

Rancang Bangun Kendali Fuzzy Logic untuk Tegangan Keluaran Buck Converter

Ahmad Sabdi^{1*} dan Krismadinata¹

¹Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Eleaktro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jl.Prof. Dr hamka, Kampus UNP Air Tawar Padang Indonesia

*e-mail: sabdiahmad@gmail.com

(Diajukan: 25 Juli 2023, direvisi: 07 Agustus 2023, disetujui: 17 Agustus 2023, dipublikasikan: 19 Agustus 2023)

Abstrak

Buck converter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang sangat berguna dalam mengubah tegangan DC tinggi menjadi tegangan DC yang lebih rendah. Hal ini menjadi kritis dalam sistem elektronika modern yang memerlukan tegangan yang lebih rendah untuk berbagai komponen seperti mikrokontroler, sensor, dan perangkat lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali tegangan keluaran pada buck converter dengan menggunakan metode *fuzzy logic* dan GUI MATLAB. Dengan adanya penggunaan metode *fuzzy logic*, *buck converter* dapat beradaptasi dengan baik terhadap perubahan beban dan fluktuasi sumber tegangan masukan, sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang lebih responsif dan stabil. Kemudian, dengan kehadiran GUI MATLAB, hal ini akan mempermudah pengguna dalam melakukan pengontrolan sistem atau aplikasi dengan cara yang lebih efisien dan mengontrol tegangan keluaran *buck converter* sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang beragam.

Kata kunci : Buck converter, fuzzy logic, GUI MATLAB.

Abstract

The buck converter is one type of DC-DC converter that is highly useful in transforming high DC voltage into lower DC voltage. This is crucial in modern electronic systems that require lower voltage for various components such as microcontrollers, sensors, and other devices. This research aims to design and implement an output voltage control system for the buck converter using fuzzy logic methods and a MATLAB GUI. By employing the fuzzy logic method, the buck converter can adapt well to load variations and input voltage source fluctuations, resulting in a more responsive and stable output voltage. Additionally, with the presence of the MATLAB GUI, this will facilitate users in efficiently controlling the system or application, allowing them to control the output voltage of the buck converter according to diverse application requirements.

Keywords: Buck converter, fuzzy logic, GUI MATLAB.

PENDAHULUAN

DC-DC *Converter* merupakan rangkaian elektronika yang mengubah sumber arus searah DC dari satu level tegangan ke yang lain, memberikan output tegangan yang diatur [1]. Sirkuit elektronik, baik analog maupun digital membutuhkan catu daya dengan besaran berbeda [2]. Kemampuannya untuk mengkonversi tegangan dengan efisiensi tinggi menjadikannya pilihan yang populer dalam berbagai aplikasi, termasuk catu daya, sistem fotovoltaiik, dan perangkat elektronik daya lainnya [3-5]. *Buck converter* memiliki desain yang sederhana, terdiri dari komponen *switching* semikonduktor seperti MOSFET dan dioda, komponen pasif terdiri dari induktor dan kapasitor, serta resistor sebagai beban [6]. *Buck converter* merupakan salah satu topologi DC-DC *Converter* yang menurunkan tegangan input dengan metode *regulator switching* dengan merubah lebar pulsa PWM (*duty cycle*) [7-9]. Konverter ini menggunakan sebuah saklar (biasanya transistor) yang dioperasikan dengan metode saklaran *on-off* secara teratur.

Cara kerja rangkaian *buck converter* yaitu ketika berada pada *state on*, *switch* akan berfungsi sebagai saklar yang menutup, selama interval waktu dt , maka arus dari tegangan sumber akan mengalir melalui induktor, kemudian ke beban dan kembali lagi ke sumber. Karena tegangan yang diberikan kepada induktor konstan, maka arus yang melewati induktor akan meningkat secara linier, Ketika berada pada kondisi *off*, *switch* akan terbuka, mengakibatkan arus dari sumber tegangan tidak dapat mengalir melewati *switch*. Sehingga sumber dari tegangan *output* sekarang berasal dari induktor dan kapasitor dimana dioda akan menjadi *forward bias* [10]. Konverter buck mempunyai 2 mode operasi kerja, yaitu mode CCM (*Continuous Conduction Mode*) dan mode DCM (*Discontinuous Conduction Mode*). Mode CCM adalah mode operasi dimana arus pada konverter mengalir secara kontinyu, dalam artian tidak pernah bernilai nol. *Discontinuous Conduction Mode* (DCM) adalah mode dimana arus pada *converter* mencapai nilai nol, atau tidak kontinyu [11-12].

