

Desain dan Simulasi *Bidirectional DC-DC Converter* untuk Penyimpanan Energi pada Sistem Fotovoltaik

(*Design and Simulation of Bidirectional DC-DC Converter for Energy Storage in Photovoltaic System*)

Armadilla Sukma Pratiwi¹, Syechu Dwitya Nugraha², Epyk Sunarno³

Abstract—In this paper, a bidirectional DC-DC converter for energy storage in the photovoltaic system has been designed and simulated on MATLAB Simulink. The bidirectional DC-DC converter can work in two modes, charge and discharge mode. The energy storage system will work to store energy into the battery when the power generation capacity is higher than load demand. Then, the energy stored in the battery will be used for the DC bus supply when the power generation capacity is lower than the load demand. To get a constant voltage on the high voltage side (DC bus voltage) and a constant current on the low voltage side (charging current), a PI controller is used. Simulations were carried out with 1,000 W/m² irradiation to get the power generation higher than the load demand (charge mode) and 200 W/m² irradiation to get the power generation lower than the load demand (discharge mode) with constant temperature of 25 °C. The test result shows that a bidirectional DC-DC converter can work in charge and discharge modes, which is shown by battery charging currents and the increase or decrease in battery voltage.

Intisari—Dalam makalah ini didesain dan disimulasikan *bidirectional DC-DC converter* untuk penyimpanan energi pada sistem fotovoltaik menggunakan Simulink MATLAB. *Bidirectional DC-DC converter* dapat bekerja dalam dua mode, yaitu mode pengisian dan mode pengosongan. Sistem penyimpanan energi bekerja untuk menyimpan energi ke dalam baterai ketika kapasitas pembangkitan energi lebih tinggi dari permintaan beban. Selanjutnya, energi yang disimpan dalam baterai akan digunakan untuk suplai bus DC ketika kapasitas pembangkitan energi lebih rendah dari permintaan beban. Untuk memperoleh tegangan konstan di sisi tegangan tinggi (tegangan bus DC) dan arus konstan di sisi tegangan rendah (arus pengisian), digunakan kontrol PI. Pengujian simulasi dilakukan dengan iradiasi 1.000 W/m² untuk memperoleh kondisi energi pembangkitan lebih tinggi dari permintaan beban (mode pengisian) dan iradiasi 200 W/m² untuk memperoleh kondisi energi pembangkitan lebih rendah dari permintaan beban (mode pengosongan), dengan temperatur tetap, yaitu 25 °C. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *bidirectional DC-DC converter* dapat bekerja dalam mode pengisian maupun mode pengosongan, yang ditunjukkan dengan arus pengisian baterai dan kenaikan atau penurunan tegangan baterai.

Kata Kunci—*Bidirectional DC-DC Converter*, Fotovoltaik, Penyimpanan Energi, Kontrol PI, Simulink MATLAB.

^{1,2,3} Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111 (telp: 031-5947280; fax: 031-5946114; e-mail: ¹armadillasukma@gmail.com, ²syechu@pens.ac.id, ³epyk@pens.ac.id)

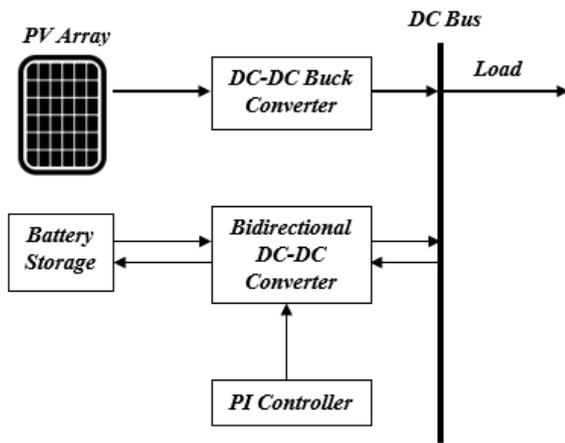
I. PENDAHULUAN

Sumber energi terbarukan, seperti air, angin, energi laut, biomassa, dan matahari, dapat menjadi energi alternatif untuk menggantikan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang semakin terbatas jumlahnya [1]. Banyak negara yang sudah memanfaatkan sumber energi terbarukan sebagai pembangkit listrik karena memperhitungkan dampak perubahan iklim yang dapat diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil. Selain itu, pertumbuhan teknologi energi terbarukan juga didorong oleh aspek harga bahan bakar fosil yang semakin meningkat dan tingkat emisi CO₂ yang dihasilkan [2].

