

Rancang Bangun Dc – Dc Converter Berbasis *Microcontroller* STM32F4 dan Matlab/Simulink

Hilmansyah^{1*}, Restu Mukti Utomo²

^{1,2} Program Studi Teknologi Listrik – Jurusan Teknik Elektro – Politeknik Negeri Balikpapan

*hilmansyah@poltekba.ac.id

Abstract

DC - DC converters are widely applied to renewable energy, solar cells, battery charging systems and electric cars. One method in DC - DC converter is buck converter. In a buck converter, the output voltage is smaller than the input interval. In this paper, the buck converter is designed using a MATLAB / Simulink based STM32F4 microcontroller, TLP521 as a safety connection for buck and STM32F4 converters, IGBT FGH75T65UPD as a switching component, and IR 2111 which is also used as a driver gate for IGBT. The STM32F4 Planting Program from MATLAB / Simulink uses waijung blockset. The input voltage on the designed buck converter is 35 V with an output voltage of 3.5 V to 31.5 V with a maximum switching frequency at IGBT of 100 kHz, voltage ripple is around 0.1 % and current ripple is around 10 %. Data conversion on the experimental results on the duty cycle will be announced on the output, output current and efficiency of the buck converter.

Keywords : DC – DC Converter, buck converter, STM32F4, MATLAB/Simulink

Abstrak

DC – DC converter banyak diaplikasikan pada *renewable energy*, sel surya, sistem pengisian baterai dan mobil listrik. Salah satu metode pada DC – DC converter adalah *buck converter*. Pada *buck converter*, tegangan keluaran lebih kecil dari tegangan masukannya. Pada paper ini, *buck converter* didesain menggunakan *microcontroller* STM32F4 berbasis MATLAB/Simulink, TLP521 sebagai pengaman rangkaian daya *buck converter* dan rangkaian kendali STM32F4, IGBT FGH75T65UPD sebagai komponen *switching*, dan IR 2111 yang berfungsi sebagai *gate driver* untuk IGBT. Penanaman program STM32F4 dari MATLAB/Simulink menggunakan *waijung blockset*. Tegangan masukan pada *buck converter* didesain sebesar 35 V dengan tegangan keluaran sebesar 3,5 V sampai dengan 31,5 V dengan frekuensi *switching* pada IGBT maksimum sebesar 100 kHz, *ripple* tegangan sebesar 0,1 % dan *ripple* arus sebesar 10 %. Data pada hasil eksperimen menunjukkan bahwa perubahan pada *duty cycle* akan berpengaruh pada tegangan keluaran, arus keluaran dan efisiensi dari *buck converter*.

Kata kunci : DC-DC converter, buck converter, STM32F4, MATLAB/Simulink

1. Pendahuluan

Pengembangan teknologi converter terutama DC – DC converter mengalami pengembangan yang cukup signifikan dikarenakan aplikasinya pada bidang *renewable energy*, *electric vehicle*, dan *microgrid* [1], [2], [3], [4], [5]. *Buck converter* merupakan salah satu dari DC – DC converter

yang mengkonversi tegangan DC ke tegangan DC yang lebih rendah. *Buck converter* dapat diaplikasikan pada sistem pengisian baterai pada *photovoltaic systems* [6]. Pada institusi pendidikan, *buck converter* telah dikembangkan di berbagai aspek seperti : pengembangan metode *switching*, teknik pemrograman untuk pulsa *switching*, teknik

simulasi, aplikasi di lapangan dan lain sebagainya. Pengembangan metode *switching* pada *buck converter* lebih difokuskan pada strategi pengatutan *switching* untuk *buck converter* dan *asynchronous PWM* [7], [8] sedangkan pada sistem simulasi, *buck converter* dikembangkan menggunakan *Model in The Loop (MIL)*, *Hardware in The Loop (HIL)*, *FPGA in The Loop (FIL)* dan *Processor in The Loop (PIL)* [9], [10], [11], [12].

Pada paper ini, *Pulse Width Modulation (PWM)* pada *buck converter* dibangkitkan melalui *microcontroller STM32F4* dengan menggunakan *waijung blockset* pada *MATLAB/Simulink*. Hasil pengukuran sinyal keluaran *buck converter* diukur secara manual menggunakan *oscilloscope* dan digital multimeter.

