

DESAIN DAN SIMULASI RANGKAIAN DC TO DC CHOPPER TIPE BUCK CONVERTER DENGAN PENGENDALI PI

¹Purwandito Tulus Asmoro, ²Dieta Wahyu Asry Ningtias, ³Feri Siswoyo Hadisantoso

^{1,2,3}Teknologi Listrik, Politeknik Enjineri Indorama, Purwakarta, Indonesia

¹purwandito@pei.ac.id, ²dieta@pei.ac.id, ³feri.siswoyo.h@pei.ac.id

Coressponding author: purwandito@pei.ac.id

Abstrak

Dalam banyak aplikasi industri, diperlukan untuk mengubah sumber DC dengan tegangan tetap kedalam tegangan DC yang variabel, maupun sebaliknya. Chopper DC yang mengubah secara langsung dari DC ke DC disebut juga sebagai konverter dc-ke-dc (dc-to-dc converter). Seperti juga trafo, chopper dapat digunakan menurunkan (step-down) atau menaikkan (step-up) tegangan sumber DC. Sebuah sumber listrik DC atau generator DC pada dasarnya akan menyuplai energi listrik ke beban DC untuk penggunaan sehari-hari. Jika tegangan yang dihasilkan oleh generator atau sumber lebih besar dari pada beban, maka diperlukan konverter DC-DC agar tegangan dapat stabil dan mampu disuplai ke beban. Konverter buck digunakan untuk menurunkan nilai tegangan pada sumber listrik jika melebihi nilai tegangan setpoint. Sebuah MOSFET pada rangkaian konverter DC-DC ini switchingnya diatur oleh PWM (Pulse Width Modulation) yang dikontrol dengan kontroler berbasis PI (Proporsional Integral).

Kata kunci: DC Chopper, Converter DC-DC, PWM, PI

Abstract

In many industrial applications, it is necessary to convert a DC source with a fixed voltage to a variable DC voltage, or vice versa. DC choppers that convert directly from DC to DC are also called DC-to-DC converters. Like a transformer, a chopper can be used to reduce (step down) or increase (step up) the DC source voltage. A DC power source, or DC generator, will basically supply electrical energy to DC loads for daily use. If the voltage produced by the generator or source is greater than the load, a DC-DC converter is needed so that the voltage can be stable and able to be supplied to the load. A buck converter is used to reduce the voltage value on the power source if it exceeds the setpoint voltage value. A MOSFET in this DC-DC converter circuit switching is regulated by PWM (pulse width modulation), which is controlled by a PI (proportional integral)-based controller.

Keyword: DC choppers, DC-DC Converter, PWM, PI

Makalah dikirim 22 Februari 2024; Revisi 22 Maret 2024; Diterima 22 April 2024

*Desain dan Simulasi Rangkaian DC to DC Chopper Tipe Buck Converter dengan Pengendali PI,
Purwandito Tulus Asmoro, Dieta Wahyu Asry Ningtias, Feri Siswoyo Hadisantoso*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan masyarakat terkait penggunaan energi listrik semakin meningkat sejalan dengan perkembangan teknologi industri. Terdapat banyak peralatan atau beban yang memerlukan sumber tegangan dengan arus searah atau *direct current* (DC) sebagai sumber dayanya, seperti lampu DC, motor DC, peralatan elektronika, dan lain-lain. Penyaluran tegangan DC dari sumber menuju beban harus diperhatikan menyesuaikan dengan kebutuhan beban yang akan disuplai. Salah satu cara dalam pengaturan tegangan yaitu menggunakan DC *chopper* atau konverter DC. Konverter DC dapat mengubah nilai tegangan DC sumber menjadi tegangan DC dengan nilai yang dibutuhkan oleh beban [1].

Konverter DC memiliki banyak jenis antara lain *buck converter*, *boost converter*, *buck-boost converter*, dan *flyback*. *Buck converter* merupakan salah satu jenis konverter DC yang mampu menurunkan tegangan masukan ke beberapa level tegangan keluaran yang dipengaruhi oleh nilai *duty cycle* atau lebar pulsa. Ketika merancang sistem yang menggunakan *buck converter*, harus memperhatikan kestabilan tegangan. Apabila beban berubah secara tiba-tiba, maka *buck converter* tidak mampu secara cepat menyesuaikan keluaran tegangan [2]. Pada situasi tersebut dapat berdampak negatif seperti terjadinya *over voltage*, *under voltage*, hingga kerusakan komponen. Berdasarkan hal tersebut, maka dibutuhkan kontrol agar tegangan dapat turun menyesuaikan dengan kebutuhan beban.

Penelitian ini melakukan pengaturan *switching* oleh *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dikontrol dengan kontroler berbasis *Proporsional Integral* (PI) pada MOSFET di rangkaian konverter DC jenis *buck converter*. Penelitian menggunakan PI dengan tujuan menghasilkan tegangan keluaran sesuai dengan set yang diinginkan, performa yang lebih baik, serta menaikkan nilai efisiensi.

