

## Desain *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada Panel Surya Menggunakan Metode *Sliding Mode Control*

Ahmad Faizal<sup>1</sup>, Bagus Setyaji<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Syarif Kasim Riau  
Jl. HR. Soebrantas No. 155 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru, 28293  
Email:<sup>1</sup>ahmad.faizal@uin-suska.ac.id

(Received: 18 Oktober 2016; Revised: 30 Desember 2016; Accepted: 30 Desember 2016)

### ABSTRAK

Energi surya merupakan suatu energi alternatif yang tersedia dalam jangka waktu yang lama, sementara sumber energi utama yang digunakan saat ini mempunyai keterbatasan. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk menjaga titik kerja panel surya, digunakan *DC-DC Boost Converter* sebagai pengatur tegangan keluaran dari panel surya untuk menjaga titik kerja panel surya tetap pada titik MPP. Adapun hasil dari penelitian yang dilakukan sistem yang dirancang berjalan dengan baik. Terjadi kenaikan rata-rata nilai tegangan keluaran sebesar 51.22 %, dari rata-rata sebesar 19.84 Volt sebelum pemasangan sistem MPPT menjadi 40.67 Volt setelah pemasangan sistem MPPT saat kondisi iradiasi matahari dan temperatur yang berubah-ubah, dan juga dapat mempertahankan tegangan keluaran dari modul panel surya disekitar nilai maksimum yang diinginkan yaitu sebesar 40 Volt.

**Kata Kunci :** DC-DC Boost Converter, MPPT, Panel Surya, Sliding Mode Control

### ABSTRACT

*Solar energy is an energy alternative that is available in a long period of time, while the main energy source in use today have limitations Maximum Power Point Tracking (MPPT) to keep the working point of the solar panels. As a supporter of the MPPT system, used DC-DC Boost Converter as a regulator of the output voltage of the solar panel to keep the working point of the solar panels fixed on MPP. As for the results of research conducted system designed. Going on a rise in the average value of the output voltage of 51.22%, from an average of 19.84 Volt MPPT system before installation be 40.67 Volt system after installation when the MPPT solar irradiation and temperature conditions are fickle, and can also maintain the output voltage of the module's solar panels around the desired maximum value i.e. for 40 volts.*

**Keywords :** DC-DC Boost Converter, MPPT, Panel Surya, Sliding Mode Controller

---

#### Corresponding Author:

Ahmad Faizal

Prodi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau  
Email: ahmad.faizal@uin-suska.ac.id

---

### Pendahuluan

Energi listrik merupakan energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia, kebutuhan energi saat ini sebagai penggerak kehidupan semakin lama semakin meningkat. Hal ini didorong oleh lonjakan jumlah populasi manusia terutama di Negara berkembang, sementara ketersediaannya pasokan daya yang ada juga tidak dapat mencukupi

kebutuhan yang terus meningkat tersebut, maka dari itu dibutuhkan suatu sumber energi terbarukan. Energi terbarukan secara umum dapat didefinisikan sebagai energi yang didapat dari sumber yang alami yang ada disekitar manusia dan dapat kita peroleh secara gratis. Sebagai salah satu sumber energi yang bersifat terbarukan, sinar matahari atau energi surya ini dirasa tepat untuk menjadi salah satu sumber energi listrik alternatif yang dapat digunakan. Energi

surya merupakan suatu energi yang bersih, terbarukan, serta tersedia dalam jangka waktu yang lama. Sumber energi surya ini juga merupakan energi terbarukan yang paling umum dimanfaatkan saat ini dan energi surya ini dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Divais elektronik yang digunakan untuk mengubah energi yang dihasilkan dari cahaya matahari menjadi energi listrik adalah panel surya. Panel surya adalah komponen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. Namun, karena tingkat penyinaran energi surya yang berbeda-beda pada setiap harinya menyebabkan daya keluaran dari panel surya bervariasi dan tidak maksimal [1], maka dari itu diperlukannya model yang menyerupai karakteristik sel surya sebenarnya, sehingga kita dapat melakukan percobaan sederhana dari beberapa data untuk mencari tahu bagaimana untuk mendapatkan performa semaksimal mungkin dan mempertahankannya. Panel surya memiliki karakteristik yang *non-linear*, hal ini membuat kita sulit untuk mendapatkan titik maksimum dari panel surya tersebut, sehingga untuk menyelesaikan masalah tersebut diperlukan pemodelan dari panel surya untuk mendesain dan mensimulasikan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk menjaga titik kerja panel surya tetap pada titik MPP [5]. Pada titik tersebut panel surya berada pada keadaan optimal, baik dari tegangan dan arus yang dihasilkan. Ketika tegangan dan arus yang dihasilkan maksimal maka akan mendapatkan keluaran daya yang maksimal [1].

Pada penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu dengan judul *Matlab Simulink Based Study of Photovoltaic Cells Modules Array and Their Experimental Verification*[2], kemudian desain dan implementasi *maximum power point tracker* (MPPT) *solar PV* berbasis *Fuzzy Logic* menggunakan mikrokontroler AVR [3], dan *Second-Order Sliding Mode Control for Variable Speed Wind Turbine Experiment System* [4]. Dengan algoritma MPPT tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan daya maksimal yang mampu dihasilkan dari panel surya.