2. Metoda Penelitian

2.1. Buck Converter

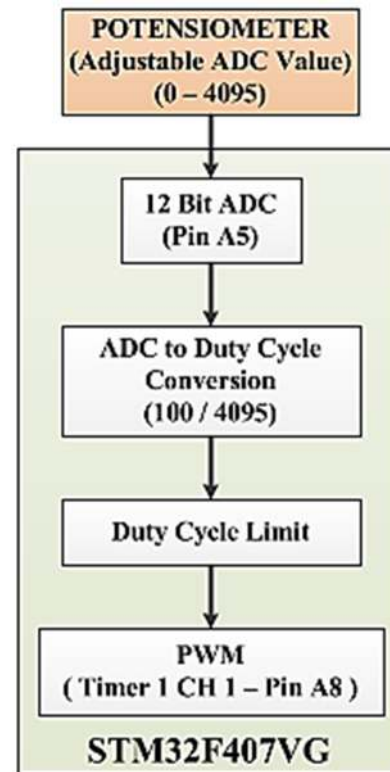
Pada penelitian ini, *buck converter* di desain untuk mengonversi tegangan sumber 10 V menjadi ± 3 V dengan nilai *duty cycle* yang bervariasi. Pada gambar 1, alur pengambilan data diawali dengan pengaturan nilai *Analog to Digital Converter (ADC)* 12 bit (0 – 4095). Pengaturan nilai ADC dilakukan dengan memutar potensiometer. Tahap selanjutnya adalah nilai 12 bit ADC akan dirubah menjadi nilai prosentase (0 % – 100%) sesuai dengan nilai *duty cycle* pada PWM.

Nilai *duty cycle* yang dimiliki oleh PWM dibatasi untuk rentang tegangan tertentu. PWM pada *STM32F4* dibangkitkan melalui timer 1 CH 1. Data yang digunakan pada paper ini meliputi data perhitungan teori dan praktikum. Data teori didapatkan melalui perhitungan – perhitungan teoritis pada buku, paper dan referensi pustaka ilmiah. Data praktikum didapatkan melalui percobaan di laboratorium.

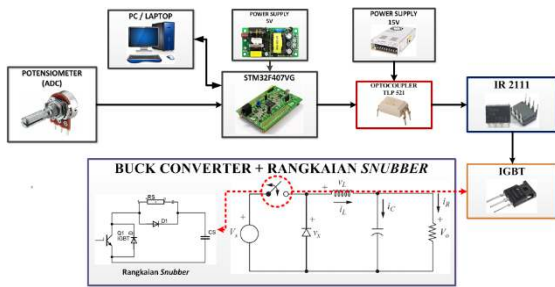
Pada gambar 2, menunjukkan desain dari rangkaian *buck converter* yang digunakan pada pengujian praktikum. Pada tahap awal, *STM32F4* ditanamkan program dari PC menggunakan *MATLAB/Simulink* dan *waijung blockset*. Tegangan *supply* untuk *STM32F4* menggunakan *power supply* DC 5V.

Potensiometer digunakan untuk memberikan data referensi berupa pembacaan nilai ADC oleh pin ADC (pin A5). ADC yang digunakan pada paper ini adalah ADC 12 bit dengan resolusi sebesar 4096 (0 – 4095).

Pembacaan nilai ADC dikonversi menjadi *duty cycle* pada PWM. PWM pada paper ini dibangkitkan menggunakan timer 1 channel 1 pada pin A8 dari *STM32F4*. IC *TLP 521* merupakan IC *optocoupler* yang berfungsi sebagai pengaman dan perubah nilai tegangan maksimum PWM dari 3 V menjadi 12 V. *IR 2111* merupakan IC *driver* untuk MOSFET dan IGBT. *IR 2111* mendapatkan tegangan masukan dari *TLP521* dan diteruskan sebagai sinyal *switching* untuk IGBT pada rangkaian *buck converter*.