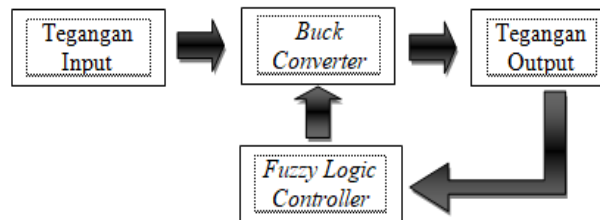
Dalam upaya untuk meningkatkan kinerja dan responsivitas *buck converter*, metode kendali *fuzzy logic* telah muncul sebagai alternatif yang menarik [13-15]. *Fuzzy logic* merupakan salah satu teknik kendali cerdas yang memanfaatkan aturan-aturan linguistik untuk memodelkan dan mengontrol sistem non-linier dengan tingkat ketidakpastian. Dengan menerapkan aturan-aturan kendali berdasarkan pengetahuan manusia, *Fuzzy logic* dapat menangani masalah-masalah kompleks yang sulit dipahami atau dinyatakan dalam bentuk matematis yang terstandarisasi [16]. *Fuzzy logic* mampu menghadapi variasi dengan fleksibilitas dan kemampuan adaptasi yang tinggi. Penerapan *fuzzy logic* dalam kendali *buck converter* akan dikombinasikan dengan antarmuka pengguna *grafis user interface* (GUI) menggunakan Matlab. GUI akan memberikan kemudahan dalam memantau kinerja sistem secara *real-time*. Dengan demikian, pengguna dapat secara interaktif mengoptimalkan kendali *buck converter* sesuai dengan kebutuhan spesifik dari sistem elektronika yang kompleks dan beragam [17-19].

METODE

Metode pada penelitian rancang bangun kendali *fuzzy logic* untuk tegangan keluaran *buck converter* menggunakan GUI matlab berbasis mikrokontroler dengan melakukan perancangan dan pembuatan alat yang menjelaskan mengenai sistem kerja perancangan baik dalam bentuk *hardware* dan juga *software*.

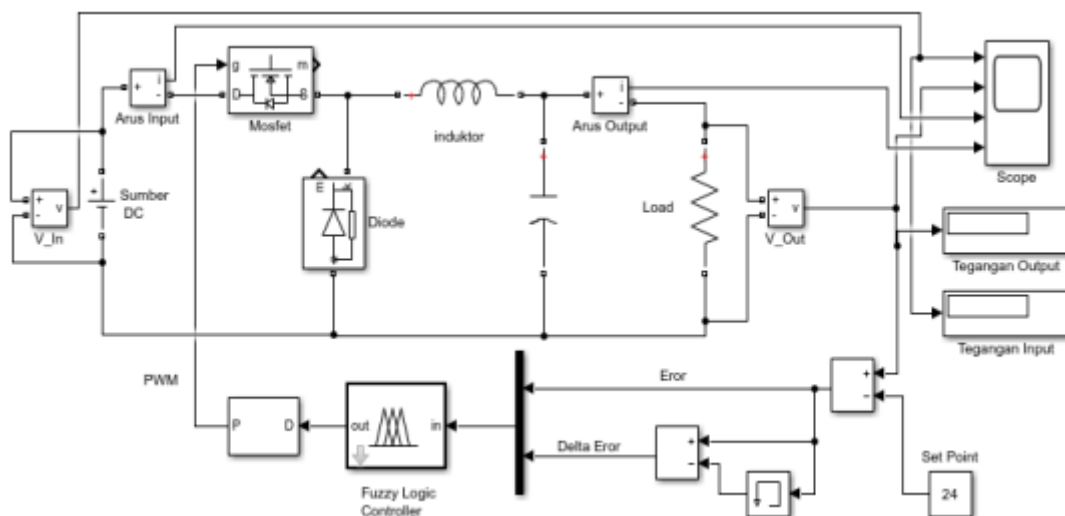
Prinsip Kerja

Rancang bangun *buck converter* ini bertujuan untuk memperoleh nilai tegangan keluarannya yang stabil berdasarkan dengan nilai set poin yang telah ditentukan, walaupun terdapat tegangan input dan perubahan beban pada *buck converter* secara bervariasi [20]. Berbeda dengan tanpa pengendalian (*open loop*), pada penelitian [21] tegangan output *buck converter* hanya berdasarkan dengan siklus kerja yang tetap.



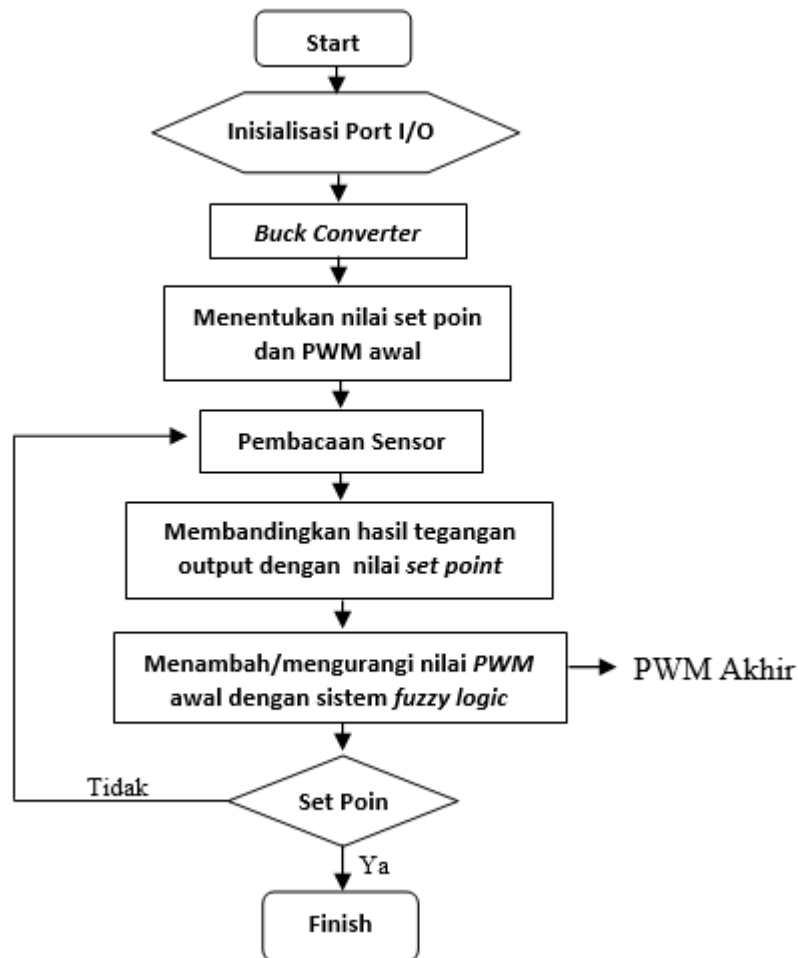
Gambar 1. Diagram blok *buck converter* dengan pengontrolan