Pada penelitian ini, digunakan metode *Sliding Mode Control* (SMC). Metode *Sliding Mode Control* (SMC) digunakan untuk mencari MPP dan mempertahankannya dari panel surya, karena SMC memiliki keuntungan pelacakan kecepatan kinerja yaitu bersifat sangat *robust*, dan juga kokoh terhadap gangguan [4]. SMC merupakan salah satu metodologi pengontrolan yang mampu mengatasi perubahan pada sistem, tanpa menyebabkan gangguan pada performa sistem itu sendiri. SMC menyediakan pendekatan yang sistematis untuk mengarahkan permasalahan kestabilan dan melacak pencapaian keberhasilan sistem dengan kemungkinan pemodelan yang sangat luas dan

memiliki tujuan utama untuk memaksa dan membatasi variabel yang dikontrol berada pada permukaan luncur yang dirancang dan menjaganya agar dapat tetap berada pada keadaan yang diinginkan. Sebagai pendukung sistem MPPT, digunakan *DC-DC Boost Converter* sebagai pendukung kontrol tegangan keluaran dari panel surya agar dapat memaksa dan mempertahankan panel surya memperoleh tegangan keluaran yang maksimum pada tingkat radiasi dan temperatur yang berubah-ubah.

Berdasarkan uraian latar belakang diatas dan penelitian-penelitian sebelumnya, maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian yaitu dengan judul "**Desain *Maximum Power Point Tracking* pada panel surya dengan menggunakan metode *Sliding Mode Control* (SMC)**".

## Dasar Teori

### A. Panel Surya

Panel surya adalah alat yang terdiri dari suatu sel yang terbuat dari bahan semikonduktor yang dapat melepas elektron. Sel surya diartikan sebagai teknologi yang membangkitkan suatu daya listrik DC, diukur dalam satuan *Watts* (*W*) atau *kiloWatts* (*kW*), yang berasal dari suatu bahan semikonduktor ketika dipaparkan oleh cahaya. Selama cahaya menyinari bahan semikonduktor tersebut maka sel surya akan menghasilkan energi listrik, dan ketika cahaya berhenti menyinari, sel surya berhenti menghasilkan listrik [7].

Sel surya bergantung pada efek panel surya untuk menyerap energi matahari dan menyebabkan arus mengalir antara dua lapisan bermuatan yang berlawanan, ketika memproduksi panel surya, produsen harus memastikan bahwa sel-sel surya saling terhubung secara elektrik antara satu dengan yang lain pada sistem tersebut. Persamaan eksponensial untuk memodelkan sel surya diturunkan dari hukum fisika untuk *pn junction* dan secara umum diterima sebagai representasi karakteristik sel ditunjukkan oleh persamaan berikut[2].

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{N \cdot k \cdot T} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

Dimana

$I_{ph}$  adalah arus hubung singkat,

$I_s$  adalah arus reverse saturation dari dioda (*A*),

$q$  adalah muatan elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C),

$V$  adalah tegangan dioda (*V*),

$K$  adalah konstanta Boltzman ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K),

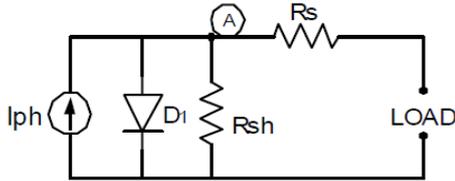
$T$  adalah suhu junction dalam Kelvin (*K*),

$N$  faktor idealitas dari dioda,

$R_s$  adalah tahanan seri dari dioda,

$R_{sh}$  adalah tahanan *shunt* dari dioda,

Dari persamaan diatas, dapat digambarkan rangkaian pengganti dari sel surya, yaitu seperti ditunjukkan oleh Gambar. 1.



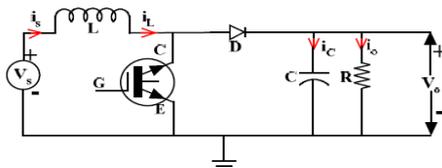
Gambar. 1 Rangkaian Pengganti Sel Surya

### B. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

*Maximum Power Point Tracking* atau yang biasa disingkat MPPT, adalah sebuah sistem elektronis yang mengoperasikan modul *photovoltaic* (PV) atau modul sel surya agar dapat menghasilkan daya maksimal yang bisa diproduksi oleh modul sel surya. MPPT bukan merupakan sistem *tracking* mekanis yang secara fisik menggerakkan modul agar mengarah langsung ke matahari. MPPT merupakan sistem elektronis yang secara keseluruhan mengubah-ubah titik operasi elektronis modul sel surya sehingga dapat mengirim daya maksimal yang tersedia. Dari daya tambahan yang terkumpul yang berasal dari modul sel surya, sehingga arus pengisian baterai dapat ditingkatkan. MPPT dapat juga dihubungkan dengan sistem *tracking* mekanis, tetapi kedua sistem ini benar-benar sangat berbeda [9].

### C. DC-DC Boost Converter

*Boost converter* terdiri dari induktor, dioda, kapasitor dan komponen pensaklar. *Boost converter* bekerja berdasarkan sinyal pensaklaran,  $t_{on}$  dan  $t_{off}$ . Perbandingan waktu hidup ( $t_{on}$ ) terhadap jumlah waktu keduanya disebut juga dengan *duty cycle*. Saat saklar hidup (*on*), energi disimpan pada induktor menjadi medan magnet, saat saklar mati (*off*), energi yang tersimpan pada induktor diubah lagi menjadi listrik dan didorong oleh tegangan *input* menjadi tegangan *output* sehingga nilainya menjadi lebih besar [10]. Karakteristik tersebut membuat *boost converter* digunakan untuk sistem MPPT, sebab ketika arus terputus maka tegangan yang terukur akan sama dengan tegangan rangkaian. Rangkaian dari konverter *boost converter* dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar. 2 Rangkaian Konverter DC-DC Boost.

Dalam rangkaian *boost converter* sebuah induktor dihubungkan secara seri dengan tegangan suplai  $V_S$ , dan transistor terhubung untuk *switching* pasokan di induktor. Sebuah kapasitor terhubung ke beban untuk menghasilkan output, kemudian *boost converter* berfungsi tergantung pada saklar on dan off, dan blok dioda akan membalikkan arus ketika saklar dihidupkan [14].

