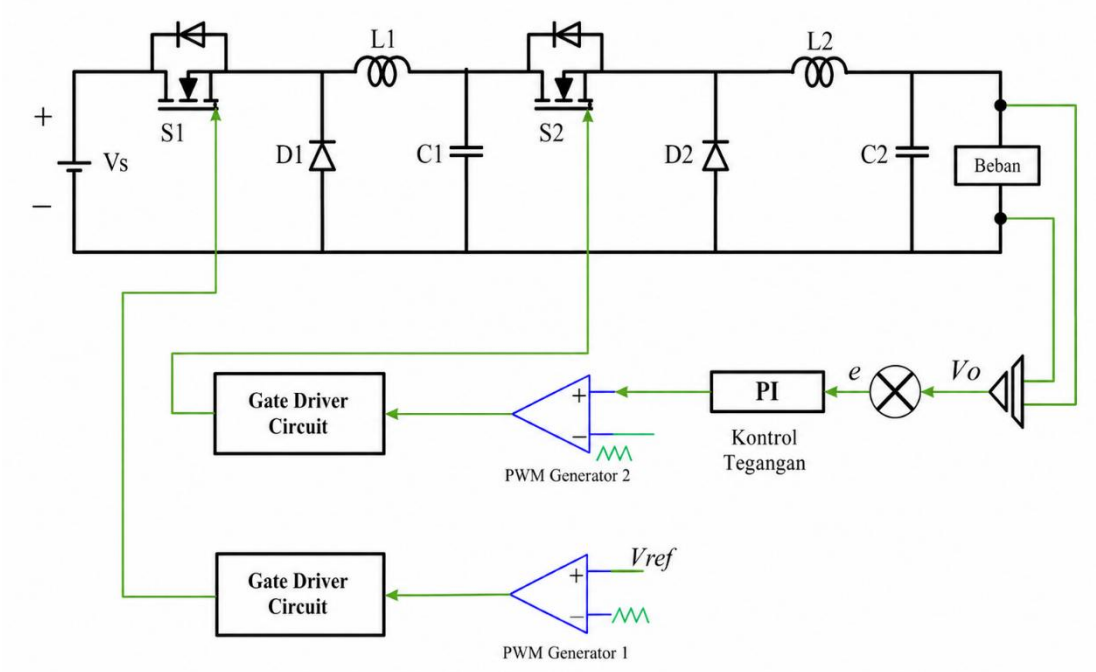
Dengan metode ini, parameter kontroler PI dapat ditentukan secara sistematis berdasarkan karakteristik dinamik sistem. Hasil penalaan kemudian digunakan untuk memperoleh respons sistem yang diharapkan memiliki **waktu respons yang cepat, error keadaan tunak yang kecil, dan kestabilan sistem yang baik**.

Tabel 1: Rumus Ziegler Nichols Tipe I

Pengendali	Kp	Ti	Ki
PI	$\frac{0.9\ x\ T}{L\ x\ Ks}$	$\frac{L}{0.3}$	$\frac{Kp}{Ti}$

Tabel 1 merupakan rumus untuk penentuan parameter kontrol (Kp, Ti, Ki) berdasarkan karakteristik respon sistem *open loop*.

2.4 Perancangan Konverter DC-DC *Cascade Buck*



Gambar 4: Blok Diagram Konverter DC-DC *Cascade Buck*

Gambar 4 menunjukkan rangkaian *cascade buck converter* yang terdiri dari dua tingkat (*stage*) *buck converter* yang disusun secara berurutan. Sumber tegangan DC (Vs) menjadi masukan utama sistem. Tahap pertama terdiri dari sakelar MOSFET S1, dioda D1, induktor L1, dan kapasitor C1 yang berfungsi menurunkan tegangan masukan menjadi tegangan antara (*intermediate voltage*). MOSFET S1 dikendalikan oleh PWM Generator 1 melalui *gate driver circuit* dengan *duty cycle* tetap sehingga menghasilkan tegangan keluaran tahap pertama. Tegangan keluaran dari tahap pertama selanjutnya menjadi masukan bagi tahap kedua yang terdiri dari MOSFET S2, dioda D2, induktor L2, dan

kapasitor C2. Pada tahap ini, MOSFET S2 dikendalikan menggunakan sinyal PWM dari PWM Generator 2 yang *duty cycle* nya diatur oleh pengendali Proportional-Integral (PI).

