

Design dan Analisis Solar Battery Charger Berbasis Push-Pull Converter

Hizrian Alnubli*, Budhi Anto **

*Teknik Elektro Universitas Riau **Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Email: hizrian_17@yahoo.co.id

ABSTRACT

This research presents a design of push-pull converter used on battery charging system that is the source of her energy comes from solar pv. Solar pv was used in this research had a 150 watt maximum power with an open circuit voltage of 21.67 volts. The battery is a type of sealed lead acid (SLA) which has a capacity of 24 Ah with a nominal voltage of 12 volts. Solar pv battery fill through chargers controller is a DC-DC converter. DC-DC converter circuit type of push-pull is used to ensure the process of charging the battery so that it takes place on a secure condition even though the solar pv output voltage fluctuates with how to limit the voltage on the battery is charging of 14.1 volt. The system was designed using of Matlab-Simulink software. The results of the simulation shows the automatic setting of duty cycle which is conducted by electronic switches that triggered by the input signal as a part of PI controller. Therefore, a series of push-pull converter able to maintain the output voltage at value of 14,1 volt.

Keywords : Push-Pull Converter, Sealed Lead Acid Battery, Chargers Controller, Matlab-Simulink.

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir ini, penggunaan *solar photovoltaic* (pv) semakin meningkat karena masalah lingkungan dan menipisnya bahan bakar fosil. *Solar pv* adalah sumber energi yang paling penting dalam aplikasi daya listrik di seluruh dunia karena merupakan energi yang tidak pernah habis, bersih dan bebas polusi. Aplikasi energi *solar pv* telah menjadi topik penelitian selama beberapa dekade, salah satunya adalah pengisian baterai menggunakan energi *solar pv*. Cara termudah untuk melakukan pengisian baterai menggunakan energi *solar pv* adalah dengan menghubungkan *solar pv* dengan baterai secara langsung. Untuk mencegah arus balik dari baterai biasanya digunakan dioda, adapun keuntungannya dari sistem ini adalah lebih sederhana dan biaya yang rendah. Tetapi sistem ini memiliki kerugian diantaranya: 1)

solar pv hanya dapat memberikan arus pengisian saat tegangan output lebih tinggi dari tegangan baterai; 2) arus pengisian akan menurun, ketika perbedaan tegangan antara *solar pv* dan baterai menurun, karena peningkatan tegangan baterai atau tegangan output *solar pv* menurun; 3) sistem tidak selalu bekerja optimal untuk mengkonversi tenaga surya yang tersedia menjadi listrik. Untuk meningkatkan kinerja sistem, perlu ditambahkan kontroler antara *solar pv* dan baterai, pada umumnya kontroler yang digunakan adalah konverter DC-DC.

Salah Satu metode konverter DC-DC adalah *Push-pull converter*. *Push-pull converter* merupakan konverter DC-DC yang menggunakan transformator untuk mengubah level tegangan DC yang dibutuhkan serta menghasilkan isolasi galvanis terhadap beban. *Push-pull converter* termasuk kedalam jenis *forward converter*. *Push-pull converter*

digunakan karena memiliki efisiensi keluaran yang tinggi dan mampu menyediakan jangkauan daya keluaran yang lebih tinggi.

Beberapa penelitian telah membahas penggunaan konverter DC-DC pada sistem pengisian muatan baterai. Penelitian yang sudah pernah dilakukan pada dasarnya memiliki kesamaan yakni agar sistem pengisian muatan pada baterai dapat bekerja secara optimal namun dengan jenis konverter DC-DC dan sumber energi listrik yang berbeda.

Penelitian yang dilakukan oleh Sivaprasad. A, dkk (2012) yang berjudul “*Half bridge Converter for Battery Charging Application*” juga menggunakan konverter DC-DC agar sistem pengisian muatan baterai dapat bekerja secara optimal. Jenis konverter DC-DC yang digunakan pada penelitian ini adalah *half bridge converter* dengan sumber energi listrik DC.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Febriyandi, dkk (2014) yang berjudul “*DC-DC Converter as Power Supply of Battery Charger 100 V 300 W using 25 kHz Switching Frequency*” juga menggunakan konverter DC-DC dalam pengisian muatan baterai dari sumber energi listrik. Jenis konverter yang digunakan pada penelitian ini adalah *full bridge converter* dengan sumber listrik AC 220 V/50 Hz dari PLN.

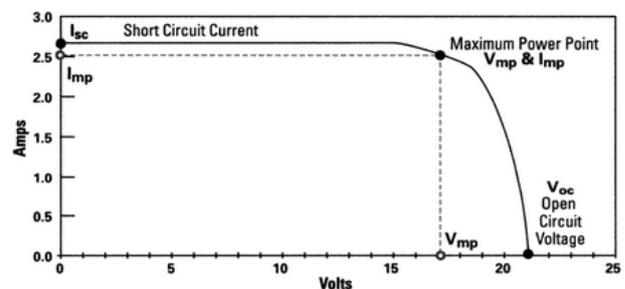
Beranjak dari beberapa penelitian diatas penulis melakukan penelitian tentang “*Design dan Analisis Solar Battery Charger Berbasis Push-Pull Converter*”. Pemilihan konverter DC-DC jenis *push-pull converter* dilakukan karena memiliki efisiensi keluaran yang tinggi dan mampu menyediakan jangkauan daya keluaran yang lebih tinggi. Selain itu karakteristik transfer (perbandingan antara sinyal tegangan *output* dan sinyal tegangan *input*) *push-pull converter* adalah *linear*, sehingga konverter ini mudah untuk dikendalikan. Keunggulan lainnya dari *push-pull converter* adalah dapat berfungsi sebagai konverter untuk penaik tegangan atau juga dapat berfungsi sebagai konverter untuk penurun tegangan, tergantung pada perbandingan belitan sisi primer dan belitan

sisi sekundernya. Sumber energi *solar pv* digunakan sebagai pemanfaatan energi terbarukan.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Kinerja Solar PV

Total keluaran energi listrik dari *solar PV* (Watt) adalah sebanding dengan tegangan keluaran (Volt) dikali dengan arus (Ampere) operasi. *Solar pv* dapat menghasilkan arus dari tegangan yang berbeda-beda. Hal tersebut berbeda dengan baterai yang menghasilkan arus dari tegangan yang relatif konstan. Karakteristik keluaran dari solar PV dapat dilihat dari kurva kinerja solar PV, atau disebut juga kurva I-V. Kurva I-V menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan pada solar PV.



