



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI DAN ANALISIS PHOTOVOLTAIC SIMULATOR  
BERBASIS BUCK CONVERTER**

**LAPORAN SKRIPSI**

**MUHAMAD YASIL FARABI**

**0706267875**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI DAN ANALISIS PHOTOVOLTAIC SIMULATOR  
BERBASIS BUCK CONVERTER**

**LAPORAN SKRIPSI**

**Skripsi ini diajukan untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi  
Sarjana Teknik**

**MUHAMAD YASIL FARABI**

**0706267875**

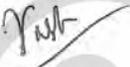
**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
PEMINATAN KENDALI  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Muhamad Yasil Farabi**

**NPM : 0706267875**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 13 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Muhamad Yasil Farabi  
NPM : 0706267875  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : SIMULASI DAN ANALISIS PHOTOVOLTAIC  
SIMULATOR BERBASIS BUCK CONVERTER

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Feri Yusivar M. Eng (.....)  
Penguji : Ir. Aries Subiantoro M.Sc (.....)  
Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan laporan skripsi ini. Penulisan laporan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi persyaratan dari mata kuliah skripsi yang terdapat dalam kurikulum program studi Teknik Elektro Universitas Indonesia.

Skripsi ini pun dapat terselesaikan tak luput dari bantuan berbagai pihak. Saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Feri Yusivar M. Eng, selaku dosen pembimbing, serta dosen-dosen lainnya, yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan laporan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan berupa dukungan material dan moral;
3. Teman-teman, terutama Rian Suryadiningrat, Yuddy Syaifudin, dan Wayan Wicak Ananduta, selaku rekan sekerja saya, dan pihak-pihak lainnya yang telah membantu saya dalam menyelesaikan laporan skripsi ini.

Berkat bimbingan dan bantuan mereka, saya dapat menyelesaikan laporan skripsi ini.

Akhir kata, semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam pembuatan skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan

Depok, 13 Juni 2011

Muhamad Yasil Farabi

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhamad Yasil Farabi  
NPM : 0706267875  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**SIMULASI DAN ANALISIS PHOTOVOLTAIC SIMULATOR  
BERBASIS BUCK CONVERTER**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 13 Juni 2011

Yang menyatakan,



Muhamad Yasil Farabi

## ABSTRAK

Nama : Muhamad Yasil Farabi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Simulasi dan Analisis Photovoltaic Simulator Berbasis Buck Converter

Pada skripsi ini, dirancang sebuah simulator sel surya menggunakan *buck converter* yang kemudian dianalisis menggunakan diagram bode dan TKA. Model statik sel surya digunakan untuk mengimplementasikan karakteristik dari sel surya. *Low-pass filter* digunakan untuk mengubah model statik sel surya menjadi model dinamik sel surya. Pengendali PI digunakan untuk mengendalikan *switch* buck converter melalui pulsa-pulsa yang dihasilkan oleh *PWM Generator*. Sistem dianalisis menggunakan diagram bode terhadap masukannya, yaitu *solar irradiance* dan suhu sel. Beban, konstanta *proportional*, dan konstanta integral akan divariasikan untuk menganalisis sistem. Sistem juga dianalisis dengan menggunakan TKA untuk mengetahui seberapa besar batas gain kestabilan sistem. Dari diagram bode yang didapat, sistem terlihat menyerupai sistem orde tiga. Dari TKA, dengan mengubah beban didapat bahwa batas *gain* kestabilan sistem sangatlah tinggi, sekitar  $4.48 \times 10^5$  untuk masukan perubahan *solar irradiance*, dan  $1.25 \times 10^6$  untuk masukan perubahan suhu sel. Karena nilai tersebut sangatlah tinggi, sehingga sistem dapat dinyatakan robust terhadap perubahan beban dan cenderung stabil.

Kata kunci : Sel surya, PV, *photovoltaic*, simulator, *buck converter*, PWM, *low-pass filter*, pengendali PI, bode diagram, tempat kedudukan akar.

## ABSTRACT

Name : Muhamad Yasil Farabi  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Simulation Analysis of Buck Converter PV Simulator

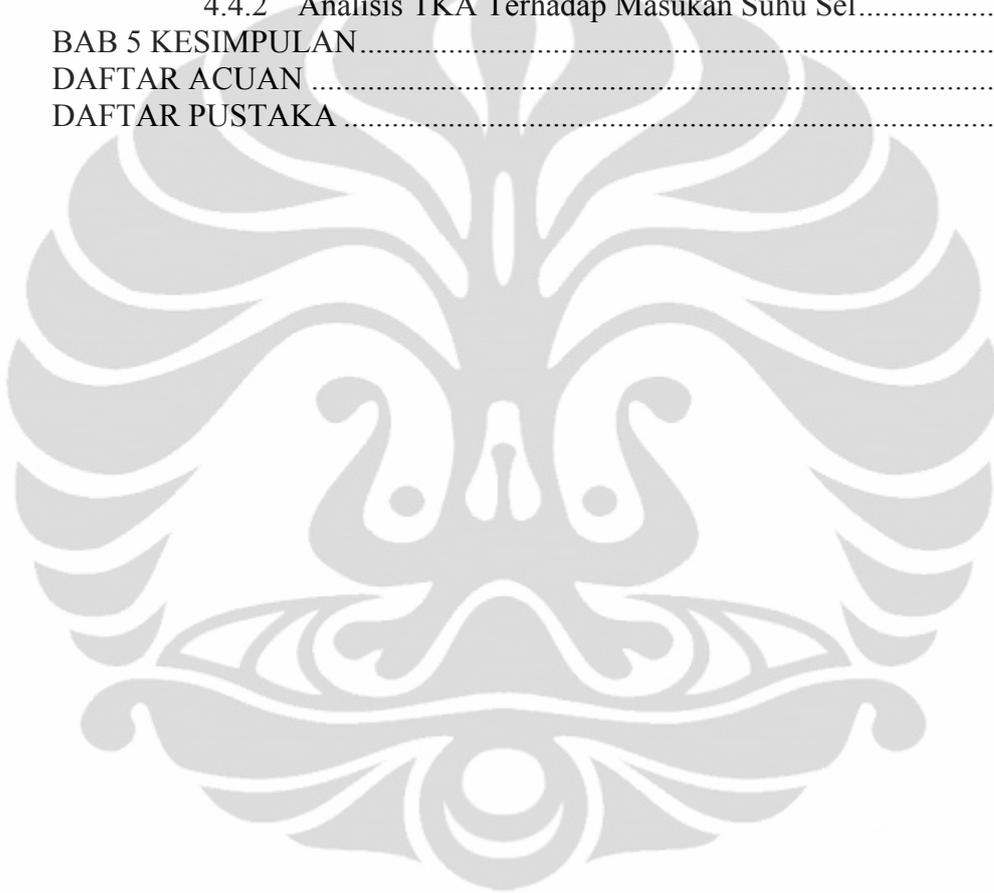
This thesis presents a Photovoltaic Simulator Simulation using Buck Converter with analysis using bode diagram and root locus. A PV Static Model is used to implement the characteristics of actual solar cell. A Low-Pass Filter is used to turn the static model of photovoltaic into the dynamic model. PI Controller is used to control buck converter's switch via PWM Generator. The system is analyzed using bode diagram for its inputs, such as solar irradiance and cell's temperature. Load,  $K_p$ , and  $K_i$  will be varied to analyzed the system. Root locus method is used to analyze the maximum gain system. From bode plot, the analyzed system similar to third order system. From root locus, the limits of gain stability system are so high about  $4.48 \times 10^5$  for solar irradiance input, and  $1.25 \times 10^6$  for cell's temperature input, so the system can be declared stable.

Key words : PV, photovoltaic, simulator, buck converter, PWM, low-pass filter, PI controller, bode diagram, root locus.

## DAFTAR ISI

LAPORAN SKRIPSI .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Pembatasan Masalah .....	2
1.4 Metodologi Penulisan .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
BAB 2 DASAR TEORI .....	4
2.1 <i>Photovoltaic</i> .....	4
2.1.1 Rangkaian karakteristik umum .....	4
2.1.2 Nilai estimasi awal untuk hambatan <i>photovoltaic</i> .....	8
2.2 Buck Converter .....	11
2.2.1 Konfigurasi .....	11
2.2.2 Analisis Kondisi Tunak .....	13
2.2.3 Penentuan Besar LC Filter .....	15
2.3 Pengendali PI .....	16
2.4 Pulse Width Modulation (PWM) .....	17
2.5 Fungsi Alih .....	19
2.6 Linearisasi .....	20
2.7 Diagram Bode .....	20
2.8 Tempat Kedudukan Akar .....	21
BAB 3 PERANCANGAN SIMULASI DAN PEMODELAN SISTEM .....	23
3.1 Deskripsi Rangkaian yang akan dibuat .....	23
3.2 Perancangan Buck Converter .....	24
3.3 <i>Photovoltaic</i> Model .....	25
3.3.1 Model Statik Sel Surya .....	25
3.3.2 Model Dinamik Sel Surya .....	27
3.4 Pengendali PI .....	27
3.5 Pulse Width Modulation (PWM) Generator .....	27
3.6 Blok Fungsi Alih Sistem .....	28
3.7 Model Non Linear Sistem .....	29
3.8 Model Linear Sistem .....	30
3.9 Model Ruang Keadaan Sistem Simulator .....	33

3.10 Fungsi Alih Sistem Secara Keseluruhan .....	34
<b>BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN SISTEM .....</b>	<b>37</b>
4.1 Perbandingan Simulasi dengan Kondisi Ideal .....	37
4.2 Pengaruh Masukan terhadap Sistem .....	39
4.3 Analisis Menggunakan Diagram Bode .....	40
4.3.1 Analisis Bode dengan Variasi Beban .....	40
4.3.2 Analisis Bode dengan Variasi Konstanta <i>Proportional</i> .....	42
4.3.3 Analisis Bode dengan Variasi Konstanta Integral .....	43
4.4 Analisis Sistem dengan Menggunakan Tempat Kedudukan Akar ....	45
4.4.1 Analisis TKA Terhadap Masukan <i>Solar Irradiance</i> .....	46
4.4.2 Analisis TKA Terhadap Masukan Suhu Sel .....	48
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>51</b>
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>52</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Rangkaian ekivalen <i>photovoltaic</i> .....	4
Gambar 2.2.	Grafik hubungan karakteristik arus dan tegangan <i>photovoltaic</i> ....	5
Gambar 2.3.	Kurva I-V dengan 4 bagian .....	9
Gambar 2.4.	Rangkaian ekivalen <i>photovoltaic</i> pengganti dengan tiga buah dioda paralel .....	9
Gambar 2.5.	Buck converter .....	12
Gambar 2.6.	Buck converter saat <i>switch</i> tertutup.....	12
Gambar 2.7.	Buck converter saat <i>switch</i> terbuka .....	13
Gambar 2.8.	Tegangan induktor pada satu periode <i>switching</i> . .....	13
Gambar 2.9.	Arus induktor.....	15
Gambar 2.10.	Gambar arus dan tegangan kapasitor.....	15
Gambar 2.11.	Skema pengendali PI.....	16
Gambar 2.12.	Bentuk sinyal sinusoidal PWM yang dibangkitkan dengan menggunakan sinyal segitiga yang dibandingkan dengan sinyal sinusoidal .....	19
Gambar 2.13.	Fungsi alih serdeerhana .....	19
Gambar 2.14.	Diagram blok lingkaran tertutup .....	21
Gambar 3.1	Blok diagram .....	23
Gambar 3.2	Rangkaian buck converter .....	24
Gambar 3.3	Blok diagram simulasi.....	28
Gambar 3.4	Blok diagram simulasi beserta fungsi alih <i>Laplace</i> .....	28
Gambar 4.1.	Grafik hasil simulasi hubungan antara arus, tegangan, dan daya PV simulator .....	38
Gambar 4.2.	Grafik ideal dari sel surya KC50T yang disusun seri sebanyak 15 buah.....	38
Gambar 4.3.	Grafik perbandingan pengaruh perubahan <i>solar irradiance</i> terhadap suhu sel.....	39
Gambar 4.4.	Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan <i>solar irradiance</i> dengan variasi beban .....	41
Gambar 4.5.	Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan suhu sel dengan variasi beban .....	41
Gambar 4.6.	Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan <i>solar irradiance</i> dengan variasi konstanta <i>proportional</i> .....	42
Gambar 4.7.	Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan suhu sel dengan variasi konstanta <i>proportional</i> .....	43
Gambar 4.8.	Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan <i>solar irradiance</i> dengan variasi konstanta integral.....	44
Gambar 4.9.	Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan suhu sel dengan variasi konstanta integral .....	45
Gambar 4.10.	Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm terhadap masukan <i>solar irradiance</i> .....	46
Gambar 4.11.	Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 hingga 110 ohm terhadap masukan <i>solar irradiance</i> .....	47

Gambar 4.12.	Grafik batas <i>gain</i> kestabilan sistem vs. beban terhadap masukan <i>solar irradiance</i> .....	47
Gambar 4.13.	Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm terhadap masukan suhu sel.....	48
Gambar 4.14.	Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm hingga 110 ohm terhadap masukan suhu sel.....	49
Gambar 4.15.	Hasil perbesaran grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm hingga 110 ohm terhadap masukan suhu sel pada sumbu nyata dari -150 hingga 50 dan untuk sumbu imajiner dari $-3.5 \times 10^4$ hingga $3.5 \times 10^4$ . ....	50



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tabel karakteristik sel surya KC50T .....	8
Tabel 3.1. Parameter spesifikasi dari sel surya Kyocera KC50T.....	26
Tabel 3.2. Tabel hasil perhitungan model rangkaian ekivalen pengganti tiga buah dioda paralel .....	26
Tabel 3.3. Tabel nilai awal untuk analisis perubahan beban.....	32
Tabel 3.4. Tabel nilai awal untuk analisis perubahan konstanta <i>proportional</i> .....	33
Tabel 3.5. Tabel nilai awal untuk analisis perubahan konstanta integral.....	33
Tabel 4.1. Tabel hasil simulasi perubahan beban terhadap arus dan tegangan.....	37



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sel surya merupakan divais yang dapat mengubah energi dari matahari menjadi energi listrik untuk dapat menyuplai listrik yang dibutuhkan dalam kehidupan sehari-hari. Sel surya memiliki kelebihan seperti bebas polusi, biaya perawatan serta biaya operasi yang murah. Hanya saja, efisiensi dari sel surya masih sangatlah kecil. Banyak faktor yang mempengaruhi performa dari sel surya ini sehingga diperlukan simulasi untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap performa dari sel surya.

PV Simulator dapat ditemukan dalam beberapa bentuk. Ada simulator yang dibentuk dengan menggunakan rangkaian eksperimen *photovoltaic* yang dibentuk menggunakan dioda (Koran, 2009), ada pula yang menggunakan *DSP Controller* (Li, 2009), dan lainnya hanya mensimulasikan kurva karakteristik dari *photovoltaic* (Tsai, 2008). Pada simulator yang menggunakan rangkaian eksperimen *photovoltaic* menggunakan dioda, simulator yang dibuat menggunakan arus hubung singkat sebagai masukannya pada rangkaian eksperimennya, bukan menggunakan masukan yang sebenarnya dari sel surya itu sendiri, yaitu *solar irradiation* dan suhu sel surya (Koran, 2009). Oleh karena itu rangkaian ini akan digantikan dengan menggunakan model dinamik sel surya agar simulator ini mencerminkan sel surya yang sebenarnya.