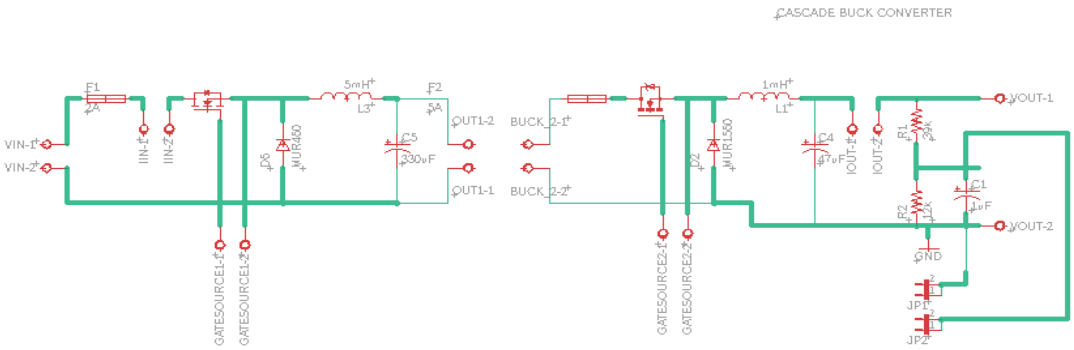
Sistem kontrol tegangan pada tahap kedua bekerja dengan mengukur tegangan keluaran (Vo) menggunakan sensor tegangan sebagai sinyal umpan balik (*feedback)*. Tegangan keluaran yang terukur dibandingkan dengan tegangan referensi (Vref) pada blok pembanding sehingga menghasilkan sinyal error (e). Sinyal error kemudian diproses oleh pengendali PI untuk menghasilkan sinyal kendali yang digunakan untuk mengatur *duty cycle* PWM Generator 2. Sinyal PWM tersebut diteruskan ke *gate driver circuit* sebelum diberikan ke gerbang MOSFET S2.

Dengan mekanisme tersebut, pengendali PI dapat menyesuaikan *duty cycle* secara otomatis ketika terjadi perubahan tegangan keluaran akibat perubahan kondisi operasi atau beban. Dengan demikian, tegangan keluaran *cascade buck converter* dapat dipertahankan mendekati nilai referensi yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, istilah *cascade* mengacu pada susunan dua tahap *buck converter* yang disusun secara berurutan, sedangkan sistem kontrol yang diterapkan merupakan kontrol tegangan *closed loop* menggunakan pengendali PI pada tahap kedua.

Tabel 2: Parameter Konverter DC-DC Cascade Buck Converter

Parameter	**Nilai**
Tegangan masukan (Vin)	30 V DC
Tegangan keluaran (Vout)	15 V DC
Setpoint tegangan	15V
Steady State Error	<5%
Rise time	<0,5 sekon
Frekuensi *switching* (Fs)	30k HZ

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



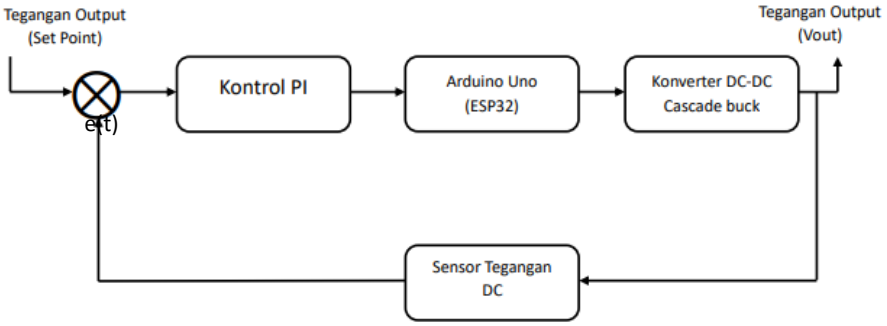
Gambar 5: Skematik Konverter DC-DC *Cascade Buck*

Gambar 5 merupakan perancangan skematik konverter Dc-DC *cascade buck* 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 *cascade buck*. Sistem ini bekerja dengan cara *close loop*, dimana tegangan *output* terus disesuaikan agar sesuai dengan nilai referensi yang diiginkan.

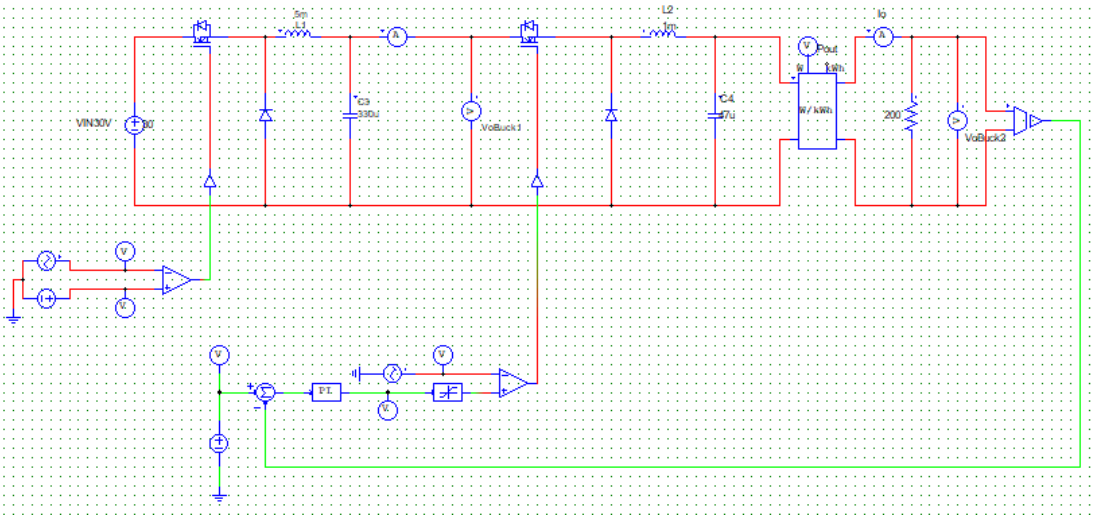
© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Gambar 6: Blok Diagram Kendali PI

