

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER DC-DC BUCK DENGAN DAYA KELUARAN 50W

Ulfi Salsa Septiani ¹, Sofyan Muhammad Ilman ^{1*}, Nanang Mulyono ¹

¹Politeknik Negeri Bandung; Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat, 40559; 022 – 2013789

Keywords:

Konverter *Buck*;
Konverter Daya;
DC.

Correspondent Email:

sofyan.muhammad@polban.ac.id

Abstrak. Kemajuan akan teknologi semakin pesat, salah satunya adalah di bidang konverter daya. Konverter daya dapat diaplikasikan di berbagai sektor baik di industri, ketenagalistrikan, peralatan rumah tangga, kendaraan listrik, maupun untuk sarana pembelajaran di skala laboratorium perguruan tinggi. Umumnya konverter daya penurun tegangan seperti konverter DC-DC *buck* pada skala laboratorium hanya terbatas pada daya keluaran di bawah 45W. Tujuan dari penelitian ini adalah mendesain dan mengimplementasikan konverter DC-DC *buck* yang memiliki kemampuan daya keluaran sebesar 50W untuk skala laboratorium. Konverter ini dirancang untuk menurunkan tegangan DC dari 30V menjadi tegangan DC 14V dengan kapasitas daya keluaran dapat mencapai diatas 45W skala laboratorium sebagai sarana pembelajaran elektronika daya. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah menentukan spesifikasi dari konverter, kemudian menghitung semua parameter komponen pasif dan aktif, kemudian dilakukan pengujian secara parsial, lalu diintegrasikan yang kemudian dilakukan pengujian secara keseluruhan sistem. Hasil yang diperoleh adalah konverter DC-DC *buck* dapat menurunkan tegangan keluaran sebesar 14,32V sisi keluaran dengan tegangan masukan tetap sebesar 30V dan menghasilkan daya keluaran sebesar 51,26W.

Abstract. Technological progress will be increasingly rapid, one of which is in the field of power converters. Power converters can be applied in various sectors both in industry, electricity, household appliances, electric vehicles, as well as for learning facilities on a university laboratory scale. Generally, voltage-reducing power converters such as DC-DC buck converters on a laboratory scale are only limited to output power below 45W. The purpose of this study is to design and implement a DC-DC buck converter that has an output power capability of 50W for a laboratory scale. This converter is designed to reduce the DC voltage from 30V to a DC voltage of 14V with an output power capacity that can reach above 45W on a laboratory scale as a learning tool for power electronics. The method used in this study is to determine the specifications of the converter, then calculate all the parameters of the passive and active components, then conduct partial testing, then integrate and then test the entire system. The results obtained are that the DC-DC buck converter can reduce the output voltage by 14.32V on the output side with a fixed input voltage of 30V and produce an output power of 51.26W.

1. PENDAHULUAN

Kemajuan dalam teknologi komponen semikonduktor dan rangkaian elektronika daya

telah memungkinkan pengembangan sistem penyedia daya pada tegangan arus searah (DC), yang bekerja dengan mengubah tegangan DC masukan menjadi tegangan DC keluaran yang

lebih tinggi atau lebih rendah. Sistem ini dikenal sebagai konverter DC-DC. Seiring perkembangannya, konverter DC-DC memungkinkan perangkat elektronik beroperasi menggunakan sumber tegangan rendah atau tinggi, dengan tegangan keluaran yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan. Saat ini, berbagai konfigurasi konverter DC-DC telah dikembangkan, salah satunya adalah tipe yang tidak memiliki isolasi dielektrik antara tegangan masukan dan keluaran, yang dikenal sebagai *non-isolated* DC-DC konverter [1].

Penggunaan arus searah (DC) masih sangat dibutuhkan, Salah satu aplikasi dari konverter DC-DC atau dahulu biasa di sebut *chopper dc* yang dapat diaplikasikan untuk *charger* baterai atau catu daya, dengan tegangan keluarannya yang dapat disesuaikan, bisa lebih rendah atau lebih tinggi dari tegangan masukannya [2]. Jenis *chopper* yang umum digunakan adalah konverter DC-DC *buck*, berfungsi untuk menurunkan tegangan sisi keluaran yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan bebannya. Pada penerapannya, konverter ini dapat diatur besarnya tegangan keluarannya menggunakan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang menghasilkan sinyal pulsa untuk melakukan penyaklaran (*Switching*) dengan mengatur besarnya *duty cycle* pada modul pembangkit PWM tersebut agar mendapatkan tegangan keluaran yang sesuai dengan kebutuhan [3]–[4]. Aplikasi dari konverter DC-DC *buck* beragam, salah satu penelitian tentang aplikasi dari konverter tersebut adalah pada keluaran daya solar panel yaitu *solar charge controller* untuk mengendalikan daya secara efisien dalam sistem yang mandiri [5]. Dengan permintaan sistem yang semakin kompleks, modifikasi dalam suatu konverter DC-DC diperlukan untuk mendukung kebutuhan aplikasi tertentu, salah satunya adalah pengembangan konverter dengan tiga terminal keluaran untuk mendukung sistem solar panel dan penyimpanan energi baterai dengan daya yang sangat tinggi[6]. Pengembangan konverter juga merambah luas kedalam sektor otomotif atau transportasi, dimana konverter tersebut akan difungsikan sebagai konversi daya, salah satunya yang sedang berkembang saat ini adalah *fuel cell* untuk *Vehicular Power Train*, yaitu pada penelitian ini konverter dibuat multistap dengan sistem non isolasi satu arah untuk aplikasi tersebut [7]. Selain dalam