Pada skripsi ini akan dirancang sebuah simulator dengan menggunakan sebuah *DC-DC Converter*. *DC-DC Converter* yang digunakan adalah *buck converter* yang arusnya dikendalikan menggunakan pengendali PI untuk mengendalikan terbuka dan tertutupnya *switch* dari *buck converter* melalui *PWM (Pulse Width Modulation) Generator*. Karakteristik dari *photovoltaic* dibutuhkan untuk menghasilkan arus referensi untuk mengendalikan arus *buck converter*. Dengan menggunakan penurunan persamaan dari rangkaian ekivalen *photovoltaic*, maka didapat sebuah blok yang pada skripsi ini diberi nama blok model statik sel surya, karena merupakan blok yang berisi penurunan rumus statik

dari *photovoltaic* dengan masukan berupa solar irradiasi dan suhu sel surya. Lalu dari model statik sel surya ini, akan digunakan *low-pass filter* pada bagian keluarannya untuk mengubahnya menjadi model dinamik sel surya. Gabungan dari model statik sel surya dan *low-pass filter* ini disebut model dinamik sel surya. Keluaran dari Model dinamik sel surya digunakan sebagai referensi arus yang mengendalikan arus keluaran dari *buck converter* agar bekerja sesuai dengan prinsip *photovoltaic*.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian skripsi ini adalah untuk membuat simulasi dari simulator sel surya yang dapat menggantikan sel surya yang sebenarnya. Dari simulasi yang telah dibuat, akan diteliti pengaruh masukan sel surya terhadap keluarannya. Sistem yang dibuat akan dimodelkan dan dianalisis kestabilannya dengan menggunakan diagram bode terhadap masukannya, dengan variasi beban, konstanta *proportional* dan konstanta integral. Setelah dilakukan analisis dengan diagram bode, akan dilakukan pula analisis dengan metode Tempat Kedudukan Akar untuk menentukan seberapa besar *gain* yang masih dapat diberikan kepada sistem agar sistem stabil.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Topik yang akan dibahas dalam skripsi ini terbatas hanya dalam lingkup perancangan simulasi dari sebuah rangkaian *buck converter* yang nilai keluarannya disesuaikan dengan karakteristik dari *photovoltaic* dan pemodelan sistemnya dalam bentuk fungsi alih serta analisis dari sistem yang telah dibuat. Karakteristik sel surya yang digunakan adalah sel surya Kyocera KC50T.

## 1.4 Metodologi Penulisan

Metode penulisan yang digunakan pada buku skripsi adalah:

1. Studi literatur, yaitu dengan mencari sumber-sumber yang digunakan untuk referensi.
2. Teknik observasi, yaitu melakukan pengamatan dari jurnal-jurnal yang terkait dengan apa yang akan disimulasikan pada skripsi ini.

3. Teknik eksperimen, yaitu dengan cara mencoba merancang simulasi dan mencatat data hasil yang diperlukan.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Skripsi ini terdiri dari lima bab, yaitu Pendahuluan, Dasar teori, Perancangan Simulasi dan Pemodelan Sistem, Simulasi dan Analisis Kestabilan Sistem, dan Kesimpulan. Bab satu berisi Pendahuluan mengenai Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Pembatasan Masalah, Metodologi Penulisan, dan Sistematika Penulisan. Pada bab dua akan dijelaskan dasar teori mengenai *photovoltaic*, *buck converter*, pengendali PI, PWM, fungsi alih, linearisasi, dan diagram bode. Pada bab tiga akan dijelaskan bagaimana merancang simulasi dari *photovoltaic* serta pemodelan sistem simulasi yang dibuat. Pada bab empat dijelaskan tentang hasil simulasi serta analisis sistem yang telah dibuat, dalam skripsi ini digunakan diagram bode dan TKA untuk menganalisis kestabilan sistemnya. Pada bab lima berisi kesimpulan dari hasil penelitian.

## BAB 2

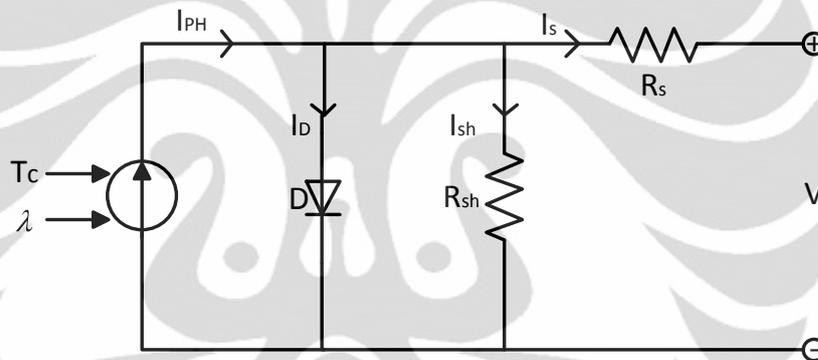
### DASAR TEORI

#### 2.1 *Photovoltaic*

##### 2.1.1 Rangkaian karakteristik umum

*Photovoltaic* adalah sebuah perangkat untuk menghasilkan daya listrik dengan mengubah radiasi matahari menjadi arus DC menggunakan semikonduktor yang menghasilkan efek *photovoltaic*. Penghasilan daya oleh *photovoltaic* menggunakan panel sel surya.

Berikut ini adalah gambar rangkaian ekuivalen dari *photovoltaic*.

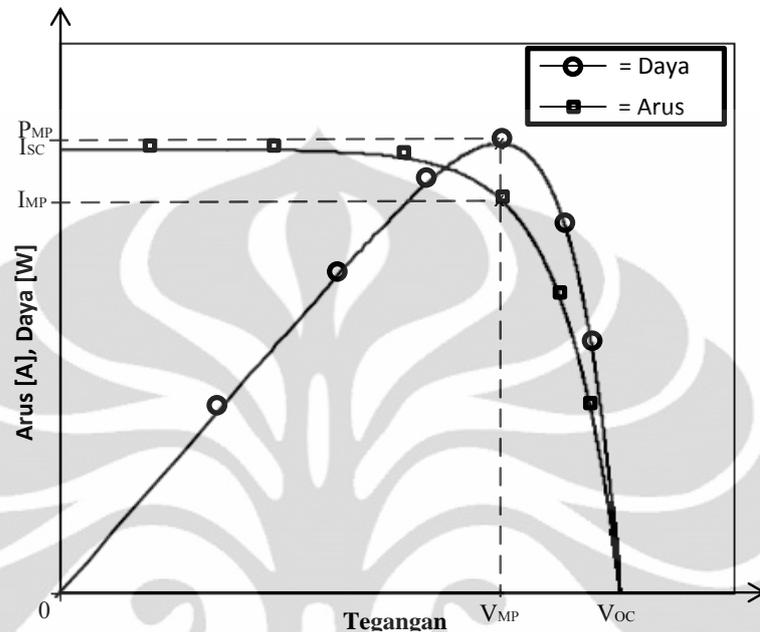


Gambar 2.1. Rangkaian ekuivalen *photovoltaic*

Pada umumnya, simulasi *photovoltaic* dibuat untuk mensimulasikan karakteristik hubungan antara arus dengan tegangan keluaran pada *photovoltaic* (Tsai, 2008). Seiring dengan bertambah besarnya nilai tegangan, maka mulai pada suatu nilai tegangan, arus yang dihasilkan akan berkurang dan hingga pada satu nilai tegangan, arus akan bernilai nol. Berikut ini adalah grafik dari hubungan karakteristik antara tegangan dengan arus pada *photovoltaic*, serta daya yang dihasilkan dari hubungan keduanya tersebut.

Pada saat tegangan semakin membesar, maka arus akan semakin kecil sampai akhirnya menuju nol saat tegangan open circuit ( $I=0$ ). Dari hubungan tersebut, akan ada satu titik dimana dengan nilai arus dan tegangan pada titik tersebut, menghasilkan daya yang terbesar, atau pada titik tersebut biasa dikenal MPP (*Maximum Power Point*). Titik untuk tegangan maksimum disebut  $V_{MP}$

sedangkan untuk arus adalah  $I_{MP}$  (Marnoto, 2007). Untuk teknik yang digunakan agar dapat menjaga daya untuk selalu pada titik maksimalnya biasa dikenal sebagai MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).



Gambar 2.2. Grafik hubungan karakteristik arus dan tegangan *photovoltaic*

Dalam simulasi ini, digunakan masukan tegangan pada blok rangkaian ekuivalen *photovoltaic* untuk mensimulasikan karakteristik dari *photovoltaic* itu sendiri. Karena yang merupakan masukan berupa tegangan, maka yang akan dikendalikan adalah arus hasil pengolahan rangkaian ekuivalen tersebut dengan pengendali PI untuk membangkitkan pulsa PWM pada blok-blok berikutnya.

Untuk membuat blok yang menghasilkan nilai referensi arus yang diinginkan, dibutuhkan karakteristik umum dari model statik sel surya. Dalam simulasi ini, digunakan sebuah blok untuk menghasilkan nilai dari arus referensi yang sesuai dengan karakteristik *photovoltaic*. Dari gambar 2.1, dapat diturunkan persamaan karakteristik umumnya sebagai berikut (Tsai, 2008):

$$I = I_{PH} - I_D - I_{Rsh} = I_{PH} - I_S \left( \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + IR_s \right)}{nkT_c} \right) - 1 \right) - \frac{V}{N_s} + IR_s \quad (2.1)$$

dimana:

- $I_{PH}$  = arus *photovoltaic*  
 $I_D$  = arus pada dioda  
 $I_{Rsh}$  = arus hambatan *shunt*  
 $I_{RS}$  = arus saturasi gelap  
 $q$  = elektron =  $1.6 \times 10^{-19} C$   
 $V$  = tegangan pada sel  
 $R_s$  = hambatan seri  
 $n$  = faktor ideal  
 $k$  = konstanta Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23} J / K$   
 $T_c$  = temperatur sel  
 $R_{sh}$  = hambatan *shunt*  
 $N_s$  = Jumlah sel surya yang disusun seri

Dari persamaan tersebut, dibentuklah sebuah blok model statik sel surya dengan beberapa masukan berupa tegangan referensi dari *buck converter*, *solar irradiance*, dan suhu sel yang kemudian diolah dengan model matematis dari model statik sel surya tersebut yang menghasilkan arus referensi untuk mengendalikan *buck converter* agar memiliki arus sebesar arus referensi tersebut.

Model statik sel surya perlu diubah menjadi model dinamik agar dapat dianalisis. Dengan menambahkan *low-pass filter* pada keluarannya dengan fungsi alih sebagai berikut:

$$\frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{I_{LPF} s}{I_{PV} s} = k \frac{1}{Ts + 1} \quad (2.2)$$

Sehingga persamaan 2.1 berubah menjadi:

$$I = I_{PH} - I_S \left( \exp \frac{q \left( \frac{V}{N_s} + I_{LPF} R_s \right)}{nkT_c} - 1 \right) - \frac{\frac{V}{N_s} + I_{LPF} R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

dimana:

$I_{LPF}$  = arus *low-pass filter*

$I_{PV}$  = arus keluaran model statik *photovoltaic*

Berikut ini adalah persamaan karakteristik lainnya untuuk melengkapi persamaan 2.3 (González-Longatt, 2005):

$$V_{OC} = V_{OC-STC} + \beta(T - T_{ref}) \quad (2.4)$$

$$I_{SC} = \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} I_{SC-STC} \quad (2.5)$$

$$I_{PH} = I_{SC} + \alpha T_c - T_{ref} \quad (2.6)$$

$$I_{RS} = \frac{I_{SC-STC}}{\left( \exp \frac{qV_{OC-STC}}{nkT_{ref}} - 1 \right)} \quad (2.7)$$

$$I_S = I_{RS} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left( \frac{qE_g \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{nk} \right) \quad (2.8)$$

dimana:

$\lambda$  = solar irradiance

$\lambda_{ref}$  = referensi solar irradiance = 1000 W/m<sup>2</sup>

$\alpha$  = koefisien temperatur dari arus

$I_{RS}$  = arus gelap saturasi

$I_{SC}$  = arus hubung singkat pada suhu kerja

$V_{OC}$  = tegangan open circuit pada suhu kerja

$q$  = elektron =  $1.6 \times 10^{-19} C$

$n$  = faktor ideal

$k$  = konstanta Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23} J / K$

$T_{ref}$  = suhu referensi = 25<sup>0</sup>C = 298 K

$I_{SC-STC}$  = arus hubung singkat pada *Standard Test Conditions*

$V_{OC-STC}$  = tegangan hubung singkat pada *Standard Test Conditions*

$I_S$  = arus saturasi sel surya

*Standard Test Conditions* adalah kondisi pengetesan standar dimana besar dari  $\lambda = \lambda_{ref}$  dan  $T_c = T_{ref}$ . Besar dari nilai ref telah didefinisikan dalam IEC 61215 *International Standard* (Adamo, 2009). Dalam skripsi ini, digunakan sel surya Kyocera KC50T dengan spesifikasi seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tabel karakteristik sel surya KC50T

Characteristics	Value	
Rated Power, Watts (Pmax)	54	+ 10%
		-5%
Open Circuit Voltage (Voc)	21.7	
Short Circuit current (Isc)	3.31	
Voltage at Load (Vpm)	17.4	
Current at Load (Ipm)	3.11	
Temp. coefficient of Voc (V/°C)	$-8.21 \times 10^{-2}$	
Temp. coefficient of Isc (A/°C)	$1.33 \times 10^{-3}$	
Temp. coefficient of Vpm (V/°C)	$-9.32 \times 10^{-2}$	

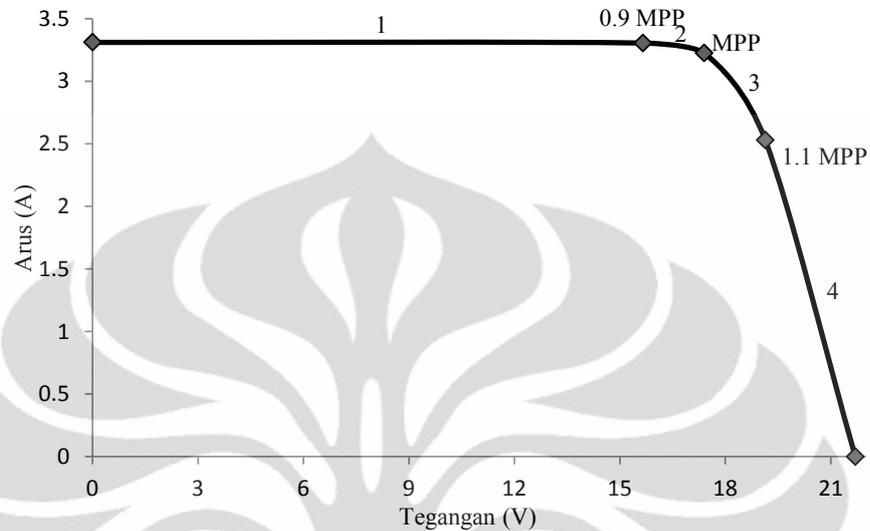
### 2.1.2 Nilai estimasi awal untuk hambatan *photovoltaic*

Untuk melengkapi parameter dari model yang ada, perlu ditentukan besar dari hambatan shunt  $R_{sh}$  dan hambatan ke beban  $R_s$ . Besar dari nilai  $R_s$  memiliki pengaruh dalam karakteristik hubungan antara arus dan tegangan didekat kondisi *open circuit*, dimana  $R_{sh}$  berperan dalam tegangan pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*, MPP) (Adamo, 2009).

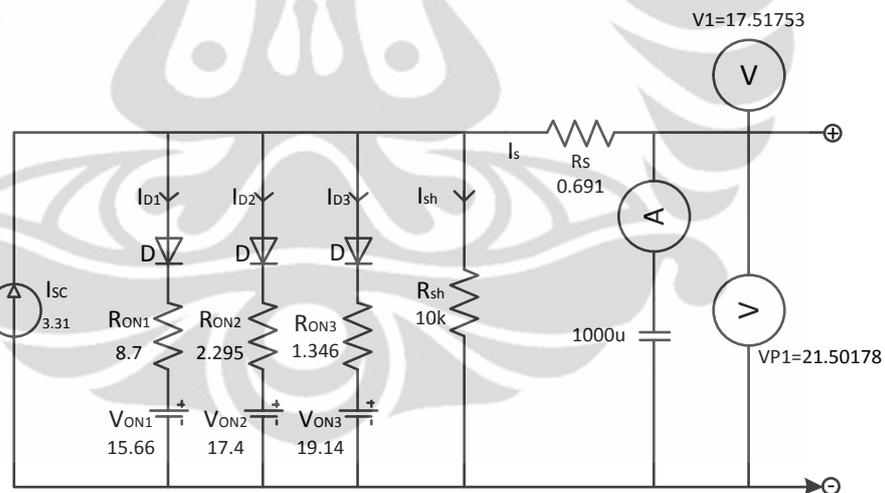
Pada dasarnya, kurva I-V dari *photovoltaic* dapat dibagi menjadi 4 bagian seperti pada gambar 2.3. (Lin, 2009)

Sebuah model linear rangkaian simpel dengan 3 buah dioda yang diparalelkan digunakan untuk mensubstitusi rangkaian ekivalen. Setiap dioda berperan sebagai 2 *state voltage controlled resistor* untuk memperkirakan setiap bagian. Dengan mengamati tegangan MPP dan tegangan rangkaian terbuka

menggunakan sebuah kapasitor yang terhubung pada keluaran untuk menyimpan arus yang mengalir melalui hambatan seri *photovoltaic*.