Stabilnya tegangan keluaran tersebut diperoleh setelah melakukan pengontrolan dengan menggunakan sistem *fuzzy logic*. Sistem *fuzzy logic* tersebut didasari dengan pembacaan sensor tegangan yang ada pada *buck converter* yang akan diprogram melalui mikrokontroler, selanjutnya akan memberikan sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)* dengan nilai siklus kerja yang bervariasi setiap perubahan tegangan input yang diberikan.



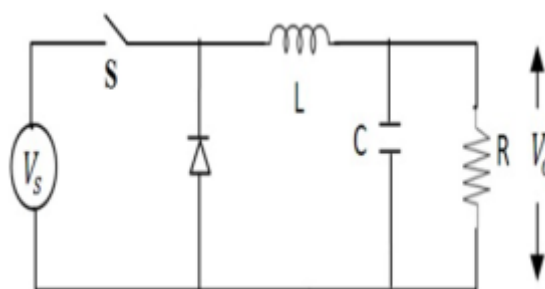
Gambar 2. Diagram blok *buck converter* dengan pengontrolan

Jika dijelaskan secara rinci, maka prinsip kerja Penelitian ini dapat dijelaskan melalui diagram *flow chart* pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram *flow cahart* buck converter dengan pengontrolan
Perancangan Buck Converter

Desain *buck converter* yang dikembangkan seperti terlihat pada Gambar 4 dan memiliki spesifikasi seperti terlihat pada Tabel 1.



Gambar 4. Rangkain *buck converter*

Tabel 1. Spesifikasi perencanaan *buck converter*

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan masukan	0 – 40 V
Tegangan Keluaran	5 – 40 V
Arus output maksimal	3 A
Frekuensi swiching	31,4 KHz
Ripple tegangan	< 2%

Untuk menentukan nilai besaran komponen-komponen yang ada pada *buck converter* yang terdiri dari dioda, induktor, kapasitor dan komponen pendukung lainnya [22], dapat dihitung sebagai berikut :

1. Menentukan nilai *duty cycle* maksimum dan minimum.

Nilai *duty cycle* pada *buck converter* ditetapkan antara 10% hingga 90%. Hal ini dilakukan untuk menghindari tegangan output yang sama dengan nilai tegangan input. Ketika *duty cycle* mencapai 100%, saklar dalam *buck converter* akan selalu berada dalam posisi terbuka, sehingga tegangan output sama dengan tegangan input. *Duty cycle* yang sangat rendah juga dapat mempengaruhi stabilitas tegangan output. Oleh karena itu, rentang *duty cycle* antara 10% hingga 90% dipilih untuk memastikan *buck converter* beroperasi dalam kondisi yang stabil dan efisien.

2. Pemilihan Induktor

Untuk menentukan besar induktor yang akan digunakan dalam *buck converter* pada mode CCM. Estimasi *ripple* arus digunakan untuk mengetahui berapa arus keluran minimum yang dapat di hasilkan oleh *converter*. Berikut ini merupakan persamaan perhitungan $I_{o\min}$ (arus keluaran minimum) dengan mengestimasi *ripple* arus sebesar 20 %.

$$\Delta I_L \max = I_o \max \times 20\% \quad (1)$$

$$\Delta I_L \max = 3 \text{ A} \times 20\%$$

$$\Delta I_L \max = 0.6 \text{ A}$$

Setelah mendapatkan estimasi *ripple* arus maka selanjutnya menghitung $I_o(\min)$ sebagai berikut.

$$I_o \min = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2)$$

$$I_o \min = \frac{0.6}{2}$$

$$I_o \min = 0.3 \text{ A}$$

Nilai induktansi minimum untuk mendapatkan kondisi CCM pada DC-DC *buck converter* sebagai berikut.