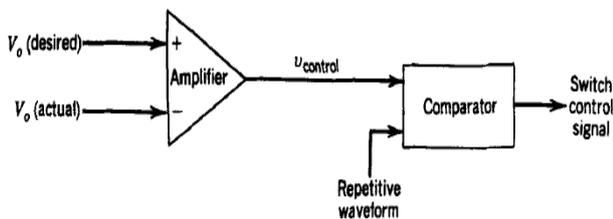
Gambar 1. Kurva I-V pada solar pv

Gambar diatas menunjukkan kurva karakteristik I-V. Pada sumbu horizontal menunjukkan tegangan (V) dan pada sumbu vertikal menunjukkan arus (I). Kebanyakan kurva I-V diberikan dalam *Standar Test Conditions* (STC) 1000 watt/m² radiasi atau disebut satu matahari puncak (*one peak sun hour*) dan 25° celcius (77° Fahrenheit) suhu *solar pv*. Pada kurva I-V terdapat tiga hal penting: *maximum power point* (V_{mp} dan I_{mp}), *open circuit voltage* (V_{oc}), dan *short circuit current* (I_{sc}).

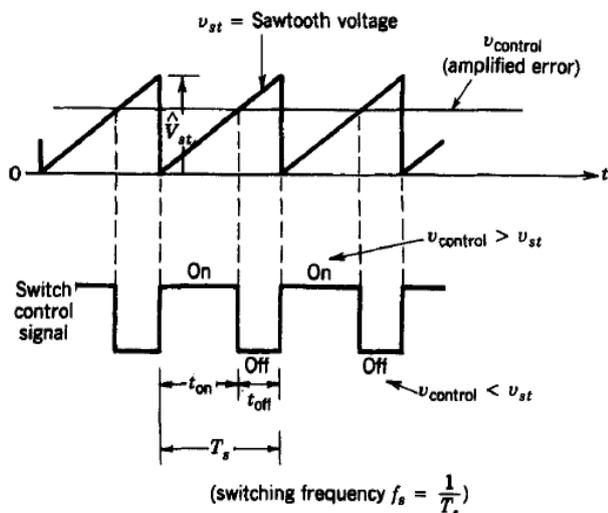
2.2 Modulasi Lebar Pulsa

Modulasi lebar pulsa atau *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan sebuah mekanisme untuk membangkitkan sinyal keluaran yang periodenya berulang antara tinggi dan rendah dimana kita dapat mengontrol durasi sinyal tinggi dan rendah

sesuai dengan yang kita inginkan. Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0% hingga 100%. Pada *switching* PWM terdapat suatu *switching* yang konstan yang disebut *switch control signal*. *Switch control signal* ini mempunyai kontrol *on* dan *off* yang dihasilkan dengan membandingkan suatu *level control signal* tegangan dengan suatu bentuk gelombang berulang. Frekuensi tetap dengan keadaan konstan dalam kontrol PWM sesuai dengan batasan frekuensi yang telah ditentukan, seperti yang terlihat pada gambar blok diagram PWM dan gambar *comparator signal* PWM dibawah ini:



Gambar 2. Blok diagram PWM



Gambar 3. Comparator signal PWM

Tegangan kendali $V_{control}$ yang dihasilkan oleh kontroler akan dibandingkan dengan

tegangan sinyal gergaji V_{st} dengan amplitudo konstan, frekuensi *switching* (f_s) konstan, seperti pada gambar 2.12. Sinyal keluaran *switching* dinyatakan T , sehingga:

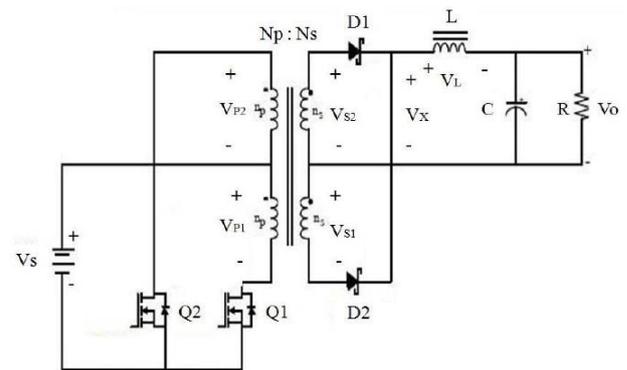
$$\begin{aligned} T_{on} &= 1 && \text{untuk } V_{control} > V_{st} \\ T_{off} &= 0 && \text{untuk } V_{control} < V_{st} \end{aligned}$$

Istilah *duty cycle* (D) didefinisikan sebagai berikut:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (1)$$

2.3 Prinsip Kerja Push-Pull Converter

Push-pull converter adalah konverter DC-DC yang menggunakan transformator untuk mengubah level tegangan DC yang dibutuhkan serta menghasilkan isolasi galvanis terhadap beban. *Push-pull converter* terdiri dari dua transistor yang berfungsi sebagai saklar. Prinsip kerja dari rangkaian *push-pull converter* berdasarkan kerja dari setiap saklar dengan analisis rangkaian ketika saklar tertutup dan terbuka. Rangkaian dari *push-pull converter* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4. Rangkaian *push-pull converter*

Pada rangkaian *push-pull converter* diatas terdapat tiga kondisi kerja. Pertama saat saklar Q1 *on* dan Q2 *off*, kemudian saat saklar Q2 *on* dan Q1 *off*, dan yang terakhir saat saklar Q1 dan Q2 sama-sama *off*.