Gambar 2.3. Kurva I-V dengan 4 bagian



Gambar 2.4. Rangkaian ekivalen *photovoltaic* pengganti dengan tiga buah dioda paralel

Model tersebut diasumsikan dengan  $V_{ON1} < V_{ON2} < V_{ON3}$  dan mengatur titik-titiknya pada 0.9 MPP, MPP, dan 1.1 MPP (Lin, 2009). Setiap bagian diilustrasikan sebagai berikut:

- Bagian 1:  $V_D < V_{on1}$

Dalam bagian ini, semua dioda berada dalam kondisi OFF, dimana tegangan PV yang dihasilkan lebih kecil dari  $V_{ON1}$ . Maka semua arus yang dihasilkan mengalir melalui beban, dan sebagian kecil melalui hambatan *shunt*.

- Bagian 2:  $V_{ON1} \leq V_D < V_{ON2}$

Ketika tegangan PM melebihi  $V_{ON1}$ , tapi kurang dari  $V_{ON2}$ , dioda D1 aktif. Keluaran dari *photovoltaic* mulai berkurang sampai titik yang didefinisikan oleh perbedaan antara arus hubung singkat dengan arus yang mengalir pada dioda D1

$I_{D1} = I_{SC} - I_{OUT1}$ .  $R_{ON1}$  dapat dihitung melalui persamaan:

$$R_{ON1} = \frac{V_{MPP} - 0.9V_{MPP}}{I_{D1}} \quad (2.9)$$

- Bagian 3:  $V_{ON1} \leq V_D < V_{ON2}$

Pada bagian ini, dioda D1 dan dioda D2 aktif. Akan tetapi, tegangan PV masih lebih kecil dari  $V_{ON3}$ . Arus yang mengalir pada 2 cabang dioda ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_{D1} = \frac{1.1V_{MPP} - 0.9V_{MPP}}{R_{ON1}} \quad (2.10)$$

$$I_{D2} = I_{SC} - I_{D1} - I_{OUT2} \quad (2.11)$$

$$R_{ON2} = \frac{1.1V_{MPP} - V_{MPP}}{I_{D2}} \quad (2.12)$$

- Bagian 4:  $V_{ON3} \leq V_D < V_{OC}$

Dengan kondisi semua dioda aktif, arus keluaran PV berada pada titik minimum mendekati nol pada titik tegangan rangkaian terbuka.  $R_{ON3}$  dihitung setelah didapat seberapa banyak arus yang mengalir di setiap cabang dioda.

$$I_{D1} = \frac{V_{OC} - 1.1V_{MPP}}{R_{ON1}} \quad (2.13)$$

$$I_{D2} = \frac{V_{OC} - 1.1V_{MPP}}{R_{ON2}} \quad (2.14)$$

$$I_{D3} = I_{SC} - I_{D1} - I_{D2} - I_{OUT3} \quad (2.15)$$

$$R_{ON3} = \frac{V_{OC} - 1.1V_{MPP}}{I_{D3}} \quad (2.16)$$

Nilai  $R_s$  dan  $R_{sh}$  dalam simulasi ini akan ditentukan pada kondisi standar referensi ( $\lambda_{ref} = 1000 W/m^2$  dan  $T_c = 25^{\circ}C$ ). Hambatan seri  $R_s$  dan hambatan *shunt*  $R_{sh}$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_s = \frac{V_{OC} - 0.5 V_{OC} + V_{MPP}}{I_{OUT2} - I_{OC}} \quad (2.17)$$

$$R_{sh} = \frac{0.5V_{OC} - V_{SC}}{I_{SC} - I_X} \quad (2.18)$$

Hambatan *shunt* idealnya dibuat dengan nilai hambatan yang sebesar-besarnya. Agar didapat nilai  $R_{sh}$  yang besar, maka diasumsikan besar dari  $I_{SC} - I_X = 1$  mA dan  $V_{SC} = 0$  Volt, dan didapat besar hambatan *shunt* ( $R_{sh}$ ) pada kondisi standar sebesar 10850 ohm (Lin, 2009). Untuk besar dari  $R_s$  dibuat sekecil-kecilnya untuk menghindari penurunan tegangan. Dengan mengasumsikan  $I_{OC} = 1$  nA (Lin, 2009), maka didapat besar dari  $R_s$  pada kondisi standar adalah 0.691 ohm.

## 2.2 Buck Converter

### 2.2.1 Konfigurasi

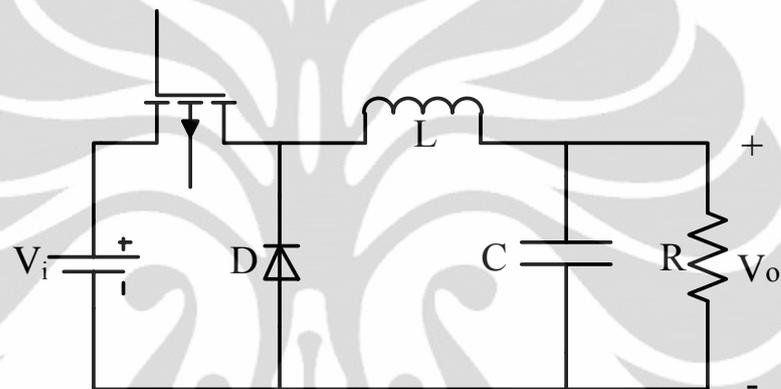
*Buck converter* merupakan salah satu jenis *switching converter* yang dapat menurunkan tegangan keluarannya (Gunawan, 2009). *Buck converter* merupakan DC-DC Converter yang bersifat menurunkan tegangan. Konfigurasinya, mirip dengan *boost converter*, yang merupakan *switched-mode power supply*, yang menggunakan dua buah *switch*, yaitu sebuah transistor dan sebuah dioda, sebuah induktor, dan sebuah kapasitor. Tegangan keluarannya diatur dengan mengatur *duty cycle* yang diberikan kepada *switching device*.

*Buck converter* bekerja cukup simpel, dengan sebuah induktor dan dua buah *switch* (transistor dan dioda) yang mengontrol induktor. *Switch* tersebut menghubungkan antara induktor dengan sumber tegangan untuk menyimpan energi dalam induktor dan mengeluarkannya ke beban.

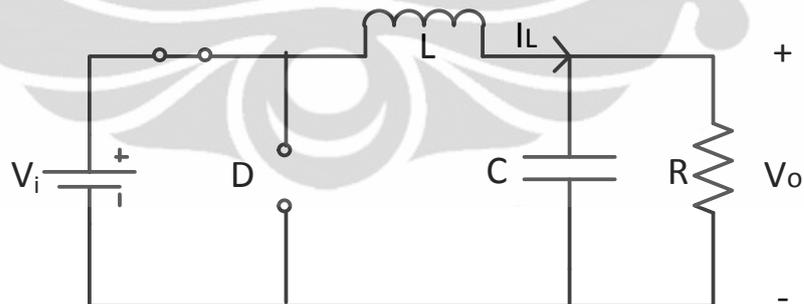
*Buck converter* bekerja dalam mode kontinu, jika arus yang melalui induktor tidak pernah turun menjadi nol dalam siklus *switch*. Dalam mode ini, prinsip kerjanya adalah sebagai berikut:

Saat *switch* tertutup, tegangan yang melalui induktor adalah  $V_L = V_i - V_o$ . Arus yang melalui induktor bertambah secara linier. Seiring dengan dioda dalam mode *reverse bias* oleh sumber tegangan  $V$ , tidak akan ada arus yang mengalir melalui dioda tersebut. Sedangkan pada saat *switch* terbuka, dioda akan menjadi *forward bias*. Tegangan yang melalui induktor adalah  $V_L = -V_o$ . Arus  $I_L$  akan berkurang.

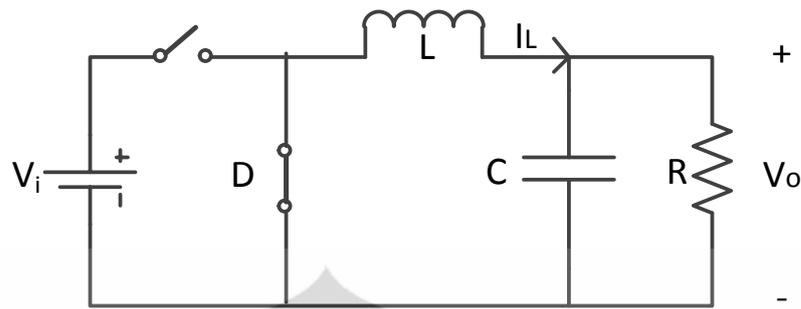
Gambar 2.5 merupakan gambar buck converter secara umum, gambar 2.6 merupakan gambar buck converter saat *switch* tertutup, dan gambar 2.7 merupakan gambar buck converter saat *switch* terbuka.



Gambar 2.5. Buck converter



Gambar 2.6. Buck converter saat *switch* tertutup

Gambar 2.7. Buck converter saat *switch* terbuka

### 2.2.2 Analisis Kondisi Tunak

Analisis kondisi tunak dilakukan dengan menganalisis rangkaian pada kondisi *switch* tertutup dan terbuka (Gunawan, 2009). Pada analisis ini, *switch* diasumsikan ideal.

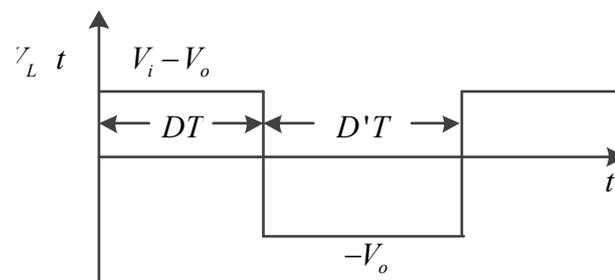
Pada saat *switch* tertutup, rangkaian ekivalen buck converter akan tampak seperti pada gambar 2.6. Pada kondisi ini tegangan pada induktor adalah:

$$V_L = V_i - V_o - L \frac{di_L}{dt} \quad (2.19)$$

Pada saat *switch* terbuka, rangkaian ekivalen buck converter akan tampak seperti pada gambar 2.7. Pada kondisi ini tegangan pada induktor adalah:

$$V_L = -V_o - L \frac{di_L}{dt} \quad (2.20)$$

Maka kondisi tegangan induktor adalah seperti tampak pada gambar 2.8, dimana  $DT$  menunjukkan waktu pada saat *switch* tertutup dan  $D'T$  menunjukkan waktu saat *switch* terbuka.

Gambar 2.8. Tegangan induktor pada satu periode *switching*.

Kondisi tunak dicapai pada saat arus yang dilepas induktor sudah sama dengan arus yang diserap induktor selama satu periode. Menurut persamaan induktor:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.21)$$

Maka integrasi dalam satu periode dari  $t = t_0$  sampai dengan  $t = T$  didapatkan:

$$i_L(T) - i_L(t_0) = \int_0^T V_L dt \quad (2.22)$$

Karena pada kondisi tunak nilai total perubahan arus adalah nol, maka didapatkan:

$$0 = \int_0^T V_L dt \quad (2.23)$$

Persamaan 2.23 disebut *inductor volt-second balance* yang akan digunakan untuk menurunkan karakteristik tunak dari sistem buck converter.

Dari gambar 2.8, didapatkan nilai tegangan induktor selama satu periode sehingga:

$$\int_0^T V_L dt = (V_i - V_o) DT + (-V_o) (1-D) T \quad (2.24)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.23 ke persamaan 2.24 didapatkan:

$$0 = (V_i - V_o) DT + (-V_o) (1-D) T$$

Dengan membagi kedua sisi dengan T, didapatkan:

$$0 = (V_i - V_o) D + (-V_o) (1-D)$$

Didapatkan penyelesaian untuk  $V_o$  adalah:

$$V_o = DV_i = M(D) V_i \quad (2.25)$$

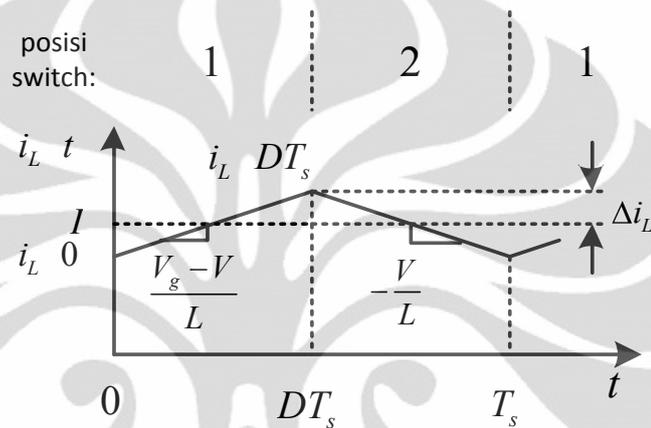
dimana  $M(D)$  menunjukkan *gain* dari sistem.

Hasil penurunan analisis kondisi tunak dari persamaan 2.25 menunjukkan karakteristik sistem buck converter. Jika *gain*  $M(D)$  diplot terhadap duty ratio  $D$ , maka akan didapatkan hasil seperti pada gambar 2.3. Pada gambar 2.3 terlihat bahwa nilai *gain* sistem dapat bernilai dari nol sampai dengan satu. Artinya sistem buck converter dapat mengubah tegangan keluarannya menjadi lebih kecil sampai dengan sama dengan tegangan masukan yang diberikan, sebanding dengan besarnya duty ratio yang diberikan.

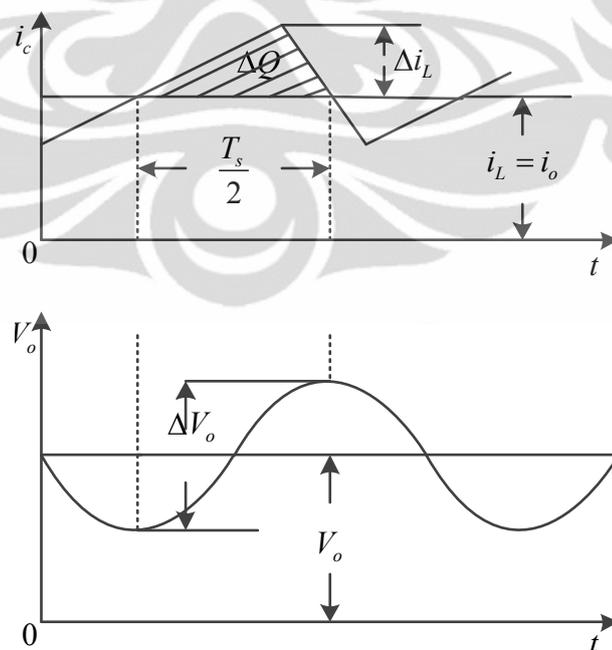
### 2.2.3 Penentuan Besar LC Filter

Besarnya LC filter juga perlu ditentukan dalam merancang *buck converter*. Agar sistem beroperasi pada daerah yang kontinu, maka arus induktor harus tetap kontinu dalam satu periode (Gunawan, 2009).