Gambar 1. Pengaturan sinyal PWM



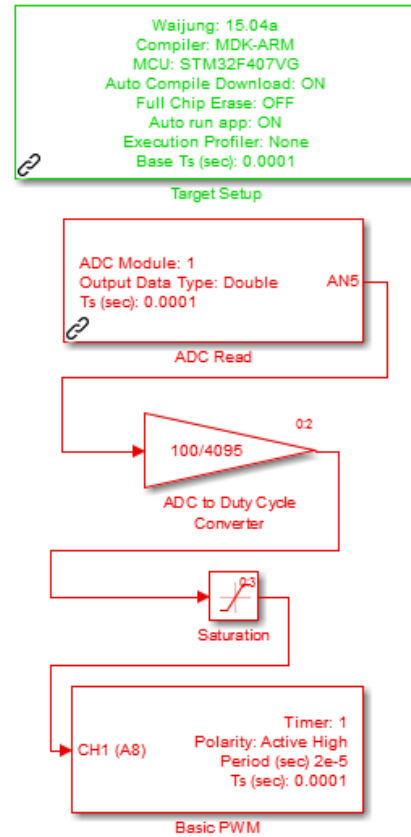
Gambar 2. Design sistem buck converter

2.2. STM32F4 pada MATLAB/Simulink

Pembuatan dan penanaman program pada STM32F4 dapat dilakukan dalam beberapa cara, seperti CoCoX CoIDE, Keil uVision sampai pemrograman yang dapat digunakan untuk menerapkan teknologi simulasi seperti HIL dan FIL. Salah satu cara penanaman program STM32F4 yang berbasis HIL adalah dengan menggunakan MATLAB/Simulink yang diintegrasikan dengan *waijung blockshet* dan *ST-Link Utility*.

3. Hasil Penelitian

Rancangan buck converter ini ditunjukkan oleh gambar 2. Sumber tegangan menggunakan dua buah *adjustable power supply* 30V / 3A yang dirangkai secara paralel untuk mendapatkan tegangan masukan 35 V, komponen *switching* menggunakan IGBT tipe FGH 75T65 UPD dan dioda yang digunakan adalah RURG 8060. Perhitungan nilai masing – masing komponen berdasarkan persamaan (1) – (4) [13].



Gambar 3. Pengaturan PWM pada STM32F4 menggunakan *waijung blockset* – MATLAB/Simulink

Tabel 1. Parameter *buck converter*

| Parameter | Nilai | Satuan |
|----------------------|----------|----------|
| Vs | 35 | V |
| Vo (max) | 31.5 | V |
| Vo (min) | 3.5 | V |
| Io | 5 | A |
| F / T (switching) | 100 / 10 | kHz / μs |
| Ripple V | 0.1 | % |
| Ripple I | 10 | % |
| Induktor | 126 | μH |
| Capacitor | 11 | μF |
| Resistor | 12.6 | Ω |

Perhitungan tegangan keluaran (V_o), tegangan masukan (V_s) dan *duty cycle* (D) dinyatakan dengan persamaan (1) [14]. Pada paper ini, tegangan V_s sebesar 35 V dengan V_o sebesar 3,5 V sampai 31,5 V dengan *duty cycle* sebesar 25 % sampai 75 %.

$$V_o = V_s D \tag{1}$$

Perhitungan frekuensi *buck converter* ditunjukkan oleh (2). Dimana L adalah nilai

induktor, Δi_L adalah ripple arus pada induktor (10% dari arus keluaran (I_o) atau sebesar 0.5 A) dan f adalah frekuensi switching (Hz). Berdasarkan persamaan (2), nilai induktor yang dibutuhkan adalah 126 μ H.

$$L = \left(\frac{V_s - V_o}{\Delta i_L f} \right) D \tag{2}$$

Perhitungan nilai resistor pada rangkaian buck converter pada gambar 2 ditunjukkan oleh persamaan (3). Dimana L_{min} merupakan nilai induktor minimal yang digunakan dan R adalah nilai resistor dalam Ω .