$$L \min = \frac{V_o \max \times (1 - D \min)}{2 \times f_s \times I_o \min} \quad (3)$$

$$L \min = \frac{40 \times (1 - 0.1)}{2 \times 31400 \times 0.3}$$

$$L \min = 1,91 \text{ mH}$$

Maka dari hasil perhitungan induktansi minimum didapatkan induktansi minimum sebesar 1,91 mH untuk mendapatkan kondisi CCM pada *buck converter*. Dikarenakan agar nilai *ripple* arus dapat berkurang dan mengurangi arus output yang semakin kecil, maka penulis memilih nilai yang lebih besar dari nilai perhitungan tersebut, yaitu menggunakan

nilai 4,2 mH. Dengan menggunakan nilai induktor 4,2 mH tersebut maka *ripple* arus induktor maksimal yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

$$I_{L \max} = \frac{V_o \max \times (1 - D \min)}{f_s \times L} \quad (4)$$

$$I_{L \max} = \frac{40 \times (1 - 0.1)}{31400 \times 4,2 \text{ mH}}$$

$$I_{L \max} = 277 \text{ mA.}$$

3. Pemilihan kapasitor

Kapasitor difungsikan untuk meminimalisir *ripple* tegangan, pada pemilihan kapasitor ini digunakan estimasi *ripple* tegangannya adalah 1 %.

$$V_r = 1 \% \times V_o \max \quad (5)$$

$$V_r = 1 \% \times 40$$

$$V_r = 0,40 \text{ V}$$

Dengan menggunakan nilai *ripple* tegangan 0,40 V tersebut maka dapat dihitung nilai ESR (*equivalent series resistance*) maksimum pada kapasitor sebagai berikut :

$$\begin{aligned} R_{C \max} &= \frac{V_r}{\Delta I_{L \max}} \\ &= \frac{0.40 \text{ V}}{0,6 \text{ A}} = 0,667 \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

Dari nilai ESR maksimum tersebut maka dapat dihitung nilai kapasitor minimum sebagai berikut.

$$C \min = \frac{D \max}{2 \cdot f_s \times R_{C \max}} \quad (7)$$

$$C \min = \frac{0.90}{2 \cdot 31400 \times 0,667}$$

$$C \min = 21,48 \mu\text{F}$$

4. Pemilihan Dioda dan MOSFET

Memilih MOSFET berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan yaitu sebagai berikut.

$$V_{\text{switch}} = V_{\text{dioda}} = V_{\text{in max}} = 48 \text{ V}$$

Maka dapat digunakan MOSFET dengan tipe N-Chanel IRFP460 dengan data yang terlampir. Untuk menentukan pemakain *diode* dapat menggunakan persamaan berikut:

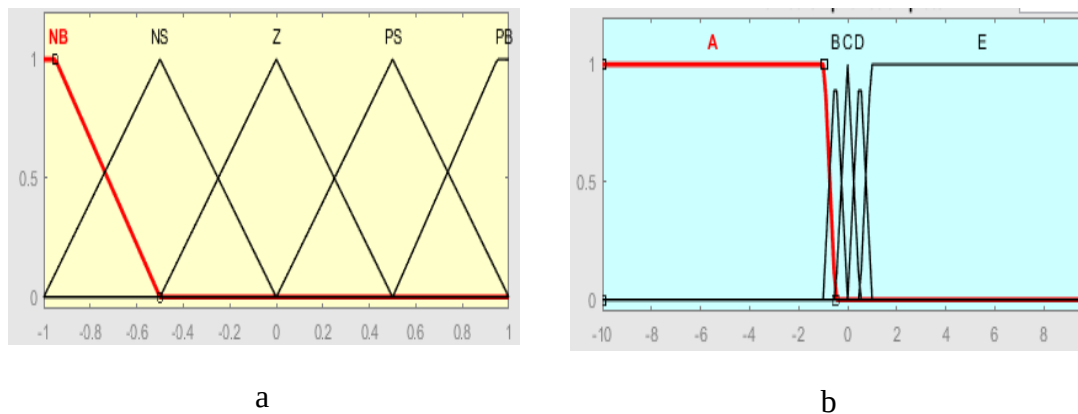
$$I_{DM \max} = I_o \max \cdot \frac{\Delta I_{L \max}}{2} \quad (8)$$

$$I_{DM \max} = 4 \cdot \frac{0,277}{2} = 0,554 \text{ A}$$

Maka dari perhitungan tersebut arus minimal yang dilewati *diode* tersebut adalah sebesar 0,554 A. sehingga *diode* yang digunakan dengan penyesuaian *data sheet* yang terlampir bisa menggunakan dioda MUR 460.

Perancangan Fuzzy Logic

Logika fuzzy atau dalam istilah bahasa inggris disebut *fuzzy logic* merupakan bentuk logika bernilai banyak yang memiliki nilai kebenaran variabel dalam bilangan real antara 0 dan 1 [23]. Output kontroler logika fuzzy berupa nilai PWM yang digunakan untuk mengatur *buck converter*. Kontrol logika fuzzy untuk pengendalian tegangan keluaran konverter buck ini menggunakan metode Mamdani yang terdiri dari dua input dan satu output, dua input tersebut yaitu nilai error dan delta error. Himpunan fuzzy logic dapat dilihat dari Gambar 5.



Gambar 5. Himpunan fuzzy logic. a) error dan delta error b) Output PWM

Nilai error merupakan selisih nilai yang diperoleh dari nilai set poin dengan nilai tegangan input yang actual dan delta error adalah selisih nilai error pengukuran sebelumnya dengan nilai pengukuran yang selanjutnya. Untuk menentukan nilai tindakan yang akan diperoleh oleh output tersebut terlebih dahulu dengan menentukan *rules* dari *fuzzy logic* tersebut yang diperoleh pada Tabel 2.