Untuk menentukan besar dari induktansi yang digunakan adalah dengan memperhatikan arus pada induktor (Gunawan, 2009). Arus pada induktor selama *switch* dalam kondisi tertutup dan terbuka adalah sebagai berikut:



Gambar 2.9. Arus induktor



Gambar 2.10. Gambar arus dan tegangan kapasitor

Arus yang mengalir pada induktor harus dibuat selalu kontinu untuk dapat dalam keadaan kontinu (Gunawan, 2009). Dengan kata lain, arus tidak boleh turun hingga bernilai nol. Oleh karena itu, dapat ditentukan bahwa besar minimum dari sebuah induktansi sebesar:

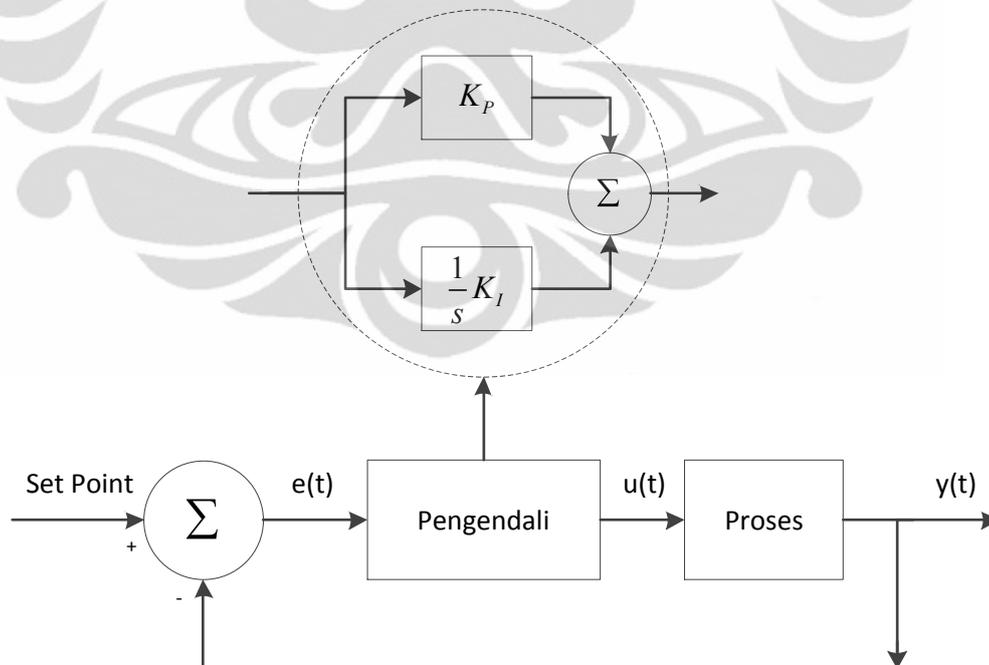
$$L > \frac{(1-D)R}{2f} \quad (2.26)$$

Lalu, untuk menentukan besarnya kapasitansi yang digunakan adalah dengan memperhatikan ripple tegangan yang terjadi pada keluaran. Ripple tegangan kapasitor akan sebanding dengan perubahan muatan kapasitor. Besarnya perubahan muatan pada kapasitor ini ditunjukkan pada gambar 2.3.

Dari hubungan dimana perubahan muatan sebanding dengan kapasitansi dikalikan dengan perubahan muatan, bisa didapatkan hubungan faktor ripple, yaitu (Gunawan, 2009):

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.27)$$

### 2.3 Pengendali PI



Gambar 2.11. Skema pengendali PI

Pada sistem yang dibuat ini, diperlukan kompensator untuk mengatur arus keluaran agar sama dengan arus referensi dari model dinamik sel surya. Pada skripsi ini kompensator yang digunakan adalah kompensator PI.

Skema pengendali PI ditunjukkan pada gambar 2.7. Pengendali PI merupakan penjumlahan dari dua buah aksi kendali, yaitu *proportional* yang ditunjukkan pada oleh  $K_p$  dan integral yang ditunjukkan oleh  $\frac{1}{s}K_I$ . Masing-masing pengendali mempunyai *gain*, yaitu  $K_p$  untuk pengendali *proportional* dan  $K_I$  untuk pengendali integral.

Masing-masing pengendali ini memiliki fungsinya tersendiri (Gunawan, 2009). Pengendali *proportional* berfungsi untuk mengurangi *rise time* dan akan mengurangi *steady state error*. Untuk pengendali integral, berfungsi untuk menghilangkan *steady state error* namun dampaknya adalah *transient response* akan menjadi buruk.

Penurunan persamaan fungsi alih pengendali PI dalam bentuk *Laplace* adalah sebagai berikut:

$$u(s) = \left( K_p + \frac{1}{s}K_I \right) e(s) \quad (2.28)$$

dimana:

$u(s)$  = keluaran pengendali PI yang akan menjadi input proses selanjutnya

$e(s)$  = *error* sistem terhadap *set point*

$K_p$  = konstanta pengendali *proportional*

$K_I$  = konstanta pengendali integral

## 2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation, atau yang biasa dikenal dengan sebutan PWM, adalah teknik yang biasa digunakan untuk mengendalikan alat-alat listrik, seperti *switch* elektronik. Rata-rata tegangan dan arus yang diberikan ke beban pada rangkaian listrik tersebut dikendalikan oleh *switch* elektrik diantara penyuplai daya dan beban dengan menutup dan membuka *switch* elektrik tersebut. Semakin lama *switch* dalam kondisi menutup, maka akan semakin banyak daya yang disuplai ke beban karena daya dari sumber akan mengalir ke beban.

*Duty cycle*, mendeskripsikan seberapa banyak waktu “on” dalam satu periode waktu. Jika *duty cycle* bernilai rendah, maka *switch* yang dikendalikan akan lebih lama membuka daripada menutup (kondisi on). *Duty cycle* biasa diekspresikan dalam persen, dengan nilai maksimal 100% jika *switch* selalu dalam kondisi menutup (kondisi on).

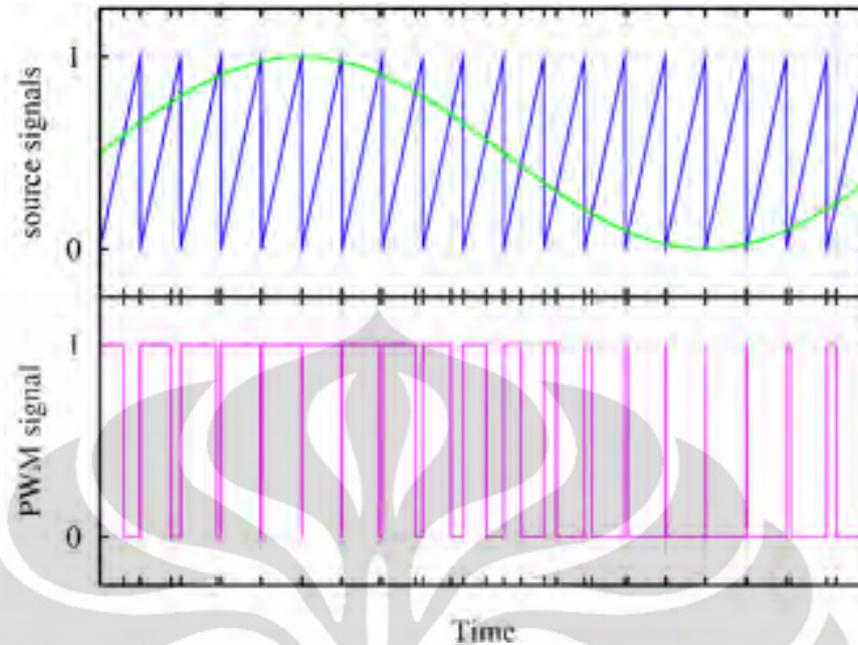
Keuntungan utama dari PWM adalah daya yang hilang dalam alat *switch* sangat rendah. Ketika *switch* membuka, tidak ada arus, dan ketika dalam kondisi menutup hampir tidak ada tegangan drop sama sekali. Daya hilang yang merupakan hasil perkalian dari tegangan dan arus, dalam kasus tersebut mendekati nil. PWM juga bekerja dengan baik dalam kendali digital, yang karena sifat on/off-nya, dapat dengan mudah di-set sesuai dengan *duty cycle* yang dibutuhkan.

Dalam skripsi ini, *duty cycle* merupakan persentase dari sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan *switch* pada *buck converter* per periode waktu. *Duty cycle* cenderung relatif konstan saat nilai dari arus sudah mencapai nilai arus referensi yang diinginkan. Hubungan antara *duty cycle* dengan tegangan yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

$$D_c = \frac{V_i}{V_o} \quad (2.29)$$

Cara termudah untuk menghasilkan sebuah sinyal PWM adalah dengan metode intersective, yang hanya dengan membutuhkan sebuah sinyal segitiga yang dengan mudah dapat dihasilkan dengan menggunakan *oscillator* dan sebuah *comparator*. Ketika nilai dari sinyal referensi lebih besar daripada sinyal segitiga, sinyal PWM akan bernilai 1 atau *high*, sedangkan saat bernilai lebih kecil, sinyal PWM akan bernilai nol atau *low*.

Dalam skripsi ini, PWM digunakan untuk mengendalikan *switch* dari *buck converter* agar arus keluarannya sesuai dengan arus referensi dari model dinamik sel surya. Keluaran dari pengendali PI akan dibandingkan dengan sinyal segitiga gigi gergaji yang apabila nilai dari keluaran pengendali PI lebih besar dari besar nilai segitiga, maka keluaran dari PWM adalah 1, sedangkan saat keluaran pengendali PI lebih kecil dari besar nilai segitiga, maka keluaran dari PWM akan bernilai 0.



Gambar 2.12. Bentuk sinyal sinusoidal PWM yang dibangkitkan dengan menggunakan sinyal segitiga yang dibandingkan dengan sinyal sinusoidal

## 2.5 Fungsi Alih

Fungsi alih merupakan representasi matematis dari hubungan antara masukan dan keluaran suatu sistem linear waktu. Fungsi alih biasa digunakan dalam analisis sebuah sistem dalam bidang pemrosesan sinyal, teori komunikasi, dan sistem kendali.

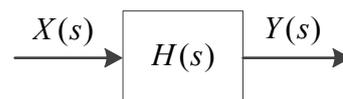
Berikut ini adalah bentuk fungsi alih yang paling umum dijumpai, fungsi alih dalam bentuk laplace dengan masukan  $X(s)$  dan keluaran  $Y(s)$ , yaitu:

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (2.30)$$

atau:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.31)$$

dengan blok fungsi alih



Gambar 2.13. Fungsi alih sederhana

dimana  $H(s)$  merupakan fungsi alih sistem LTI.

## 2.6 Linearisasi

Dalam matematika, linearisasi merupakan sebuah metode untuk menemukan perkiraan linear sebuah fungsi terhadap suatu titik. Dalam studi sistem dinamik, linearisasi merupakan metode untuk menganalisis kestabilan terhadap sebuah titik keseimbangan pada suatu sistem persamaan differensial nonlinear atau sistem dinamik diskrit. Persamaan umum yang digunakan pada linearisasi adalah:

$$y = f(a) + f'(a)(x - a) \quad (2.32)$$

yang merupakan penurunan dari fungsi  $f(x)$  terhadap nilai titik kerja  $a$ .

## 2.7 Diagram Bode

Suatu sistem yang memiliki fungsi alih  $G(s)H(s)$ , tanggapan frekuensi dari sistem tersebut dapat diperoleh dengan mensubstitusi  $s = j\omega$ . Maka diperoleh responnya adalah  $G(j\omega)H(j\omega)$ . Oleh karena  $G(j\omega)H(j\omega)$  merupakan bilangan kompleks, maka untuk menggambarkannya dibutuhkan dua buah grafik yang merupakan fungsi dari  $\omega$ , yaitu:

1. Grafik *magnitude* terhadap frekuensi
2. Grafik fasa terhadap frekuensi

Diagram Bode merupakan salah satu metode analisis dalam perancangan sistem kendali yang memperhatikan tanggapan frekuensi sistem yang digambar secara logaritmik. Dari kedua buah grafik yang digambar tersebut, yang perlu diperhatikan adalah *Gain Margin* (GM) dan *Phase Margin* (PM). Nilai GM besarnya adalah  $\frac{1}{G}$ , dimana  $G$  adalah *gain* saat kurva grafik fasa memotong nilai  $-180^\circ$ . Nilai GM umumnya dinyatakan dalam dB, yang dihitung dengan  $20\log_{10}(GM)$ , sementara PM adalah nilai fasa dalam derajat saat kurva grafik *magnitude* dengan frekuensi memotong nilai 0 dB. Sistem dapat dinyatakan stabil apabila GM bernilai positif pada saat kurva fasa memotong  $-180^\circ$ , atau jika grafik *magnitude* selalu berada pada nilai negatif.

Tanggapan frekuensi dari suatu sistem dipengaruhi oleh beberapa komponen dalam sistem fungsi alih yang berpengaruh, yaitu:

1. Bati (*gain*) konstan

2. *Pole* dan *zero* yang terletak pada titik awal (*origin*)
3. *Pole* dan *zero* yang tidak terletak pada titik awal
4. *Pole* dan *zero* kompleks
5. Waktu tunda ideal

Untuk dapat menganalisis sistem dengan bode diagram dari bentuk ruang keadaan:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.33)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.34)$$

dibutuhkan persamaan untuk mengubahnya menjadi bentuk fungsi alih lingkaran tertutup dengan menggunakan persamaan berikut:

$$G_c s = C (sI - A)^{-1} B + D \quad (2.35)$$

Setelah didapatkan bentuk fungsi alih lingkaran tertutup, perlu diubah terlebih dahulu menjadi bentuk fungsi alih lingkaran terbuka dengan persamaan:

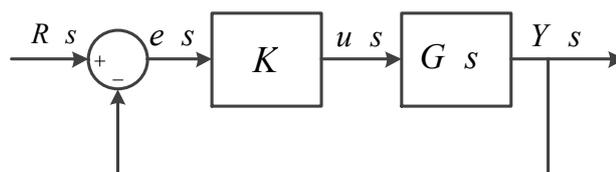
$$G_o s = \frac{G_c s}{1 - G_c s} \quad (2.36)$$

Setelah persamaan fungsi alih lingkaran terbuka didapat, maka diagram bode dapat digambar dan dianalisis kestabilan sistem yang telah dibuat.

## 2.8 Tempat Kedudukan Akar

Tempat Kedudukan akar sebuah sistem merupakan kurva atau tempat kedudukan dari akar-akar persamaan karakteristik (pole-pole dari fungsi alih lingkaran tertutup) dengan parameter *gain*  $K$  yang berubah-ubah.

Tempat Kedudukan Akar merupakan metode yang cukup efektif dalam perancangan dan analisis stabilitas dan tanggapan transien. TKA dapat memberikan informasi grafis tentang kestabilan sebuah sistem. Karakteristik tanggapan transient sistem lingkaran tertutup dapat ditentukan dari lokasi pole-pole (lingkaran tertutupnya).

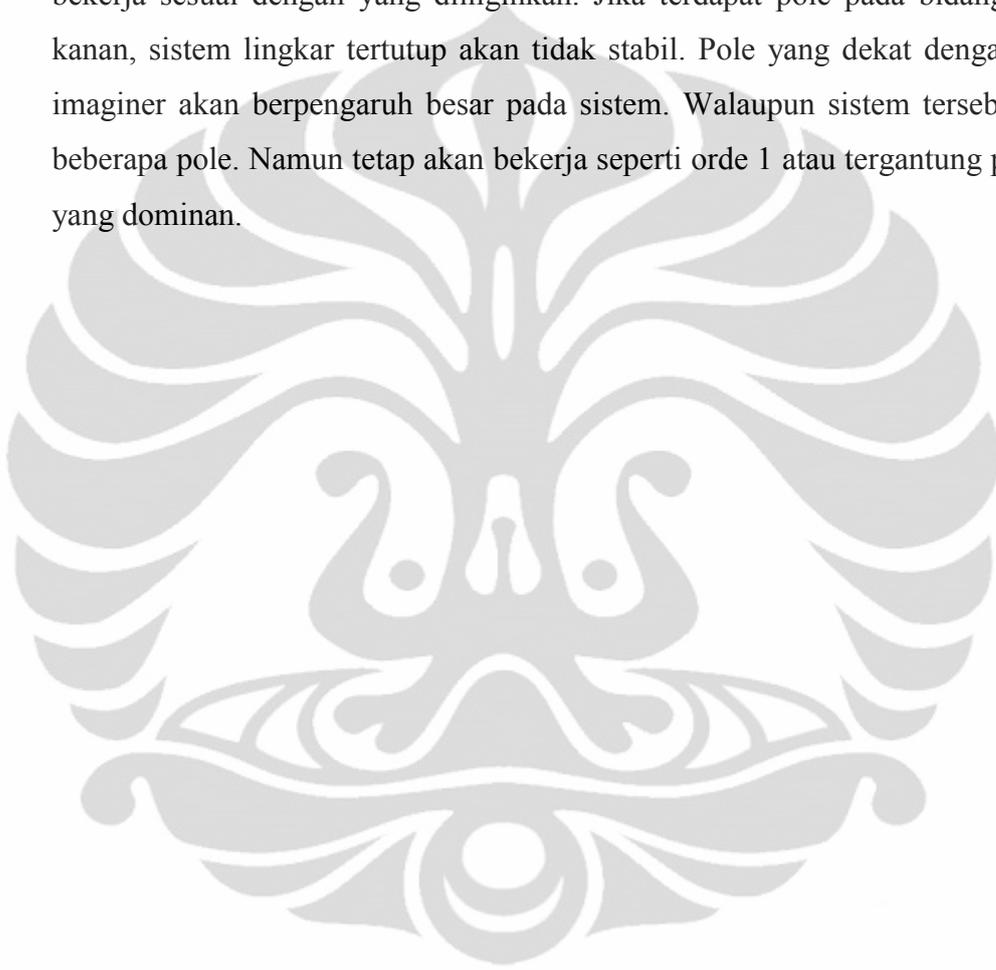


Gambar 2.14. Diagram blok lingkaran tertutup

Fungsi alih lingkaran tertutup adalah sebagai berikut:

$$\frac{Y_s}{R_s} = \frac{KG_s}{1 + KG_s} \quad (2.37)$$

TKA merupakan lokasi sebenarnya dari semua kemungkinan pole lingkaran tertutup. Dari TKA dapat dipilih *gain* sehingga sistem lingkaran tertutup akan bekerja sesuai dengan yang diinginkan. Jika terdapat pole pada bidang sebelah kanan, sistem lingkaran tertutup akan tidak stabil. Pole yang dekat dengan sumbu imajiner akan berpengaruh besar pada sistem. Walaupun sistem tersebut punya beberapa pole. Namun tetap akan bekerja seperti orde 1 atau tergantung pada pole yang dominan.