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{3}$$

Perhitungan nilai capacitor yang digunakan mengikuti persamaan (4).

$$C = \frac{1-D}{8L(\Delta V_o/V_o)f^2} \tag{4}$$

Desain rangkaian snubber pada buck converter mengikuti persamaan (5) untuk parameter R_s dan persamaan (6) untuk parameter C_s .

$$C_s = \frac{I_{on} \times t_{fall}}{2 \times V_{off}} \tag{5}$$

dimana $I_{on} = I_o$ dan V_{off} adalah tegangan offset.

$$R_s = \frac{D \times T}{2 \times C_s} \tag{6}$$

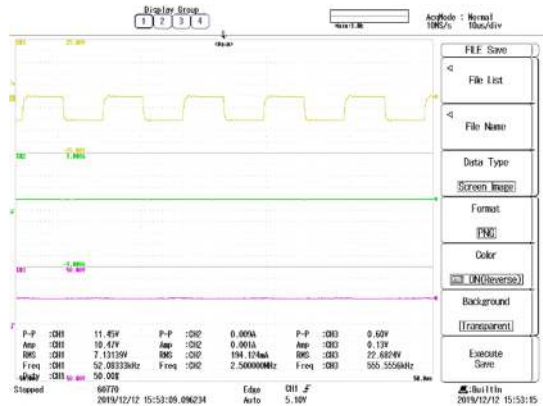
Pengujian secara eksperimen pada buck converter dilakukan dengan mengatur frekuensi switching sebesar 50 kHz, 55 kHz, 60 kHz, 65 kHz dan 70 kHz dan mengatur duty cycle sebesar 25 % sampai 75 % dengan beda sebesar 5 %. Parameter pengamatan terdiri atas tegangan masukan, arus masukan, arus keluaran, tegangan keluaran, daya masukan, daya keluaran dan efisiensi. Pengukuran daya masukan (p_{in}) mengikuti persamaan (7) sedangkan pengukuran daya keluaran (P_{out}) mengikuti persamaan (8).

Berdasarkan daya masukan dan daya keluaran, perhitungan efisiensi ditunjukkan oleh persamaan (9).

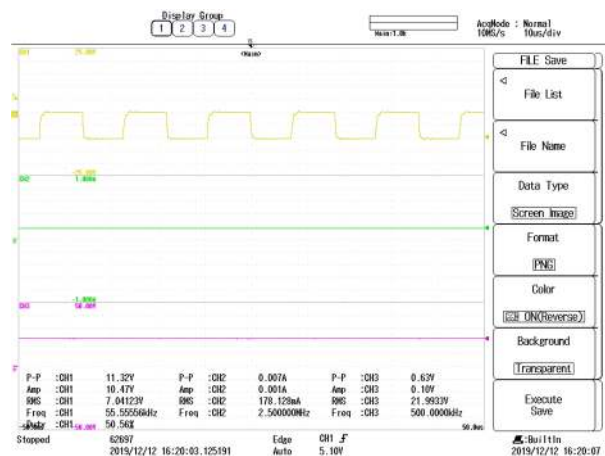
$$P_{in} = V_s \times I_s \tag{7}$$

$$P_{out} = V_o \times I_o \tag{8}$$

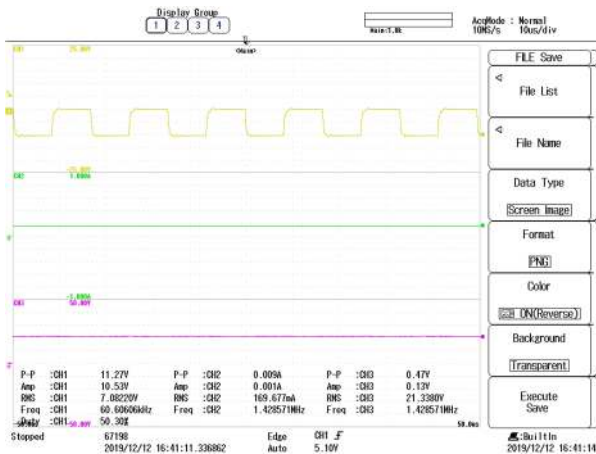
$$effisiensi = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{9}$$