aplikasi tersebut, konverter daya juga dapat di *improve* untuk koreksi faktor daya dalam sistem pengisian baterai [8]. Penelitian tentang konverter hibrida yang mana mengulas kemajuan terbaru dalam topologi, khususnya dalam aplikasi berdaya rendah untuk mengatasi kelemahan seperti rugi pembagian muatan, riak arus tinggi, terbatasnya rasio konversi, kerapatan daya rendah, dan efisiensi[9]. Penelitian tentang konverter DC-DC *buck* yang dimodifikasi yaitu dengan multifasa yang di kendalikan oleh FPGA untuk mempercepat respon transien [10]. Kendali *feedforward* berbasis modulasi tegangan puncak yang bertujuan untuk menstabilkan tegangan keluaran terhadap variasi masukan [11]. Berbagai penelitian tentang modifikasi konverter dc-dc telah banyak dilakukan dengan multi keluaran dan satu masukan, dimana konverter tersebut bisa melakukan menaikkan dan menurunkan tegangan keluaran dengan independen [12]. Analisa konverter *buck* dalam keadaan nonlinear yang dimodelkan dalam *software* untuk melihat performa dari konverter tersebut dengan mode arus kontinyu [13][14][15]. Pengembangan konverter dc-dc seperti Zeta di aplikasikan untuk meningkatkan efisiensi dan membuat arus masukan kontinyu dan dilengkapi dengan kontrol PI [16]. Beberapa penelitian mengenai perancangan konverter *buck* jenis konvensional dan sinkronus *buck* telah dirancang dan di implementasikan dengan tujuan untuk menghasilkan tegangan keluaran untuk aplikasi MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), maupun kebutuhan skala laboratorium untuk praktikum, namun permasalahan yang muncul adalah daya keluaran dari konverter tersebut belum mencapai diatas 45W[17][18][19][20].

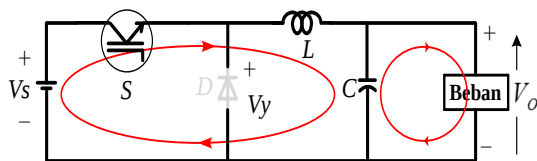
Berangkat dari permasalahan tentang daya keluaran konverter DC-DC, maka tujuan dari penelitian ini adalah mendesain dan mengimplementasikan konverter DC-DC *buck* yang dapat menurunkan tegangan masukan dari 30V yang bersifat tetap menjadi 14V pada sisi keluaran dengan daya maksimum 50W untuk skala laboratorium. Metode penelitian yang akan dilakukan adalah dengan mendesain semua parameter komponen pasif dan aktif pada konverter tersebut sesuai spesifikasi yang sudah ditentukan, kemudian melakukan desain konverter daya, modul *gate driver*, dan modul pembangkitan PWM (*pulse width modulation*)

dalam sebuah skematik yang kemudian di konversi kedalam bentuk *layout* PCB, dan tahap akhir adalah melakukan pengujian untuk seluruh sistem.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konverter DC-DC Buck

Konverter DC-DC *buck* merupakan koverter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari level yang tinggi ke level yang lebih rendah pada sisi keluaran. Rangkaian konverter tersebut yang terdiri dari komponen aktif seperti IGBT atau MOSFET yang di fungsikan sebagai pensaklaran, dan komponen pasif seperti dioda, kapasitor, dan induktor. Struktur dari konverter ini terdapat rangkaian *low pass filter* yang terddiri dari induktor dan kapasitor yang di pasang setelah saklar. Pada Gambar 1 merupakan sistem kerja dari konverter *buck*.