### D. Sliding Mode Control

SMC merupakan sebuah kontrol umpan balik pensaklaran berkecepatan tinggi yang efektif dan kokoh dalam mengendalikan sistem *linier* maupun *non-linier*. Sistem kontrol ini kokoh karena menyediakan sebuah metode perancangan sistem yang tidak peka terhadap ketidakpastian parameter lingkungan dan gangguan dari luar. SMC merupakan kontrol yang didesain dengan menyediakan sebuah pendekatan sistematis, dan memiliki performa yang konsisten di dalam ketidakpastian model parameter.

Prinsip dasar SMC merancang permukaan luncur dalam hukum kontrol yang akan membawa variabel menuju ke titik operasi, karena dalam kasus *boost converter* memiliki satu *switch*, sangat tepat menggunakan hukum kontrol untuk fungsi *switching* [14], sebagai :

$$u = \frac{1}{2}(1 + \text{sgn}(S)) \quad (5)$$

Dimana,  $u$  = *switching* untuk *converter*, dan 'S' adalah variabel lintasan. Dalam hal ini, 'S' digambarkan sebagai,

$$S = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 = J^T x \quad (6)$$

Dengan  $J^T = [\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3]$  dan  $\alpha_1, \alpha_2$ , dan  $\alpha_3$  mewakili kontrol disebut sebagai koefisien geser.

$x_1, x_2$ , dan  $x_3$  adalah keadaan yang diinginkan variabel umpan balik yang harus dikontrol. Dengan menyamakan  $S = 0$ , permukaan luncur dapat diperoleh. Tujuan dari desainer adalah untuk menentukan keadaan fungsi beralih 'u' dan juga untuk memilih nilai yang sesuai dari  $\alpha_1, \alpha_2$  dan  $\alpha_3$  sehingga kontrol memenuhi *hitting*, keberadaan *sliding mode* dan kondisi stabilitas [14].

### E. Kondisi Hitting

Desain SMC untuk memenuhi kondisi *hitting* dalam kasus konverter daya. Sekarang variabel permukaan dapat dinyatakan dalam bentuk [14].

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} - \beta V_o \\ \frac{d(V_{ref} - \beta V_o)}{dt} \\ \int (V_{ref} - \beta V_o) dt \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dalam rangka merancang kondisi *hitting*, tergantung pada keadaan variabel  $x_1$  langsung, yang dominan selama fase mencapai 'S'. fungsi kontrol yang dihasilkan dalam konfigurasi ini adalah,

$$u = \begin{cases} 1 = ON, & \text{When } S > 0 \\ 0 = OFF, & \text{When } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

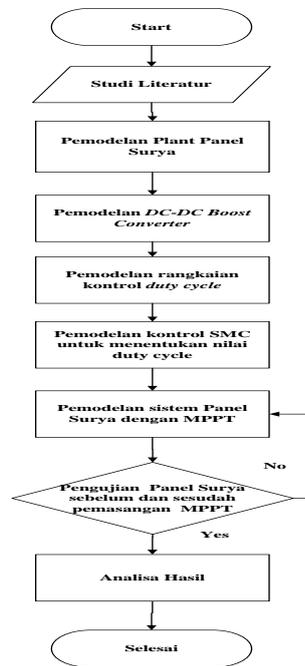
Dan, dimana pemetaan fungsi kontrol ke kontrol *duty ratio*, memberikan hubungan untuk sinyal kontrol  $V_C$  dan sinyal ramp  $V_{ramp}$  dengan,

$$0 < d = \frac{V_C}{V_{ramp}} < 1 \quad (9)$$

Dengan demikian, metode ini memastikan penyelesaian kondisi *hitting* dari SMC, yang hampir terkait dengan cara di mana kontrol *switch* permukaan dirancang.

### Metodologi Penelitian

Adapun tahapan penelitian digambarkan seperti pada Gambar. 3 diagram alir penelitian berikut ini :



Gambar. 3 Diagram Alir Penelitian

#### A. Pemodelan Panel Surya

Pemodelan matematika padasel surya mengacu pada persamaan(1) pemodelan sel surya sebelumnya. Namun, untuk menghasilkan energi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban pada

umumnya, energi yang dihasilkan oleh satu sel surya sangat tidak memadai. maka sel surya dikembangkan lagi menjadi modul surya yang terdiri dari beberapa sel surya. sehingga persamaan yang digunakan dalam pemodelan sel surya [16] menjadi :

$$V_T = \frac{K.T_{OPT}}{q} \quad (10)$$

$$I_d = I_s \cdot N_p \left( \exp \frac{q.(V + I_{RS})}{N.K.T} - 1 \right) \quad (11)$$

$$I = (I_{ph} \cdot N_p) - I_D - I_{SH} \quad (12)$$

$$I_{ph} = [K_i (T_{OPT} - T_{REF}) + I_{SC}] I_{RR} \quad (13)$$

$$I_{SH} = \left( \frac{V + I_{RS}}{R_{SH}} \right) \quad (14)$$

$$I_s = \left[ I_{RS} \left( \frac{T_{OPT}}{T_{REF}} \right)^3 \cdot q^2 \frac{E_g}{N.K} \cdot \exp^{(1/T_{OPT} - 1/T_{REF})} \right] \quad (15)$$

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{[\exp^{(q.V_{OC} / KCT_{OPT})} - 1]} \quad (16)$$

$$P = VI \quad (17)$$

Dimana :

$V_T$  = Tegangan thermal (V)

$V$  = Tegangan operasi (V)

$V_J$  = Tegangan junction (V)