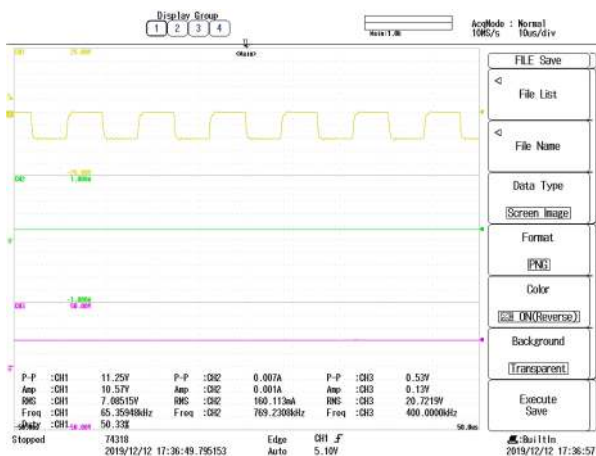
Gambar 4. Duty cycle, arus keluaran dan tegangan keluaran pada frekuensi 50 kHz dan duty cycle 50%



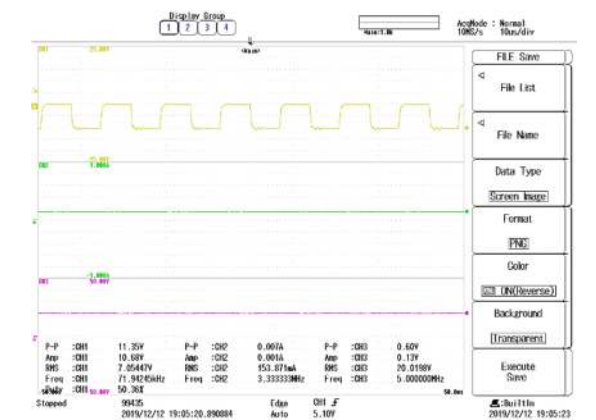
Gambar 5. Duty cycle, arus keluaran dan tegangan keluaran pada frekuensi 55 kHz dan duty cycle 50%



Gambar 6. *Duty cycle*, arus keluaran dan tegangan keluaran pada frekuensi 60 kHz dan *duty cycle* 50%



Gambar 7. *Duty cycle*, arus keluaran dan tegangan keluaran pada frekuensi 65 kHz dan *duty cycle* 50%

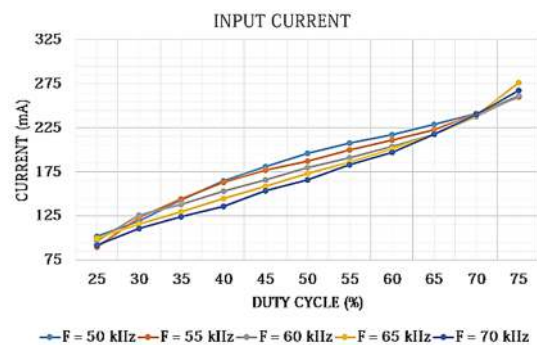


Gambar 8. *Duty cycle*, arus keluaran dan tegangan keluaran pada frekuensi 70 kHz dan *duty cycle* 50%

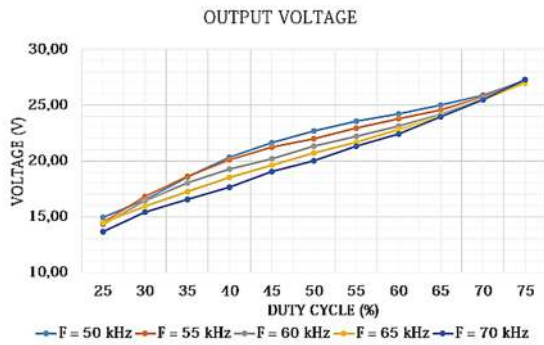
Pengukuran *duty cycle*, arus keluaran dan tegangan keluaran dari buck converter ditunjukkan oleh gambar 4 – 8. Pada gambar 4, frekuensi *switching* yang digunakan sebesar 50 kHz dengan *duty cycle* 50 %. *Buck converter*

dengan frekuensi *switching* 55 kHz dan *duty cycle* 50 % ditunjukkan oleh gambar 5. Gambar 6 menunjukkan *buck converter* dengan frekuensi *switching* sebesar 60 kHz dengan *duty cycle* 50 %. *Buck converter* dengan frekuensi *switching* 65 kHz dan *duty cycle* 50 % ditunjukkan oleh gambar 7, sedangkan gambar 8 menunjukkan *buck converter* dengan frekuensi *switching* 70 kHz dengan *duty cycle* 50 %.