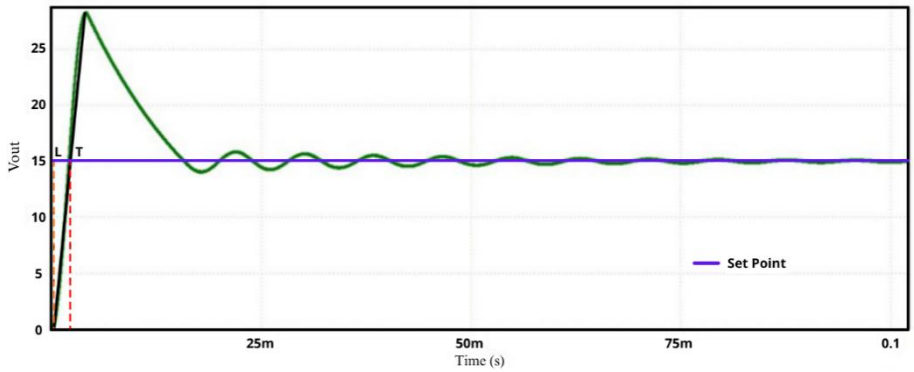
Gambar 6 menunjukkan pada sistem ini, *Buck Converter* 2 dikendalikan menggunakan metode *Proportional-Integral* (PI) dalam konfigurasi *closed loop*. Tegangan keluaran *Buck* 2 diukur menggunakan sensor tegangan DC dan digunakan sebagai sinyal umpan balik (*feedback*). Tegangan hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan nilai *set point* sebesar 15 VDC untuk menghasilkan nilai *error*. Nilai *error* tersebut diproses oleh kontrol PI untuk menghasilkan sinyal kendali yang selanjutnya diproses oleh ESP32 menjadi sinyal PWM. Sinyal PWM digunakan untuk mengatur *switching* pada Buck 2 sehingga tegangan keluarannya dapat dipertahankan pada nilai yang diinginkan, yaitu 15 VDC. Dengan sistem *closed-loop* ini, kontrol PI secara kontinu melakukan koreksi terhadap perubahan tegangan keluaran berdasarkan sinyal umpan balik dari sensor tegangan. Apabila hasil dari tuning Ziegler Nichlos Tipe I masih kurang sesuai dengan respon yang diinginkan bisa dilakukan *trial* dan *error* untuk mendapatkan parameter konstanta yang diinginkan. Proses perancangan kontrol PI dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PSIM.

Rangkaian skematik konverter *cascade buck* DC-DC merupakan representasi dari plant yang akan dirancang, sebagaimana Gambar 7. Simulasi dilakukan dalam kondisi *open loop* dengan pemberian sinyal *duty cycle* sebesar 70%. Nilai *duty cycle* ini diperoleh dari hasil perhitungan perancangan konverter DC-DC *cascade buck* yang akan direalisasikan.



Gambar 7: Konverter DC-DC Cascade Buck

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



Gambar 8: Respon *Open Loop*

Gambar 8 merupakan respon kurva dari sistem *open loop,* langkah selanjutnya adalah melakukan analisis kuva dengan menambahkan gars bantu pada kurva untuk menentukan waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T). Dimana besarnya nilai L adalah 0.000200969 detik dan nilai T sebesar 0.00024931 detik. Setelah didapatkan parameter PI, maka disimulasikan dalam kondisi *close loop* pada perangkat lunak PSIM.

Tabel 3. Rumus Mencari Kp, Ti dan Kp

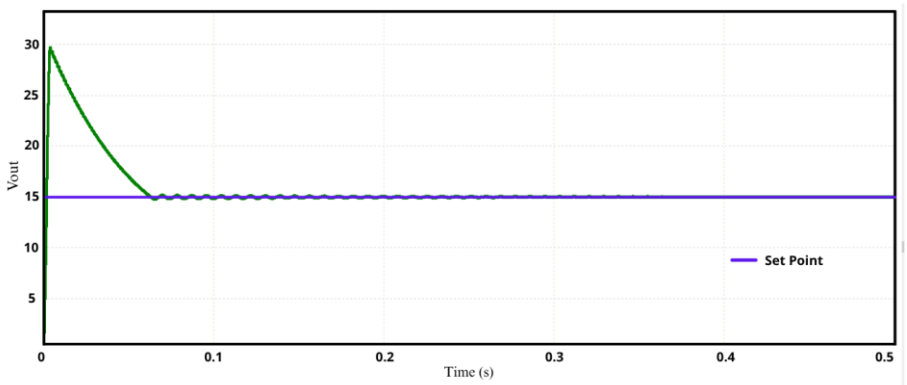
Pengendali	Kp	Ti	Ki
PI	$\frac{0.9T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	$\frac{Kp}{Ti}$