Tabel 2. Rules fuzzy logic

Error/Delta error	NB	NS	Z	PS	PB
NB	E	E	E	D	C
NS	E	E	D	C	B
Z	E	D	C	B	A
PS	D	C	B	A	A
PB	C	B	A	A	A

Tampilan Monitoring

Monitoring digunakan untuk dapat memberikan informasi yang terjadi pada saat pembacaan sensor yang digunakan. Pada penelitian ini monitoring dengan menggunakan metode *Graphical User Interface* (GUI) dan dipadukan dengan menggunakan *oscilloscope*. Dengan adanya metode GUI Matlab ini maka akan memudahkan untuk melakukan pengontrolan terhadap rangkaian *buck converter* dikarenakan pada *board* arduino uno akan terkoneksi secara langsung dengan sistem GUI Matlab yang dapat diprogram sesuai dengan perencanaan yang diinginkan secara langsung melalui menu editor [24].

HASIL DAN PEMBAHASAN

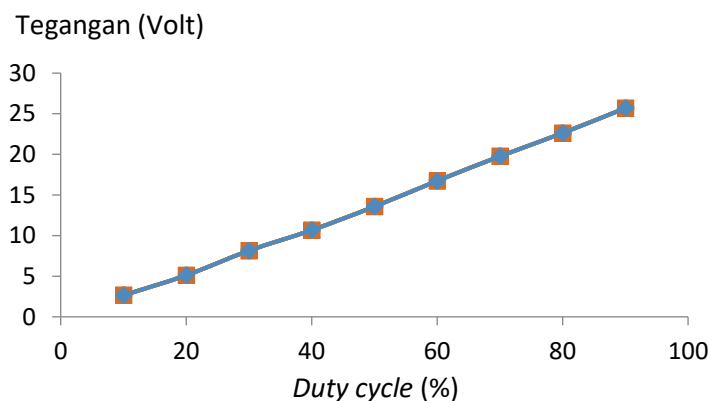
Pengujian rangkaian *buck converter* tanpa pengontrolan (*open loop*)

Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian open-loop. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan input sebesar 30 volt dengan nilai beban yang sama yaitu sebesar 24 ohm dan nilai *duty cycle* yang bervariasi.

Tabel 3. Pengujian *Buck Converter*

No	Lebar pulsa	Tegangan sumber (V)	Tegangan Output (V)	Alat Ukur (V)
1	10%	30	2,65	2,67
2	20%	30	5,11	5,25
3	30%	30	8,14	8,2
4	40%	30	10,67	10,98
5	50%	30	13,57	13,86
6	60%	30	16,73	16,84
7	70%	30	19,76	19,86
8	80%	30	22,62	22,67
9	90%	30	25,69	25,98

Nilai tegangan output yang dihasilkan oleh rangkaian *buck converter* dipengaruhi oleh besarnya *duty cycle* yang diberikan, Sehingga besarnya tegangan output akan sebanding dengan kenaikan nilai *duty cycle* yang akan diberikan pada rangkaian *buck converter*. Representasi grafis dari hubungan *dutycycle* dan tegangan terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. grafik pengaruh *duty cycle* terhadap tegangan output

Pengujian rangkaian *buck converter* dengan *fuzzy logic*

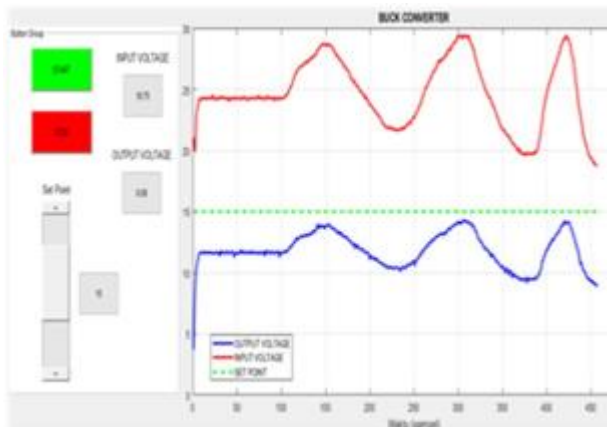
Tahap selanjutnya dengan melakukan pengujian menggunakan pengontrolan *fuzzy logic* dengan tipe mamdani yang telah di desain. Pengujian ini dengan memberikan tegangan input sebesar 30 V dan menggunakan beban yang konstan yaitu dengan memberikan nilai tahanan sebesar 98 ohm. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. *buck converter* dengan pengontrolan *fuzzy logic*

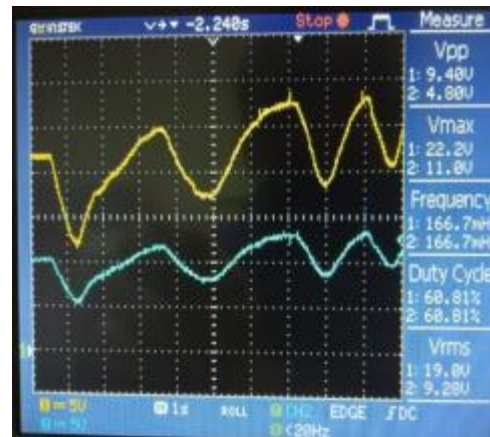
No.	Tegangan Input (V)	Set poin	Tegangan Output (V)	Error (%)
1	30	5	5,09	1,80
2	30	7	6,89	1,57
3	30	10	9,85	1,50
4	30	12	11,92	0,67
5	30	15	15,04	0,26
6	30	20	19,93	0,35
7	30	24	23,89	0,45