Sistem fotovoltaik (*photovoltaic/PV*) adalah salah satu sumber energi terbarukan yang paling populer. PV mengonversi tenaga surya menjadi tenaga listrik secara langsung. Ada banyak jenis teknologi yang digunakan untuk menghasilkan listrik berdasarkan prinsip PV. Pada saat ini silikon kristal adalah teknologi utama yang digunakan secara komersial, tetapi ada teknologi lainnya di bawah penelitian intensif untuk menghasilkan sel surya yang lebih efisien [3].

Terlepas dari keuntungan konversi energi surya menjadi listrik yang berlimpah, tidak habis-habisnya, dan bersih, sistem PV juga memiliki kekurangan, yaitu tidak memiliki keandalan dalam menangkap energi surya. Selain karena rendahnya daya iluminasi matahari per meter persegi, sinar matahari juga bersifat intermiten, karena dipengaruhi oleh waktu, iklim, polusi, dan musim [4]. Oleh karena itu, sistem PV memerlukan teknologi yang dapat meningkatkan keandalan sistem, salah satunya dengan menyediakan teknologi penyimpanan energi listrik dari sumber energi cadangan yang lain [5]. Hal ini dapat mengatasi kondisi saat energi surya tidak dapat memenuhi permintaan beban. Teknologi ini akan membantu menyuplai beban ketika permintaan energi lebih tinggi dari yang dihasilkan. Begitupun sebaliknya, teknologi ini akan menyimpan energi ketika permintaan beban lebih rendah daripada energi yang dihasilkan.

Bidirectional DC-DC converter yang dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpan energi dapat menjadi pilihan untuk mengatasi masalah mengenai penyimpanan energi pada sistem PV. Sistem penyimpanan energi menggunakan *bidirectional DC-DC converter* ini sudah banyak dikembangkan [6]-[9]. Sistem penyimpanan energi bekerja untuk menyimpan energi ke dalam baterai ketika kapasitas pembangkitan energi lebih tinggi dari permintaan beban dan energi yang disimpan dalam baterai akan dikeluarkan untuk digunakan ketika kapasitas pembangkitan lebih rendah dari permintaan beban. *Bidirectional DC-DC converter* ini mempunyai dua mode kerja,



Gbr. 1 Diagram blok sistem.

yaitu mode pengisian baterai, yang digunakan untuk menyimpan energi surya saat pembangkitan lebih tinggi dari permintaan beban, dan mode pengosongan baterai, yang dapat digunakan sebagai suplai beban ketika energi surya tidak dapat memenuhi permintaan beban. Topologi *bidirectional DC-DC converter* yang paling sederhana dan banyak digunakan adalah jenis *non-isolated bidirectional DC-DC converter* [6]-[10].

Pada makalah ini dibahas desain dan simulasi *non-isolated bidirectional DC-DC converter* menggunakan *bidirectional buck-boost DC-DC converter* yang bekerja pada mode *buck* (pengisian baterai) dan mode *boost* (pengosongan baterai) sebagai sistem penyimpanan energi menggunakan baterai pada sistem PV. Diagram blok sistem ditampilkan pada Gbr. 1 dan diimplementasikan dalam Simulink MATLAB.

II. KONFIGURASI SISTEM

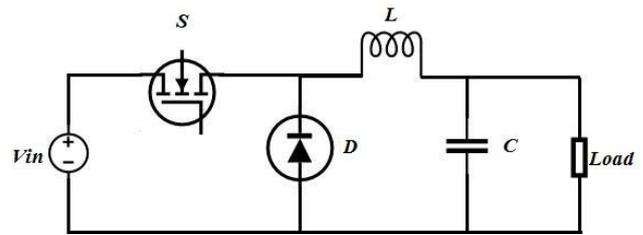
Untuk merancang sebuah sistem penyimpanan energi pada sistem PV menggunakan *bidirectional DC-DC converter*, diperlukan beberapa komponen berikut ini.

A. Fotovoltaik (PV)

PV adalah bidang teknologi dan penelitian yang terkait dengan perangkat yang secara langsung mengonversi sinar matahari menjadi listrik. Sel surya adalah unsur dasar dari teknologi PV. Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon. Satu dari sifat semikonduktor yang paling bermanfaat adalah konduktivitasnya dapat dengan mudah dimodifikasi dengan memasukkan campuran ke dalam kisi kristalnya. Cara kerja dari sel surya ini adalah ketika foton cahaya jatuh pada sel, foton memindahkan energi ke pembawa muatan. Medan listrik yang melintasi persimpangan memisahkan pembawa muatan positif (*hole*) yang dihasilkan cahaya dari pasangan negatifnya (elektron). Dengan cara ini, arus listrik diekstraksi setelah rangkaian ditutup pada beban eksternal [11]. Parameter panel surya yang digunakan pada sistem ini disajikan pada Tabel I.

B. Buck Converter

Buck converter merupakan jenis konverter DC-DC *step down* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan DC. Konverter ini digunakan untuk mendapatkan tegangan DC



Gbr. 2 Buck converter.