Dengan menggunakan rumus pada Tabel 3, maka di peroleh nilai Kp sebesar 0.0563, Ti sebesar 0.000669897, dan Ki sebsar 84. Setelah mendapatkan nilai Kp dan Ki maka akan dibuat simulasi kontrol PI *close loop* pada *software* PSIM.

3. Results and discussion

Pengujian dilakukan dengan beberapa tahap yaitu, dengan simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM dan melalui percobaan eksperimen. Pengujian simulasi dan eksperimen meliputi pengujian dengan skema set point tetap, set point berubah dan skema dengan perubahan beban.

3.1 Skema *Close Loop Set Point* Tetap *Software*

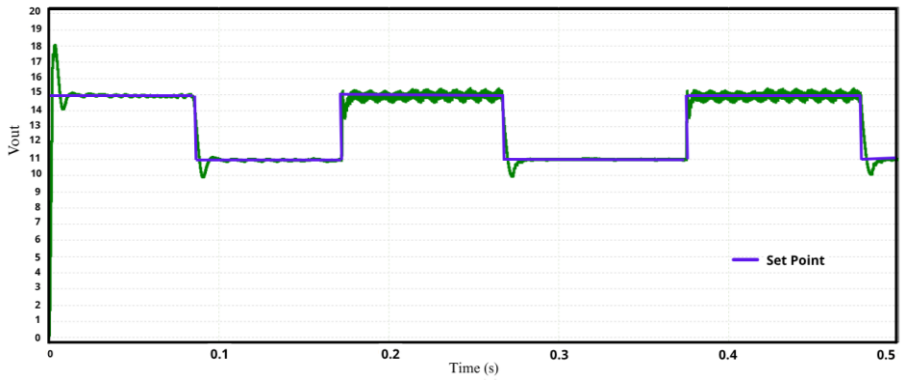


Gambar 9: Gelombang *Output Close Loop Set Point* Tetap *Software*

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Berdasarkan Gambar 9, hasil simulasi menunjukkan *output* naik cepat *overshoot* ke 30 V, lalu stabil di 15 V tanpa *error steady-state.* Masih ada *ripple* kecil disekitar *set point*, tapi secara keseluruhan sistem sudah baik dan responnya cepat.

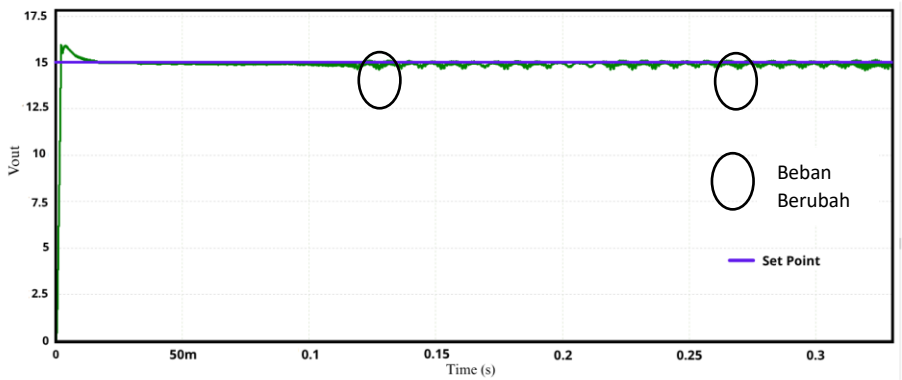
3.2 Skema *Close Loop Set Point* Berubah *Software*



Gambar 10: Gelombang *Output Close Loop Set Point* Berubah *Software*

Berdasarkan Gambar 10, hasil simulasi perubahan *set point* terlihat bahwa tegangan keluaran mampu mengikuti perubahan nilai set point secara otomatis. Pada kondisi awal, terjadi *overshoot* pada tegangan keluaran hingga sekitar 18 V sebelum mencapai kondisi *steady state*. Selanjutnya, ketika *set point* mengalami perubahan, tegangan keluaran me respons dengan cepat dan mengikuti nilai referensi yang diberikan. Pada setiap perubahan *set point*, terdapat *undershoot* dan osilasi transien, tetapi respons kemudian mereda dan kembali mendekati nilai set point. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kontroler PI mampu mengendalikan tegangan keluaran dan mempertahankan kestabilan sistem terhadap perubahan set point.