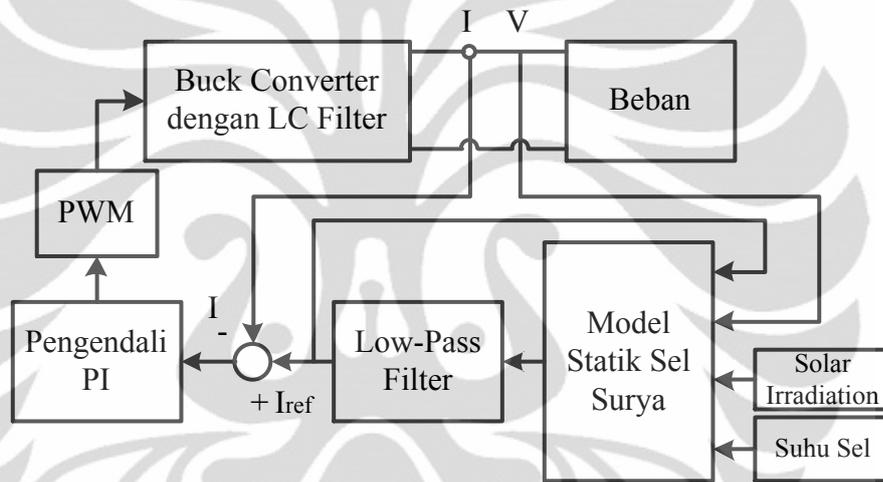


### BAB 3

## PERANCANGAN SIMULASI DAN PEMODELAN SISTEM

### 3.1 Deskripsi Rangkaian yang akan dibuat

Pada skripsi ini, dirancang sebuah simulator menggunakan *buck converter* yang tegangan keluarannya akan diolah pada blok model statik sel surya sehingga dihasilkan arus referensi untuk mengendalikan arus pada *buck converter* agar bekerja sesuai dengan karakteristik *photovoltaic*. Berikut ini adalah blok diagram dari simulasi yang dibuat.



Gambar 3.1 Blok diagram

Masing-masing blok memiliki fungsi tersendiri. Blok *buck converter* dibagi menjadi dua blok, yaitu blok *Buck Converter* dengan *LC Filter* dan beban. *LC Filter* yang digunakan dalam simulasi ini hanya satu buah induktor dan satu buah kapasitor yang besarnya masing-masing adalah  $1\text{mH}$  dan  $237.5\ \mu\text{F}$ .

Tegangan pada beban *buck converter* dideteksi dan dijadikan masukan ke dalam blok model statik sel surya. Blok model statik sel surya memiliki 4 buah masukan, yaitu suhu sel, *solar irradiation*, tegangan *buck converter*, dan arus umpan balik keluaran dari *low-pass filter*. Keempat buah masukan tersebut diolah dalam persamaan model statik sel surya dan dihasilkan arus referensi untuk mengendalikan arus *buck converter*. Namun dalam simulasi ini digunakan *low-pass filter* pada keluarannya yang berfungsi untuk mengubah model statik dari

*photovoltaic* ini menjadi sebuah model dinamik. *Low-pass filter* ini berfungsi agar arus referensi memiliki waktu respons agar menyerupai sel surya yang sebenarnya.

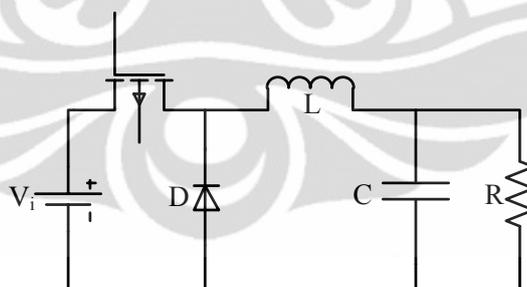
Berikutnya, arus keluaran *low-pass filter* dibandingkan dengan arus dari *buck converter* dan errornya akan dimasukkan ke dalam pengendali PI. Di dalam pengendali PI, error tersebut akan diberikan *gain proportional* dan integral. Keluarannya akan menjadi masukan untuk blok PWM

Blok PWM akan menghasilkan pulsa-pulsa dengan nilai *duty cycle* tertentu. Besar *duty cycle* didapat dari keluaran pengendali PI. Frekuensi dari PWM dapat diatur sesuai dengan keinginan. Semakin besar frekuensinya, semakin baik hasil pengendaliannya. Pulsa-pulsa PWM ini akan mengendalikan *switch* dari *buck converter* apakah terbuka atau tertutup.

Berikutnya akan dijelaskan secara detail perancangan tiap blok simulasi yang dibuat.

### 3.2 Perancangan Buck Converter

*Buck converter* yang dibuat dalam simulasi ini memiliki sebuah sumber tegangan DC, sebuah *switch*, sebuah dioda, sebuah induktor, sebuah kapasitor, dan sebuah beban.



Gambar 3.2 Rangkaian buck converter

Untuk besar dari tegangan DC dalam perancangan buck converter ini adalah 22 volt untuk tiap jumlah sel surya. Sebenarnya tegangan open circuit dari sel surya yang sebenarnya adalah sebesar 21,7 volt, dapat dilihat pada tabel 2.1. Namun karena dalam simulasi ini menggunakan pengendalian, tentunya akan ada overshoot pada saat tegangan mencapai titik yang diinginkan. Oleh karena itu, perlu ditambahkan toleransi agar dapat terlihat seberapa besar *overshoot*-nya.

Dalam kasus ini, tegangan DCnya didisain sebesar 22 volt/sel surya agar dapat terlihat *overshoot*-nya. Dikarenakan digunakan sebanyak 15 buah sel surya, maka sistem yang dirancang memiliki tegangan DC sebesar 330 volt.

Lalu besar induktor yang digunakan ditetapkan dengan menggunakan persamaan 2.7. Dengan mengambil perkiraan besar hambatan sebesar 200 ohm, frekuensi PWM sebesar 10 kHz, dan duty cycle maksimum sebesar 0.95, didapatkan besar minimum dari induktor adalah sebesar 0.5 mH. Karena nilai tersebut merupakan batas minimal sebuah buck converter dapat bekerja secara kontinu, maka dalam simulasi ini akan digunakan besar dari induktor sebesar 1 mH.

Berikutnya besar kapasitor yang akan ditetapkan. Berdasarkan persamaan 2.8, dengan besar dari fluktuasi tegangan sebesar 0.5%, duty cycle 0.95, induktor 1 mH, dan frekuensi sebesar 10 kHz, maka didapatkan besar dari kapasitor sekitar  $237.5 \mu F$ .

Dari yang telah dipaparkan di atas, didapatkan nilai-nilai parameter buck converter sebagai berikut:

Tegangan = 22 volt/sel surya  
 Induktor = 1 mH  
 Kapasitor =  $21 \mu F$

Besar dari hambatan R masih dapat diubah-ubah untuk penyesuaian dari titik karakteristik sel surya yang diinginkan karena untuk menggambarkan kurva karakteristik *photovoltaic* diperlukan mengubah besar dari beban R.

### 3.3 Photovoltaic Model

#### 3.3.1 Model Statik Sel Surya

Model statik sel surya merupakan blok yang berisi persamaan *photovoltaic* yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya, yaitu persamaan 2.1. Dalam persamaan tersebut, terdapat beberapa parameter yang tentunya perlu ditentukan untuk dapat menjalankan simulasi ini.

Untuk penentuan besar dari hambatan  $R_s$  dan  $R_{sh}$ , akan dihitung pada kondisi STC, yaitu dengan besar *solar irradiance*  $1000 \text{ W/m}^2$  dan suhu sel surya  $25^\circ\text{C}$  atau 298 K.

Tabel 3.1. Parameter spesifikasi dari sel surya Kyocera KC50T

Tingkat Iradiasi	$1000 \text{ W/m}^2$
Vmpp	17.4 Volt
Impp	3.11 Ampere
Pmpp	54.114 Watt
Isc	3.31 Ampere
Voc	21.7 Volt
0.9 Vmpp	15.66 Volt
Vmpp	17.4 Volt
1.1 Vmpp	19.14 Volt
Iout2	3.11 Ampere
Iout3	2.152 Ampere

Tabel 3.2. Tabel hasil perhitungan model rangkaian ekivalen pengganti tiga buah dioda paralel

Tingkat Iradiasi	$1000 \text{ W/m}^2$
Bagian 1 ( $V_d < V_{on1}$ )	
Von1	15.66 Volt
Io1	3.31 Ampere
Bagian 2 ( $V_{on1} < V_d < V_{on2}$ )	
Id1	0.2 Ampere
Ron1	8.7 Ohm
Bagian 3 ( $V_{on2} < V_d < V_{on3}$ )	
Id1	0.4 Ampere
Id2	0.758 Ampere
Ron2	2.295 Ohm
Bagian 4 ( $V_{on3} < V_d < V_{oc}$ )	
Id1	0.294252874 Ampere
Id2	1.115 Ampere
Id3	1.9 Ampere
Ron3	1.346 Ohm

Dengan menggunakan persamaan 2.9-2.16 dan mengacu pada tabel 2.1, didapatkan hasil seperti pada tabel 3.1 dan 3.2.

Dalam simulasi ini, akan digunakan beberapa parameter:

Suhu Referensi	: $25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$
Koefisien temperatur arus hubung singkat	: $1.33 \times 10^{-3} \text{ A}/^{\circ}\text{C}$
Koefisien temperatur tegangan rangkaian terbuka	: $-8.21 \times 10^{-2} \text{ V}/^{\circ}\text{C}$
Faktor ideal dioda	: 27.5
<i>Solar irradiance reference</i>	: $1000 \text{ W}/\text{m}^2$
Arus hubung singkat	: 3.31 A
Tegangan rangkaian terbuka	: 21.7 Volt
Jumlah panel sel surya seri	: 15 buah
Hambatan seri <i>photovoltaic</i>	: 0.691 ohm
Hambatan <i>shunt photovoltaic</i>	: 10850 ohm

### 3.3.2 Model Dinamik Sel Surya

Model dinamik sel surya merupakan model dinamik dari *photovoltaic* yang didapat dengan menambahkan *low-pass filter* pada keluaran dari model statiknya. Parameter yang dibutuhkan adalah parameter konstanta waktu. Dalam simulasi ini digunakan konstanta waktu untuk *low-pass filter* sebesar 0.1, yang merupakan waktu kerja dari sel surya jika mendapatkan perubahan pada besar masukannya.

## 3.4 Pengendali PI

Untuk pengendali PI, yang dibutuhkan dalam perancangannya adalah besar dari konstanta *gain proportional*  $K_p$  dan besar dari *gain integral*  $K_i$ . Metode yang digunakan untuk mendapatkan besarnya menggunakan trial and error. Besar *gain proportional* yang digunakan dalam simulasi ini adalah 20 dan untuk *gain integral* adalah 10.

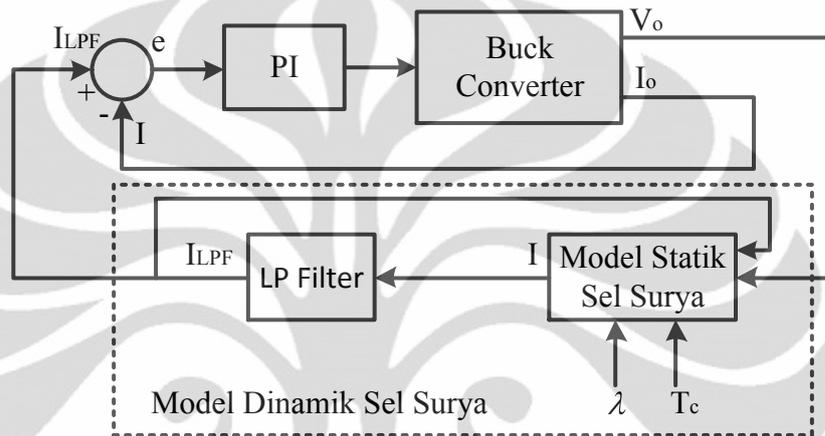
## 3.5 Pulse Width Modulation (PWM) Generator

PWM Generator yang digunakan adalah PWM diskrit dengan menggunakan sinyal gigi gergaji. Frekuensi PWM yang digunakan pada simulasi

ini 10 kHz. Besar frekuensi ini juga menentukan besar minimal induktor pada buck converter serta besar kapasitor.

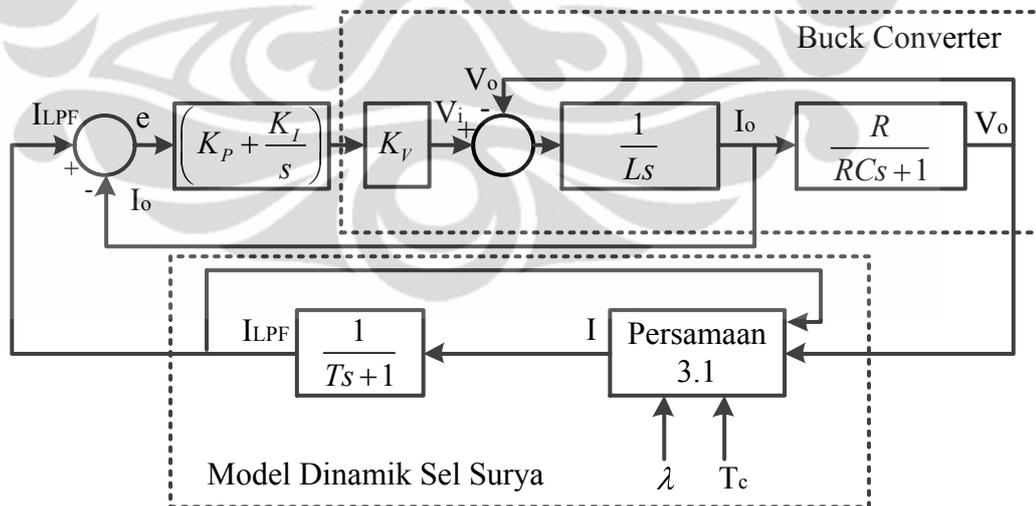
### 3.6 Blok Fungsi Alih Sistem

Setelah sistem didisain, sistem perlu dimodelkan dalam model matematis untuk dapat dianalisis. Dari rancangan simulasi yang dibuat, dapat dibuat blok diagram sebagai berikut:



Gambar 3.3 Blok diagram simulasi

dan berikut ini adalah blok diagram dengan fungsi alih *Laplace*-nya:



Gambar 3.4 Blok diagram simulasi beserta fungsi alih *Laplace*

dengan:

$$I = I_{PH} - I_S \left( \exp \left( \frac{q \left( \frac{V_o}{N_s} + I_{LPF} R_s \right)}{nkT_c} \right) - 1 \right) - \frac{V_o + R_s I_{LPF}}{R_{sh}} \quad (3.1)$$

### 3.7 Model Non Linear Sistem

Dari gambar 3.3 dan 3.4, dapat dimodelkan bentuk matematisnya dalam bentuk persamaan:

$$D = \left( K_P + \frac{K_I}{S} \right) I_{LPF} - I_o$$

$$e = I_{LPF} - I_o$$

$$D = K_P I_{LPF} - I_o + K_I \int e dt$$

$$D = K_P e + K_I X_{PI}$$

$$\frac{d}{dt} X_{PI} = I_{LPF} - I_o$$

$$D = K_P I_{LPF} - I_o + K_I X_{PI}$$

$$\frac{I_o}{V_i - V_o} = \frac{1}{LS}$$

$$\frac{d}{dt} I_o = \frac{1}{L} V_i - V_o$$

$$\frac{d}{dt} I_o = \frac{1}{L} K_V K_P I_{LPF} - I_o + K_I X_{PI} - V_o$$

$$\frac{d}{dt} I_o = \frac{K_V K_P}{L} I_{LPF} - \frac{K_V K_P}{L} I_o + \frac{K_V K_I}{L} X_{PI} - \frac{1}{L} V_o$$

$$\frac{d}{dt} V_o = -\frac{1}{RC} V_o + \frac{1}{C} I_o$$

$$\frac{I_{LPF}}{I} = \frac{1}{TS + 1}$$

$$\frac{d}{dt} I_{LPF} = -\frac{1}{T} I_{LPF} + \frac{1}{T} I$$

dimana  $I$  merupakan persamaan 3.1. Dengan mensubstitusikan persamaan 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 ke dalam persamaan 3.1, maka didapat persamaan 3.2 sebagai berikut:

$$I = \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} I_{SC-STC} + \alpha (T_c - T_{ref}) \right) - \frac{\frac{V_o}{N_s} + R_s I_{LPF}}{R_{sh}} - \left( \frac{I_{SC-STC} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3}{\left( \exp \frac{qV_{oc}}{nkT_{ref}} - 1 \right)} \exp \left( \frac{qE_g \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{nk} \right) \left( \exp \frac{q \left( \frac{V_o}{N_s} + I_{LPF} R_s \right)}{nkT_c} - 1 \right) \right) \quad (3.2)$$

Dari penurunan persamaan di atas, didapat hasil penurunan akhir sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} X_{PI} = I_{LPF} - I_o \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} I_o = \frac{K_V K_P}{L} I_{LPF} - \frac{K_V K_P}{L} I_o + \frac{K_V K_I}{L} X_{PI} - \frac{1}{L} V_o \quad (3.4)$$

$$\frac{d}{dt} V_o = -\frac{1}{RC} V_o + \frac{1}{C} I_o \quad (3.5)$$

$$\frac{d}{dt} I_{LPF} = -\frac{1}{T} I_{LPF} + \frac{1}{T} I \quad (3.6)$$

dengan besar dari  $I$  seperti pada persamaan 3.2.