TABEL I
PARAMETER PANEL SURYA

Parameter	Nilai
Maximum Power (P_{max})	100 WP
Voltage at P_{max} (V_{max})	18 V
Current at P_{max} (I_{mp})	5,56 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22 V
Short Circuit Current (I_{sc})	6,06 A
Series Connected	2

TABEL II
PARAMETER BUCK CONVERTER

Parameter	Nilai
Frekuensi Switching (f_s)	40 kHz
Duty Cycle (D)	0,57
Induktor (L)	131,9 μ H
Kapasitor (C)	330 μ F

yang lebih rendah daripada masukannya [12]. Rangkaian *buck converter* diperlihatkan pada Gbr. 2.

Buck converter beroperasi dalam dua kondisi, yaitu ketika saklar tertutup dan ketika saklar terbuka. Pada saat saklar tertutup, diode berada dalam kondisi *reverse-biased*, saklar mengalirkan arus dari sumber tegangan menuju induktor, kemudian melalui kapasitor dan beban, lalu kembali ke sumber. Pada saat saklar terbuka, diode berada dalam kondisi *forward-biased*, arus yang tersimpan pada induktor mengalir ke beban, kemudian menuju diode *freewheeling*, lalu kembali ke induktor [12]. Hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dengan tegangan masukan (V_{in}) pada *buck converter* dapat dinyatakan dengan (1).

$$V_o = V_{in} \times D \quad (1)$$

Sedangkan nilai induktor minimal (L_{min}) dan kapasitor keluaran (C) pada *buck converter* dinyatakan dengan (2) dan (3).

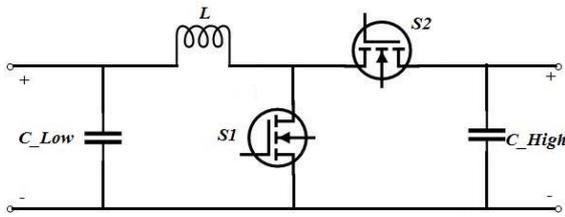
$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f_s} \quad (2)$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_o} = \frac{\Delta i_L \cdot T}{8\Delta V_o} = \frac{\Delta i_L}{8 \times f_s \times \Delta V_o} \quad (3)$$

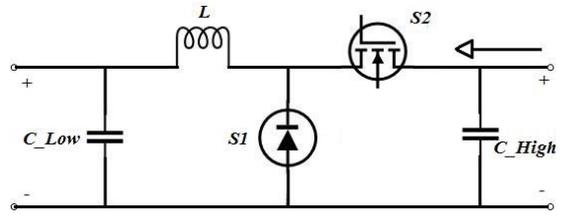
Agar *buck converter* dapat bekerja pada kondisi mode konduksi kontinu (*Continuous Conduction Mode/CCM*), nilai induktor dipilih lebih besar daripada nilai induktor minimal ($L > L_{min}$) [12], sehingga pada sistem ini diperoleh parameter *buck converter* seperti ditunjukkan pada Tabel II.

C. Bidirectional DC-DC Converter

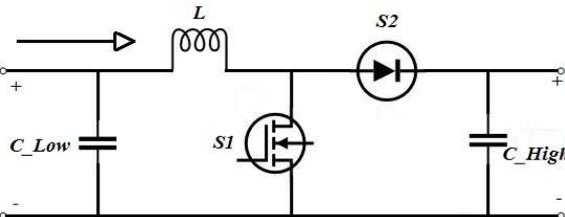
Bidirectional DC-DC converter saat ini menerima banyak perhatian karena meningkatnya kebutuhan sistem dengan



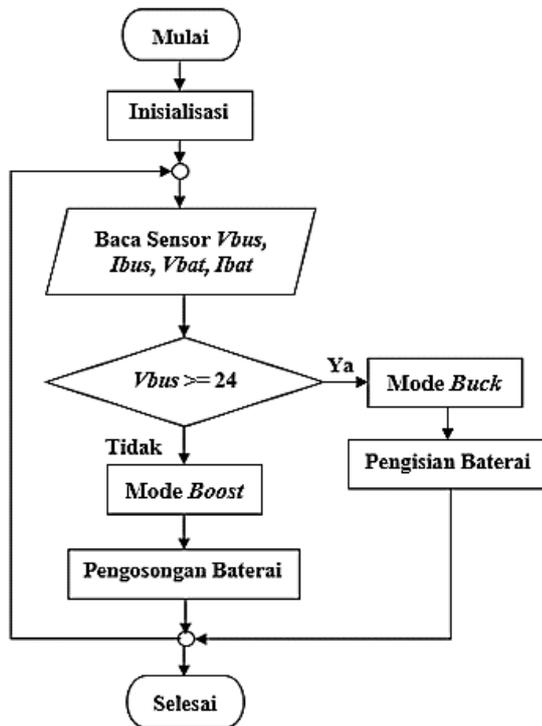
Gbr. 3 Bidirectional buck-boost DC-DC converter.