1. Kondisi saklar saklar Q1 on dan Q2 off

Ketika saklar Q1 aktif, maka lilitan primer V_{p1} akan mendapatkan arus yang berasal dari V_s . Sehingga nilai V_{p1} akan sama dengan V_s . Dengan demikian tegangan primer sama dengan positif tegangan sumber. Sehingga dioda D1 akan menjadi forward bias dan dioda D2 menjadi reversed bias. Kemudian arus akan mengalir dioda D1 ke output induktor, kapasitor, dan beban.

$$V_{p1} = V_s \quad (2)$$

Sesuai dengan prinsip kerja transformator dimana kumparan primer akan menginduksi kumparan sekundernya, maka:

$$V_{s1} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (3)$$

$$V_{s2} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (4)$$

$$V_{p2} = V_s \quad (5)$$

$$V_{Q2} = 2 \times V_s \quad (6)$$

Diode D1 adalah *forward* bias dan dioda D2 *reversed* bias, sehingga:

$$V_x = V_{s2} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (7)$$

$$V_L = V_x - V_o = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o \quad (8)$$

Dengan asumsi tegangan output konstan, tegangan induktor adalah konstan, sehingga arus meningkat secara linear di induktor. Perubahan arus dalam induktor adalah:

$$\frac{\Delta i_l}{\Delta t} = \frac{\Delta i_l}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} \quad (9)$$

Sehingga dapat diperoleh nilai Δi_l pada saat saklar tertutup adalah sebagai berikut:

$$(\Delta i_l)_{closed} = \left(\frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} \right) \times DT \quad (10)$$

2. Kondisi saklar saklar Q2 on dan Q1 off

Ketika saklar Q2 aktif, maka lilitan primer V_{p2} akan mendapatkan arus yang berasal dari V_s . Sehingga nilai V_{p2} akan sama dengan negatif V_s . Dengan demikian tegangan primer sama dengan negatif tegangan sumber. Sehingga dioda D2 akan menjadi forward bias dan dioda D1 menjadi reversed bias. Kemudian arus akan mengalir dioda D2 ke output induktor, kapasitor, dan beban.

$$V_{p2} = -V_s \quad (11)$$

$$V_{p1} = -V_s \quad (12)$$

Sesuai dengan prinsip kerja transformator dimana kumparan primer akan menginduksi kumparan sekundernya, maka:

$$V_{s1} = -V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (13)$$

$$V_{s2} = -V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (14)$$

$$V_{Q1} = 2 \times V_s \quad (15)$$

Diode D2 adalah forward bias dan dioda D1 reversed bias, sehingga:

$$V_x = -V_{s2} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (16)$$

$$V_L = V_x - V_o = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o \quad (17)$$

Dengan asumsi tegangan output konstan, tegangan induktor adalah konstan, sehingga arus meningkat secara linear di induktor. Perubahan arus dalam induktor adalah:

$$\frac{\Delta i_l}{\Delta t} = \frac{\Delta i_l}{DT} = \frac{V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} \quad (18)$$

Sehingga dapat diperoleh nilai Δi_l pada saat saklar tertutup adalah sebagai berikut:

$$(\Delta i_l)_{closed} = \left(\frac{V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} \right) \times DT \quad (19)$$

3. Kondisi saklar saklar Q1 off dan Q2 off

Ketika saklar Q1 dan Q2 berada pada kondisi *off* maka tidak ada arus yang mengalir pada kedua lilitan primer. Sehingga tidak ada induksi pada lilitan sekunder. Arus yang mengalir pada induktor bersifat kontinu sehingga dioda D1 dan D2 menjadi *forward bias*.

$$V_x = 0 \quad (20)$$

$$V_L = V_x - V_o = -V_o \quad (21)$$

Tegangan di induktor adalah $-V_o$ sehingga arus akan berkurang secara linear di induktor. Perubahan arus di induktor adalah:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{T - DT} = -\frac{V_o}{L} \quad (22)$$

$$(\Delta i_L)_{open} = -\left(\frac{V_o}{L}\right) \times \left(\frac{1}{2} - D\right) \times T \quad (23)$$

Pada kondisi tunak, total perubahan arus harus bernilai nol, maka dari persamaan dapat diperoleh:

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (24)$$

$$\left[\frac{V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L} \right] \times DT + -\left(\frac{V_o}{L}\right) \times \left(\frac{1}{2} - D\right) \times T = 0 \quad (25)$$

Sehingga rumus V_o adalah:

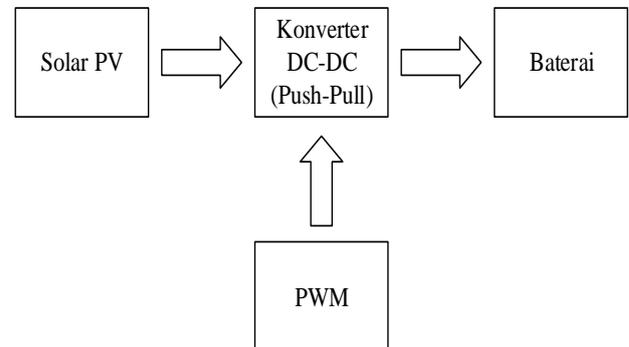
$$V_o = 2 \times V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \times D \quad (26)$$

Pada persamaan (26) terlihat bahwa hubungan antara tegangan *output* (V_o) dan tegangan *input* (V_s) *push-pull converter* adalah linear dengan parameter *duty cycle* (D) sehingga untuk mendapatkan V_o yang konstan dengan V_s yang berubah-ubah dapat dilakukan dengan mengatur nilai D .