### 3.8 Model Linear Sistem

Setelah didapatkan persamaan differensial dari sistem yang dibuat, ternyata didapatkan bahwa persamaan differensial tersebut tidak linear. Hal ini membuat sistem sulit untuk dianalisis. Oleh karena itu, diperlukan linearisasi agar dapat dianalisis lebih lanjut. Metode yg digunakan adalah metode euler.

Dari persamaan 3.2 hingga 3.6, dilakukan linearisasi sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \Delta X_{PI} = \Delta I_{LPF} - \Delta I_o$$

$$\frac{d}{dt} \Delta I_o = \frac{K_V K_P}{L} \Delta I_{LPF} - \frac{K_V K_P}{L} \Delta I_o + \frac{K_V K_I}{L} \Delta X_{PI} - \frac{1}{L} \Delta V_o$$

$$\frac{d}{dt} \Delta V_o = -\frac{1}{RC} \Delta V_o + \frac{1}{C} \Delta I_o$$

$$\frac{d}{dt} \Delta I_{LPF} = \left( -\frac{1}{T} - \frac{1}{T} \left( \frac{R_s}{R_{sh}} + \left( \frac{qR_s I_{RS} T_{c0}^2}{nkT_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \right) \Delta I_{LPF}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{T} \left( \frac{1}{N_s R_{sh}} - \left( \frac{q I_{RS}}{nk N_s} \frac{T_{c0}^2}{T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \Delta V_o + \frac{1}{T} \left( \frac{I_{SC-STC}}{\lambda_{ref}} \right) \Delta \lambda \\
& + \frac{1}{T} \left( \alpha + 3 \frac{T_{c0}^2}{T_{ref}^3} I_{RS} A_1 - \frac{q E_g T_{c0}}{nk T_{ref}^3} I_{RS} A_1 \right) \Delta T_c \\
& + \frac{1}{T} \left( 3 \frac{T_{c0}^2}{T_{ref}^3} I_{RS} A_1 A_2 + \frac{q T_{c0}}{nk T_{ref}^3} \left( E_g - \left( \frac{V_{o0}}{N_s} + I_{LPF0} R_s \right) \right) I_{RS} A_1 A_2 \right) \Delta T_c \\
\frac{d}{dt} \Delta I_{LPF} & = \left( -\frac{1}{T} - \frac{1}{T} \left( \frac{R_s}{R_{sh}} + \left( \frac{q R_s I_{RS} T_{c0}^2}{nk T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \right) \Delta I_{LPF} \\
& + \frac{1}{T} \left( \frac{1}{N_s R_{sh}} - \left( \frac{q I_{RS}}{nk N_s} \frac{T_{c0}^2}{T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \Delta V_o + \frac{1}{T} \left( \frac{I_{SC-STC}}{\lambda_{ref}} \right) \Delta \lambda \\
& + \frac{1}{T} \left( \alpha + \frac{T_{c0} I_{RS} A_1}{T_{ref}^3} \left( 3 T_{c0} - \frac{q E_g}{nk} \right) \right) \Delta T_c \\
& + \frac{1}{T} \frac{T_{c0} I_{RS} A_1 A_2}{T_{ref}^3} \left( 3 T_{c0} + \frac{q}{nk} \left( E_g - \left( \frac{V_{o0}}{N_s} + I_{LPF0} R_s \right) \right) \right) \Delta T_c \\
\frac{d}{dt} \Delta I_{LPF} & = \left( -\frac{1}{T} - \frac{1}{T} \left( \frac{R_s}{R_{sh}} + \left( \frac{q R_s I_{RS} T_{c0}^2}{nk T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \right) \Delta I_{LPF} \\
& + \frac{1}{T} \left( \frac{1}{N_s R_{sh}} - \left( \frac{q I_{RS}}{nk N_s} \frac{T_{c0}^2}{T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \Delta V_o + \frac{1}{T} \left( \frac{I_{SC-STC}}{\lambda_{ref}} \right) \Delta \lambda \\
& + \frac{1}{T} \left( \alpha + \frac{T_{c0} I_{RS} A_1}{T_{ref}^3} \left( 3 T_{c0} - \frac{q E_g}{nk} + A_2 \left( 3 T_{c0} + \frac{q}{nk} \left( E_g - \left( \frac{V_{o0}}{N_s} + I_{LPF0} R_s \right) \right) \right) \right) \right) \Delta T_c
\end{aligned}$$

Dari penurunan persamaan linearisasi, didapat persamaan linearisasi akhir sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \Delta X_{PI} = \Delta I_{LPF} - \Delta I_o \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta I_o = \frac{K_V K_P}{L} \Delta I_{LPF} - \frac{K_V K_P}{L} \Delta I_o + \frac{K_V K_L}{L} \Delta X_{PI} - \frac{1}{L} \Delta V_o \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta V_o = -\frac{1}{RC} \Delta V_o + \frac{1}{C} \Delta I_o \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \Delta I_{LPF} = & \left( -\frac{1}{T} - \frac{1}{T} \left( \frac{R_s}{R_{sh}} + \left( \frac{q R_s I_{RS} T_{c0}^2}{nk T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \right) \Delta I_{LPF} \\
& + \left( \frac{\alpha}{T} + \frac{T_{c0} I_{RS} A_1}{T T_{ref}^3} \left( 3T_{c0} - \frac{q E_g}{nk} + A_2 \left( 3T_{c0} + \frac{q}{nk} \left( E_g - \left( \frac{V_{o0}}{N_s} + I_{LPF0} R_s \right) \right) \right) \right) \right) \Delta T_c \\
& + \frac{1}{T} \left( \frac{1}{N_s R_{sh}} - \left( \frac{q I_{RS} T_{c0}^2}{nk N_s T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \Delta V_o + \frac{1}{T} \left( \frac{I_{SC-STC}}{\lambda_{ref}} \right) \Delta \lambda
\end{aligned} \tag{3.10}$$

dengan besar  $I_{RS}$  seperti pada persamaan 2.14, dan:

$$A_1 = \exp \left( \frac{q E_g \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{c0}} \right)}{nk} \right)$$

$$A_2 = \exp \left( \frac{q \left( \frac{V_{o0}}{N_s} + I_{LPF0} R_s \right)}{nk T_{c0}} \right)$$

Untuk analisis, digunakan nilai titik seimbang yang didapatkan dari hasil simulasi seperti yang tercantum pada table di bawah ini:

Tabel 3.3. Tabel nilai titik seimbang untuk analisis perubahan beban

Beban (ohm)	I <sub>LPF0</sub> (A)	V <sub>o0</sub>
50	3.3086	164.2400
60	3.3084	196.7900
70	3.3061	229.1020
80	3.2529	257.2470
90	3.0604	271.8940
100	2.8369	279.6395
110	2.6307	284.8405

Tabel 3.4. Tabel nilai titik seimbang untuk analisis perubahan konstanta *proportional*

Kp	ILPFO (A)	V <sub>o0</sub>
1	3.1163	264.875
10	3.1438	263.065
20	3.134	263.731
50	3.125	265.318
100	3.1208	264.591
500	3.1171	264.820
1000	3.1167	264.849

Tabel 3.5. Tabel nilai titik seimbang untuk analisis perubahan konstanta integral

Ki	ILPFO (A)	V <sub>o0</sub>
1	3.1387	263.4090
10	3.1378	263.4710
20	3.1370	263.5370
50	3.1345	263.7160
100	3.1311	263.9620
500	3.1190	264.7395
1000	3.1166	264.8650

### 3.9 Model Ruang Keadaan Sistem Simulator

Untuk menganalisis dengan menggunakan diagram bode, diperlukan untuk membuat persamaan ruang keadaan dari sistem yang telah dibuat. Dari hasil linearisasi pada persamaan 3.7 – 3.10, dapat dibentuk persamaan ruang keadaan 2.33 dan 2.34 dengan matriks-matriks sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{K_V K_I}{L} & -\frac{K_V K_P}{L} & -\frac{1}{L} & \frac{K_V K_P}{L} \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T} \begin{pmatrix} I_{SC-STC} \\ \lambda_{ref} \end{pmatrix} & B_{42} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$C = 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad (3.13)$$

$$D = 0 \quad 0 \quad (3.14)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \Delta X_{PI} \\ \frac{d}{dt} \Delta I_o \\ \frac{d}{dt} \Delta V_o \\ \frac{d}{dt} \Delta I_{LPF} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$x = \begin{bmatrix} \Delta X_{PI} \\ \Delta I_o \\ \Delta V_o \\ \Delta I_{LPF} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta \lambda \\ \Delta T_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

dengan:

$$A_{43} = \frac{1}{T} \left( \frac{1}{N_s R_{sh}} - \left( \frac{q I_{RS} T_{c0}^2}{nk N_s T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right)$$

$$A_{44} = \left( -\frac{1}{T} - \frac{1}{T} \left( \frac{R_s}{R_{sh}} + \left( \frac{q R_s I_{RS} T_{c0}^2}{nk T_{ref}^3} \right) A_1 A_2 \right) \right)$$

$$B_{42} = \left( \frac{\alpha}{T} + \frac{T_{c0} I_{RS} A_1}{T T_{ref}^3} \left( 3T_{c0} - \frac{q E_g}{nk} + A_2 \left( 3T_{c0} + \frac{q}{nk} \left( E_g - \left( \frac{V_{o0}}{N_s} + I_{LPF0} R_s \right) \right) \right) \right) \right)$$

### 3.10 Fungsi Alih Sistem Secara Keseluruhan

Dari persamaan ruang keadaan yang telah didapat, dengan menggunakan persamaan 2.35 dapat dibuat fungsi alih lingkaran tertutup sebagai berikut:

$$G_c s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T \left( \begin{bmatrix} s & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{K_V K_I}{L} & s + \frac{K_V K_P}{L} & \frac{1}{L} & -\frac{K_V K_P}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & 0 & -A_{43} & s - A_{44} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T} \left( \frac{I_{SC-STC}}{\lambda_{ref}} \right) & B_{42} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

didapat:

$$G_{c1} s = \frac{\Delta V}{\Delta \lambda} \frac{s}{s} = \frac{X_1 K_I + K_P s}{c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (3.18)$$

$$G_{c2} s = \frac{\Delta V}{\Delta T_c} \frac{s}{s} = \frac{X_2 \left( \alpha + \frac{X_3}{T_{ref}^3} \right) K_I + K_P s}{c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (3.19)$$

dengan:

$$X_1 = \frac{I_{SC-STC} K_V N_S R R_{sh} T_{ref}^3 kn}{\lambda_{ref}}$$

$$X_2 = K_V N_S R R_{SH} T_{ref}^3 kn$$

$$X_3 = A_1 I_{RS} T_{c0} \left( 3T_{c0} + A_2 \left( 3T_{c0} - \frac{q \left( \frac{V_{o0}}{N_S} - E_g + I_{LPO} R_S \right)}{kn} \right) - \frac{q E_g}{kn} \right)$$

$$b_0 = K_I K_V N_S R_S - K_I K_V R + K_I K_V N_S R_{SH} T_{ref}^3 kn$$

$$b_1 = N_S K_V R_{SH} K_P + K_I T + CK_I K_V + 1 R R_S + R_{SH} - K_P K_V R + N_S R_S T_{ref}^3 kn$$

$$b_2 = \left( L R_S + R_{SH} + CK_V R \left( K_P R_S + R_{SH} + R_{SH} T \left( K_I + K_P + \frac{R + K_P K_V}{CK_V R} \right) \right) \right) N_S T_{ref}^3 kn$$

$$b_3 = LR_{SH} T + CLR R_S + R_{SH} N_S T_{ref}^3 kn$$

$$b_4 = CLR R_{SH} T N_S T_{ref}^3 kn$$

$$c_0 = A_1 A_2 I_{RS} K_I K_V R + N_S R_S R_{SH} T_{c0}^2 q$$

$$c_1 = A_1 A_2 I_{RS} N_S R R_S + K_P K_V R + K_V N_S R_S K_P + CK_I R R_{SH} T_{c0}^2 q$$

$$c_2 = A_1 A_2 I_{RS} N_S R_S L + CK_P K_V R R_{SH} T_{c0}^2 q$$

$$c_3 = A_1 A_2 C I_{RS} L N_s R R_s R_{SH} T_{c0}^2 q$$

Lalu dengan menggunakan persamaan 2.36, didapatlah bentuk fungsi alih lingkaran terbuka:

$$G_{o1} s = \frac{\Delta V s}{\Delta \lambda s} = \frac{X_1 K_I + K_P s}{X_4 - X_1 K_I + K_P s} \quad (3.20)$$

$$G_{o2} s = \frac{\Delta V s}{\Delta T_c s} = \frac{X_2 \left( \alpha + \frac{X_3}{T_{ref}^3} \right) K_I + K_P s}{X_4 - X_2 \left( \alpha + \frac{X_3}{T_{ref}^3} \right) K_I + K_P s} \quad (3.21)$$

dengan:

$$X_4 = c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0$$

Fungsi alih lingkaran terbuka pada persamaan 3.20 dan 3.21 akan digunakan dalam analisis menggunakan diagram bode.