Gambar 1. Konverter DC-DC *buck* ketika saklar ON

Gambar 1 menunjukkan sistem kerja dari konverter *buck* ketika dalam kondisi saklar ON, dimana dioda menjadi *reverse-biased*, maka tidak menghantarkan arus. Besarnya tegangan di dioda adalah[21]-[22].

$$V_x = V_s \quad (1)$$

Dimana V_x merupakan tegangan pada dioda dan V_s adalah tegangan sumber, dan besarnya tegangan pada induktor sebesar[21]-[22].

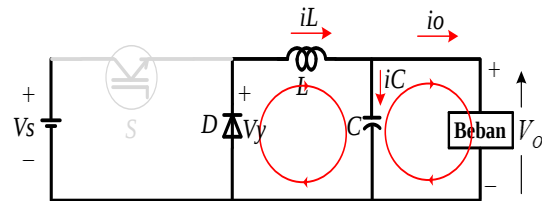
$$V_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

Dimana V_L merupakan tegangan pada induktor, V_s adalah tegangan sumber dan V_o adalah tegangan keluaran. Dari persamaan (2) jika disusun ulang menjadi[21]-[22].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (3)$$

Persamaan (3) merupakan penurunan dari persamaan (2), ketika saklar ON. Selanjutnya

Gambar 2 merupakan rangkaian dari konverter *buck* ketika dalam kondisi saklar OFF.



Gambar 2. Konverter DC-DC *buck* ketika saklar OFF

Gambar 2 menunjukkan sistem kerja dari konverter *buck* ketika dalam kondisi saklar OFF, dimana dioda menjadi *forward-biased*, maka tidak menghantarkan arus. Besarnya tegangan di dioda adalah[21]-[22].

$$V_x = 0 \quad (4)$$

Dimana V_x merupakan tegangan pada dioda ketika kondisi *forward-biased*, dan besarnya tegangan pada induktor sebesar[21]-[22].

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

Dimana V_L merupakan tegangan pada induktor, dan V_o adalah tegangan keluaran. Dari persamaan (5) jika disusun ulang menjadi[21]-[22].

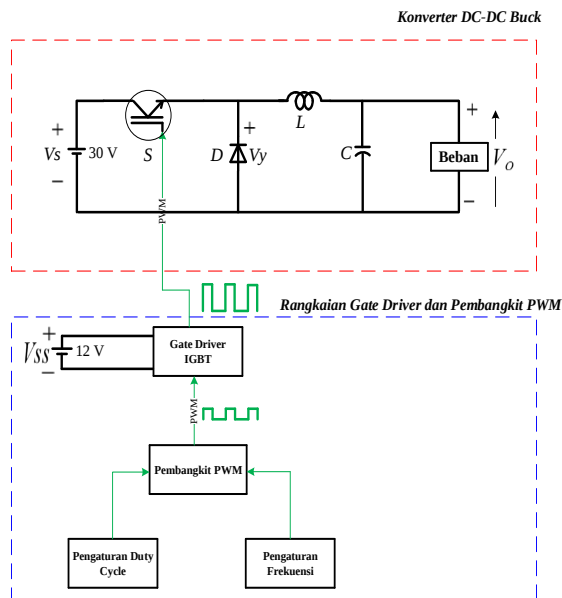
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (6)$$

Dari persamaan (2) dan persamaan (3) merupakan persamaan KVL (*Kirchhoff's Voltage Law*) pada konverter DC-DC *buck* ketika kondisi saklar ON, dan persamaan (5) dan persamaan (6) merupakan persamaan KVL (*Kirchhoff's Voltage Law*) pada konverter DC-DC *buck* ketika kondisi saklar OFF.

3. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini akan dibagi menjadi dua yaitu, perancangan *hardware* daya dan perancangan *hardware* pembangkit PWM, untuk konverter daya (konverter *buck*) yaitu pada tahapan awal adalah menentukan spesifikasi dari konverter *buck*, kemudian dilakukan perhitungan untuk parameter komponen aktif dan komponen pasif, kemudian dilakukan perancangan pada tahap pembuatan skematik dari rangkaian konverter dan

pembangkitan PWM, dan dilakukan konversi skematik ke dalam *layout* PCB, lalu dilakukan uji coba secara parsial dan keseluruhan sistem. Pada Gambar 3 merupakan arsitektur dari keseluruhan sistem.