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada gambar 5 menunjukkan blok diagram rangkaian *solar battery charger* berbasis *push-pull converter* yang akan didesain. Pada blok diagram terlihat bahwa energi listrik yang bersumber dari *solar pv* sebelum masuk ke baterai akan dikontrol terlebih dahulu pada rangkaian *charger*

controller yaitu pada rangkaian PWM dan konverter DC-DC (*push-pull*) sehingga nantinya arus dan tegangan dapat diatur sesuai dengan yang dibutuhkan dalam pengisian muatan pada baterai.



Gambar 5. Blok diagram rangkaian *solar battery charger* berbasis *push-pull converter*

Dalam merancang *push-pull converter* ada beberapa bagian yang harus dirancang, diantaranya: perancangan transformator, penentuan nilai induktansi dan nilai kapasitansi kapasitor.

3.1 Perancangan Transformator

Pada bagian perancangan transformator ini akan dijelaskan prosedur perancangan transformator *push-pull converter* menggunakan metoda *area-product*. Adapun prosedur dalam merancang transformator *push-pull converter* adalah:

- 1 Tentukan parameter-parameter perancangan transformator seperti tegangan keluaran (V_o), arus keluaran (I_o), faktor riak tegangan keluaran (r), frekuensi pensaklaran (f_s), dan tegangan masukan konverter (V_{cc}).
- 2 Tentukan fluks maksimum (B_m), kerapatan arus (J), utilisation factor (K_w), dan jatuh tegangan dioda (V_D).
- 3 Hitung daya output (P_{o2}) transformator.
- 4 Hitung nilai *area-product* (A_p) inti transformator.
- 5 Hitung luas jendela (A_w) dan luas inti (A_c) transformator.

6 Hitung jumlah belitan kumparan primer (N_1) dan sekunder (N_2).

7 Hitung luas penampang kawat kumparan primer dan sekunder.

Berdasarkan uraian diatas, maka spesifikasi *push-pull converter* yang akan dibuat adalah sebagai berikut:

$$V_o = 14,1 \text{ V}$$

$$r = 0,141$$

$$I_o = 7,2 \text{ A}$$

$$f_s = 50.000 \text{ Hz}$$

$$V_{cc \text{ max}} = 21,67 \text{ V}$$

$$V_{cc \text{ min}} = 13,89 \text{ V}$$

$$K_w = 0,4$$

$$J = 3.000.000 \text{ A/m}^2$$

$$B_m = 0,2 \text{ T}$$

$$\eta = 0,8$$

$$D_{\text{max}} = 0,45$$

- menghitung daya output transformator digunakan persamaan berikut,

$$P_{O2} = (V_o + V_{rl} + V_D)I_o \quad (27)$$

$$V_{rl} = 0,1 \times V_o = 0,1 \times 14,1 = 1,41 \text{ V}$$

sehingga,

$$P_{O2} = (14,1 + 1,41 + 1,5)7,2$$

$$P_{O2} = 122,472 \text{ Watt}$$

- Menghitung *area-product* (A_p) dengan menggunakan persamaan berikut,

$$A_p = \frac{\sqrt{2}P_{O2} \left[1 + \frac{1}{\eta} \right]}{4K_wJB_{mf}s} \quad (28)$$

dengan memasukkan parameter yang dibutuhkan pada persamaan diatas didapat,

$$A_p = 8.118,823 \times 10^{-12} \text{ m}^4 = 8.118,823 \text{ mm}^4$$

Langkah selanjutnya pilih ukuran inti yang sesuai dengan cara menggunakan inti transformator yang mempunyai nilai A_p lebih besar daripada nilai A_p yang dihitung menggunakan persamaan 28 diatas.

Berdasarkan tabel 1 dipilih Inti ferit ukuran E36/18/11 yang mempunyai parameter-parameter panjang rata-rata 1 lilitan atau *mean length per turn* (MLT) = 70,6 mm; luas penampang inti ferit tempat kumparan

dililitkan (A_c) = 131 mm²; luas jendela ferit (A_w) = 141 mm²; permeabilitas relatif bahan inti ferit (μ_R) = 2000 dan induktansi magnetisasi per kuadrat lilitan (A_L) = 4200 nH/lilit².

Tabel 1. Ukuran dan spesifikasi inti ferit jenis E-E

Ukuran	MLT (mm)	I_m (mm)	A_c (x100 mm ²)	A_w (x100 mm ²)	A_p (x10 ⁴ mm ⁴)	μ_R	A_L (nH/lilit ²)
E20/10/5	38	42,8	0,31	0,478	0,149	1770	1624
E25/9/6	51,2	48,8	0,40	0,78	0,312	1840	1895
E25/13/7	52	57,5	0,55	0,87	0,478	1900	2285
E/30/15/7	56	66,9	0,597	1,19	0,71		
E36/18/11	70,6	78,0	1,31	1,41	1,847	2000	4200
E42/21/9	77,6	108,5	1,07	2,56	2,739	2100	2613
E42/21/15	93	97,2	1,82	2,56	4,659	2030	4778
E42/21/20	99	98,0	2,35	2,56	6,016	2058	6231
E65/32/13	150	146,3	2,66	5,37	14,284	2115	4833