Perbandingan antara *buck converter* dengan pengontrolan *fuzzy logic* dan tanpa pengontrolan

Buck converter tanpa pengontrolan adalah jenis *buck converter* yang tidak menggunakan pengaturan aktif untuk mengatur *duty cycle*. *Duty cycle*-nya tetap pada tingkat yang ditetapkan secara statis tanpa memperhatikan perubahan kondisi operasional. Hal ini menyebabkan kurang responsifnya *buck converter* dan dapat mengakibatkan terjadi perubahan jika terdapat input tegangan yang bervariasi, sehingga tegangan output tidak konstan. Gambar 7 merupakan sinyal tegangan output tanpa pengendalian.



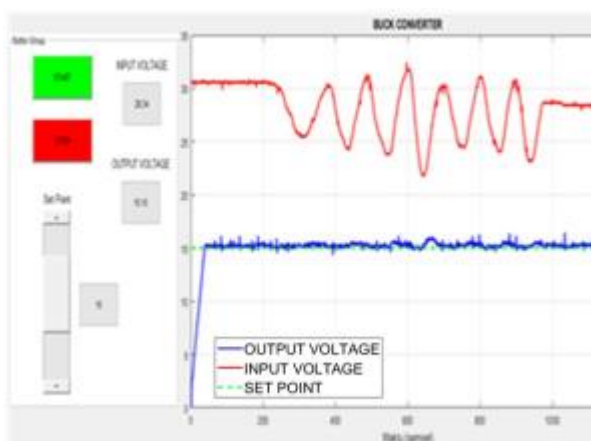
a



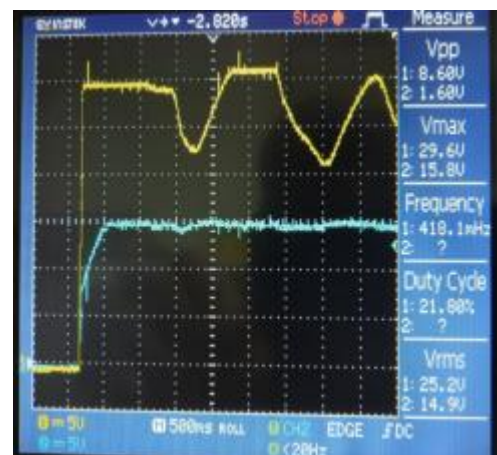
b

Gambar 7. Tegangan Output tanpa *fuzzy logic* . a) Tampilan GUI Matlab b) Tampilan Oscilloscope

Buck converter dengan pengendalian *fuzzy logic* mengatur *duty cycle* secara adaptif berdasarkan analisis variabel masukan, merespons perubahan tegangan masukan dengan lebih baik sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dan akurat. Gambar 8 menunjukkan hasil implementasinya.



a

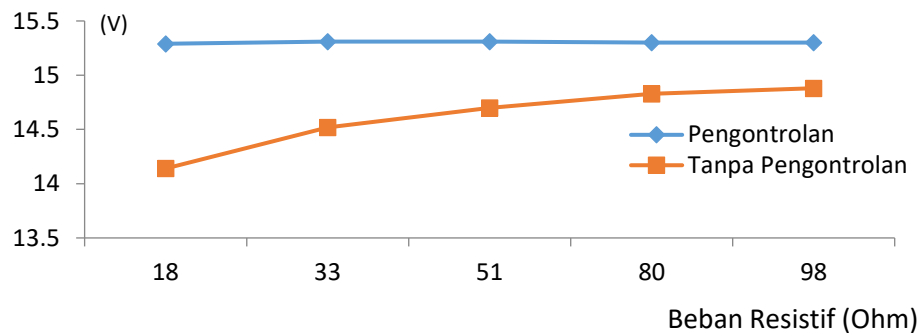


b

Gambar 8. Tegangan output menggunakan *fuzzy logic* . a) Tampilan GUI Matlab b) Tampilan Oscilloscope