## BAB 4

### SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN SISTEM

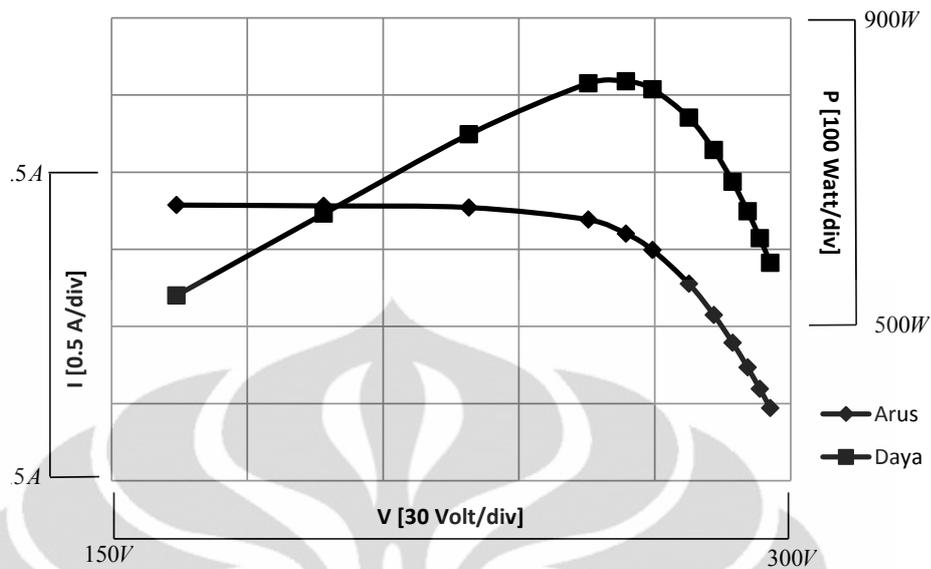
#### 4.1 Perbandingan Simulasi dengan Kondisi Ideal

Setelah proses perancangan dan pemodelan sistem, berikutnya akan dilakukan analisis sistem terhadap masukan yang diberikan. Pertama-tama, perlu dilakukan tes apakah simulasi simulator yang dibuat sudah menyerupai kondisi idealnya. Maka akan dilakukan simulasi, dengan besar *solar irradiance* standar sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$ , suhu sel sebesar  $25^{\circ}\text{C}$ , dan mengubah beban dari 50 ohm sampai dengan 150 ohm. Berikut ini adalah tabel hasil simulasi.

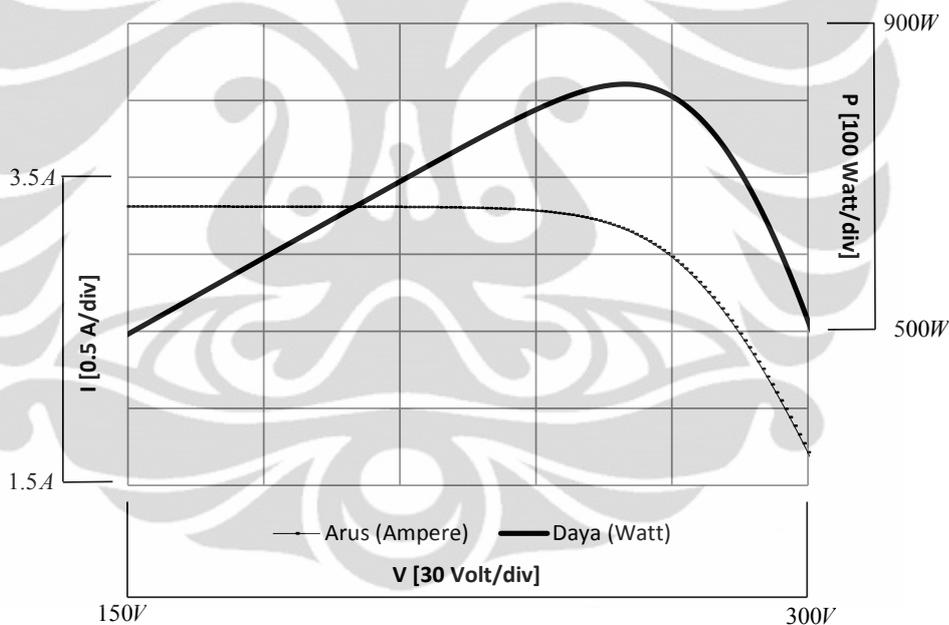
Tabel 4.1. Tabel hasil simulasi perubahan beban terhadap arus dan tegangan

Beban (Ohm)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
50	164.3350	3.2867	540.1198
60	196.8900	3.2815	646.0945
70	228.9560	3.2708	748.8693
80	255.3440	3.1918	815.0069
85	263.6275	3.1015	817.6407
90	269.5320	2.9948	807.1944
100	277.5700	2.7757	770.4510
110	283.0740	2.5734	728.4626
120	287.2200	2.3935	687.4611
130	290.5110	2.2347	649.2049
140	293.2300	2.0945	614.1702
150	295.5300	1.9702	582.2532

Dari tabel 4.1, terlihat bahwa pada saat beban simulator bernilai 85 ohm, didapat besar dari arus yang dihasilkan sebesar 3,1015 A, atau mendekati dengan besar nilai  $I_{MPP}$  pada tabel 2.1, yaitu 3,11 A. Grafik dari tabel 4.1 dapat dilihat pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 merupakan grafik ideal dari sel surya KC50T yang disusun seri sebanyak 15 buah.



Gambar 4.1. Grafik hasil simulasi hubungan antara arus, tegangan, dan daya PV simulator



Gambar 4.2. Grafik ideal dari sel surya KC50T yang disusun seri sebanyak 15 buah

Jika dilihat dari kedua grafik pada gambar 4.1 dan gambar 4.2, terlihat bahwa hasil dari simulasi yang dibuat telah menyerupai kondisi ideal dari sel surya KC50T. Dari grafik didapat daya maksimum sebesar 817.6407 Watt, dengan besar nilai beban buck converter sebesar 85 ohm, arus 3,1015 A dan tegangan sebesar 263,6275 Volt. Maka, simulasi dari simulator yang dibuat telah dapat menggantikan sel surya KC50T yang digunakan dalam penelitian ini.

## 4.2 Pengaruh Masukan terhadap Sistem

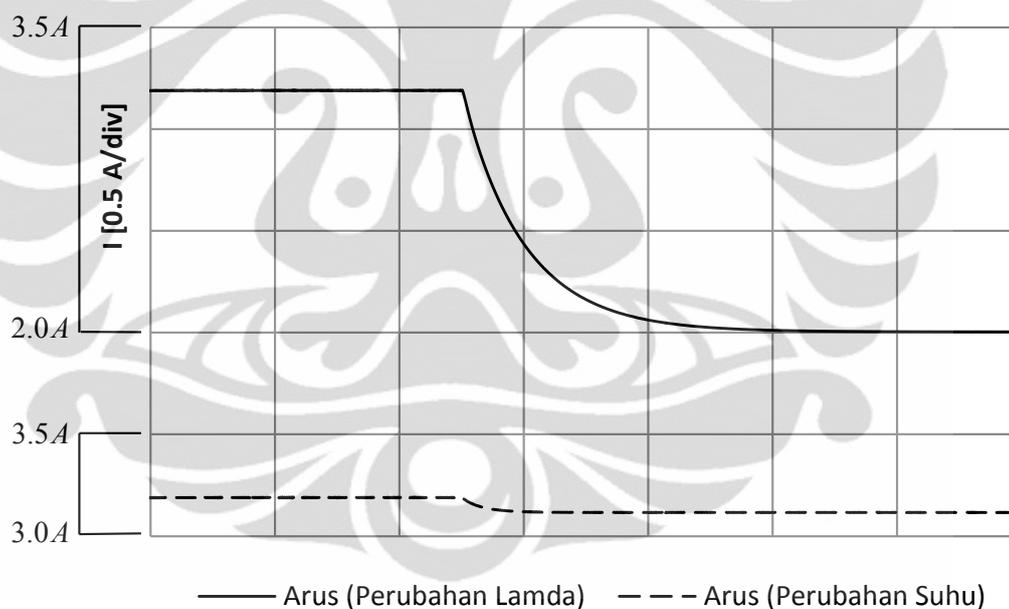
Pada sistem yang telah dibuat, terdapat dua buah masukan, yaitu *solar irradiance* dan suhu sel. Berikut ini akan dianalisis seberapa besar pengaruh perubahan masukan terhadap keluarannya jika masukannya diubah secara step. Simulasi akan dijalankan pada kondisi sebagai berikut:

Perubahan *solar irradiance*:

- *Solar irradiance* =  $1000\text{W/m}^2 \rightarrow 600\text{W/m}^2$
- Suhu sel =  $40^\circ\text{C}$

Perubahan suhu sel:

- *Solar irradiance* =  $1000\text{W/m}^2$
- Suhu sel =  $40^\circ\text{C} \rightarrow 27^\circ\text{C}$



Gambar 4.3. Grafik perbandingan pengaruh perubahan *solar irradiance* terhadap suhu sel

Gambar 4.3 merupakan perbandingan arus keluaran jika salah satu masukan diubah secara step. Pada grafik perubahan lamda, terlihat bahwa jika besar lamda masukan turun dari  $1000\text{W/m}^2$  menjadi  $600\text{W/m}^2$ , arus yang dihasilkan turun sekitar 1 Ampere lebih, sedangkan untuk perubahan suhu sel dari  $40^\circ\text{C}$  menjadi  $27^\circ\text{C}$ , tidak terlalu terlihat penurunan arusnya.

Dari grafik tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa perubahan lamda sangat mempengaruhi perubahan arus keluaran *photovoltaic*. Perubahan suhu sel juga mempengaruhi arus keluaran, namun tidak signifikan jika dibandingkan dengan perubahan lamda.

### 4.3 Analisis Menggunakan Diagram Bode

Setelah didapatkan fungsi alih lingkaran terbuka dari perubahan tegangan terhadap masukan, berikutnya akan dianalisis kestabilannya dengan menggunakan diagram bode. Dalam analisis dengan diagram bode ini, akan divariasikan besar beban, konstanta *proportional*, dan konstanta integral untuk dilihat pengaruhnya terhadap sistem.

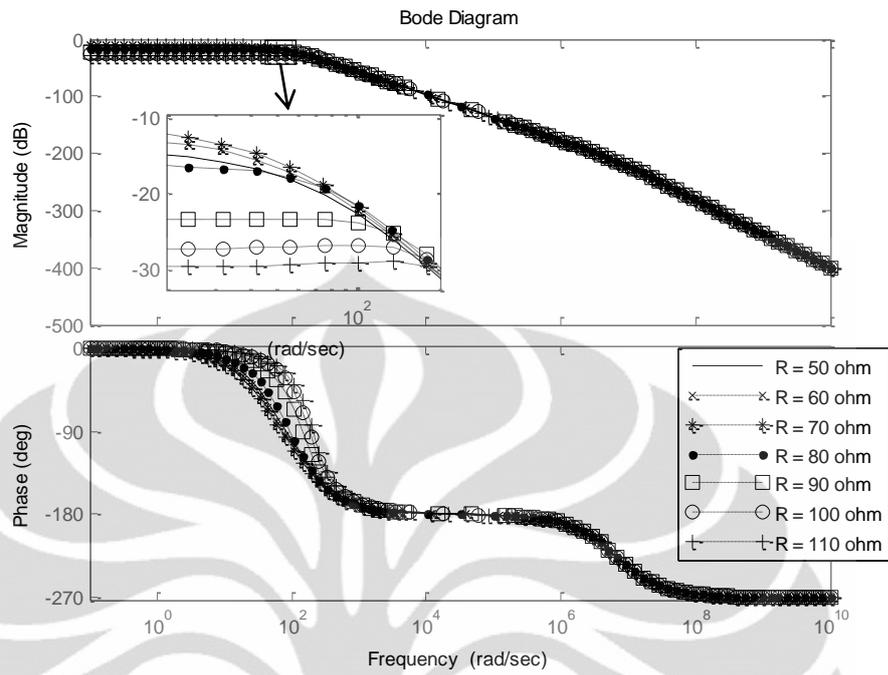
Untuk variasi beban, akan digambar grafik dalam diagram bode untuk besar beban dengan kenaikan konstan sebesar 10 ohm dari 50 ohm hingga 110 ohm. Untuk nilai  $K_p$  akan digunakan 20 dan  $K_i$  bernilai 10.

Untuk variasi besar konstanta *proportional* dan *integral*, akan dilakukan variasi secara logaritmik dari 1 hingga 1000 sebanyak 7 nilai. Untuk variasi nilai  $K_p$ , nilai  $K_i$  akan dijaga konstan yaitu 10, dan untuk variasi nilai  $K_i$ , besar dari  $K_p$  akan dijaga konstan pada nilai 20. Untuk besar beban akan diatur konstan yaitu 85 ohm.

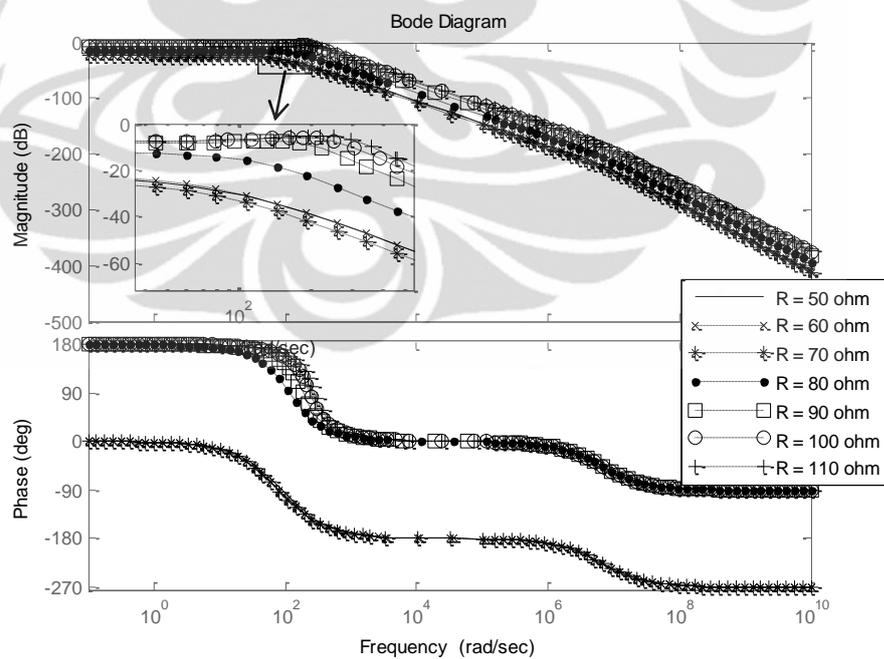
#### 4.3.1 Analisis Bode dengan Variasi Beban

Gambar 4.4 adalah diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan *solar irradiance* dengan variasi beban dan gambar 4.5 merupakan diagram bode perubahan tegangan terhadap perubahan suhu sel dengan variasi beban.

Dari gambar 4.4, dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya beban dari 50 hingga 70 ohm, terlihat bahwa grafik magnitudo semakin mendekati nol, namun jika beban lebih besar dari 70 ohm, magnitudo akan semakin negatif. Ini menunjukkan bahwa semakin besar beban, magnitudo akan semakin negatif sehingga untuk beban yang besar sistem akan selalu stabil.