- Menghitung belitan kumparan primer dan sekunder digunakan persamaan berikut,

$$N_1 = \frac{V_{cc \text{ max}}}{4B_m A_c f_s} \quad (29)$$

$$N_2 = n \times N_1 \quad (30)$$

$$n = \frac{V_o'}{(2D_{\text{max}})V_{cc \text{ min}}} \quad (31)$$

Dengan memasukkan parameter yang dibutuhkan pada persamaan diatas didapat,

$$N_1 = 4,135 \approx 5 \text{ lilitan}$$

$$n = 1,36$$

$$N_2 = 6,803 \approx 7 \text{ lilitan}$$

- Menentukan luas penampang kawat kumparan primer (a_1) dan kawat kumparan sekunder (a_2) dari transformator menggunakan persamaan berikut,

$$I_2 = I_o \sqrt{D_{\text{max}}} \quad (32)$$

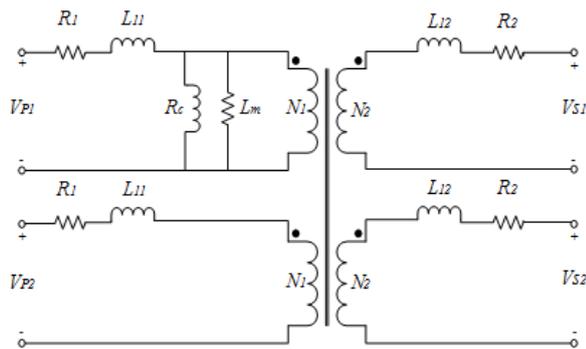
$$I_1 = nI_2 \quad (33)$$

$$a_1 = \frac{I_1}{J} \quad (34)$$

$$a_2 = \frac{I_2}{J} \quad (35)$$

Dengan memasukkan parameter yang dibutuhkan pada persamaan diatas didapat,

$$I_2 = 4,829 \text{ A}, I_1 = 6,572 \text{ A}, a_1 = 2,190 \text{ mm}^2, \text{ dan } a_2 = 1,609 \text{ mm}^2.$$



Gambar 6. Rangkaian ekivalen *transformator push-pull converter*

Pada gambar 6 diatas diperlihatkan rangkaian ekivalen *transformator push-pull converter*, dimana R_1 adalah resistansi kumparan primer, R_2 adalah resistansi kumparan sekunder, L_{11} adalah induktansi bocor kumparan primer dan L_{12} adalah induktansi bocor kumparan sekunder, sedangkan L_m adalah induktansi magnetisasi dan R_c adalah representasi rugi-rugi inti ferit. Untuk menentukan nilai R_1 dan R_2 dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_1 = N_1 \times MLT \times \rho_{20} \times [1 + 0,00393 \times (T - 20)] \quad (36)$$

$$R_2 = N_2 \times MLT \times \rho_{20} \times [1 + 0,00393 \times (T - 20)] \quad (37)$$

Dengan memasukkan nilai $\rho_{20} = 6,6$ ohm/Km dan $T = 75^\circ\text{C}$ pada persamaan 36 maka didapat nilai $R_1 = 2,83 \times 10^{-3}$ ohm.

Dengan memasukkan nilai $\rho_{20} = 10,8$ ohm/Km dan $T = 75^\circ\text{C}$ pada persamaan 37 maka didapat nilai $R_2 = 7,42 \times 10^{-3}$ ohm. Dimana ρ_{20} merupakan resistansi per satuan panjang pada temperatur 20°C , dan T adalah temperatur konduktor.

Untuk mendapatkan nilai L_{11} dan L_{12} dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L_{11} = \frac{\mu_o \times N_1^2 \times MLT \times b_w}{3h_w} \quad (38)$$

$$L_{12} = \frac{\mu_o \times N_2^2 \times MLT \times b_w}{3h_w} \quad (39)$$

Dimana pada persamaan diatas μ_o adalah permeabilitas ruang hampa yaitu sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, b_w adalah lebar efektif jendela

inti ferit dan h_w adalah tinggi jendela inti ferit. Sehingga dengan memasukkan nilai parameter yang dibutuhkan pada persamaan 38 dan persamaan 39 didapat nilai $L_{11} = 2,59 \times 10^{-7}$ H dan $L_{12} = 6,63 \times 10^{-7}$ H.

Selanjutnya untuk mendapatkan nilai induktansi magnetisasi (L_m) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$L_m = N_1^2 \times A_L \quad (40)$$

Pada persamaan diatas, A_L merupakan induktansi magnetisasi per kuadrat lilitan dengan nilai 4200 nH/lilit² (sesuai dengan ukuran transformator pada tabel 1). Dengan memasukkan nilai parameter yang dibutuhkan pada persamaan 40 maka didapat nilai $L_m = 105 \times 10^{-6}$ H.

Selanjutnya rugi-rugi inti transformator P_{fe} dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{fe} = V_c \times K_c \times f^\alpha \times B_m^\beta \quad (41)$$

Pada persamaan diatas, V_c adalah volume inti transformator, sedangkan K_c , α , dan β ditentukan oleh material inti transformator yang digunakan. Dengan menggunakan nilai $V_c = 9,72 \times 10^{-9}$ m³, $K_c = 16,9$, $\alpha = 1,25$, dan $\beta = 2,35$ didapat nilai $P_{fe} = 2,79$ Watt.

Selanjutnya untuk menghitung resistansi yang ekivalen dengan rugi-rugi inti transformator (R_c) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_c = \frac{2 \times D_{\min} \times V_{cc \max}^2}{P_{fe}} \quad (42)$$

Untuk menghitung nilai *duty cycle* minimum (D_{\min}) digunakan persamaan 26, sehingga didapat $D_{\min} = 0,23$. Dengan memasukkan nilai parameter yang dibutuhkan pada persamaan 42 maka didapat nilai $R_c = 78,03$ ohm.

3.2 Menentukan nilai induktansi induktor

Induktor yang akan didesain pada penelitian ini menggunakan bahan inti ferit dengan celah udara. Nilai induktansi minimum dari induktor yang digunakan (L_{\min}) agar nantinya arus yang melewati induktor mengalir secara kontinu dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$L_{\min} = \frac{(1 - 2D_{\min}) \times V_o}{4 \times I_o \times f_s} \quad (43)$$

Sehingga dengan memasukkan nilai parameter yang dibutuhkan pada persamaan 43 diatas didapat nilai $L_{\min} = 5,24 \times 10^{-6}$ H.