Gbr. 4 Bidirectional DC-DC converter mode buck.

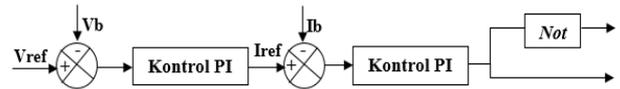


Gbr. 5 Bidirectional DC-DC converter mode boost.

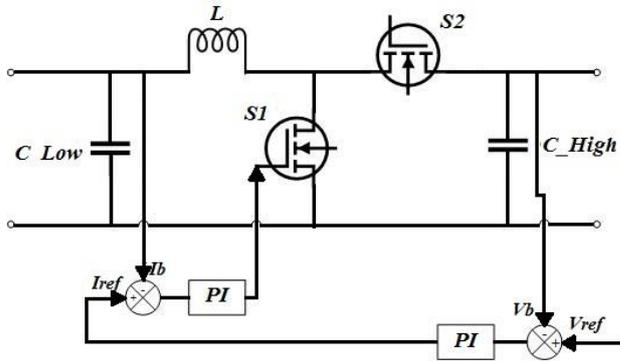


Gbr. 6 Diagram alir pemilihan mode.

kemampuan perpidahan energi dua arah antara dua bus DC, salah satunya pada sistem energi terbarukan. Konverter DC-DC dasar seperti buck converter dan boost converter tidak memiliki kemampuan aliran daya dua arah. Keterbatasan ini disebabkan oleh adanya diode dalam rangkaian yang mencegah aliran arus



Gbr. 7 Diagram blok kontrol PI.



Gbr. 8 Kontrol ganda tegangan dan arus pada bidirectional DC-DC converter.

TABEL III
PARAMETER BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER

Parameter	Nilai
Frekuensi Switching (f_s)	40 kHz
Induktor (L)	145,9 μ H
Kapasitor sisi tegangan rendah (C_{Low})	390,6 μ F
Kapasitor sisi tegangan tinggi (C_{High})	1.000 μ F

balik [10]. Rangkaian bidirectional DC-DC converter diperlihatkan pada Gbr. 3.

1) Mode Buck: Pada mode buck, bidirectional DC-DC converter bekerja seperti buck converter pada umumnya [13], [14]. Tegangan keluaran memiliki nilai yang lebih kecil daripada tegangan masukan. Gambar rangkaian untuk mode buck ditunjukkan pada Gbr. 4. Hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dengan tegangan masukan (V_{in}) pada mode buck dapat dinyatakan dengan (1), sedangkan nilai kapasitor sisi tegangan rendah (C_{Low}) dapat dinyatakan dengan (3).

2) Mode Boost: Pada mode boost, bidirectional DC-DC converter bekerja seperti boost converter pada umumnya [13], [14]. Tegangan keluaran memiliki nilai yang lebih besar daripada tegangan masukan. Gambar rangkaian untuk mode boost dapat dilihat pada Gbr. 5. Hubungan antara tegangan keluaran (V_o) dengan tegangan masukan (V_{in}) pada mode boost dapat dinyatakan dengan (4).