Gambar 3. Arsitektur Sistem Keseluruhan

Gambar 3 diatas merupakan sistem keseluruhan sistem konverter DC-DC *Buck* ini dirancang untuk menurunkan tegangan 30V menjadi 15V, konverter yang dikendalikan oleh sinyal PWM dengan mengatur besarnya *duty cycle*. Sistem ini mengintegrasikan beberapa modul esensial. Tegangan masukan 30V bersifat tetap dari sumber DC disalurkan ke konverter daya, yang mana menggunakan IGBT sebagai saklar elektronik yang dioperasikan oleh sinyal PWM dari sebuah IC pembangkitan sinyal PWM. Modul Isolator atau modul *gate driver* untuk IGBT, seperti *optocoupler*, digunakan untuk memisahkan rangkaian kendali dan daya, menjamin keamanan dan mencegah interferensi ketika terjadi gangguan pada sisi konverter daya. Pada Tabel 1 merupakan spesifikasi dari keseluruhan sistem.

Tabel 1. Spesifikasi Sistem

Variabel	Satuan
Tegangan Masukan	30 V
Tegangan Keluaran	15 V
Arus Keluaran	3.3 A
Daya Keluaran	50 Watt
Frekuensi <i>Switching</i>	20 kHz
Beban	4Ω

Pada Tabel 1 menunjukkan spesifikasi dari keseluruhan sistem yang akan di implementasikan. Tegangan masukan berasal dari catu daya DC yang bernilai tetap sebesar 30V, dan target tegangan keluaran yang ingin dicapai sebesar 15V. Untuk besarnya frekuensi *switching* pada pensaklaran IGBT ditetapkan sebesar 20kHz, daya keluaran target yang ingin dicapai sebesar 50W. Untuk mendukung terpenuhinya semua spesifikasi sistem, maka perancangan konverter daya dan modul sinyal dapat dijabarkan.

3.1 Perancangan Konverter Daya

Dalam perancangan konverter daya (konverter *buck*) yaitu melalui beberapa tahapan, pertama menentukan besarnya *duty cycle* untuk mencapai tegangan keluaran yang diinginkan, selanjutnya adalah menentukan besarnya nilai dari induktor, kapasitor, rating arus, tegangan dioda dan IGBT. Berdasarkan Tabel 1, maka besarnya tegangan keluaran[21]-[22].

$$V_o = V_s \times D \quad (7)$$

Persamaan (7) jika disusun ulang untuk mendapatkan *duty cycle* akan menjadi,

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (8)$$

Persamaan (8) menunjukkan besarnya *duty cycle* yang akan diperoleh dari perbandingan tegangan keluaran dan masukan dari konverter. Dari hasil persamaan (8) dihasilkan bahwa besarnya *duty cycle* adalah 50%. Kemudian untuk menentukan parameter induktor dapat digunakan persamaan berikut.

$$L = \left(\frac{V_s - V_o}{\Delta i_L f} \right) D \quad (9)$$

Pada persamaan (9) digunakan untuk menghitung besarnya induktor yang dipakai dalam konverter *buck*. Dimana dengan besarnya tegangan masukan (V_s) 30V, tegangan keluaran (V_o) 15V, *duty cycle* sebesar 55%, Δi_L adalah besarnya riak arus induktor sebesar 0,66A, dengan f merupakan frekuensi *switching* sebesar 20kHz, maka dari persamaan (9) diperoleh induktor sebesar 570 μH . Untuk

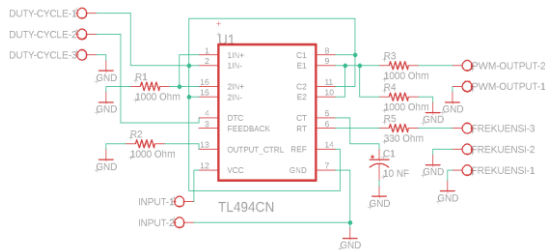
besarnya kapasitor yang digunakan pada konverter daya ini adalah.

$$C = \frac{1 - D}{8L(\Delta V_o/V_o)f^2} \quad (10)$$

Pada persamaan (10) merupakan perhitungan untuk mendapatkan parameter komponen kapasitor. Dimana ΔV_o merupakan riak tegangan disisi keluaran ditentukan sebesar 1%, dan nilai L sebesar $570 \mu H$, maka diperoleh besarnya kapasitor $50 \mu F$.

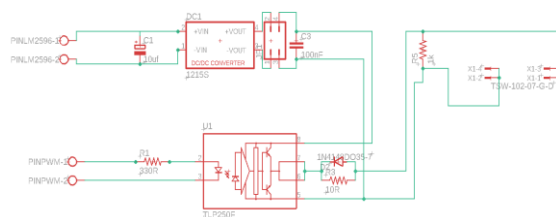
3.2 Perancangan Modul Sinyal Pembangkit

Pada perancangan modul sinyal Pembangkit ini yang terdiri dari modul pembangkit PWM dengan IC TL494 dan modul *gate driver* untuk IGBT menggunakan TLP250 dan DC-DC *isolated*. Pada Gambar 4 merupakan skematik dari kedua modul tersebut.