3.3 Menentukan nilai kapasitansi kapasitor

Nilai kapasitansi minimum dari kapasitor yang digunakan (C_{\min}) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

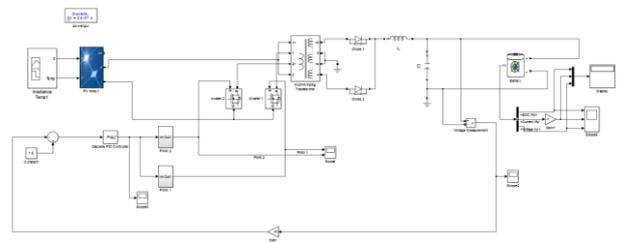
$$C_{\min} = \frac{1 \times \left(\frac{1}{2} - D_{\min} \right)}{8 \times r \times f_s^2 \times L_{\min}} \quad (44)$$

Sehingga dengan memasukkan nilai parameter yang dibutuhkan pada persamaan 44 diatas didapat nilai $C_{\min} = 1,81 \times 10^{-5}$ F.

3.4 Pemodelan dan simulasi solar battery charging berbasis push-pull converter menggunakan Matlab-Simulink.

Rangkaian solar battery charging berbasis push-pull converter didesain untuk dapat mengisi baterai jenis sealed lead acid (SLA) dengan kapasitas 24 Ah dan tegangan nominal 12 volt. Pengisian dilakukan dengan tegangan pengisian yang konstan dan ketika tegangan baterai telah mencapai 14,1 volt, maka pengisian dapat dihentikan. Arus pengisian baterai adalah sebesar 0,3C, dimana C adalah kapasitas baterai sehingga arus pengisian baterai adalah 7,2 Ampere. Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan diatas, maka tegangan keluaran maksimum konverter adalah 14,1 volt dan arus keluaran adalah 7,2 Ampere sesuai dengan spesifikasi push-pull converter yang telah ditetapkan sebelumnya. Tegangan masukan konverter berasal dari panel surya. Dengan kapasitas 150 WP, tegangan open circuit 21,67 Volt, tegangan pada daya maksimum 17,5 Volt, dan arus pada daya maksimum 9,41 Ampere.

Parameter-parameter rangkaian yang telah dihitung sebelumnya dimasukkan ke model Matlab-Simulink sebagaimana terlihat pada gambar 7.



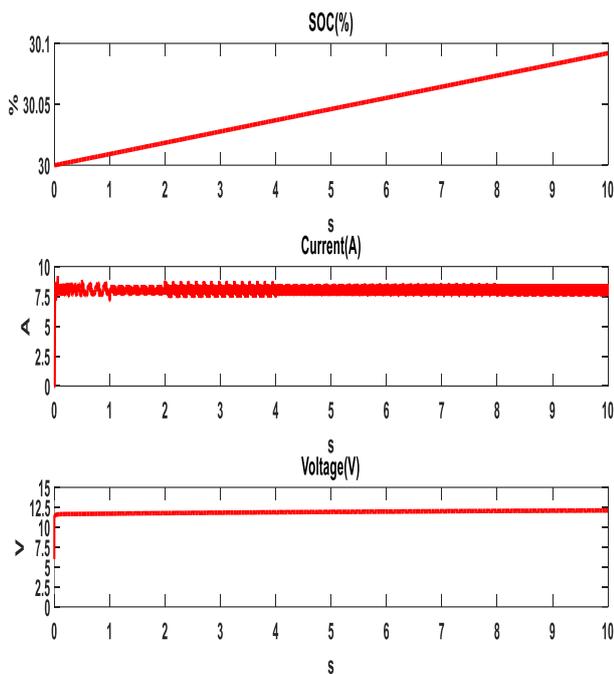
Gambar 7. Model rangkaian solar battery charging berbasis push-pull converter pada Matlab-Simulink

Pada gambar 7, saklar-saklar elektronik yang digunakan adalah MOSFET enhancement kanal-n, sedangkan sebagai sinyal kendali kedua MOSFET tersebut berasal dari PWM yang dikontrol oleh sebuah kontroler PI sebagai catatan bahwa sinyal keluaran dari PWM 2 dibuat terlambat setengah perioda.

Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan 4 kondisi untuk melihat karakteristik arus dan tegangan pengisian baterai. Pada kondisi pertama saat kapasitas baterai 30%, kondisi 2 saat kapasitas baterai 70%, kondisi 3 saat kapasitas baterai hampir penuh, dan kondisi 4 saat input irradiance dan temperatur pada solar pv berfluktuatif dengan kapasitas baterai hampir penuh..

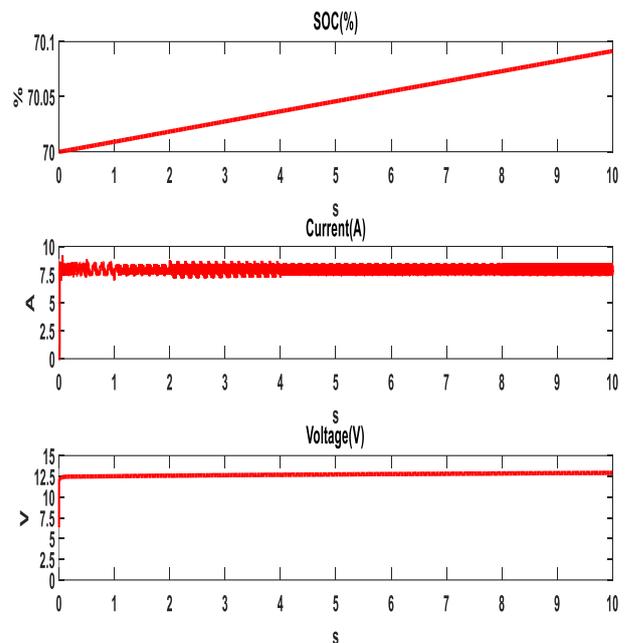
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi untuk kondisi 1 diperlihatkan pada gambar 8. Pada kondisi ini kapasitas baterai bernilai 30% dengan waktu simulasi 10 detik. Pada gambar 8 state of charge (SOC) menggambarkan energi yang tersedia pada baterai yaitu pada kondisi ini sebesar 30%. Terlihat bahwa pada grafik keluaran SOC terus meningkat dari kondisi awal sebesar 30% menjadi hampir mencapai 30,1%, ini menunjukkan bahwa telah terjadinya pengisian muatan pada baterai. Kemudian pada grafik arus keluaran terlihat pada gambar 4.16 sebesar 7.5 Ampere, dan tegangan keluaran kurang dari 12,5 volt.