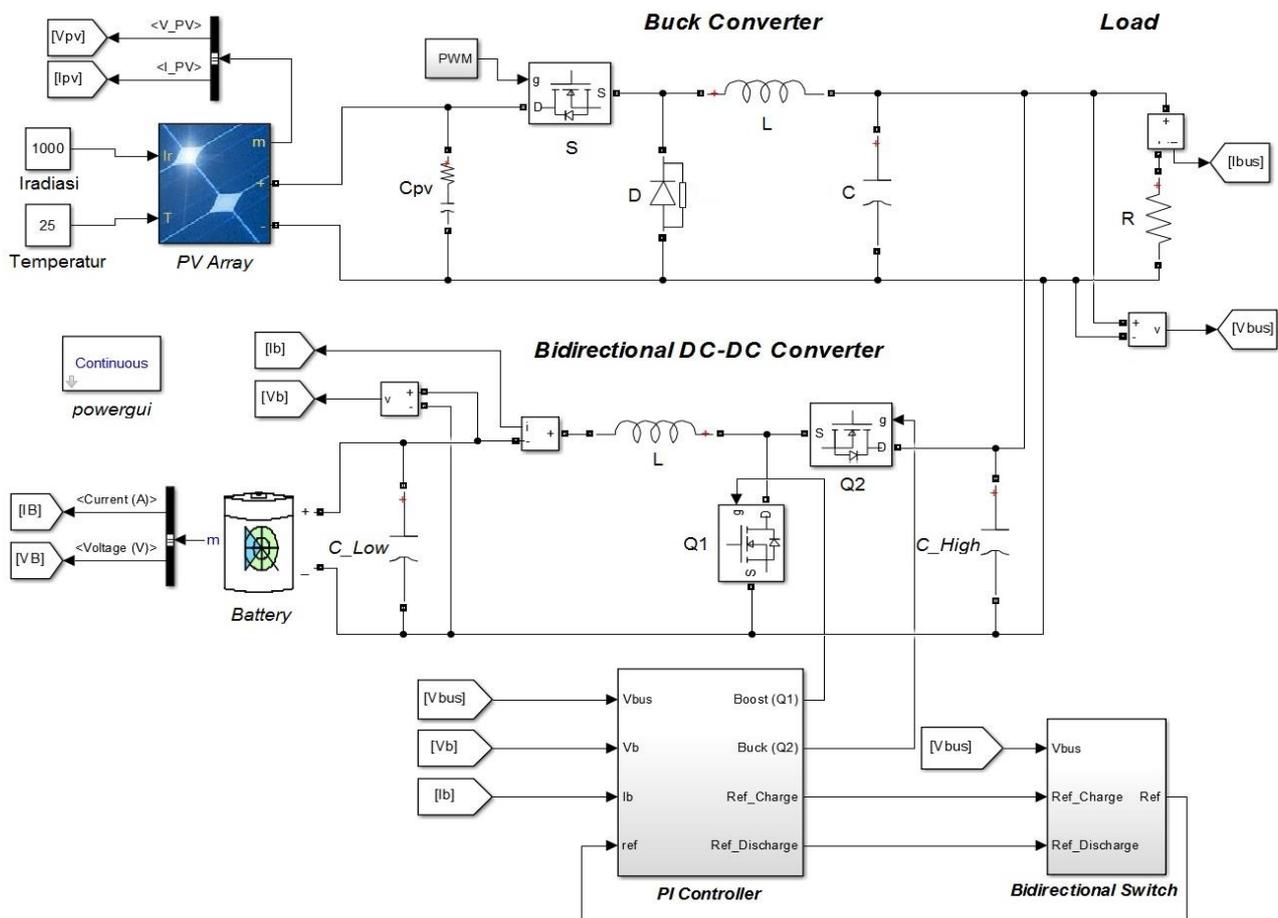
$$V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \tag{4}$$

Sedangkan nilai induktor minimal (L_{min}) dan kapasitor sisi tegangan tinggi (C_{High}) pada mode boost dinyatakan dengan (5) dan (6).

$$L_{min} = \frac{RD(1-D)^2}{2f_s} \tag{5}$$

$$C = \frac{V_o \times D}{R \times \Delta V_o \times f_s} \tag{6}$$

Agar bidirectional DC-DC converter dapat bekerja pada kondisi mode konduksi kontinu (CCM), nilai induktor yang



Gbr. 9 Model rangkaian simulasi *bidirectional DC-DC converter* untuk penyimpanan energi pada sistem PV pada MATLAB Simulink.

dipilih lebih besar daripada nilai induktor minimal ($L > L_{min}$) [12], sehingga pada sistem ini diperoleh parameter *bidirectional DC-DC converter* seperti pada Tabel III.

Pengoperasian mode pada *bidirectional DC-DC converter* tergantung pada tegangan bus DC. Pemilihan mode sesuai dengan diagram alir yang ditunjukkan pada Gbr. 6. *Set point* dari bus DC adalah sebesar 24 volt. Ketika PV membangkitkan energi lebih dari permintaan beban, tegangan pada bus DC akan bernilai lebih dari atau sama dengan 24 volt dan *bidirectional DC-DC converter* bekerja pada mode *buck* untuk melakukan pengisian baterai. Sedangkan apabila daya yang dibangkitkan PV kurang dari permintaan beban, bus DC akan mengalami drop tegangan, sehingga *bidirectional DC-DC converter* bekerja pada mode *boost* agar baterai dapat menyuplai bus DC.

D. Kontrol PI

Bidirectional DC-DC converter yang beroperasi dalam mode konduksi kontinu (CCM) mengontrol tegangan DC dengan mengendalikan *duty cycle*. Kontrol ini mempertahankan tegangan konstan di sisi keluaran, baik pada sisi *buck* maupun sisi *boost* [10], [15]. Kontrol ini disusun oleh dua loop kontrol PI. Tegangan keluaran (V_b) dan arus keluaran induktor (I_b) adalah sinyal umpan balik ke kontrol PI. Seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 7 dan Gbr. 8, loop tegangan luar memberikan referensi untuk loop arus dalamnya.