3.3 Skema *Close Loop* Beban Berubah *Software*



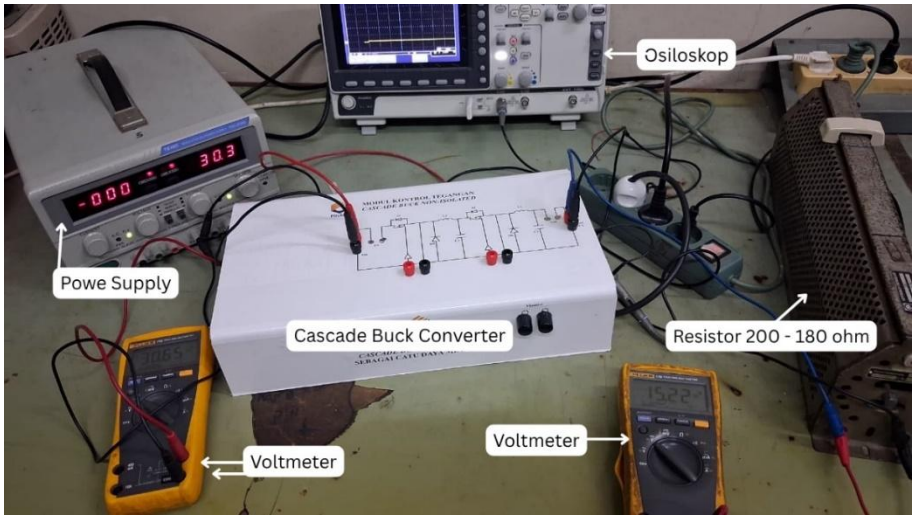
Gambar 11: Gelombang *Output Close Loop* Beban Berubah *Software*

Berdasarkan Gambar 11, perubahan beban dari **200 Ω menjadi 180 Ω** menyebabkan peningkatan arus beban, sehingga sistem mengalami perubahan kecil pada tegangan keluaran. Kontroler PI kemudian melakukan penyesuaian terhadap sinyal kendali PWM untuk mengkompensasi perubahan tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan keluaran tetap berada di sekitar **15 V,** sehingga dapat disimpulkan bahwa kontroler PI mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran terhadap perubahan beban.

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

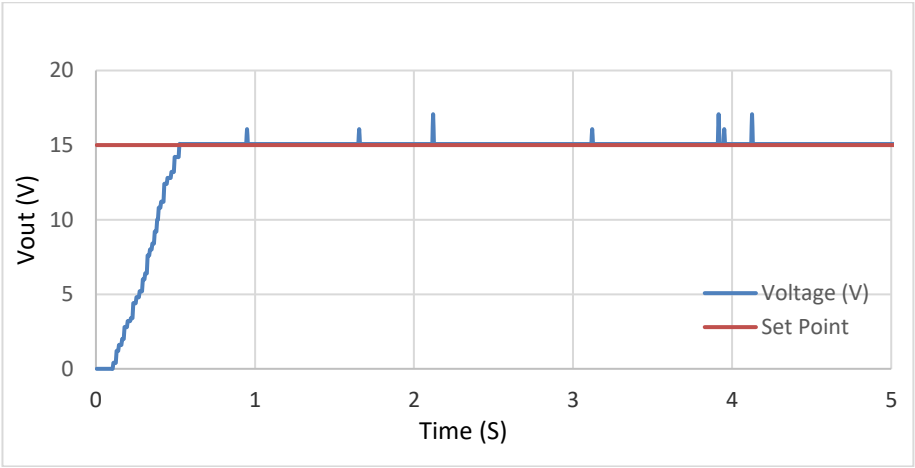
3.4 Skema *Open Loop Set Point* Tetap *Hardware*

Seluruh perangkat keras disusun sesuai dengan konfigurasi yang telah dirancang agar setiap komponen dapat bekerja dengan baik dan mempermudah proses pengambilan data selama pengujian.



Gambar 12: Realisasi Alat dan Pengujian Secara Eksperimen

Gambar 12 merupakan pengujian simulasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik *cascade buck converter* berdasarkan percobaan pada *software* dan *hardware.*