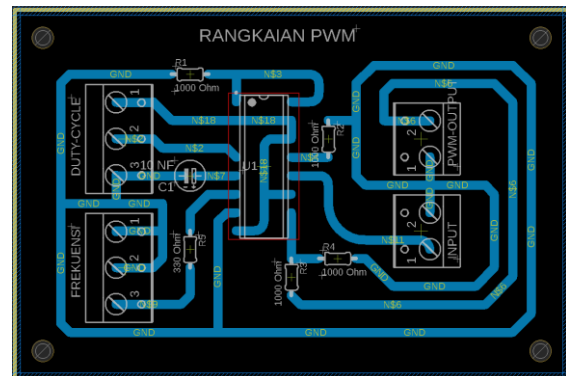
Gambar 4. Skematik Modul Pembangkit Sinyal PWM

Pada Gambar 4 merupakan skematik dari modul pembangkit PWM yang dimana terdapat terminal *input* yang difungsikan sebagai masukan tegangan kerja 10-41V untuk pembangkitan PWM, terminal *output* merupakan keluaran sinyal PWM, terminal *duty cycle* merupakan terminal untuk potensiometer yang mana pengaturan *duty cycle* dapat diatur secara *manual* melalui potensiometer tersebut dengan besarnya potensiometer sebesar $10k\Omega$, dan terminal frekuensi untuk pengaturan frekuensi dengan mengatur potensiometer sebesar $100k\Omega$. Gambar 5 merupakan skematik dari modul *gate driver* untuk IGBT.



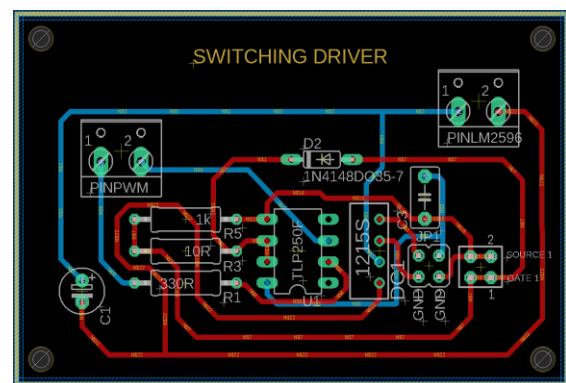
Gambar 5. Skematik Modul *gate driver*

Pada Gambar 5 merupakan skematik dari modul *gate driver* untuk IGBT yang terdiri dari komponen TLP250 dan DC-DC *isolated* tipe B1212S. Modul ini berfungsi sebagai proteksi dari gangguan kerusakan dan isolasi galvanic antara sisi konverter daya dengan pembangkitan PWM. Berikut merupakan *layout* PCB yang telah dirancang.



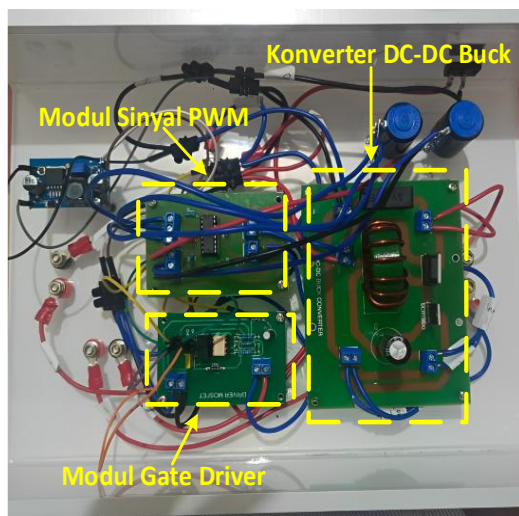
Gambar 6. *Layout* PCB Modul Pembangkit Sinyal PWM

Pada Gambar 6 merupakan *layout* PCB modul pembangkit sinyal PWM yang merupakan hasil konversi dari skematik. Untuk lebar dari setiap jalur-jalur PCB diatur sebesar 1 mm dengan penempatan jalur *bottom layer*. Untuk *layout* PCB modul *gate driver* sebagai berikut.