$V_{OC}$  = Tegangan rangkaian terbuka

$I_{ph}$  = Arus hubung singkat

$I_s$  = Saturasi arus balik dari dioda

$I_{SC}$  = Hubungan arus pendek

$I$  = Sel keluaran arus

$T_{REF}$  = Referensi operasi temperatur sel

$T_{OPT}$  = Operasi temperatur sel

$R_{SH}$  =Tahanan *shunt* dari dioda

$R_s$  = Tahanan seri dioda

$E_g$  = *Energy Band Gap*

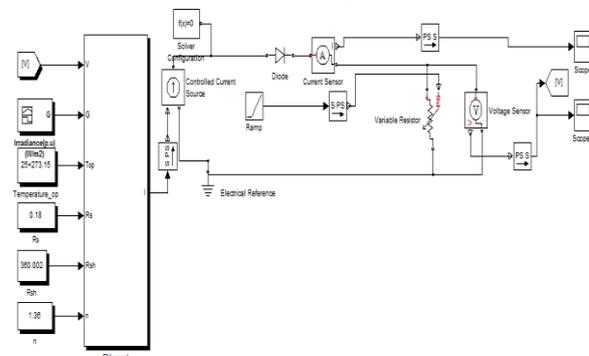
- $N$  = Faktor idealistis dari dioda (bernilai 1 untuk dioda ideal)
- $K$  =Konstanta Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$ )
- $q$  =Electron charge ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
- $N_s$  =Jumlah sel surya yang dihubung seri
- $N_p$  = Jumlah sel surya yang dihubung paralel
- $G$  = Iradiansi ( $1000 \text{ W / m}^2$ )

Modul sel surya yang digunakan jenis BPSX60 dengan daya keluaran maksimal dari photovoltaic adalah 60 Watt. Oleh karena itu model sel surya dibangun berdasarkan spesifikasi modul sel surya tersebut. Parameter modul surya BPSX60 ditunjukkan pada Tabel I pada STC.

Tabel1. Spesifikasi Modul Sel Surya BPSX60

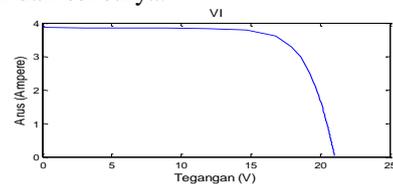
Spesifikasi Modul Sel Surya	
Ideality diode factor of PN junction (N)	1.1 77
Band gap energy (Eg)	1.12 eV
Number of parallel-connected modules (n <sub>p</sub> )	1
Number of series-connected modules (n <sub>s</sub> )	36
Maximum power at STC (P <sub>MAX</sub> )	60 Watt
Voltage at the MPP (V <sub>MAX</sub> )	16.8 Volt
Current at the MPP (I <sub>MAX</sub> )	3.56 Ampere
Nominal Operating Cell Temperature (NOTC)	47 °C
Short-circuit current at STC (I <sub>SC</sub> )	3.87 A
Open-circuit voltage at STC (V <sub>OC</sub> )	21.0 V
V <sub>OC</sub> temperature coefficient (KV)	-80 mV/°C
I <sub>SC</sub> temperature coefficient (Ki)	0.065 %/°C

Model dari modul sel surya ditunjukkan pada gambar4. Masukan dari model ini ialah tegangan, iradiansi,temperatur kerja,tahanan seri, tahanan shunt, faktor ideal dioda (bernilai 1 untuk dioda ideal) dari modul. Serta adanya rangkain tambahan untuk membantu keluaran dari panel surya [18].



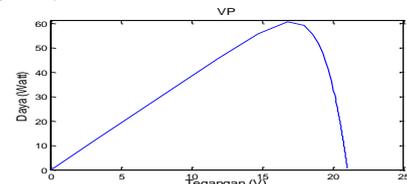
Gambar. 4Blok pemodelan panel surya

Dari persamaan-persamaan sel surya sebelumnya, digunakan dalam simulasi menggunakan komputer pada software matlab simulink untuk mendapatkan karakteristik keluaran sel surya, seperti pada gambar 5 dan 6. Dari gambar tersebut menunjukkan sangat jelas bahwa karakteristik keluaran sel surya adalah *non linier* dan sangat dipengaruhi oleh iradiasi sinar matahari dan temperatur. Selain itu, karakteristik *I-V* sel surya adalah *non linier* dan juga dipengaruhi oleh iradiasi dan temperatur permukaan. Secara umum, terdapat titik yang unik pada kurva *I-V* atau kurva *V-P*, yang dinamakan *Maximum Power Point* (MPP). Dimana pada titik tersebut, sel surya menghasilkan daya keluaran paling besar. Pada gambar 5 diperlihatkan pengaruh dari temperatur permukaan sel surya pada kurva *I-V* dan pada gambar 6 juga diperlihatkan pengaruh iradiasi terhadap daya dan tegangan keluaran dari sel surya.



Gambar 5. Grafik karakteristik IV panel surya

Grafik diatas merupakan karakteristik arus (I) – tegangan(V) dari model simulasi panel surya yang telah dibuat. Sumbu x merupakan variasi tegangan dan sumbu y merupakan arus keluaran dari modul surya, dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik arus pada intensitas radiasi  $1000 \text{ W / m}^2$  merupakan arus yang dihasilkan panel surya. Jadi, model yang dibuat telah sesuai dengan teori dimana untuk setiap kenaikan intensitas radiasi matahari, arus yang dihasilkan panel surya mengalami peningkatan. Hal ini pasti berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan dimana setiap kenaikan intensitas radiasi matahari daya yang dihasilkan juga mengalami peningkatan. Hal ini seperti yang ditunjukkan oleh grafik 13 dibawah ini.