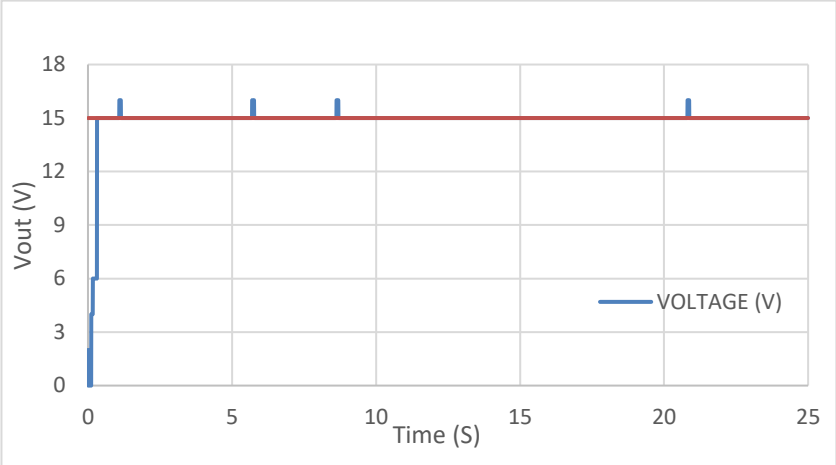


Gambar 13: Gelombang Output Open Loop Hardware

Berdasarkan Gambar 13, hasil pengujian *open loop* menunjukkan bahwa *cascade buck converter* berhasil menurunkan tegangan masukan menjadi 15V sesuai target. Tetapi respon sistem masih memperlihatkan *overshoot* dan riak tegangan, sehingga keluarannya belum stabil sepenuhnya. Kondisi ini merupakan karakteristik yang umum pada sistem open loop karena belum ada umpan balik untuk mengoreksi perubahan tegangan keluaran.

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

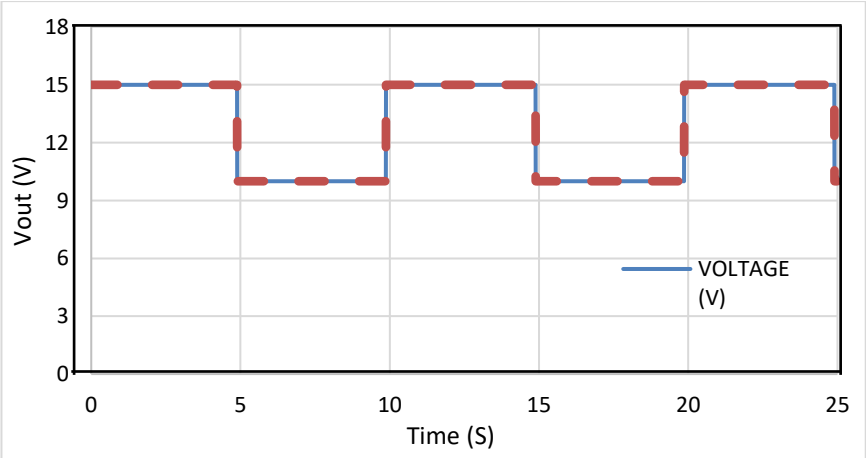
3.5 Skema *Close Loop Set Point* Tetap *Hardware*



Gambar 14: Gelombang *Output Close Loop Set Point* Tetap *Hardware*

Berdasarkan Gambar 14, nilai *set point* ditetapkan konstan sebesar 15 V selama pengujian dari 0 hingga 25 detik. Set point yang tetap digunakan sebagai nilai referensi bagi sistem kontrol untuk mempertahankan tegangan keluaran pada nilai yang diinginkan. Dari hasil pengujian terlihat bahwa tegangan keluaran mengalami kenaikan cepat dari kondisi awal hingga mencapai nilai set point 15 V. Setelah mencapai kondisi tunak (*steady-state*), dengan *rise time* 0,31 detik, tegangan keluaran mampu mengikuti set point dengan baik sehingga nilai rata-rata keluaran berada di sekitar 15 V. Meskipun demikian, pada beberapa waktu tertentu terlihat adanya lonjakan tegangan (*spike*) hingga sekitar 15,8–16 V. Lonjakan tersebut hanya terjadi sesaat dan tegangan segera kembali ke nilai set point 15 V. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol masih mampu mempertahankan kestabilan tegangan meskipun terdapat gangguan atau riak (*ripple*) kecil pada keluaran. Secara keseluruhan, karena set point tidak berubah selama pengujian dan tegangan keluaran tetap berada di sekitar 15 V, maka sistem dapat dikatakan memiliki kemampuan *tracking* yang baik terhadap referensi tetap dengan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) yang sangat kecil.

3.2 Skema Perubaan *Set Point*



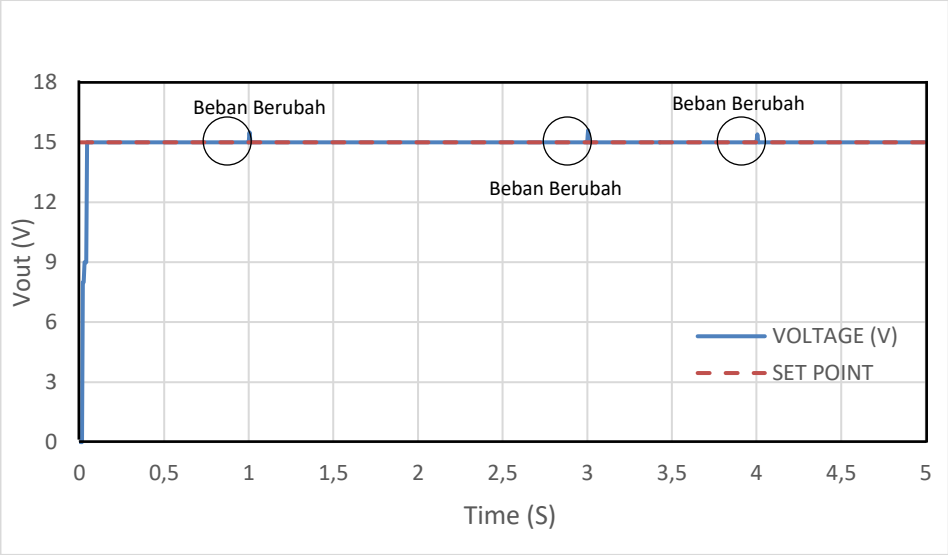
Gambar 15: Gelombang *Output Close Loop Set Point* Berubah *Hardware*