Gambar 8. Hasil simulasi kondisi 1

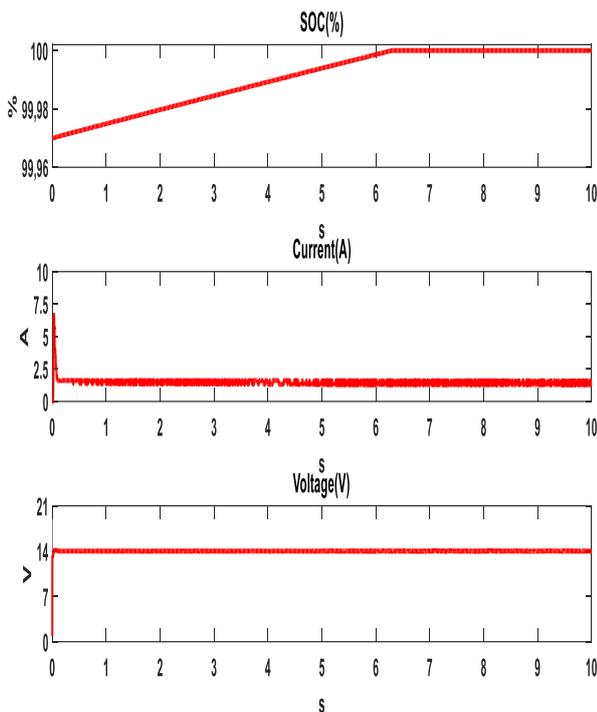
Hasil simulasi untuk kondisi 2 diperlihatkan pada gambar 9. Pada kondisi ini kapasitas baterai bernilai 70% dengan waktu simulasi 10 detik. Pada gambar 9 *state of charge* (SOC) menggambarkan energi yang tersedia pada baterai yaitu pada kondisi ini sebesar 70%. Terlihat bahwa pada grafik keluaran SOC terus meningkat dari kondisi awal sebesar 70% menjadi hampir mencapai 70,1%, ini menunjukkan bahwa telah terjadinya pengisian muatan pada baterai. Kemudian pada grafik arus keluaran terlihat pada gambar 4.16 sebesar 7.5 Ampere, dan tegangan keluaran 12,5 volt.



Gambar 9. Hasil simulasi kondisi 2

Hasil simulasi untuk kondisi 3 diperlihatkan pada gambar 10. Pada kondisi ini kapasitas bernilai 99,97% dengan waktu simulasi 10 detik. Pada gambar 10 *state of charge* (SOC) menggambarkan energi yang tersedia pada baterai yaitu pada kondisi hampir penuh, yaitu sebesar 99,97%. Terlihat bahwa pada grafik keluaran SOC terus meningkat dari kondisi awal sebesar 99,97% menjadi 100%, ini menunjukkan bahwa telah terjadinya pengisian muatan pada baterai. Kemudian pada grafik arus keluaran terlihat pada gambar 10 mengalami penurunan yang awalnya sebesar 2 Ampere hingga hingga nilai 1,5 Ampere, dan tegangan keluaran sebesar 14,1 volt.

Terlihat bahwa dengan pengaturan *duty cycle* secara otomatis yang dilakukan oleh kontroler PI pada PWM, tegangan pada kondisi 3 sesuai dengan yang diharapkan yaitu sebesar 14,1 volt.