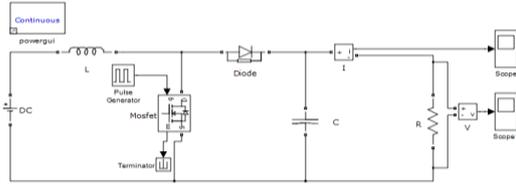


Gambar 6 Grafik karakteristik PV panel surya

### B. Pemodelan Boost Converter

Rangkaian *boost converter* digunakan untuk menaikkan *level* tegangan *dc* ke *level* tegangan *dc* tertentu dengan mengontrol *duty cycle* pada *switch*-nya. Panel surya dihubungkan dengan rangkaian *boost converter* agar tegangan panel surya dapat dikontrol. Pada matlab simulink komponen-

komponen utama penyusun *boost converter* ialah seperti induktor, kapasitor, diode, mosfet dan resistor. Dalam merancang sebuah *boost converter* dibutuhkan parameter-parameter untuk menentukan besar hambatan, induktansi dan kapasitor yang akan digunakan. Parameter tersebut disesuaikan dengan spesifikasi dari modul panel surya, *boost converter* yang dimodelkan adalah konverter yang dapat menaikkan tegangan dari 5 - 21 V ke 40 V..



Gambar. 7 Rangkaian Boost Converter

Untuk lebih jelasnya di bawah ini dijelaskan perhitungannya. Parameter dari *boost converter* adalah sebagai berikut :

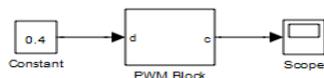
- Nilai-nilai yang sudah ditentukan :
- Tegangan masukan ( $V_{in}$ ) : 5-21 Volt
- Tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) : 40Volt
- Frekuensi ( $f_s$ ) : 12kHz
- Ripple tegangan keluaran : 1 %
- Ripple arus keluaran : 5 %

Pemodelan *boost converter* diawali dengan perhitungan *duty cycle* (D) maksimal dengan persamaan yang telah di jelaskan pada bab 2 sebelumnya :

$$D = 1 - \frac{21}{40} = 0.4 \quad (18)$$

### C. Pemodelan rangkaian kontrol *duty cycle* konverter

Cara paling sederhana untuk membuat sinyal PWM adalah dengan metode *intersective*. Metode *intersective* menggunakan sinyal gigi gergaji (*saw tooth*) sebagai gelombang modulasi dan komparator. Blok pembuat sinyal PWM dibangun untuk menghasilkan sinyal PWM yang dibutuhkan rangkaian *boost converter*. Keluaran dari blok PWM adalah kondisi *High* dan *Low* yang memiliki proporsi tertentu setiap periode. Variabel yang menunjukkan lebar kondisi *High* dalam satu periode disebut *duty cycle* (D), oleh karena itu masukan pada blok pembuat sinyal PWM yang dibangun adalah *duty cycle*.



Gbr. 8 Blok Pembuat Sinyal PWM

### D. Perancangan Sliding Mode Control untuk menentukan nilai *duty cycle* *boost converter*

Pemodelan kontrol SM untuk menentukan nilai *duty cycle*, Di sini  $C, L, r_L, \beta V_o$  menunjukkan kapasitansi, induktansi, resistansi beban sesaat dari konverter, dan merasakan tegangan keluaran.  $i_c, i_L, i_r$  menyatakan kapasitor, induktor, dan arus beban sesaat.  $V_{ref}, V_i, V_o$  menunjukkan tegangan referensi, masukan, dan tegangan keluaran,  $\beta$  menunjukkan perbandingan umpan balik.  $\bar{u}$  adalah logika terbalik dari  $u$ , adalah 0 atau 1, yang mewakili tombol power (*switch*). Pada penelitian ini dibuat sesuai dengan tujuan awal yaitu bagaimana merancang kontrol SM pada *boost converter*, dengan persamaan,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{r_L C} x^2 + \frac{\beta(V_o - V_i)}{LC} \bar{u} \\ \dot{x}_3 &= x_1 \end{aligned} \quad (19)$$

Merancang kontrol SM pada *boost converter* agar dapat menaikkan tegangan dan dapat memaksimalkan tegangan keluaran, di sini tegangan error  $X_1$ , laju perubahan error tegangan  $X_2$ , dan integral tegangan error  $X_3$ , di bawah mode konduksi kontinyu operasi CCM [6], diturunkan dalam persamaan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$X_1 = (V_{ref} - \beta V_o) \quad (20)$$

$$X_2 = \dot{X}_1 = \frac{\beta V_o}{r_L C} + \int \frac{\beta(V_o - V_i)\bar{u}}{LC} dt \quad (21)$$

$$X_3 = \int X_1 dt \quad (22)$$

Model substitusi *boost converter* di bawah CCM dari persamaan (7) menghasilkan kontrol deskripsi variabel berikut,

$$X_{boost} = \begin{bmatrix} x_1 = V_{ref} - \beta V_o \\ x_2 = \frac{\beta V_o}{r_L C} + \int \frac{\beta(V_o - V_i)\bar{u}}{LC} dt \\ x_3 = \int V_{ref} - \beta V_o dt \end{bmatrix} \quad (23)$$

Selanjutnya, didapatkan state-space yang dibutuhkan untuk desain kontrol *boost converter*,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta V_o - V_i}{LC} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} \quad (24)$$

dimana  $\bar{u} = 1 - u$  adalah logika terbalik dari  $u$ , digunakan untuk pemodelan *boost converter*, dan penyusunan kembali deskripsi dari state-space *boost converter* dalam bentuk,

$$\dot{X}_{boost} = Ax_{boost} + B_u$$

Untuk sistem ini, adalah tepat untuk memiliki hukum kontrol *sliding mode* umum yang menggunakan fungsi *switching* seperti :

$$u = \begin{cases} 1 = ON, & \text{When } S > 0 \\ 0 = OFF, & \text{When } S < 0 \end{cases} \quad (25)$$

$$u = \frac{1}{2}(1 + \text{sgn}(S)) \quad (26)$$

Di mana  $S$  adalah seketika suatu variabel lintasan dan digambarkan sebagai

$$S = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 = J^T x \quad (27)$$

dengan,  $J^T = [\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3]$

dimana,  $\alpha_1, \alpha_2$ , dan  $\alpha_3$  adalah mewakili kontrol disebut sebagai koefisien geser. Untuk memastikan operasi *sliding mode* dapat dinyatakan sebagai,

$$\lim_{S \rightarrow 0} S \cdot \dot{S} < 0$$

$$\dot{S}_{S \rightarrow 0^+} = J^T Ax_{boost} + J^T Bu_{S \rightarrow 0^+} < 0$$

$$\dot{S}_{S \rightarrow 0^-} = J^T Ax_{boost} + J^T Bu_{S \rightarrow 0^-} > 0 \quad (28)$$