Berdasarkan Gambar 15, dari grafik dapat disimpulkan bahwa sistem pengendali memiliki ***tracking* yang sangat baik** terhadap perubahan set point. Tegangan keluaran

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

mampu mengikuti perubahan referensi dari **10 V ke 15 V maupun sebaliknya** dengan respon yang cepat, stabil, tanpa overshoot yang berarti, dan memiliki **steady-state error yang sangat kecil (mendekati nol).** Hal ini menunjukkan bahwa metode kontrol yang digunakan mampu menjaga tegangan keluaran tetap sesuai dengan nilai referensi meskipn terjadi perubahan set point secara berulang.

3.3 Skema dengan Perubahan Beban



Gambar 16: Gelombang *Output Close Loop* Beban Berubah *Hardware*

Berdasarkan Gambar 16, set point dijaga konstan pada **15 V,** sedangkan beban diubah pada beberapa waktu pengujian dari 200 Ω menjadi 180 Ω, yaitu sekitar **1 s, 3 s, dan 4 s**. Saat terjadi perubahan beban, tegangan keluaran (Vout) mengalami kenaikan sesaat (*overshoot*) hingga sekitar **15,3–15,5 V** sebelum kembali ke nilai referensi sebesar **15 V dengan *rise time* 0,025 detik**. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan beban memberikan pengaruh sementara terhadap tegangan keluaran. Meskipun terjadi gangguan akibat perubahan beban, sistem kendali mampu mengembalikan tegangan keluaran ke nilai set point dalam waktu yang singkat tanpa menimbulkan osilasi yang berkepanjangan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengendali memiliki kemampuan regulasi yang baik terhadap gangguan beban, sehingga tegangan keluaran tetap stabil.

Pada Tabel 4 merupakan hasil respon kontrol seperti, *Overshoot* yang terjadi relatif kecil, yaitu sekitar **3%** dari nilai referensi, sehingga masih berada dalam batas yang dapat diterima. Selain itu**, *steady-state error*** setelah sistem kembali stabil mendekati **0%,** yang menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan keluaran sesuai dengan set point meskipun terjadi perubahan beban. Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem kendali memiliki **respon yang cepat, stabil, dan mampu menolak gangguan akibat perubahan beban (*good disturbance rejection*).**

Tabel 4: Hasil Pengujian Perubahan Beban

Parameter	**Nilai**
Rise Time	0,025 detik
Error Steady State	0%
Overshoot	3%

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

4. Conclusion

Cascde buck converter DC-DC dengan tegangan masukan 30 VDC telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sehingga mampu menghasilkan tegangan keluaran sebesar 15 VDC sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan. **Metode kontrol PI** berhasil diimplementasikan menggunakan teknik ***Pulse Width Modulation* (PWM)** pada frekuensi **30 kHz.** Pengendali mampu mengatur *duty cycle* sehingga tegangan keluaran tetap berada pada nilai referensi sebesar **15 V**, baik pada kondisi awal, saat perubahan set point, maupun saat terjadi perubahan beban. Berdasarkan hasil analisis performa sistem, metode kontrol PI mampu mengatur tegangan keluaran *cascade buck converter* DC-DC menuju nilai referensi sebesar 15 V dengan rise time sebesar 0,31 detik, *overshoot* sebesar 3%, dan *steady state error* sebesar mendekati 0. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan keluaran mendekati nilai referensi pada kondisi tunak. Pada saat terjadi perubahan beban, pengendali PI mampu menyesuaikan *duty cycle* untuk menghasilkan tegangan keluaran menuju nilai referensi. Dengan demikian, metode kontrol PI mampu meningkatkan kemampuan regulasi teganga dan kestabilan sistem *cascade buck converter* DC-DC.

Acknowledgements

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas bantuan pendanaan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian dengan kelompok pembiayaan A2.

References

[1] S. M. Ilman and F. A. S. 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: https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i1.2023.47-56.

[2] R. Kunigar, A. R. A. 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: https://doi.org/10.24036/jtein.v4i1.414.

[3] N. Fuada and I. Husnaini, "Rancang bangun buck converter dengan kontrol PID berbasis mikrokontroler Arduino," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 781–791, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.513.