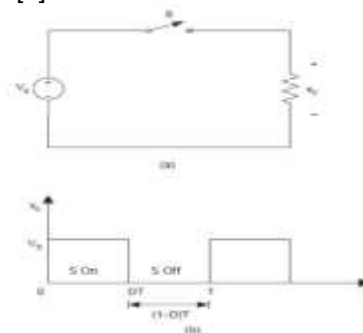
2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian berkaitan dengan landasan dasar DC *chopper* tipe *buck converter*, langkah penelitian, dan konfigurasi yang digunakan.

2.1. DC Chopper

Chopper (pemangkas) merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk mengubah sumber masukan tegangan DC tetap menjadi sumber keluaran tegangan DC yang dapat dikendalikan atau diatur. Komponen semikonduktor daya yang digunakan dapat berupa SCR, transistor, dan MOSFET yang beroperasi sebagai sakelar dan pengatur. Ditinjau dari proses pengaturan menurut fungsinya, *chopper* dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu : *chopper* penurun tegangan (*step-down*), *chopper* penaik tegangan (*step-up*), dan *chopper* penaik-penurun tegangan (*step-up/step-down*)[3].

Jika sakelar S di-on-kan sampai dengan DT, maka tegangan masukan V_s akan dipindahkan ke beban menjadi V_o , selanjutnya jika sakelar S di-off-kan sampai dengan T, tegangan pada beban menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tegangan keluaran ditentukan oleh proses on dan off sakelar S. Rasio antara waktu sakelar off terhadap jumlah waktu sakelar on dan off disebut siklus kerja (*duty cycle*). Gambar 1 merupakan prinsip dasar kerja *chopper* penurun tegangan [1].



Gambar 1. Rangkaian Prinsip Kerja Dasar Chopper

Nilai siklus kerja (α atau D) ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\alpha = D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} = f \cdot T_{on} \quad (1)$$

Keterangan:

α = Siklus kerja (%)

T = Periode (s)

T_{on} = Periode ketika *on* (s)

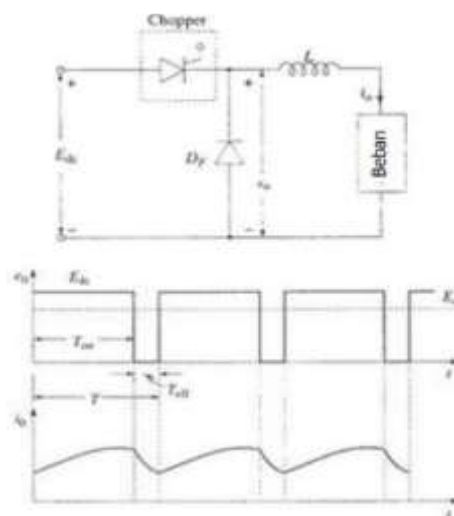
T_{off} = Periode ketika *off* (s)

f = Frekuensi (Hz)

Persamaan 1 di atas dapat dijelaskan bahwa pengaturan siklus kerja dapat dilakukan melalui dua operasi, yaitu:

- operasi frekuensi konstan
- operasi frekuensi variabel

Operasi frekuensi konstan dilakukan dengan cara menjaga frekuensi selalu konstan dan T_{on} diatur. Pengaturan T_{on} ini lazim disebut pengaturan lebar pulsa atau modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation*). Operasi frekuensi variabel dilakukan dengan mengatur frekuensi, pengaturan ini biasanya disebut modulasi frekuensi (*frequency modulation*). Gambar 2 mengilustrasikan prinsip kerja *chopper* penurun tegangan yang ditunjukkan dengan SCR di dalam kotak. Selama periode T_{on} atau ketika *chopper* ON, tegangan sumber akan terhubung dengan terminal beban [4],[5],[6].



Gambar 2. Rangkaian Chopper Penurun Tegangan

Selanjutnya, selama periode T_{off} atau ketika *chopper* OFF, arus beban akan mengalir pada dioda komutasi (D_f), sehingga terminal beban terhubung singkat dengan D_f dan tegangan beban menjadi nol selama T_{off} . Dengan demikian, tegangan searah (DC) pada beban dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$E_o = E_{dc} \cdot \alpha \quad (2)$$

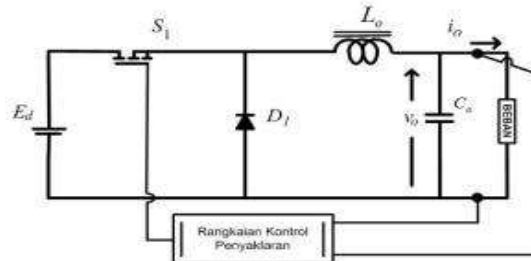
Keterangan:

α = Siklus kerja (%)

E_o = Tegangan *output* (Volt)

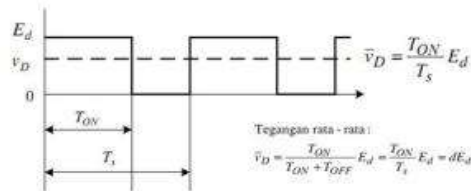
E_{dc} = Tegangan *input* (Volt)

Konverter jenis *buck* merupakan konverter penurun tegangan yang mengkonversikan tegangan masukan DC menjadi tegangan DC lainnya yang lebih rendah [7],[8],[9]. Seperti terlihat pada Gambar 3, rangkaian ini terdiri atas satu saklar aktif (MOSFET), satu saklar pasif (diode), kapasitor dan induktor sebagai tapis keluarannya.

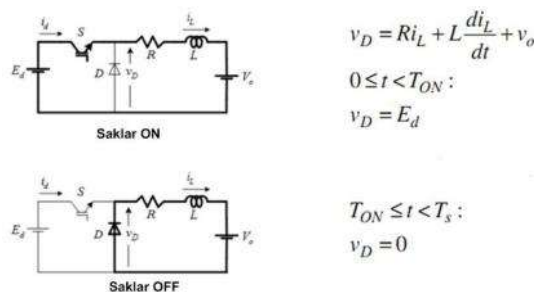


Gambar 3. Rangkaian konverter DC-DC tipe buck

Untuk tegangan kerja yang rendah, saklar pasif (dioda) sering diganti dengan saklar aktif (MOSFET) sehingga susut daya pada saklar bisa dikurangi [10],[11],[12]. Nilai rata-rata tegangan keluaran konverter sebanding dengan rasio antara waktu penutupan saklar (saklar konduksi atau ON) terhadap periode penyaklarannya (Gambar 4 dan 5).

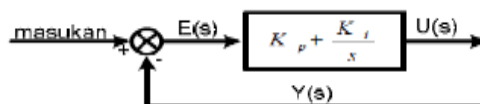


Gambar 4. Tegangan rata-rata buck converter



Gambar 5. Persamaan tegangan buck converter

Kontroler PI merupakan salah satu jenis pengatur yang banyak digunakan pada kontrol loop tertutup. Selain itu sistem ini mudah digabungkan dengan metoda pengaturan yang lain seperti Fuzzy dan Robust, sehingga akan menjadi suatu sistem pengatur yang semakin baik [13],[14],[15]. Diagram blok kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Blok Diagram Kontroler PI

Gabungan aksi kontrol proporsional dan aksi kontrol integral membentuk aksi kontrol proporsional plus integral (kontroler PI). Gabungan aksi ini mempunyai keunggulan dibandingkan dengan masing-masing penyusunnya. Keunggulan utamanya adalah diperolehnya keuntungan dari masing-masing aksi kontrol dan kekurangan aksi kontrol yang satu dapat diatasi. Dengan kata lain elemen-elemen controller P dan I secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat

reaksi sebuah sistem dan menghilangkan offset. Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PI dapat dirumuskan sebagai persamaan di bawah ini:

$$C_o(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3)$$

Di mana:

$C_o(t)$ = sinyal keluaran kontroler PI

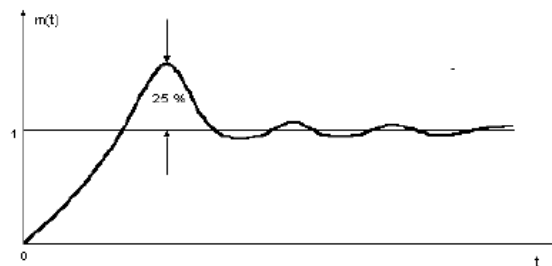
K_p = konstanta proporsional

T_i = waktu integral

$e(t)$ = sinyal kesalahan = referensi – keluaran plant

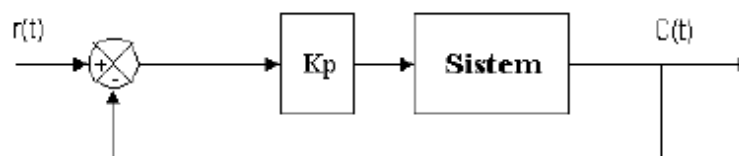
Penalaan parameter PI maupun PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (Plant). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu plant, perilaku plant tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter kontroler itu dilakukan. Karena penyusunan model matematik plant tidak mudah, maka dikembangkan suatu metode eksperimental. Metode ini didasarkan pada reaksi plant yang dikenai suatu perubahan. Dengan menggunakan metode itu model matematik perilaku plant tidak diperlukan lagi, karena dengan menggunakan data yang berupa kurva keluaran, penalaan PI atau PID telah dapat dilakukan. Penalaan bertujuan untuk mendapatkan kinerja sistem sesuai spesifikasi perancangan.