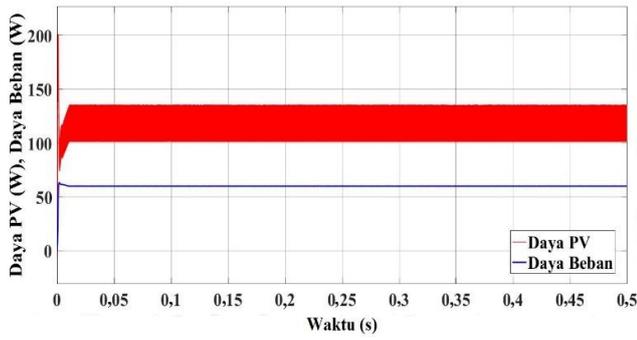
Di loop tegangan luar, diperoleh V_b dan dibandingkan dengan tegangan referensi (V_{ref}). Perbedaan antara keduanya diproses dengan kontrol PI, lalu dimasukkan ke dalam loop sebagai arus referensi (I_{ref}) dan dibandingkan dengan arus keluaran induktor (I_b). Perbedaan diproses melalui kontrol PI untuk mendapatkan PWM. Kontrol ini dapat menghasilkan tegangan stabil untuk suplai bus DC di sisi tegangan tinggi dan arus stabil untuk pengisian baterai di sisi tegangan rendah [7].

III. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

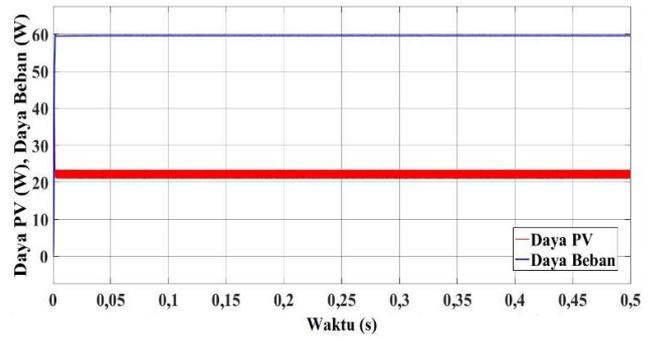
Bidirectional DC-DC converter dengan penyimpanan energi disimulasikan menggunakan Simulink MATLAB untuk mengamati keluaran dari berbagai mode. Model rangkaian simulasi ditunjukkan pada Gbr. 9.

Pada kondisi daya pembangkitan lebih besar daripada daya beban, nilai iradiasi 1.000 W/m^2 dan temperatur $25 \text{ }^\circ\text{C}$ digunakan agar dapat mewakili kondisi ini. *Bidirectional DC-DC converter* bekerja pada mode *buck* dan baterai mengalami pengisian. Hasil respons simulasi dapat dilihat pada Gbr. 10 sampai Gbr. 13.

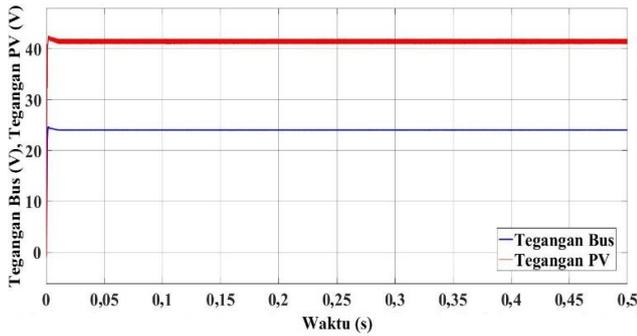
Dari hasil simulasi tersebut terlihat bahwa daya keluaran yang dihasilkan PV bernilai 118 watt serta daya PV memiliki nilai yang tidak konstan dan memiliki *ripple* karena hasil *tracking* daya yang kurang maksimal. Daya PV bernilai lebih besar daripada daya beban yang bernilai 60 watt, sehingga



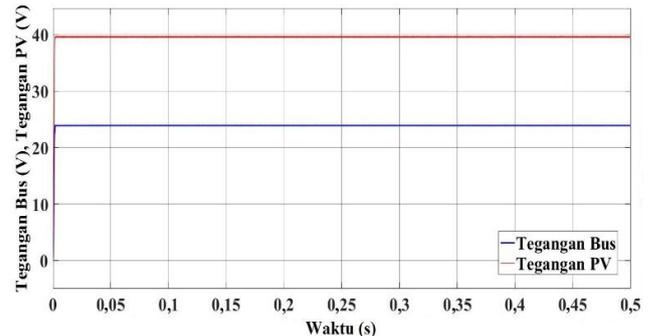
Gbr. 10 Daya keluaran PV (merah) dan daya beban (biru) pada saat mode *buck*.