Permukaan geser dapat diperoleh dengan  $S = 0$ , Kondisi untuk keberadaan operasi kontrol SM pada *boost converter* adalah sebagai berikut,

Kasus 1, substitusi  $u_{S \rightarrow 0^+} = \bar{u} = 0$ , dari state-space persamaan (24) dan persamaan (28) pada persamaan (23) memberikan,

$$-\alpha_1 \frac{\beta ic}{C} + \alpha_2 \frac{\beta ic}{r_L C^2} + \alpha_3 (V_{ref} - \beta V_o) < 0$$

Kasus 2, substitusi  $u_{S \rightarrow 0^-} = \bar{u} = 1$ , dan dari state-space persamaan (24) dan persamaan (28) pada persamaan (23) memberikan,

$$-\alpha_1 \frac{\beta ic}{C} + \alpha_2 \frac{\beta ic}{r_L C^2} + \alpha_3 (V_{ref} - \beta V_o) - \alpha_2 \frac{\beta(V_o - V_i)}{LC} > 0$$

Akhirnya, kombinasi dari kasus diatas memberikan kondisi operasi keberadaan *boost converter* di CCM.

$$0 < \beta L \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{r_L C} \right) ic - LC \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (V_{ref} - V_o) < \beta(V_o - V_i) \quad (29)$$

Selanjutnya, desain PWM dalam terdapat dua langkah, pertama sinyal kontrol  $u_{eq}$  yang setara, yang merupakan fungsi kelancaran input  $u$ . Kedua, fungsi kontrol setara dipetakan ke fungsi *duty cycle* dari modulator PWM, untuk PWM berdasarkan *sliding mode boost converter* hal tersebut dapat dinyatakan sebagai,

$$\dot{S} = J^T A_x + J^T B u_{eq} = 0 \quad (30)$$

Menghasilkan setara fungsi kontrol dari persamaan 29 pada persamaan 25 dan 27,

$$\bar{u}_{eq} = -[J^T B]^{-1} J^T A_x = -\frac{\beta L}{\beta(V_o - V_i)} x \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{r_L C} \right) ic - \frac{\alpha_3 LC}{\alpha_2 \beta(V_o - V_i)} (V_{ref} - \beta V_o) \quad (31)$$

Dimana,  $\bar{u}_{eq}$  kontinyu  $0 < \bar{u}_{eq} < 1$ . Saat  $u = 1 - \bar{u}$  dan juga  $u_{eq} = 1 - \bar{u}_{eq}$ , substitusi dari persamaan 31 ke dalam persamaan memberikan,

$$0 < u_{eq} = 1 - \left[ \frac{\beta L}{\beta(V_o - V_i)} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{r_L C} \right) ic - \frac{\alpha_3 LC}{\alpha_2 \beta(V_o - V_i)} (V_{ref} - \beta V_o) \right] < 1$$

persamaan dengan  $\beta(V_o - V_i)$  memberikan,

$$0 < u_{eq}^* = -\beta L \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{r_L C} \right) ic + LC \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (V_{ref} - \beta V_o) + \beta(V_o - V_i) < \beta(V_o - V_i) \quad (32)$$

jadi, pemetaan fungsi kontrol setara persamaan 32 ketugas kontrol rasio  $d$ , dimana,

$$0 < d = \frac{V_c}{V_{ramp}} < 1$$

memberikan hubungan untuk membawa sinyal kontrol  $V_c$  dan mempertahankan sinyal  $V_{ramp}$  untuk pelaksanaan dari PWM berdasarkan kontrol *sliding mode*, dan persamaan kontrol yang diperlukan untuk pelaksanaan *boost converter* beroperasi di CCM, dimana :

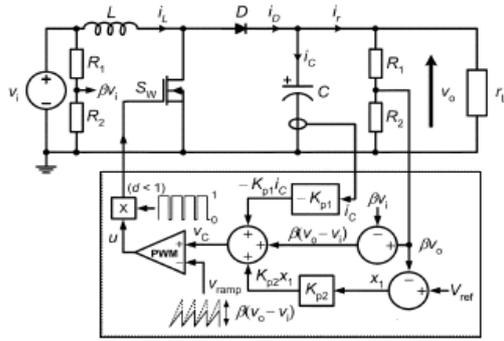
$$V_c = U_{equi} = -\beta L \left[ \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) - \left( \frac{1}{r_L C} \right) \right] ic + LC \left( \frac{\alpha_3}{\alpha_2} \right) (V_{ref} - \beta V_o) + \beta(V_o - V_i)$$

$$V_c = -kp_1 ic + kp_2 (V_{ref} - \beta V_o) + \beta(V_o - V_i) \quad (33)$$

$$kp_1 = \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) - \left( \frac{1}{r_L C} \right) \quad \text{dan} \quad kp_2 = LC \left( \frac{\alpha_3}{\alpha_2} \right) \quad (34)$$

$$\text{dan } V_{ramp} = U_n = \beta(V_o - V_i) \quad (35)$$

Untuk implementasi praktis dari *control sliding mode* berbasis PWM dapat ditunjukkan pada gambar berikut,