Ziegler-Nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942. Metode ini memiliki dua cara, metode osilasi dan kurva reaksi. Kedua metode ditujukan untuk menghasilkan respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25%. Gambar 7 memperlihatkan kurva dengan lonjakan 25%.



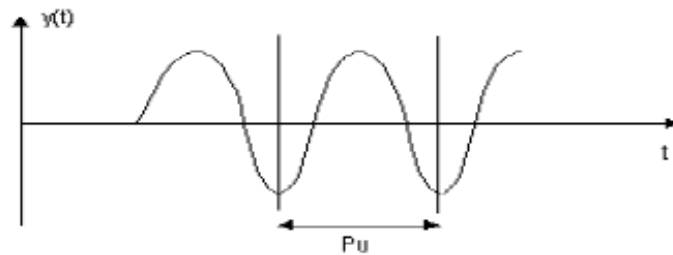
Gambar 7. Kurva respons tangga satuan yang memperlihatkan 25 % lonjakan maksimum

Metode ini didasarkan pada reaksi sistem untai tertutup. Plant disusun serial dengan controller PI atau PID. Semula parameter parameter integrator disetel tak berhingga dan parameter diferensial disetel nol ($T_i = \infty$; $T_d = 0$). Parameter proporsional kemudian dinaikkan bertahap. Mulai dari nol sampai mencapai harga yang mengakibatkan reaksi sistem berosilasi. Reaksi sistem harus berosilasi dengan magnitud tetap (*Sustain oscillation*). Gambar 8 menunjukkan rangkaian untai tertutup pada cara osilasi.



Gambar 8. Sistem untai tertutup dengan alat kontrol proporsional

Nilai penguatan proportional pada saat sistem mencapai kondisi *sustain oscillation* disebut *ultimate gain* K_u . Periode dari *sustained oscillation* disebut *ultimate period* T_u . Gambar 9 menggambarkan kurva reaksi untai tertutup ketika berosilasi.



Gambar 9. Kurva respon sustain oscillation

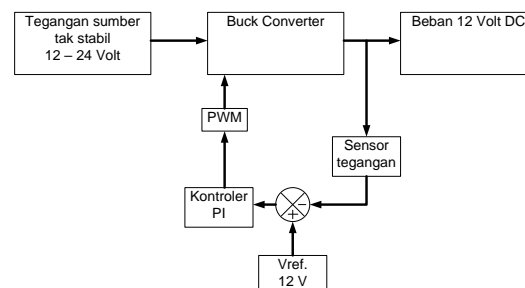
Penalaan parameter PID didasarkan terhadap kedua konstanta hasil eksperimen, K_u dan P_u . Ziegler dan Nichols menyarankan penyetelan nilai parameter K_p , T_i , dan T_d berdasarkan rumus yang diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penalaan parameter PID dengan metode osilasi

Type Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$		
PI	$0.45 K_u$	$\frac{1}{2} P_u$	
PID	$0.6 K_u$	$0.5 P_u$	$0.125 P_u$

2.2. Konfigurasi dan Langkah Penelitian

Gambar 10 adalah skema dari rangkaian Buck converter di mana tegangan sumber berada dalam keadaan tidak stabil dengan dengan maksimum adalah 24 Volt DC, dan tegangan minimum berada pada 12 Volt DC. Sedangkan rating tegangan pada beban adalah 12 Volt DC, jika mendapatkan tegangan yang melebihi rating beban, maka akan menyebabkan kerusakan pada beban, maka dibutuhkan Buck Converter sebagai regulator tegangan yang berfungsi menstabilkan tegangan Output menjadi 12 Volt DC. Prinsip kerja dari rangkaian Buck Converter tersebut antara lain dengan adanya untaian balik (Feedback) berupa sensor tegangan yang akan mendeteksi tegangan keluaran dari Buck Converter, yang kemudian akan dibandingkan dengan tegangan referensi yang diinginkan, yaitu 12 Volt DC. Hasil dari perbandingan tersebut adalah sinyal error yang kemudian responnya akan dikuatkan oleh kontroler PI (Proporsional Integral), sinyal keluaran dari kontroler PI tersebut akan masuk ke rangkaian PWM yang selanjutnya rangkaian PWM akan memanipulasi transistor Mosfet pada rangkaian Buck Converter untuk Switching, guna menjaga tegangan keluaran Buck Converter tetap stabil di level 12 Volt DC.