[4] N. V. Laksmi B., M. S. Mubarok, W. Aribowo, S. T. Umaroh, S. R. Ariyanto, I. Nurlita, and R. Rahmadian, "Solar charging controller using DC-DC buck converter with cascaded PI controller for a sustainable renewable energy system," *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, vol. 9, no. 1, pp. 119–127, 2025, doi: https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v9.i1/444.

[5] Y. Mulia, H. Purnata, and Supriyono, "Perancangan sistem penurun tegangan dengan menggunakan DC-DC buck converter," in *Proc. WINCO*, Cilacap, Indonesia, Sep. 2022. [Online]. Available: https://proceeding.winco.cilacapkab.go.id/index.php/winco

[6] A. F. Rifai, W. Purnomo, and E. P. Revirda, "Rancang bangun DC to DC buck converter dengan sistem kendali PI pada NI ELVIS II dan antarmuka berbasis LabVIEW," *Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 7, no. 2, Sep. 2021.

[7] P. T. Asmoro, D. W. A. Ningtias, and F. S. Hadisantoso, "Desain dan simulasi rangkaian DC to DC chopper tipe buck converter dengan pengendali PI," *RAMATEKNO*, vol. 4, no. 1, pp. 52–62, Apr. 2024, doi: https://doi.org/10.61713/jrt.v4i1.170.

[8] S. Kumaraguruparan and K. Elango, "Optimal control strategies for high-efficiency non-isolated DC-DC buck converters in IoT applications: A comparative study," *Heliyon*, vol. 10, no. 18, Art. no. e38119, Sep. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38119.

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[9] M. Jabari, D. Izci, S. Ekinci, M. Bajaj, and I. Zaitsev, "Performance analysis of DC-DC buck converter with innovative multi-stage PIDn(1+PD) controller using GEO algorithm," *Scientific Reports*, vol. 14, Art. no. 25612, Oct. 2024, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-024-77395-6.

[10] S. A. Zerlina, E. Purwanto, and I. Ferdiansyah, "Pengembangan kontroler PI pada SEPIC berbasis PSIM," *INOVTEK Seri Elektro*, vol. 2, no. 3, 2020, doi: https://doi.org/10.35314/ise.v2i3.1445.

[11] M. Saputra, S. Djulihenanto, and I. Fadlika, "Implementasi kendali tegangan lup tertutup buck converter dengan ArduinoMega," *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 8, no. 1, pp. 11–15, 2021, doi: https://doi.org/10.33795/elposys.v8i1.623.

[12] A. Mansouri, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, and S. Pierfederici, "Nonlinear cascaded control for a DC-DC boost converter," *Journal of Robotics and Control*, vol. 4, no. 4, pp. 521–536, 2023, doi: https://doi.org/10.18196/jrc.v4i4.18932.

[13] S. Chincholkar, M. Tariq, M. Poshtan, and M. Sharaf, "Normalized error-based PI controller and its application to the DC-DC buck converter," *Mathematics*, vol. 12, no. 2, Art. no. 240, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/math12020240.

[14] F. Farhan and B. Sujanarko, "Pengaruh frekuensi dan duty cycle pada ripple tegangan buck converter," *Dielektrika*, vol. 9, no. 1, pp. 51–61, Feb. 2022.

[15] M. R. Ansutia, Jamaluddin, and P. Putera, "Optimasi kinerja buck converter menggunakan proportional integral controller untuk regulasi tegangan stabil," *Rekayasa*, vol. 18, no. 3, pp. 466–482, Dec. 2025, doi: https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i3.31524.

[16] S. H. M. Al-attwani, M. Teke, E. Bektaş, E. S. Y. Yaseen, Y. Bektaş, and Z. Civelek, "The comparison study of PI and sliding mode control techniques for buck-boost converters," *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2024, doi: https://doi.org/10.28948/ngumuh.1459414.

[17] P. Warrier and P. Shah, "Optimal fractional PID controller for buck converter using cohort intelligent algorithm," *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 3, Art. no. 50, Aug. 2021, doi: https://doi.org/10.3390/asi4030050.

[18] A. S. Samosir, T. Sutikno, and L. Mardiyah, "Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 327–336, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i1.pp327-336.

[19] N. Prameswari, "Analysis and small-signal modeling of simplified cascade multiphase DC-DC buck converter," *JURNAL INFOTEL*, vol. 14, no. 4, pp. 338–344, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.20895/infotel.v14i4.814.

[20] N. Prameswari, A. B. Ganesen, F. K. Nuraziz, J. Furqani, A. Rizqiawan, and P. A. Dahono, "Simplified cascade multiphase DC-DC buck power converter for low voltage large current applications: Part II—output current controller," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 2273–2283, Dec. 2021, doi: https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2273-2283.

© The Author(s)
Published by Universitas Negeri Padang
This is an open-access article under the: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/