Gambar 9. Diagram skematik *sliding mode boost converter*

### Analisa dan Hasil

#### A. Pengujian Total Sistem

Pengujian secara keseluruhan pada sistem yang dibuat dengan cara memberikan input berupa panel surya dengan spesifikasi yang telah ditentukan sebelumnya. Pengujian dilakukan dengan level iradiasi dan temperatur yang bervariasi, dari iradiasi dan temperatur selama 12 jam perhari yang akan selalu disinari matahari [20], dalam setiap bulannya di daerah kota Pekanbaru, data yang digunakan diambil dari suatu aplikasi retscreen 2013, yaitu suatu aplikasi yang menyajikan data-data mengenai cuaca yang ada di setiap negara dan kota yang ada di Dunia. Pengujian pertama adalah simulasi panel surya sebelum pemasangan sistem MPPT dengan variasi iradiasi matahari dan temperatur, sedangkan pengujian selanjutnya adalah simulasi panel surya setelah pemasangan sistem MPPT dengan variasi iradiasi matahari dan temperatur.

Adapun hasil simulasi dari panel surya sebelum dan sesudah pemasangan sistem MPPT dengan variasi temperatur modul dan variasi iradiasi matahari dapat dilihat pada Tabel III dan IV.

Tabel 2. Hasil pengujian sebelum pemasangan sistem MPPT dengan variasi temperatur modul dan variasi radiasi matahari

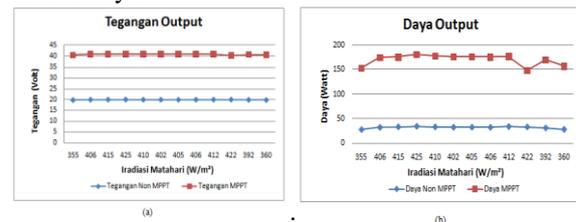
Iradiasi ( $W/m^2$ )	Temperatur ( $^{\circ}C$ )	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P_{out}$ (Watt)
355	26.6	19.68	1.41	27.74
406	26.8	19.86	1.61	31.97
415	27.3	19.90	1.66	33.03
425	27.6	19.93	1.71	34.08
410	27.9	19.88	1.66	33.00
402	27.9	19.86	1.63	32.37
405	27.4	19.86	1.63	32.37
406	27.2	19.87	1.62	32.18
412	27.1	19.89	1.69	33.61
422	27.2	19.92	1.65	32.86
392	27.0	19.82	1.56	30.91
360	27.6	19.70	1.43	28.17

Tabel 3. Hasil pengujian setelah pemasangan sistem MPPT dengan variasi temperatur modul dan variasi radiasi matahari

Iradiasi ( $W/m^2$ )	Temperatur ( $^{\circ}C$ )	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P_{out}$ (Watt)
355	26.6	40.41	3.87	152.74
406	26.8	40.78	4.28	174.53
415	27.3	40.79	4.31	175.80
425	27.6	40.86	4.42	180.60
410	27.9	40.79	4.35	177.43
402	27.9	40.78	4.32	176.16
405	27.4	40.78	4.32	176.16
406	27.2	40.80	4.30	175.44
412	27.1	40.74	4.34	176.81
422	27.2	40.24	3.70	148.88
392	27.0	40.70	4.18	170.12
360	27.6	40.43	3.89	157.27

Dengan melihat hasil pengujian pada Tabel II, pengaruh temperatur modul terhadap tegangan, arus dan daya yang dihasilkan oleh modul panel surya sangat kecil. Hal ini dapat dilihat dari beberapa variasi temperatur modul, sedangkan pengaruh iradiasi matahari terhadap tegangan, arus dan daya yang dihasilkan oleh modul panel surya sangat besar. Tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan sangat tidak konstan dan semakin rendah seiring dengan menurunnya nilai iradiasi matahari sehingga berpengaruh kepada daya keluaran yang terus menurun. Hal ini dapat dilihat dari beberapa variasi iradiasi matahari yang diberikan.

Nilai intensitas radiasi matahari dan temperatur kerja dari modul tidak selalu tetap karena bergantung pada energi matahari yang diradiasikan. Perubahan intensitas radiasi matahari dan temperatur kerja akan mempengaruhi tegangan keluaran modul panel surya menjadi tidak kontinyu. Namun, setelah pemasangan sistem MPPT pada kondisi temperatur dan iradiasi matahari yang bervariasi ataupun berubah-ubah, sistem dapat mempertahankan keluaran tegangan dari modul panel surya pada *range* yang sesuai dengan perancangan dan sesuai dengan tegangan keluaran yang diinginkan. Hasil pengujian modul panel surya setelah pemasangan sistem MPPT dapat dilihat pada Tabel III sebelumnya



Gambar 10. (a) dan (b) Grafik pengaruh iradiasi matahari dan temperatur pada tegangan dan daya keluaran sebelum dan sesudah pemasangan sistem MPPT

Dari Gambar 18 (a) dan (b) terlihat bahwa pengaruh dari pemasangan sistem MPPT terhadap iradiasi matahari dan temperatur yang berubah-ubah. Tegangan dan daya keluaran dari modul panel surya sebelum pemasangan sistem MPPT tidak dapat mencapai dan mempertahankan nilai keluaran yang diinginkan ketika kondisi iradiasi matahari dan temperatur berubah. Tapi setelah pemasangan sistem MPPT, tegangan dan daya keluaran dari modul panel surya dapat dicapai dan dipertahankan disekitar nilai maksimum yang telah ditentukan.