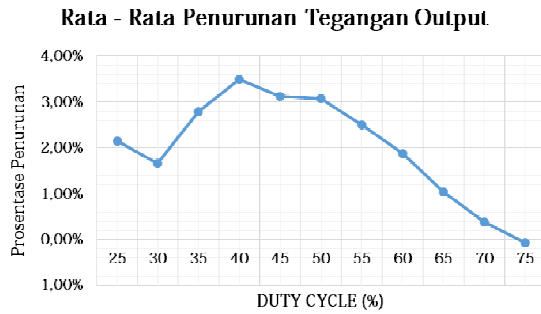
Pada gambar 9, respon arus masukan berbanding lurus dengan perubahan *duty cycle*. Pada *duty cycle* di bawah 70 %, besarnya arus masukan sangatlah dipengaruhi oleh perubahan frekuensi *switching*. Namun, untuk *duty cycle* diatas 70 %, perubahan frekuensi *switching* memberikan pengaruh yang tidak signifikan terhadap arus masukan. Respon tegangan keluaran *buck converter* pada variabel frekuensi *switching* dan *duty cycle* ditunjukkan gambar 10. Rata – rata penurunan tegangan pada rentang frekuensi *switching* 50 kHz – 70 kHz variabel *duty cycle* ditunjukkan oleh gambar 11. Berdasarkan data tersebut, prosentase penurunan terbesar pada *duty cycle* 40 % dengan nilai 3,50%. Respon arus keluaran *buck converter* ditunjukkan pada gambar 12. Persentase penurunan rata – rata terbesar pada saat *duty cycle* 50 % dengan persentase penurunan rata – rata sebesar 5.75 %.



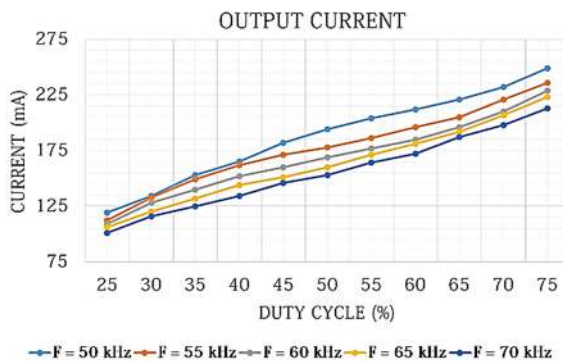
Gambar 9. Respon arus masukan pada variabel frekuensi



Gambar 10. Respon tegangan keluaran pada variabel frekuensi



Gambar 11. Rata – rata penurunan tegangan keluaran



Gambar 12. Respon arus keluaran pada variabel frekuensi

Tabel 2. Hasil pengujian rangkaian buck converter dengan frekuensi 50 kHz

| F (kHz) | D (%) | Pin (watt) | Pout (watt) | Eff (%) |
|---------|-------|------------|-------------|---------|
| 50 | 25 | 3,57 | 1,77 | 49,70 |
| | 30 | 4,17 | 2,21 | 53,15 |
| | 35 | 5,01 | 2,84 | 56,74 |
| | 40 | 5,78 | 3,36 | 58,11 |
| | 45 | 6,34 | 3,93 | 62,11 |
| | 50 | 6,86 | 4,40 | 64,14 |
| | 55 | 7,28 | 4,81 | 66,08 |
| 60 | 60 | 7,60 | 5,13 | 67,58 |
| | 65 | 8,02 | 5,53 | 68,96 |

| | | | |
|----|------|------|-------|
| 70 | 8,44 | 6,00 | 71,18 |
| 75 | 9,14 | 6,78 | 74,20 |