Gambar 10. Skema rangkaian Buck Converter pengendali PI

Tahapan dalam mendesain Buck Converter antara lain:

- Menentukan Duty Cycle
- Menentukan nilai induktor
- Menentukan nilai kapasitor
- Menentukan nilai resistor

Data-data yang diberikan untuk rangkaian Buck converter:

- Tegangan masukan: $V_{in} = 24$ Volt DC (Pada nilai maksimum)
- Tegangan keluaran: $V_{out} = 12$ Volt DC
- Arus keluaran: $I_{out} = 2$ Ampere
- Daya beban: $P_{Out} = 12 \cdot 2 = 24$ watt
- Frekuensi Switching: $f = 40$ kHz
- Ripple arus yang diinginkan: $r_I = 10\%$
- Ripple tegangan yang diinginkan: $r_V = 2\%$

a.) **Tahap 1**, menentukan Duty Cycle: Cara menentukan Duty Cycle dengan persamaan:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{12V}{24V} = 0.5 \quad (4)$$

b.) **Tahap 2**, menentukan nilai induktor: Cara menentukan nilai induktor dengan mencari nilai delta I_L terlebih dahulu:

$$\Delta I_L = r_I \cdot I_{out} = 10\% \cdot 2 = 0.2 A$$

Kemudian menentukan nilai induktor dengan persamaan:

$$L = \frac{1}{f} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{1}{\Delta I_L} \quad (5)$$

$$L = \frac{1}{40000} \cdot (24 - 12) \cdot \frac{12}{24} \cdot \frac{1}{0.2} = 0.75 mH$$

c.) **Tahap 3**, menentukan nilai kapasitor: Cara menentukan nilai kapasitor dengan mencari nilai delta V_{out} terlebih dahulu

$$\Delta V_{out} = r_V \cdot V_{out} = 2\% \cdot 12 = 0.24 \text{ Volt}$$

Kemudian menentukan nilai kapasitor dengan persamaan:

$$C = \frac{V_{out} \cdot (1-D)}{8 \cdot L \cdot \Delta V_{out} \cdot f^2} \quad (6)$$

$$C = \frac{12 \cdot (1-0.5)}{8 \cdot (0.00075) \cdot (0.24) \cdot (40000)^2} = 2.6 \mu F$$

d.) **Tahap 4**, menentukan nilai resistor dengan persamaan:

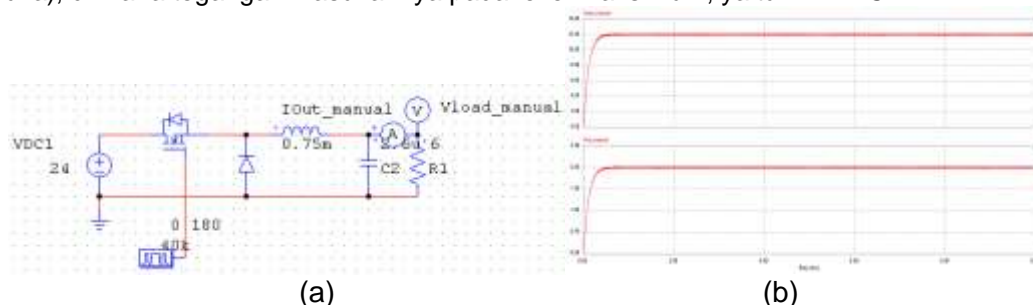
$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (7)$$

$$R = \frac{12}{2} = 6 \text{ Ohm}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

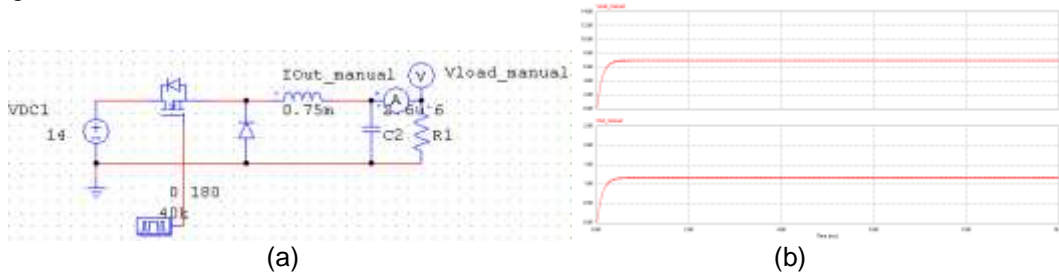
3.1. Rangkaian Buck Converter Tanpa Pengontrolan

Gambar 11 di bawah ini adalah rancangan Buck Converter tanpa pengontrolan (Loop terbuka), di mana tegangan masukannya pada level maksimum, yaitu 24 V DC.



Gambar 11. (a) Simulasi Buck Converter tanpa pengontrolan. (b) Grafik hasil simulasi

Gambar 12 menunjukkan hasil simulasi menggunakan Software Psim, di mana tegangan keluaran (V_{Out}) sebesar 12 Volt DC dengan arus keluaran (I_{Out}) sebesar 2 A, sesuai dengan yang diinginkan.