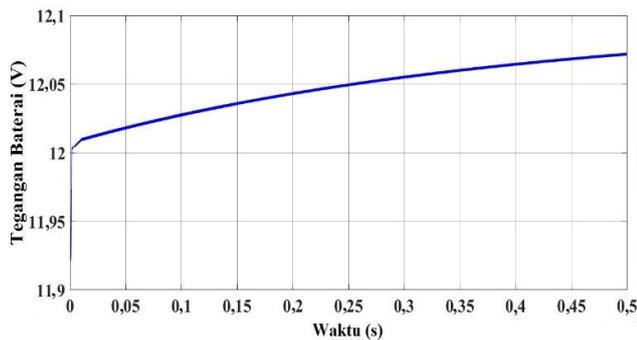
Gbr. 14 Daya keluaran PV (merah) dan daya beban (biru) pada saat mode *boost*.



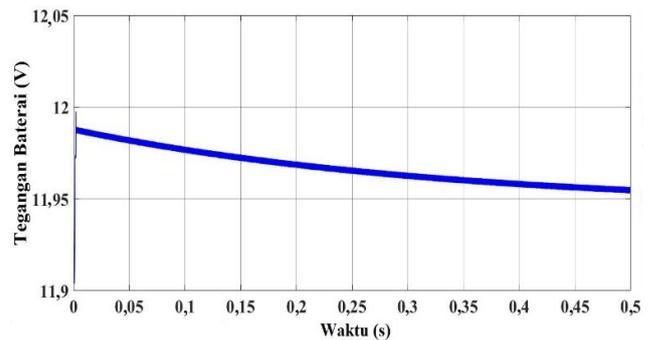
Gbr. 11 Tegangan keluaran PV (merah) dan tegangan bus DC (biru) pada saat mode *buck*.



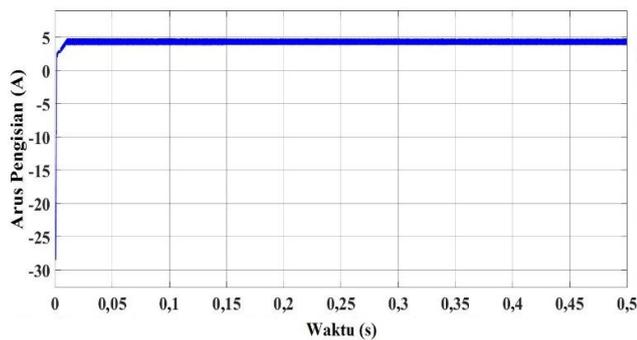
Gbr. 15 Tegangan keluaran PV (merah) dan tegangan bus DC (biru) pada saat mode *boost*.



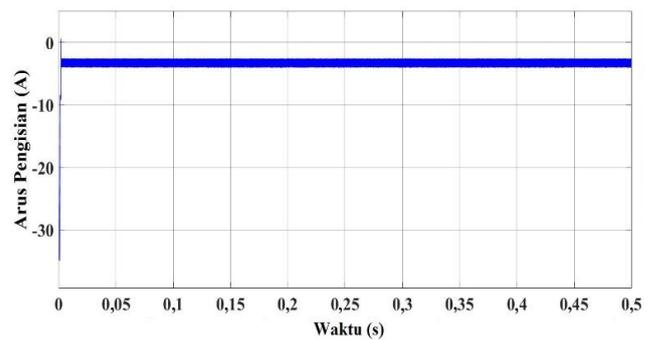
Gbr. 12 Tegangan baterai pada mode *buck*.



Gbr. 16 Tegangan baterai pada mode *boost*.



Gbr. 13 Arus pengisian baterai pada saat mode *buck*.



Gbr. 17 Arus pengisian baterai pada saat mode *boost*.

baterai mengalami pengisian, terlihat dari tegangan baterai yang mengalami kenaikan dan arus pengisian baterai yang bernilai positif, karena arus mengalir dari bus DC ke baterai. Selain itu, tegangan pada bus DC memiliki nilai sebesar 24 volt.

Pada kondisi daya pembangkitan lebih kecil daripada daya beban, nilai iradiasi 200 W/m^2 dan temperatur 25°C digunakan agar dapat mewakili kondisi ini. *Bidirectional DC-DC converter* bekerja pada mode *boost* dan baterai mengalami

pengosongan. Hasil respons simulasi ditunjukkan pada Gbr. 14 sampai Gbr. 17.

Dari hasil simulasi tersebut terlihat bahwa daya keluaran yang dihasilkan PV bernilai 21,91 watt. Daya PV lebih kecil dibanding daya beban yang bernilai 60 watt, sehingga baterai mengalami pengosongan, terlihat dari tegangan baterai yang mengalami penurunan dan arus pengisian baterai yang bernilai negatif karena baterai menyuplai tegangan pada bus DC, sehingga arus mengalir dari baterai ke bus DC. Tegangan pada bus DC bernilai konstan pada nilai 23,91 volt, memiliki error sebesar 0,09 volt dibanding *set point*. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol PI dapat bekerja cukup baik dalam mode ini.