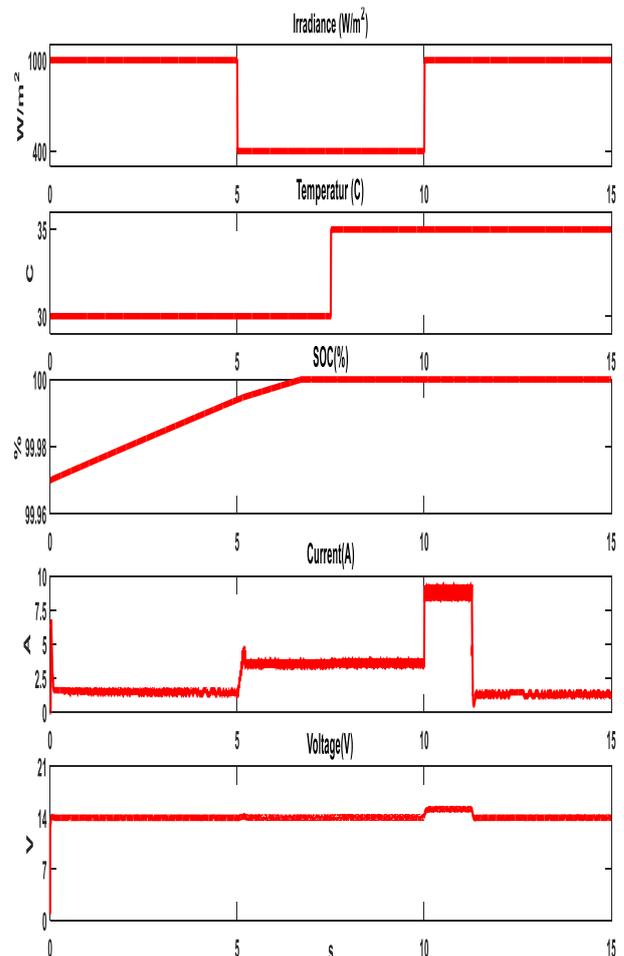


Gambar 10. Hasil simulasi kondisi 3

Hasil simulasi untuk kondisi 4 diperlihatkan pada gambar 11. Pada kondisi ini kapasitas baterai bernilai 99.97% dengan waktu simulasi 15 detik. Pada kondisi 4 input *irradiance* dan *temperature* pada solar pv dibuat berfluktuatif dengan 4 kondisi, yaitu saat nilai input *irradiance* dan *temperature* pada kondisi awal yaitu 1000 W/m² dan 30°C, kemudian saat nilai input *irradiance* diturunkan dari 1000 W/m² menjadi 400 W/m² sedangkan nilai input *temperature* tetap 30°C pada waktu 5 detik, selanjutnya saat nilai input *irradiance* tetap 400 W/m² sedangkan nilai input *temperature* dinaikkan dari 30°C menjadi 35°C pada waktu 7,5 detik, dan saat nilai input *irradiance* dinaikkan dari 400 W/m² menjadi 1000 W/m² sedangkan nilai input *temperature* tetap 35°C pada waktu 10 detik. Terlihat bahwa pada grafik keluaran SOC terus meningkat dari kondisi awal sebesar 99,97% menjadi 100%, ini menunjukkan bahwa telah terjadinya pengisian muatan pada baterai. Terlihat bahwa pada grafik arus terjadi kenaikan arus pada waktu 5 sampai 10 detik sebesar 2 ampere menjadi 4 ampere dan terjadi kenaikan lagi pada waktu 10 sampai 11 detik sebesar 4 ampere menjadi 8 ampere

hingga pada waktu 11 detik kembali ke keadaan mantap sebesar 2 ampere. Terlihat juga pada grafik tegangan konstan sebesar 14,1 volt hingga waktu 10 detik dan mengalami kenaikan sebesar 15 volt dan pada waktu 11 detik kembali ke keadaan yaitu sebesar 14,1 volt. Penurunan pada arus dan tegangan tegangan ini terjadi akibat input *irradiance* dan *temperature* pada solar pv yang dibuat berfluktuatif.

Terlihat bahwa dengan pengaturan *duty cycle* secara otomatis yang dilakukan oleh kontroler PI pada PWM, dengan input *irradiance* dan *temperature* pada solar pv yang berfluktuatif tegangan pada kondisi 4 dijaga konstan sebesar 14,1 volt. Kenaikan arus dan tegangan terjadi pada waktu 10 sampai 11 detik, dikarenakan respon kontroler PI akibat input *irradiance* dan *temperature* yang berfluktuatif.



Gambar 11. Hasil simulasi kondisi 4

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menjelaskan desain *push-pull converter* pada sistem pengisian baterai jenis *lead acid* dengan sumber energi dari *solar pv*. *Solar pv* yang digunakan mempunyai daya maksimum 150 watt dengan tegangan *open circuit* 21,67 volt. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa dengan pengaturan *duty cycle* secara otomatis yang dilakukan oleh kontroler PI pada PWM, rangkaian *push-pull converter* dapat mencapai nilai tegangan keluaran konverter sesuai dengan yang diharapkan yaitu 14,1 volt, dengan input *irradiance* dan *temperature* pada *solar pv* yang berfluktuatif tegangan baterai tetap dijaga pada angka tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Cook, G., Billman, L., and Adcock, R., 1995. *Photovoltaic Fundamentals*. Washington, DC : National Renewable Energy Laboratory.
- International, Solar Energy. 2004. *Photovoltaics: Design and Installation Manual*. Canada : New Society Publishers
- Rashid, Muhammad H. 2007. *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications*. USA : Elsevier Inc.
- Mohan, Ned. Undeland, Tore M., Robbins, William P. 2003. *Power Electronic: Converters, Application and Design* (Third Edition). USA : John Willey & Sons, Inc.
- Mazlan, Shakira Faaiza Binti. 2012. *Battery Charger Using Push-Pull Converter*. Thesis. Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia.
- Umanand, L., Bhat, S. R. 1992. *Design of Magnetic Components for Switched Mode Power Converters*. New Delhi : New Age International.
- D. Rahn, Christopher, & Wang, Chao-Yang. 2013. *Battery Systems Engineering*. USA : Willey.
- Silvarasad, A., Deepa, K., dan Mathew, K. 2012. Half bridge Converter for Battery Charging Application. *International Journal of Engineering Research and Applications* (IJERA), Vol. 2 Issue. 4, pp. 994-999.
- Febriyandi, F.I., D. Wijaya, dan E. Firmansyah. 2014. DC-DC Converter as Power Supply of Battery Charger 100 V 300 W using 25 kHz Switching Frequency. *Proceeding of International Conference on Electrical Engineering and Computer Science* (ICEECS).
- Segara, A.P.B., D.C. Riawan, H. Suryoatmojo. 2013. Monitoring Kinerja Baterai Berbasis Timbal untuk Sistem Photovoltaic. *Jurnal Teknik POMITS* Vol. 1, No. 1, 1-6
- Harley. W.G, W.H. Wolfle. (2013). *Transformers and Inductors For Power Electronics Theory, Design and Applications*. India : Wiley.
- Pressman, Abraham L. (1998). *Switching Power Supply Design*. USA: McGraw-Hill.
- Hart, Daniel W. (1997). *Introduction to Power Electronics (International Edition)*. Indiana : Prentice Hall International Edition.
- Venugopal, P., A. Ganguly, P. Singh. 2013. Design of Tuning Methods of PID Controller using Fuzzy Logic. *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development* (IJETED).
- Epcos. 2012. *Epcos Data Book 2013 Ferrites and Accessories*. Germany : EPCOS AG.