Tabel 3. Hasil pengujian rangkaian buck converter dengan frekuensi 55 kHz

| F (kHz) | D (%) | Pin (watt) | Pout (watt) | Eff (%) |
|---------|-------|------------|-------------|---------|
| 55 | 25 | 3,15 | 1,62 | 51,52 |
| | 30 | 4,31 | 2,24 | 52,00 |
| | 35 | 5,04 | 2,77 | 54,96 |
| | 40 | 5,71 | 3,26 | 57,10 |
| | 45 | 6,20 | 3,63 | 58,63 |
| | 50 | 6,55 | 3,91 | 59,80 |
| | 55 | 7,00 | 4,27 | 61,01 |
| | 60 | 7,39 | 4,66 | 63,09 |
| | 65 | 7,81 | 5,04 | 64,59 |
| | 70 | 8,44 | 5,70 | 67,54 |
| 75 | 9,10 | 6,41 | 70,41 | |

Tabel 4. Hasil pengujian rangkaian buck converter dengan frekuensi 60 kHz

| F (kHz) | D (%) | Pin (watt) | Pout (watt) | Eff (%) |
|---------|-------|------------|-------------|---------|
| 60 | 25 | 3,40 | 1,56 | 45,91 |
| | 30 | 4,41 | 2,10 | 47,69 |
| | 35 | 4,83 | 2,52 | 52,23 |
| | 40 | 5,36 | 2,93 | 54,75 |
| | 45 | 5,81 | 3,23 | 55,66 |
| | 50 | 6,30 | 3,61 | 57,25 |
| | 55 | 6,69 | 3,93 | 58,75 |
| | 60 | 7,14 | 4,28 | 59,90 |
| | 65 | 7,63 | 4,74 | 62,09 |
| | 70 | 8,33 | 5,37 | 64,46 |
| 75 | 9,14 | 6,22 | 68,04 | |

Tabel 5. Hasil pengujian rangkaian buck converter dengan frekuensi 65 kHz

| F (kHz) | D (%) | Pin (watt) | Pout (watt) | Eff (%) |
|---------|-------|------------|-------------|---------|
| 65 | 25 | 3,50 | 1,53 | 43,70 |
| | 30 | 4,06 | 1,91 | 47,14 |
| | 35 | 4,55 | 2,28 | 50,01 |
| | 40 | 5,08 | 2,67 | 52,58 |
| | 45 | 5,57 | 2,96 | 53,18 |
| | 50 | 6,06 | 3,32 | 54,75 |
| | 55 | 6,51 | 3,71 | 57,00 |
| | 60 | 7,04 | 4,13 | 58,69 |
| | 65 | 7,63 | 4,61 | 60,39 |

| | | | |
|----|------|------|-------|
| 70 | 8,37 | 5,28 | 63,13 |
| 75 | 9,66 | 6,01 | 62,26 |

Tabel 6. Hasil pengujian rangkaian *buck converter* dengan frekuensi 70 kHz

| F (kHz) | D (%) | Pin (watt) | Pout (watt) | Eff (%) |
|---------|-------|------------|-------------|---------|
| 70 | 25 | 3,22 | 1,38 | 42,82 |
| | 30 | 3,89 | 1,79 | 46,07 |
| | 35 | 4,34 | 2,07 | 47,70 |
| | 40 | 4,76 | 2,36 | 49,63 |
| | 45 | 5,39 | 2,78 | 51,57 |
| | 50 | 5,81 | 3,06 | 52,72 |
| | 55 | 6,41 | 3,49 | 54,56 |
| | 60 | 6,90 | 3,86 | 55,98 |
| | 65 | 7,63 | 4,48 | 58,77 |
| | 70 | 8,40 | 5,05 | 60,08 |
| 75 | 9,35 | 5,81 | 62,20 | |

Data pengujian rangkaian *buck converter* untuk parameter pengukuran daya masukan, daya keluaran dan efisiensi pada masing – masing *duty cycle* ditunjukkan oleh tabel 2, 3, 4, 5 dan 6 pada frekuensi *switching* 50 kHz, 55 kHz, 60 kHz, 65 kHz dan 70 kHz. Berdasarkan data eksperimen, perubahan *duty cycle* berbanding lurus dengan perubahan daya masukan, daya keluaran dan efisiensi. sedangkan, perubahan frekuensi *switching* berbanding terbalik dengan tegangan keluaran.