IV. KESIMPULAN

Bidirectional DC-DC converter yang digunakan sebagai konverter penyimpan energi pada sistem PV telah berhasil disimulasikan menggunakan Simulink MATLAB. *Bidirectional DC-DC converter* dapat bekerja pada mode *buck* pada saat daya PV lebih besar daripada daya beban, dibuktikan dengan baterai mengalami pengisian karena adanya kenaikan tegangan baterai dan nilai arus pengisian baterai yang positif. Di sisi lain, *bidirectional DC-DC converter* juga dapat bekerja pada mode *boost* pada saat daya PV lebih kecil daripada daya beban, dibuktikan dengan baterai yang mengalami pengosongan, ditunjukkan oleh adanya penurunan tegangan baterai dan nilai arus pengisian baterai yang bernilai negatif. Kontrol PI dapat bekerja untuk menjaga tegangan konstan pada bus DC pada saat mode *boost*, dengan nilai sebesar 23,91 volt, memiliki error sebesar 0,09 volt dibanding *set point*. Namun, pada sistem ini masih ada kekurangan dalam pembangkitan daya PV, karena pada saat kondisi iradiasi 1.000 W/m² dan temperatur 25 °C, daya yang dapat dibangkitkan hanya sebesar 118 watt dari kapasitas PV 200 WP. Hal ini akibat belum digunakannya metode MPPT dalam sistem.

REFERENSI

- [1] I. Kholiq, "Pemanfaatan Energi Alternatif sebagai Energi Terbarukan untuk Mendukung Substitusi BBM," *Jurnal IPTEK*, Vol. 19, No. 2, hal. 75-91, 2015.

- [2] S. Abolhosseini, A. Heshmati, dan J. Altmann, "A Review of Renewable Energy Supply and Energy Efficiency Technologies," *Proc. of IZA Discussion Paper*, 2014, hal. 1-35.
- [3] M. Wasfi, "Solar Energy and Photovoltaic Systems," *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Renewable and Sustainable Energy (JRSE)*, February ed., hal. 1-8, 2011.
- [4] P. Hersch dan K. Zweibel, *Basic Photovoltaic Principles and Methods*, Colorado, USA: Technical Information Office Solar Energy Research Institute, 1982.
- [5] Y. Levron, J.M. Guerrero, dan Y. Beck, "Optimal Power Flow in Microgrids with Energy Storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No.3, hal. 3226-3234, 2013.
- [6] K. Chao, M. Tseng, C. Huang, Y. Liu, dan L. Huang, "Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems," *International Journal of Computer Consumer and Control (IJ3C)*, Vol. 2, No. 3, hal. 44-55, 2013.
- [7] G. Zhang, Y. Dai, dan J. Cui, "Design and Realization of a Bi-directional DC/DC Converter in Photovoltaic Power System," *Proc. of International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD)*, 2016, hal. 1095-1100.
- [8] M.M. Iqbal dan K. Islam, "Design and Simulation of a PV System with Battery Storage Using Bidirectional DC-DC Converter Using MATLAB Simulink," *International Journal of Scientific & Technology Research (IJSTR)*, Vol. 6, No. 7, hal. 403-410, 2017.
- [9] K.R. Bharath, H. Choutapalli, dan P. Kanakasabapathy, "Control of Bidirectional DC-DC Converter in Renewable based DC Microgrid with Improved Voltage Stability," *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.8, No.2, hal. 871-877, 2018.
- [10] K. Suresh dan R. Arulmozhiyal, "Design and Implementation of Bi-Directional DC-DC Converter for Wind Energy System," *Circuits and Systems*, Vol. 7, No. 11, hal. 3705-3722, 2016.
- [11] European Commission, *Photovoltaic Solar Energy: Development and Current Research*, Luxembourg, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union, 2009.
- [12] D.W. Hart, *Power Electronics*, New York, USA: McGraw-Hill, 2010.
- [13] I. Aharon, A. Kuperman, dan D. Shmilovitz, "Analysis of Dual-Carrier Modulator for Bidirectional Noninverting Buck-Boost Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 2, hal. 840 - 848, 2015.
- [14] D. Trowler dan B. Whitaker, "Bi-Directional Inverter and Energy Storage System," University of Arkansas, Fayetteville, USA, Texas Instruments Analog Design Contest, Mei 2008.
- [15] Z. Chen, J. Hu, dan W. Gao, "Closed-loop Analysis and Control of a Noninverting Buck-Boost Converter," *International Journal of Control*, Vol. 83, No. 11, hal. 2294-2307, 2010.