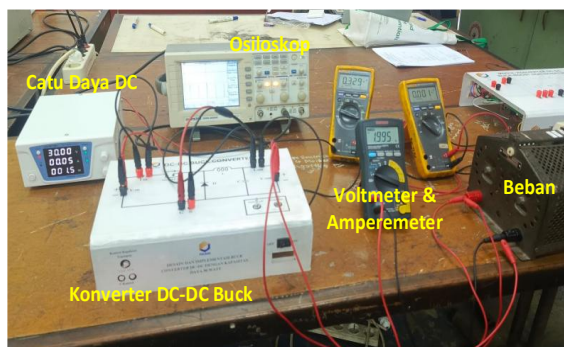
Gambar 7. *Layout* PCB Modul Pembangkit Sinyal PWM

Gambar 7 merupakan *layout* PCB modul *gate driver* yang merupakan hasil konversi dari skematik. Untuk lebar dari setiap jalur-jalur PCB diatur sebesar 0,8 mm dengan penempatan jalur *bottom layer* dan *top layer*. Pada Gambar 8 merupakan integrasi sistem secara keseluruhan.



Gambar 8. Implementasi Konverter daya dan Modul Pembangkit Sinyal

Gambar 8 merupakan hasil implementasi keseluruhan sistem yang telah terintegrasi. Untuk Gambar 9 merupakan implementasi sistem dengan beban dan catu daya.



Gambar 9. Implementasi Keseluruhan

Gambar 9 merupakan hasil implementasi keseluruhan sistem yang dimana terdapat catu daya DC, beban berupa rheostat variabel, multimeter untuk mengukur besarnya arus dan tegangan keluaran dari konverter daya, dan osiloskop untuk melihat sinyal PWM.

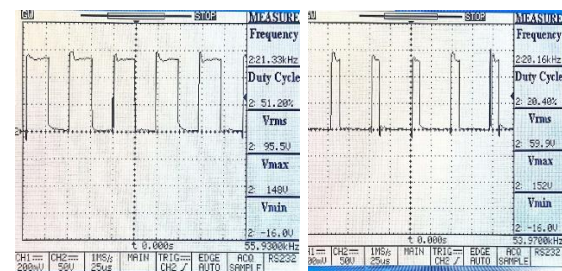
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perancangan, tahap berikutnya adalah hasil pengujian pada masing-masing modul konverter daya dan modul pembangkitan sinyal yang dilakukan secara parsial maupun terintegrasi secara keutuhan sistem. Pengujian dimulai pada modul pembangkitan sinyal, kemudian pengujian tegangan konverter daya pada variasi *duty cycle*, pengujian daya

keluaran konverter terhadap variasi *duty cycle*.

4.1 Pengujian Modul Sinyal Pembangkit

Pengujian ini untuk melihat sinyal pembangkitan gelombang PWM yang dibangkitkan oleh IC TL494 yang mana besarnya frekuensi ditetapkan adalah 20kHz dan pengaturan *duty cycle* melalui potensiometer yang tersedia pada modul pembangkit PWM tersebut.

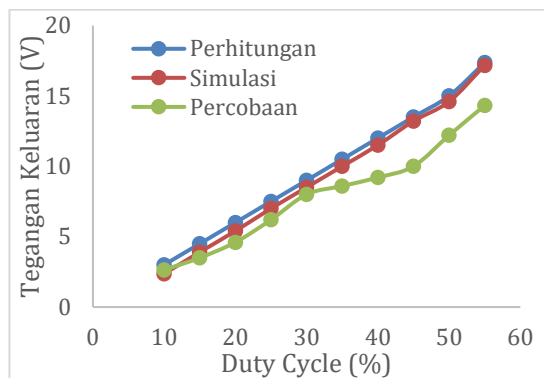


Gambar 10. Pengujian Pembangkitan PWM, (a) ketika *duty cycle* 50%, (b) ketika *duty cycle* 20%

Pada Gambar 10. merupakan gelombang PWM yang dibangkitkan oleh modul pembangkit PWM yang didalamnya terdapat IC TL494 sebagai pusat pembangkitan sinyal PWM tersebut. Terlihat pada Gambar.10 bahwa besarnya frekuensi yang ditetapkan 20kHz dengan *duty cycle* 50% dan *duty cycle* 20%. Pengaturan frekuensi dan *duty cycle* dapat diatur dengan cara memutar potensiometer. Namun dalam pengujian terintegrasi, nantinya konverter daya akan ditetapkan frekuensinya sebesar 20kHz dan *duty cycle* sebesar 50%.

4.2 Pengujian Tegangan Keluaran Konverter Terhadap Variasi *Duty Cycle*

Pengujian tegangan keluaran konverter DC-DC *buck* diimplementasikan menggunakan beban rheostat bernilai 4 Ω dengan catu daya bernilai tetap pada 30V. Pada pengujian ini, besarnya *duty cycle* divariasikan dalam rentang 10% hingga 55% dengan interval kenaikan 5% secara bertahap. Tujuan pengujian adalah untuk mengamati karakteristik tegangan keluaran konverter seiring dengan peningkatan nilai *duty cycle*.