Secara keseluruhan, dari hasil pengujian yang dilakukan sistem yang dirancang berjalan dengan baik. Selain itu terjadi kenaikan rata-rata nilai dari tegangan keluaran sebesar 51.22 %, dari rata-rata sebesar 19.84 Volt sebelum pemasangan sistem MPPT menjadi 40.67 Volt setelah pemasangan sistem MPPT. Hal ini juga terjadi pada daya keluaran dengan kenaikan sebesar 81.29 %, dari rata-rata sebesar 31.85 Watt sebelum pemasangan sistem MPPT menjadi 170.16 Watt setelah pemasangan sistem MPPT.

### Penutup

Berdasarkan analisa dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem MPPT dapat menjaga tegangan dan daya keluaran dari modul panel surya disekitar nilai maksimumnya saat kondisi iradiasi matahari dan temperatur yang berubah-ubah.
2. Terjadi kenaikan rata-rata nilai tegangan keluaran sebesar 51.22 % dari rata-rata sebesar 19.84 Volt sebelum pemasangan sistem MPPT menjadi 40.67 Volt setelah pemasangan sistem MPPT saat kondisi iradiasi matahari dan temperatur yang berubah-ubah.
3. Terjadi peningkatan juga pada daya keluaran sebesar 81.29 %, dari rata-rata sebesar 31.35 Watt sebelum pemasangan sistem MPPT menjadi 170.16 Watt setelah pemasangan sistem MPPT saat kondisi iradiasi matahari dan temperatur yang berubah-ubah.
4. Pada kondisi iradiasi matahari dan temperatur yang berubah-ubah, sistem MPPT dapat mempertahankan tegangan keluaran dari modul panel surya disekitar nilai maksimum yang diinginkan yaitu sebesar 40 Volt.

### Daftar Pustaka

- [1] Kurnia M. Pebriningtyas, Ali Musyafa, Katherin Indriawati.(2013). "Penelusuran Daya Maksimum Pada Panel *Photovoltaic* Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy di Kota Surabaya".Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya. Vol. 2,No 1. ISSN 2337-3539.
- [2] Nema, S., Nema, R.K., & Aghnihotri, G. (2010). *Matlab Simulink Based Study of Photovoltaic Cells Modules Array and Their Experimental Verification. International Journal of Energy and Environment.* 1 (3), 487-500.
- [3] Fauzi, Noval. (2012). *Desain dan Implementasi Maximum Power Point Tracker (MPPT) Solar PV Berbasis Fuzzy Logic Menggunakan Mikrokontroler AVR.* Surabaya : ITS.
- [4] A. Merabet, M. A. Islam, R. Beguenane, H. Ibrahim. (2014). *Second-Order Sliding Mode Control for Variable Speed Wind Turbine Experiment System.* Canada. ISSN 2172-038 X.
- [5] Fuady, A,(2012). Rancang bangun *Maximum Power Point Tracker (MPPT)* pada panel surya dengan menggunakan metode Fuzzy. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [6] Siew-Chong Tan,Y. M. Lai, and Chi K. Tse.(2006). "A *Unified Approach to the Design of PWM-Based Sliding-Mode Voltage Controllers for Basic DC-DC Converters in Continuous Conduction Mode*". *The authors are with the Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University.* IEEE.
- [7] Hegedeus, S. & Luque, A. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.* West Sussex: John Wiley & Sons.
- [8] Tito, B. (2012). Metode MPPT Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali PI. Teknik Elektro. Universitas Indonesia. Depok.
- [9] Richard A. Cullen. (2000). "What is *Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work*".*Blue Sky Energy.*
- [10] Kalmin, A. (2012). Simulasi dan Verifikasi Modul Surya Terhubung Dengan *Boost Converter* pada Jaringan Listrik Mikro Arus Searah dengan menggunakan Matlab Simulink. Teknik Elektro. Universitas Indonesia. Depok.
- [11] Hart, D. W. (2011). *Power Electronics.* AmerikaNew York: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-338067-4.

- [12] Xiao, W., Dunford, W. G., Palmer, P. R., & Capel, A. (2007). Regulation of Photovoltaic Voltage. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 54(3), 1365 – 1374.
- [13] W. Ambar, C.I. Dedet, dan M. Arif. (2014). Rancang Bangun *Multilevel Boost Converter (MLBC)* Sebagai Suplai DC Bus pada Inverter. Teknik Elektro. Institut Teknologi Sepuluh November (ITS). Surabaya.
- [14] V.R. Kolluru, K K Mahapatra, S.S. Sarode, R.K. Patjoshi, and B. Subudhi. (2014). *Design and Implementation of an Optimized Sliding Mode Controller and Compared with a Conventional MPPT Controller for a Solar System*. National Institute of Technology. India. E-ISSN: 2224-2856.
- [15] Slotine, J.J.E. and Weiping Li (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall International, Inc. United States of America. ISBN 0-13-040049-1.
- [16] Chandani Sharma, Anamika Jain. (2014). “*Solar Panel Mathematical Modeling Using Simulink*”. *Electronics & Communication Engg. Graphic Era University, Dehradun Utrakhand, India. ISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 5*.
- [17] J.A. Ramos-Hernanz, J.J. Campayo, J. Larranaga, E. Zulueta, O. Barambones, J. Motrico, U. Fernandez Gamiz, and I. Zamora. (2012). “*Two Photovoltaic Cell Simulation Models IN Matlab/Simulink*”. *International Organization of IOTPE.Spain. ISSN 2077-3528*.
- [18] Ioan-Viorel Banu, and Marcel Istrate. (2012). “*Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*”. Gheorghe Asachi Technical University of Iasi. Romania.
- [19] ESRAM, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 22(2), 439 - 449.
- [20] P. Eko Yoga. (2013). “*Peluang Pemanfaatan Energi Surya didaerah terpencil*”. Teknik Elektro. Universitas Negri Semarang.
- [21] RETScreen International (2013). “*Clean Energy Projects Analysis Software*”. Canada. Tersedia : [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net)[Diakses : 27 Agustus 2013]