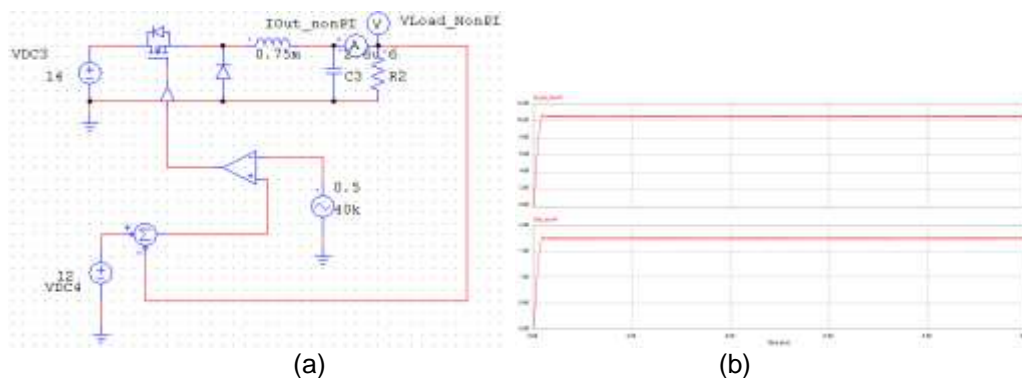


Gambar 12. (a) Simulasi Buck Converter tanpa pengontrolan ($V_s = 14$ Volt DC). (b) Grafik hasil simulasi.

Pada saat tegangan masukan pada level 14 Volt DC, tegangan keluarannya menjadi tidak stabil, yang ditunjukkan oleh grafik hasil simulasi di mana tegangan keluaran berada pada level 6.9 Volt dan arus keluarannya sebesar 1.16 A, tidak sesuai dengan yang diinginkan. Sehingga rangkaian Buck Converter dengan Loop terbuka (tanpa pengontrolan), tidak cocok sebagai penstabil tegangan, jika tegangan input mendekati tegangan referensinya (12 Volt).

3.2. Rangkaian Buck Converter Dengan Pengontrolan Tanpa PI

Gambar 13 adalah rangkaian Buck Converter yang sudah dilengkapi dengan sistem control dengan untai balik (Feedback) tanpa PI. Terlihat dari grafik hasil simulasi bahwa tegangan keluaran belum mencapai target, yaitu pada level tegangan 10 Volt dengan arus keluaran sebesar 1.7 A.



Gambar 13. (a) Simulasi Buck Converter dengan pengontrolan tanpa PI. (b) Grafik hasil simulasi

3.3. Rangkaian Buck Converter Dengan Pengontrolan PI

Gambar 14 merupakan rangkaian Buck Converter yang sudah dilengkapi dengan sistem kontrol PI. Dari grafik hasil simulasi terlihat jelas bahwa dengan tegangan masukan sebesar 14 Volt, diperoleh tegangan keluaran sebesar 12 Volt, dengan arus keluaran sebesar 2 A, hal ini sesuai dengan target.

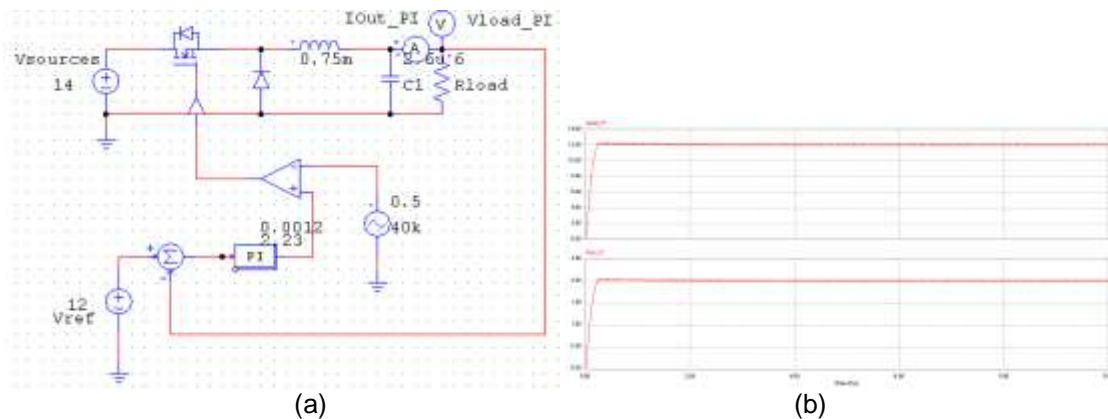
Sinyal respon tegangan keluaran rangkaian Buck Converter dengan pengontrolan PI, didapatkan respon dinamis sebagai berikut:

OverShoot (OS) = 0 %

Rise time (t_r) = 0.18 mS

Peak time (t_p) = 0.23 mS

Settling time (t_s) = 0.31 mS



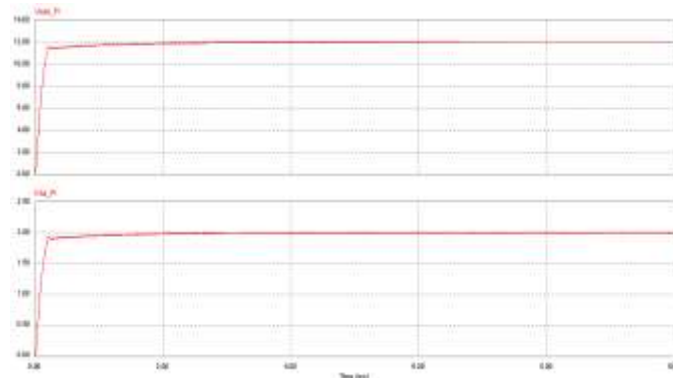
Gambar 14. (a) Simulasi Buck Converter dengan pengontrolan PI. (b) Grafik hasil simulasi

Pada rangkaian Buck Converter dengan pengontrolan PI, diketahui dengan nilai K_{pu} sebesar 2.23 dan nilai T_u sebesar 0.0012, maka nilai osilasi dari puncak ke puncak dapat diketahui. Sehingga dengan menggunakan metode Ziegler Nicholz, maka dapat ditentukan nilai K_p dan nilai T_i sebagai berikut:

$$K_p = 0.45 \times K_{pu} = 0.45 \times 2.23 = 1$$

$$T_i = \frac{T_u}{1.2} = \frac{0.0012}{1.2} = 0.001$$

Maka dengan penyesuaian parameter kontroler PI dengan nilai $K_p = 1$, dan nilai $T_i = 0.001$, maka setelah disimulasikan, menghasilkan grafik tegangan dan arus keluaran sebagai yang ditunjukkan pada Gambar 15 berikut.



Gambar 15. Grafik tegangan dan arus keluaran.

Gambar 15 Grafik hasil simulasi Buck Converter pengendali PI ($K_p = 1$, dan nilai $T_i = 0.001$). Dengan respon dinamis sebagai berikut:

$$\text{OverShoot (OS)} = 0 \%$$

$$\text{Rise time (tr)} = 0.18 \text{ mS}$$

$$\text{Peak time (tp)} = 2.8 \text{ mS}$$

$$\text{Settling time (ts)} = 3.3 \text{ mS}$$

Dilihat dari grafik hasil tegangan dan arus keluaran, terlihat bahwa rangkaian Buck Converter pengontrolan PI dengan nilai $K_p = 2.23$ dan $T_i = 0.0012$ (tanpa metode Ziegler Nichols) didapatkan hasil tegangan dan arus keluaran lebih baik, dari pada nilai $K_p = 1$ dan $T_i = 0.001$ (dengan metode Ziegler Nichols).

3.4. Data Hasil Simulasi

Dari hasil yang disajikan, maka didapatkan data-data perbandingan sebagai yang ditunjukkan pada Tabel 1 – 4 berikut.

Tabel 1. Hasil pengujian dengan simulasi rangkaian Buck Converter tanpa pengontrolan

No.	V _{in} (Volt)	V _{Out} (Volt)	I _{Out} (Ampere)
1.	24	12	2
2.	21	10.2	1.7
3.	18	8.9	1.4
4.	15	7.4	1.2
5.	12	5.9	0.9

Tabel 2. Hasil pengujian dengan simulasi rangkaian Buck Converter dengan pengontrolan tanpa PI

No.	V _{in} (Volt)	V _{Out} (Volt)	I _{Out} (Ampere)
1.	24	11.1	1.8
2.	21	11.0	1.8
3.	18	10.8	1.8
4.	15	10.5	1.7
5.	12	10.2	1.7

Tabel 3. Hasil pengujian dengan simulasi rangkaian Buck Converter dengan pengontrolan PI ($K_p = 2.23$ dan $T_i = 0.0012$).

No.	V _{in} (Volt)	V _{Out} (Volt)	I _{Out} (Ampere)
1.	24	12	2
2.	21	12	2
3.	18	12	2
4.	15	12.1	2
5.	12	12	2

Setelah dilakukan simulasi, maka berikut ini adalah data hasil secara lengkap dari rangkaian Buck Converter dengan pengendali PI, di mana nilai $K_p = 2.23$ dan nilai $T_i = 0.0012$ (Tabel 4).

Tabel 4. Hasil lengkap dari rangkaian buck converter.