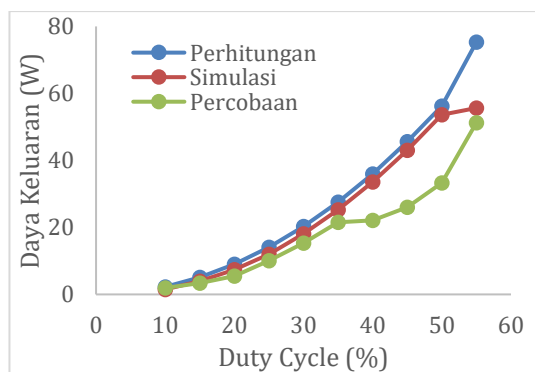


Gambar 11. Grafik Tegangan Keluaran Konverter Terhadap Perubahan *Duty cycle*

Pada Gambar 11. merupakan hubungan antara tegangan keluaran konverter DC-DC *buck* dengan variasi *duty cycle*. Hasil pengujian menunjukkan kesesuaian pola kenaikan tegangan keluaran dari *duty cycle* 10% hingga 55% pada hasil perhitungan teoritis, simulasi, dan percobaan dengan kenaikan yang linear. Pada gambar tersebut menggambarkan bahwa semakin besar nilai *duty cycle*, maka besarnya tegangan keluaran semakin besar mendekati tegangan masukannya (jika diasumsikan *duty cycle* 100%).

4.3 Pengujian Daya Keluaran Konverter Terhadap Variasi *Duty Cycle*

Pada pengujian daya keluaran konverter DC-DC *buck* diimplementasikan menggunakan rheostat bernilai 4Ω dengan catu daya DC bernilai 30V. Dalam pengujian ini, yang mana parameter *duty cycle* divariasikan dalam rentang 10% hingga 55% dengan interval kenaikan 5% secara bertahap. Tujuan pengujian adalah untuk mengamati karakteristik daya keluaran konverter seiring dengan peningkatan nilai *duty cycle*.



Gambar 12. Grafik Daya Keluaran Konverter Terhadap Perubahan *Duty Cycle*

Pada Gambar 12. menunjukkan hubungan antara daya keluaran konverter DC-DC *buck* dengan variasi *duty cycle*. Hasil pengujian memperlihatkan dengan pengaturan *duty cycle*, maka daya keluaran dari konverter semakin besar, pada grafik garis warna hijau yang merupakan data hasil percobaan menunjukkan daya keluaran tertinggi pada 51,26W, untuk hasil simulasi hasil daya keluaran tertinggi pada 55,26W. Hasil simulasi memiliki hasil tertinggi dikarenakan pada simulasi semua komponen diasumsikan ideal.

5. KESIMPULAN

Hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh beberapa Kesimpulan yaitu:

- Hasil desain dan implementasi dari konverter DC-DC *buck* yang terintegrasi dengan modul pembangkitan sinyal PWM telah berhasil di implementasikan dan telah berhasil di uji melalui beberapa tahap pengujian, yang mana konverter dapat berfungsi dengan baik yaitu dapat menurunkan tegangan sisi keluaran lebih rendah dari tegangan masukan, yaitu dengan tegangan masukan 30V tetap dapat menurunkan ke 14,3V pada sisi keluaran.
- Hasil implementasi konverter DC-DC *buck* menunjukkan bahwa dari hasil pengujian besarnya daya keluaran konverter daya mencapai diatas 45W yaitu pada 51,26W dengan melalui tahap pengujian percobaan, untuk besarnya daya keluaran pada pengujian secara simulasi konverter dapat menghasilkan daya sebesar 55,26W.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas bantuan pendanaan yang diberikan dalam pelaksanaan tugas akhir ini berdasarkan Surat Keputusan Direktur Politeknik Negeri Bandung Nomor 317 /PL1 /HK.02/2025 kelompok pembiayaan A1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. V. Yegorov, A. A. Lebedev, D. A. Degtyarev, S. F. Khafizov, and S. M. Nukhulov, "Method of Automated Generation