4. Kesimpulan

Pada paper ini, *buck converter* didesain berbasis STM32F4 dan MATLAB/Simulink. Tegangan masukan pada *buck converter* didesain sebesar 35 V. dengan tegangan keluaran sebesar 3,5 V - 31,5 V, frekuensi *switching* maksimum sebesar 100 kHz, ripple tegangan sebesar 0,1 % dan ripple arus sebesar 10 %. Berdasarkan data eksperimen, *duty cycle* berbanding lurus dengan tegangan keluaran, arus keluaran, daya keluaran dan efisiensi.

5. Saran

Buck converter pada paper ini dapat dikembangkan dengan menambahkan dan mengembangkan konsep HIL untuk respon tegangan keluaran, arus keluaran, daya

keluaran dan efisiensi. Pengembangan juga dapat dilakukan dengan menambahkan kendali konvensional PID dan *artificial intelligent*. *Buck converter* dapat diaplikasikan pada pengaturan kecepatan dari motor DC. Pada segi sumber tegangan, dapat dikembangkan dengan memanfaatkan *solar cell* yang terintegrasi dengan jala – jala Perusahaan Listrik Negara (PLN).

6. Daftar Pustaka

- [1] S. Sivakumar, M. J. Sathik, P. Manoj dan G. Sundararajan, “An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1475 - 1485, 2016.
- [2] D. Spiera, G. Oggier dan S. d. Silva, “Dynamic modeling and analysis of the bidirectional DC-DC boost-buck converter for renewable energy applications,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, p. 133–145, 2019.
- [3] J. R. K. dan S. Natarajan, “Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications - A review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 36, pp. 17387-17408, 2018.
- [4] H. Wang, A. Gaillard dan D. Hissel, “A review of DC/DC converter-based electrochemical impedance spectroscopy for fuel cell electric vehicles,” *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 124 - 138, 2019.
- [5] T. Youssef, M. Elsied, A. Salemd, A. Ouakour, H. Gualousc dan O. Mohammeda, “Carrier extraction based synchronization scheme for distributed DC - DC converters in DC - Microgrid,” *Electric Power Systems Research*, pp. 114 - 122, 2018.
- [6] J. López, S. S. Jr., P. Donoso, L. Morais, P. Cortizo dan M. Severo, “Digital control strategy for a buck converter operating as a battery charger for stand-alone photovoltaic

- systems,” *Solar Energy*, pp. 171 - 187, 2016.
- [7] G. Ma, B. Wang, D. Xu dan L. Zhang, “Switching control strategy based on non-singular terminal sliding mode for buck converter in auxiliary energy source,” dalam *Energy Procedia*, Tianjin, 2018.
- [8] R. Inanlou, R. Shokri, O. Shoaie dan A. Baschiroto, “A Buck Converter Based On Dual Mode Asynchronous Pulse Width,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2019.
- [9] P.-Y. Kuo dan Q.-J. Zhuang, “Analyze Buck Converter with PWM Feedback Circuit Using Matlab Simulink tool,” dalam *IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, Taichung, 2018.
- [10] G. A. Ramos, M. E. Hernández dan M. D. Trujillo, “Function Test by HIL for DC-DC converters type: Buck, Boost and Buck-Boost,” dalam *International Workshop on Power Electronics & Power Quality Application*, Bogota, 2017.
- [11] M. Truntic dan M. Milanovic, “Voltage and Current-Mode Control for a Buck-Converter based on Measured Integral Values of Voltage and Current Implemented in FPGA,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 29, no. 12, pp. 6686 - 6699, 2014.
- [12] J. Mina, Z. Flores, E. Lopez, A. Perez dan J. -H. Calleja, “Processor-in-the-loop and hardware-in-the-loop simulation of electric systems based in FPGA,” dalam *13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Guanajuato, 2016.
- [13] D. -I. P. Ballesteros, P. D.-I. C. Bohn dan P. D.-I. C. Rembe, *Rapid Control Prototyping Using an STM32 Microcontroller*, Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal, 2015.
- [14] D. W.Hart, *Power Electronics*, New York: McGraw-Hill, 2011.