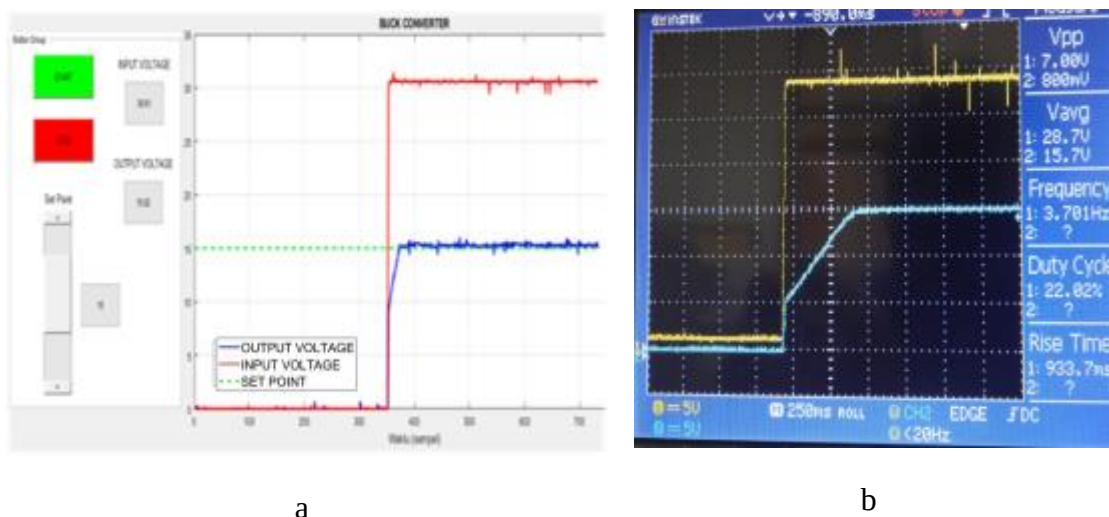
Dengan pengontrolan *fuzzy logic* pada *buck converter*, respon terhadap perubahan beban lebih terkontrol dan stabil. Saat beban berubah secara tiba-tiba, pengontrol akan

menyesuaikan siklus kerja saklar sesuai dengan kondisi baru. Hal ini menghasilkan fluktuasi tegangan keluaran yang lebih terkendali dan minim pengaruhnya terhadap perubahan beban. Pengontrolan ini membantu menjaga tegangan keluaran *buck converter* tetap mendekati nilai *set point* [25]. Dalam penelitian ini, *buck converter* diuji dengan memberikan beban yang bervariasi dan tegangan input yang konstan (30 V) baik dengan pengontrolan *fuzzy logic* maupun tanpa pengontrolan. Gambar 10 menunjukkan perbandingan antara kinerja *buck converter* tanpa dan dengan pengontrolan.



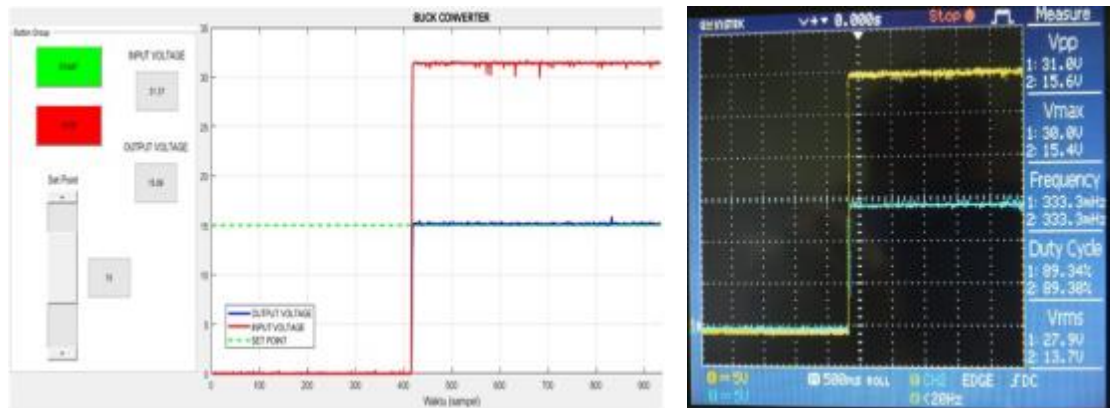
Gambar 9. Perbandingan *buck converter* pengontrolan *fuzzy logic* dan tanpa pengontrolan saat pemberian beban resistif

Pada Penelitian ini penggunaan *fuzzy logic* pada *buck converter* dapat menyebabkan proses pencapaian nilai stabil yang lebih lama pada saat *start* awal jika dibandingkan dengan tanpa pengontrolan. Pengujian pada *buck converter* dengan memberikan tegangan input sebesar 30 V dan pengujian tanpa pengontrolan dengan *duty cycle* 50% dan dengan pengontrolan *fuzzy logic* dengan nilai *set point* 15. Dari Gambar 10, *Buck converter* dengan sistem pengontrolan saat pertama kali dinyalakan, memerlukan waktu untuk menginisialisasi dan menyesuaikan parameter-parameter kontrolan yang memerlukan beberapa literasi atau siklus waktu untuk mencapai kondisi kontrol yang optimal.



Gambar 10. Start *buck converter* dengan *fuzzy logic*. a) Tampilan GUI Matlab b) Tampilan Oscilloscope

Sedangkan dari Gambar 11 terlihat jika *Buck converter* tanpa pengontrolan memiliki keunggulan dalam hal pencapaian nilai *set point* yang lebih cepat pada saat *start on* karena tidak memerlukan parameter dan penghitungan yang kompleks.



a

b

Gambar 11. Start awal *buck converter* tanpa pengontrolan. a) Tampilan GUI Matlab b) Tampilan *Oscilloscope*

KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah dilakukan perancangan dan pembuatan penelitian ini dan telah dilakukan pengujian sehingga dapat disimpulkan bahwa *Buck converter* dapat menurunkan tegangan DC yang lebih tinggi menjadi lebih rendah yang dapat digunakan sebagai catu daya dan Pengontrolan *fuzzy logic* dapat diaplikasikan pada *buck converter* dan menghasilkan tegangan output yang lebih stabil dibandingkan dengan tanpa pengontrolan.