- of Mnemonic Diagrams for Electric Circuits for the Hmi of Scada Systems of a Digital Substation,” 2023 6th Int. Sci. Tech. Conf. Relay Prot. Autom. RPA 2023, vol. 1, pp. 1–20, 2023, doi: 10.1109/RPA59835.2023.10319819.
- [2] J. Gomez-Gil, I. San-Jose-Gonzalez, L. F. Nicolas-Alonso, and S. Alonso-Garcia, “Steering a tractor by means of an EMG-based human-machine interface,” *Sensors*, vol. 11, no. 7, pp. 7110–7126, Jul. 2011, doi: 10.3390/s110707110.
- [3] J. C. Gu, C. H. Liu, K. Y. Chou, and M. T. Yang, “Research on CBM of the intelligent substation SCADA system,” *Energies*, vol. 12, no. 20, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12203892.
- [4] M. Antonijević, S. Sučić, and H. Keserica, “Augmented reality applications for substation management by utilizing standards-compliant SCADA communication,” *Energies*, vol. 11, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.3390/en11030599.
- [5] W. Merrouche, I. Gaci, S. Ould-Amrouche, and A. Boubezari, “PWM Buck Converter used in PV Controller,” *Proc. 2019 7th Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2019*, pp. 2–7, Apr. 2019, doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078250.
- [6] M. M. Haque et al., “Three-Port Converters for Energy Conversion of PV-BES Integrated Systems - A Review,” *IEEE Access*, vol. 11, no. January, pp. 6551–6573, Jan. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3235924.
- [7] M. S. Bhaskar et al., “Survey of DC-DC non-isolated topologies for unidirectional power flow in fuel cell vehicles,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 178130–178166, Sep. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027041.
- [8] S. S. Sayed and A. M. Massoud, “Review on State-of-the-Art Unidirectional Non-Isolated Power Factor Correction Converters for Short-/Long-Distance Electric Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 11308–11340, Feb. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146410.
- [9] T. S. Chang et al., “Design and Implementation of Hybrid DC-DC Converter: A Review,” *IEEE Access*, vol. 11, no. March, pp. 30498–30514, Mar. 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3261337.
- [10] A. Costabeber, P. Mattavelli, and S. Saggini, “FPGA implementation of phase shedding with time-optimal controller in multi-phase buck converters,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 2919–2924, Feb. 2009, doi: 10.1109/IECON.2009.5415389.
- [11] M. K. Kazimierczuk, “Open-loop peak voltage feedforward control of PWM buck converter,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Fundam. Theory Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 740–746, May 2000, doi: 10.1109/81.847879.
- [12] S. Palanidoss and V. T. . S, “Experimental Analysis of Conventional Buck and Boost Converter with Integrated Dual Output Converter,” in *International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer and Optimization Techniques (ICEECOT) Experimental*, Feb. 2017, pp. 323–329.
- [13] A. Reatti, F. Corti, A. Tesi, A. Torlai, and M. K. Kazimierczuk, “Effect of parasitic components on dynamic performance of power stages of DC-DC PWM buck and boost converters in CCM,” in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2019, vol. 2019-May, no. 4, doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702520.
- [14] B. Wang, L. Xian, A. Ukil, and H. B. Gooi, “Approximate-model-based predictive current control for buck converter in CCM,” in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017*, Nov. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 5306–5311. doi: 10.1109/ECCE.2017.8096890.
- [15] A. Chadha, A. Ayachit, D. K. Saini, and M. K. Kazimierczuk, “Steady-state analysis of PWM tapped-inductor buck DC-DC converter in CCM,” in *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2018*, Mar. 2018, vol. 2018-Febru, no. 4, pp. 1–6. doi: 10.1109/TPEC.2018.8312093.
- [16] A. R. Baihaki, I. K. Wirayati, and I. B. F. Citarsa, “Optimasi Pemilihan Dan Pengaturan Parameter Untuk Memaksimalkan Efisiensi Konverter Zeta,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap (JITET)*, vol. 13, no. 1, pp. 212–219, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5561.
- [17] M. R. P. Yusrifal, Y. S. Akil, and Yusran, “Rancang Bangun Buck-Boost Converter Dengan Catu Daya Panel Surya,” *J. EKSITASI*, vol. 1, no. 1, pp. 22–27, Oct. 2022.
- [18] Parlindungan Pandapotan Marpaung, “Efisiensi Daya Sel Surya Menggunakan Konverter DC-DC Mensuplai Beban Listrik,” *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 5, pp. 896–906, Oct. 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i5.2664.
- [19] R. S. Dirgantara, A. R. Al Tahtawi, and S. M. Ilman, “Desain dan Implementasi Konverter DC-DC Buck-Boost Dengan Kendali Modulasi Lebar Pulsa,” in *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, Jul. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 12–16. doi: 10.35313/irwns.v14i1.5353.
- [20] D. W. Hart, *Power Electronics*, 1st ed. US: Mc Graw Hill, 2011.

- [22] M. H. (Muhammad H. Rashid, Power electronics : devices, circuits, and applications, Fourth Edi. US: Pearson Education Limited, 2014.