No.	Duty Cycle (%)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{Out} (V)	I _{Out} (A)	P _{in} (W)	P _{Out} (W)	η (%)
1.	50	24	1.94	11.91	1.91	46.56	22.74	48.8
2.	50	23	1.99	11.89	1.98	45.77	23.54	51.4
3.	50	22	2	11.9	1.99	44	22.61	51.3
4.	50	21	1.99	11.91	1.98	41.79	23.58	56.4
5.	50	20	1.5	11.9	1.99	30	23.68	78.9
6.	50	19	1.5	11.9	1.9	28.5	22.61	79.3
7.	50	18	2	12	2	36	24	66.6
8.	50	17	2	11.9	1.99	34	22.61	66.5
9.	50	16	2	11.9	1.99	32	22.61	70.6
10.	50	15	1.97	11.9	1.98	29.55	23.56	79.7
11.	50	14	2	11.9	1.99	28	22.61	80.7
12.	50	13	1.99	11.9	1.99	25.87	22.61	87.3
13.	50	12	1.99	11.9	1.99	23.88	22.61	94.6

4.KESIMPULAN

Setelah dilakukan percobaan melalui simulasi, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi, didapatkan kesimpulan bahwa rangkaian Buck Converter menggunakan pengendali PI menghasilkan tegangan keluaran yang lebih baik dan sesuai keinginan, dibanding rangkaian Buck Converter tanpa kontroler, dan dengan kontroler tanpa PI.

2. Dari hasil percobaan melalui simulasi, diketahui bahwa untuk rangkaian Buck Converter dengan pengendali PI, dengan nilai parameter $K_p = 2.23$ dan $T_i = 0.0012$ yang didapat melalui mekanisme *Trial and Error* menghasilkan unjuk kerja rangkaian yang lebih baik, dari pada nilai parameter $K_p = 1$ dan $T_i = 0.001$ yang didapat dengan metode Ziegler Nichols.
3. Dari data hasil simulasi rangkaian Buck Converter dengan pengendali PI dengan parameter $K_p = 2.23$ dan $T_i = 0.0012$ dapat diketahui bahwa ketika tegangan masukannya turun dari level 16 Volt ke level 12 Volt, efisiensinya perlahan naik dari 70.6 % sampai 94.6 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Rashid, M. F. Rahman, D. Patterson, A. Cheok, and R. Betz, *Motor Drives*. 2023. doi: 10.1016/B978-0-323-99216-9.00042-1.
- [2] M. Ali, "Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik," *UNY Pers*, pp. 1–149, 2018.
- [3] "0212039.pdf."
- [4] I. W. Djatmiko, "Bahan Ajar ELEKTRONIKA DAYA," *Univ. Negeri Yogyakarta*, pp. 1–82, 2010.
- [5] M. Arief Juarsah, M. Facta, and A. Nugroho, "Perancangan DC Chopper tipe Buck-Boost Converter Penguatan Umpan Balik IC TL 494," *Transient (Jurnal Ilm. Tek. Elektro)*, vol. 4, no. 3, pp. 597–603, 2015.
- [6] S. Riyadi, *Konverter Statis : Chopper dan PWM Rectifier serta Aplikasinya*. 2018.
- [7] F. W. Azhari and A. Aswardi, "Sistem Pengendalian Motor DC Menggunakan Buck Konverter Berbasis Mikrokontroler ATmega 328," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 1, p. 352, 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i1.108020.
- [8] D. Dane, S. Sutedjo, and O. A. Qudsi, "Desain Buck Converter untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan Kontrol PI," *PoliGrid*, vol. 2, no. 2, p. 52, 2021, doi: 10.46964/poligrd.v2i2.774.
- [9] L. W. Cahyadi, T. Andromeda, and M. Facta, "Kinerja Konverter Arus Searah Tipe Buck Converter Dengan Umpan Balik Tegangan Berbasis TL494," *Transient*, vol. 6, p. 7, 2017.
- [10] A. Aslih, S. Abu, D. Pembimbing, D. Teknik, E. Otomasi, and F. Vokasi, "Implementasi Maximum Power Point Tracking Menggunakan Modified," 2018.
- [11] A. S. S. A. Warsito, and A. Syakur, "Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Dc Untuk Proses Powder Coating Secara Elektrostatik," *Transient*, pp. 1–7, 2010.
- [12] S. T. Aprilyani, I. Irianto, and E. Sunarno, "Desain dan Komparasi Kontrol Kecepatan Motor DC," *J. Ecotipe (Electronic, Control. Telecommun. Information, Power Eng.)*, vol. 7, no. 2, pp. 127–134, 2020, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v7i2.1886.
- [13] A. Senen, T. Ratnasari, and Y. Simamora, "Perancangan Simulasi PID Controller Menggunakan Graphic User Interface dan Simulink," *Kilat*, vol. 9, no. 2, pp. 181–191, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.33322/kilat.v9i2.1015>
- [14] Wahdaniah, "Pemakaian Bahasa Dalam Jurnal Teknologi Politeknik Negeri Lhokseumawe," *Wahdaniah*, vol. III, pp. 25–53, 2015.
- [15] P. Sistem, "Pada Inline Mixer Menggunakan Fuzzy," 2018.