Perhitungan masing-masing komponen pada *buck converter* harus lebih dipertimbangkan, agar tegangan output yang dihasilkan memiliki riak yang lebih kecil dan dalam melakukan perancangan pengontrolan *fuzzy logic* harus dipertimbangkan secara rinci agar memperoleh respon yang lebih adaptif dan stabil.

REFERENSI

- [1] Fermeiro, J. B. L., Pombo, J. A. N., Calado, M. R. A., & Mariano, S. J. P. S. (2017). A New Controller for DC-DC Converters Based on Particle Swarm Optimization. *Applied Soft Computing Journal*, 52, 418–434. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.10.025>
- [2] Kurnar, Jagdish., Surjan, Balwinder. Singh., & Omer, Prabhu. (2018). Design of Robust PID Controller for Buck Converter Using Bat Algorithm. In 1st IEEE International Conference on Power Electronic, Intelligent Control and Energy System (ICPEICES).
- [3] M. Ashari, “Simulasi Double Buck Boost Converter DC-DC Bidirectional Menggunakan PID Controller B-1 B-2,” vol. 7, pp. 1–6, 2015.
- [4] R.H.G. Tan and L.Y.H. Hoo, “DC-DC converter modeling and simulation using state space approach, ”in 2015 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2015, 2015, doi: 10.1109/CENCON.2015.7409511.
- [5] H. Hermansyah, a. komunitas, and i. manufaktur. (2019). Desain dan simulasi kontrol tegangan output boost converter menggunakan metode fuzzy logic control (flc),
- [6] Shinde, N., Sankad, Surgappa., Patil, L.S., (2018). Design and Study Voltage Characteristics of Buck Converter by Matlab Simulink. 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), p. 680–683.

- [7] Cristri, A. W., & Iskandar, R. F. (2017). Analysis and Design of Dynamic Buck Converter with Change in Value of Load Impedance. *Procedia Engineering*, 170, 398–403. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.064>
- [8] S. Wibowo, M. Facta, and A. Nugroho, “Operasi Dc-Dc Konverter Tipe Cuk Dengan Mode Dcm & Ccm Dengan Transistor Sc2555 Sebagai Saklar,” no. Ccm
- [9] P. Surya, “Rancang Bangun Buck-Boost Converter Sebagai Regulator Tegangan Keluaran pada Panel Surya.”
- [10] Sodikin, N. H., dkk. (2015). Rancang Bangun Prototype Emulator Sel Surya Menggunakan Buck Converter Berbasis Arduino. *Jurnal Rekayasa dan Teknik Elektro*. 9(3):172-180.
- [11] Tomas Hudson (2022), “seo the difference between ccm and dcm”: https://media.monolithicpower.com/mps_cms_document/2/0/2021-seo-the-difference-between-ccm-and-dcm
- [12] M. A. Lababan, M. Facta, and B. Winardi (2023), “Analisis perbandingan hasil CCM dan DCM DC chopper tipe buck boost berbasis transistor,” *Transient*, vol. 4, pp. 582–588, 2015.
- [13] Barkat B., Nouri H., Tlemcani A.(2011) Non-interacting adaptive control of PMSM using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems, 19, *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* (2011), pp. 925-9365
- [14] Irna Tri Yuniahastuti (2023), Pemodelan Fuzzy Logic Control untuk Pengendali PWM pada Buck Converter
- [15] Ang, Gerard, dkk.(2017): Implementation of a fuzzy controlled buck-boost converter for photovoltaic
- [16] Trivusi, (2022). Penjelasan Lengkap Mengenai Logika Fuzzy (Fuzzy Logic) <https://www.trivusi.web.id/2022/05/pengertian-fuzzy-logic.html>
- [17] Colgren, R. (2014). MATLAB Numerical Computing. TutoriaPoint. <https://doi.org/10.2514/5.9781600861628.0001.0042>.
- [18] Houcque, D. (2005). Introduction To Matlab for EngineeringStudents. In School of Engineering & Applied Science(IssueAugust). Northwestern University.
- [19] Serhat Beyenir, (2013). A Brief Introduction to EngineeringComputation with MATLAB. Connexions, Rice University.
- [20] I Nyoman Wahyu Satiawan, Supriono, Ida Bagus Fery Citarsa (2018), Desain Buck Converter untuk Charging Baterai pada Beban Bervariasi
- [21] Telvi Armaliany, Krismadinata. (2022). Rancang Bangun Instrumentasi Konverter Buck dengan Graphical User Interface
- [22] Kazimierczuk Marian .K., (2008). Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters. Dayton : Willey.
- [23] Popescu, C. and Sudradjat, S., Parameter estimation for fuzzy sets, *IJPAM*, accepted November 6, 2006.
- [24] Engr Fahad (2021), Matlab Arduino to Control an Led using Serial communication https://www.electronicclinic.com/matlab-arduino-to-control-an-led-using-serial-communication/#Final_Testing.
- [25] Deni Setiawan H., Syahril, (2021). Perancangan Buck Converter 24vdc-12vdc dengan Kapasitas 500w Berbasis t1494.