Gambar 4.4. Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan *solar irradiance* dengan variasi beban

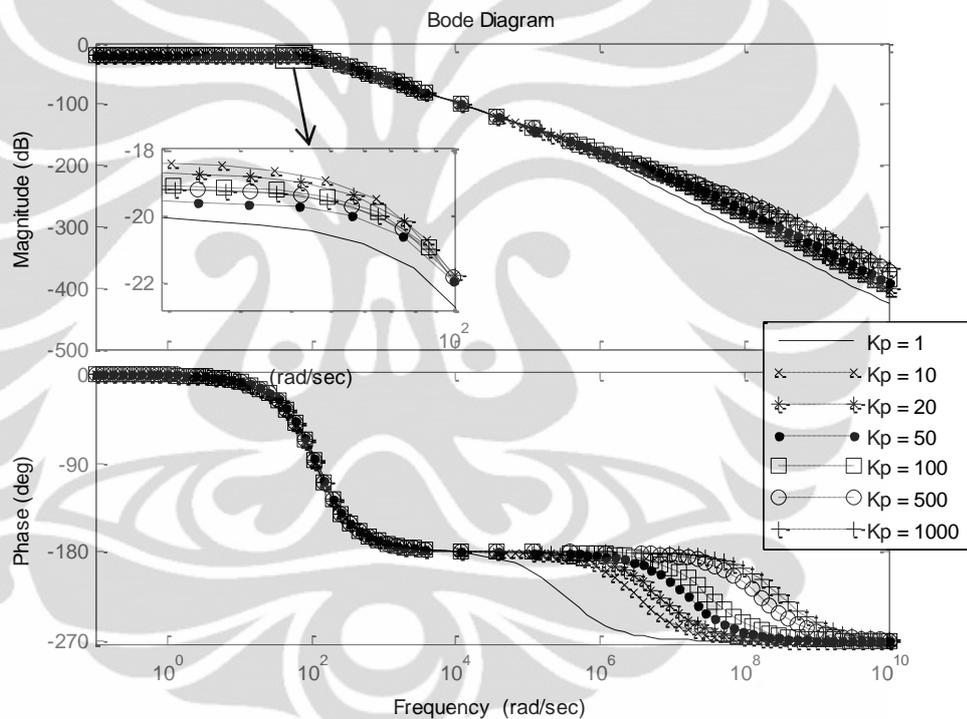


Gambar 4.5. Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan suhu sel dengan variasi beban

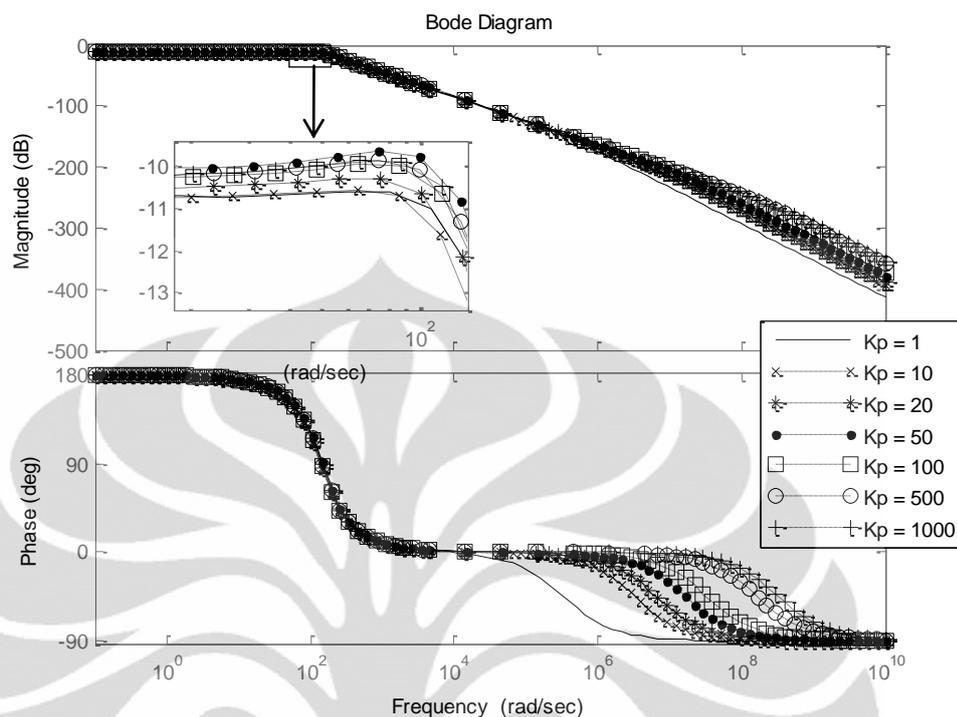
Dari gambar 4.5 terlihat bahwa untuk kenaikan beban dari 50 ohm hingga 110 ohm, kurva magnitudo berubah-ubah namun selalu berada di bawah nilai nol. Dari kurva fasenya, sistem terlihat seperti sistem orde tiga. Oleh karena *gain margin*-nya bernilai positif untuk setiap nilai beban, maka sistem akan selalu stabil.

#### 4.3.2 Analisis Bode dengan Variasi Konstanta *Proportional*

Berikut ini adalah diagram bode perubahan tegangan keluaran terhadap perubahan *solar irradiance* dan suhu sel dengan variasi konstanta *proportional*.



Gambar 4.6. Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan *solar irradiance* dengan variasi konstanta *proportional*



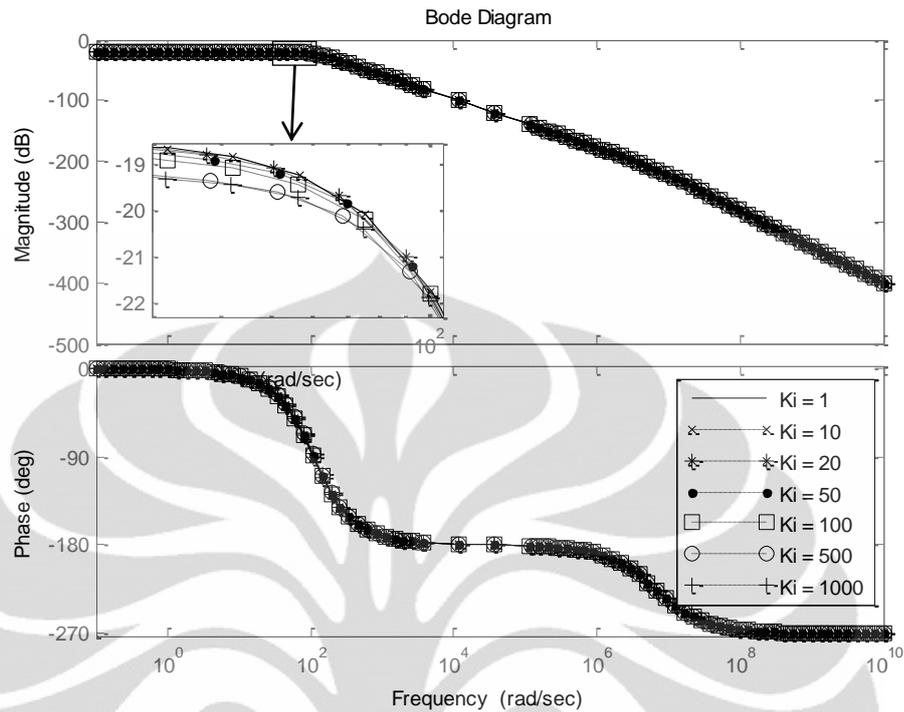
Gambar 4.7. Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan suhu sel dengan variasi konstanta *proportional*

Dari gambar 4.6 untuk analisis sistem terhadap masukan perubahan *solar irradiance* terhadap, dapat dilihat bahwa perubahan besar  $K_p$  secara logaritmik dari 1 hingga 1000 tidak terlalu mempengaruhi sistem. Jika dilihat dari grafik fasanya, tidak terjadi perubahan fase. Karena *gain margin* bernilai positif, maka sistem akan selalu stabil untuk perubahan  $K_p$  secara logaritmik.

Lalu dari grafik pada gambar 4.7 terlihat bahwa perubahan besar  $K_p$  secara logaritmik tidak terlalu mempengaruhi sistem karena grafik magnitudenya hampir mirip satu sama lain. Untuk grafik fasa, tidak terlihat perubahan fasa, namun fasanya berbeda  $180^0$  dengan grafik bode terhadap perubahan *solar irradiance*. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa sistem akan selalu stabil.

#### 4.3.3 Analisis Bode dengan Variasi Konstanta Integral

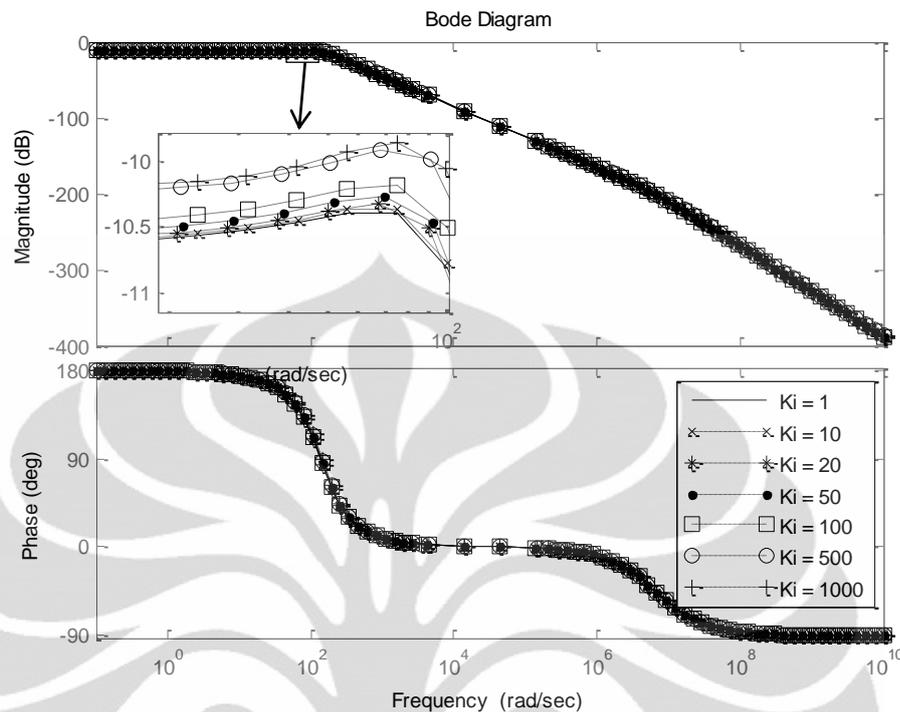
Berikut ini adalah diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan *solar irradiance* dengan variasi konstanta integral.



Gambar 4.8. Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan *solar irradiance* dengan variasi konstanta integral.

Dari grafik pada gambar 4.8 terlihat bahwa perubahan besar dari konstanta integral tidak terlalu mempengaruhi sistem. *Gain margin* sistem selalu bernilai positif sehingga sistem akan selalu stabil untuk perubahan besar konstanta integral secara logaritmik.

Berikutnya adalah diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan suhu sel dengan variasi konstanta integral.



Gambar 4.9. Diagram bode perubahan tegangan terhadap masukan perubahan suhu sel dengan variasi konstanta integral

Dari gambar 4.9 terlihat bahwa perubahan besar  $K_i$  secara logaritmik tidak terlalu mempengaruhi sistem. Untuk bode terhadap masukan perubahan suhu terhadap perubahan *solar irradiance* terdapat perbedaan fase sebesar  $180^0$ . Dari grafik dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem akan selalu stabil walaupun besar dari konstanta integral diubah secara logaritmik.

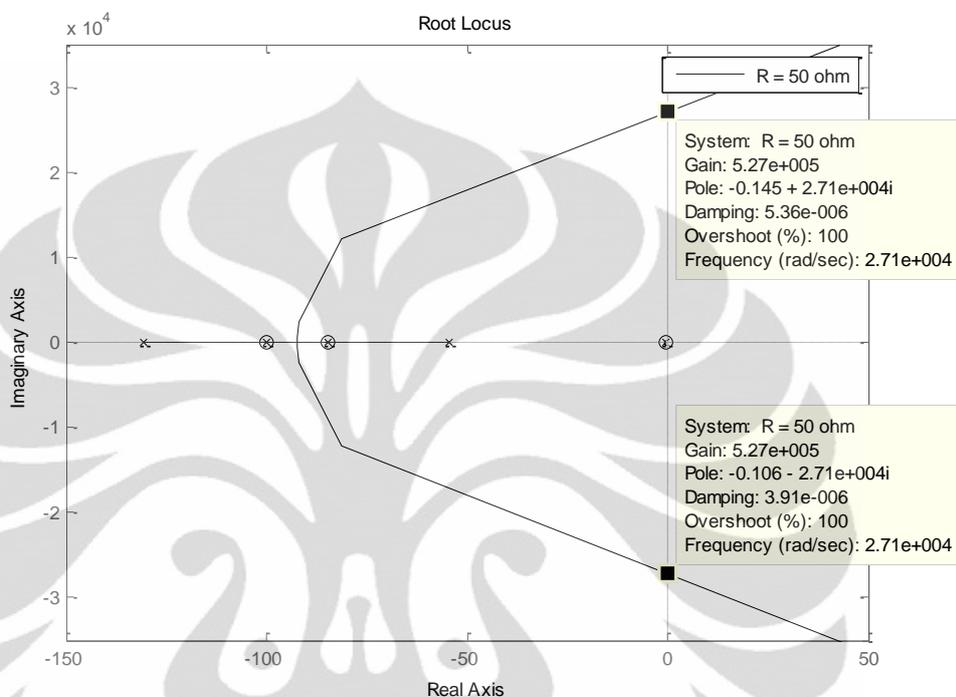
#### 4.4 Analisis Sistem dengan Menggunakan Tempat Kedudukan Akar

Setelah dilakukan analisis dengan menggunakan diagram bode, dapat dilihat bahwa yang memberikan perubahan *gain margin* yang signifikan terhadap sistem adalah pada saat beban sistem diubah-ubah. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis TKA untuk melihat seberapa besar *gain* sistem masih dapat diberikan agar sistem selalu stabil untuk besar beban yang berbeda-beda.

Perubahan besar beban yang dianalisis adalah dari 50 ohm dengan kenaikan konstan sebesar 10 ohm hingga 110 ohm. Untuk nilai  $K_p$  akan digunakan 20 dan  $K_i$  bernilai 10.

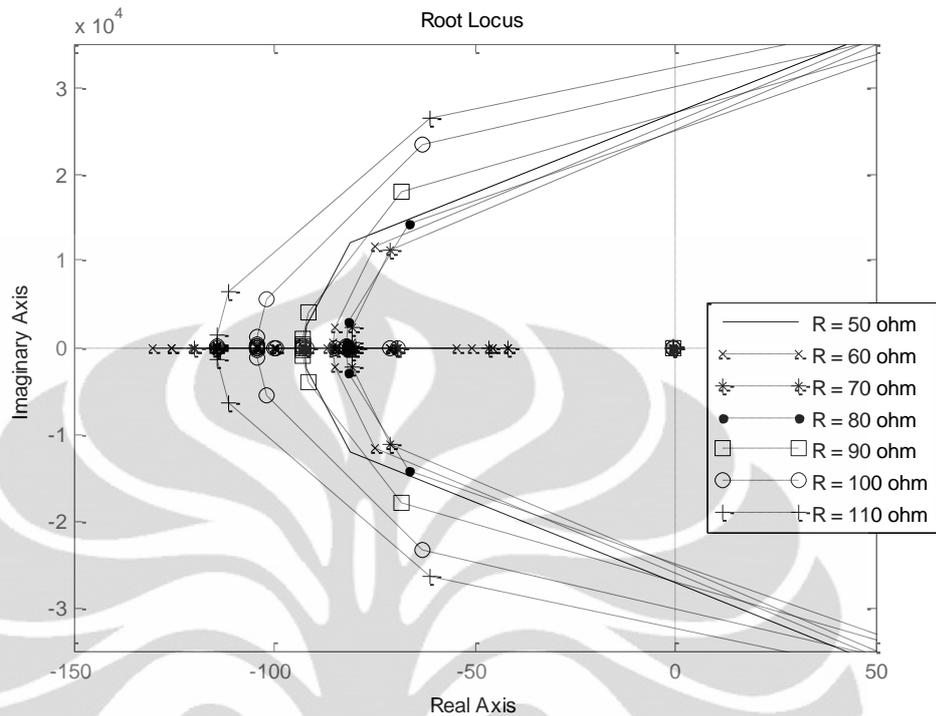
#### 4.4.1 Analisis TKA Terhadap Masukan *Solar Irradiance*

Berikut ini adalah gambar TKA untuk beban sebesar 50 ohm terhadap perubahan masukan *solar irradiance*.

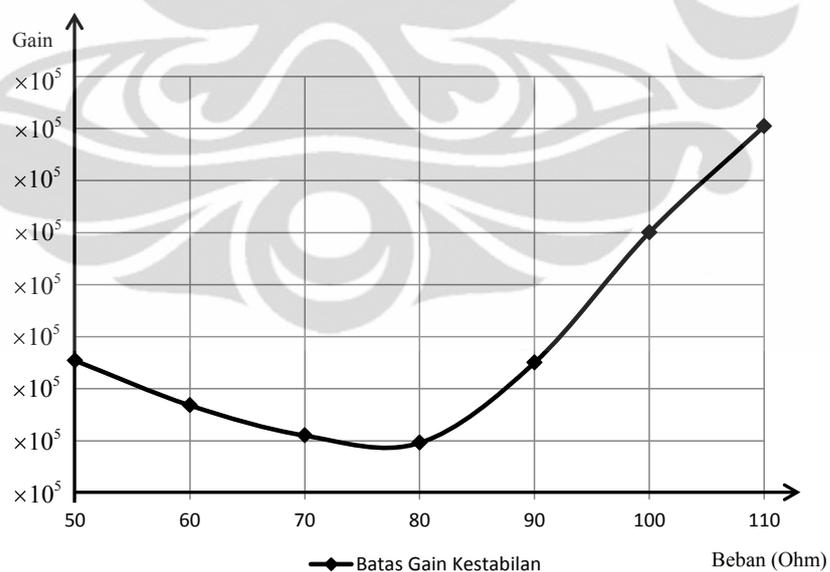


Gambar 4.10. Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm terhadap masukan *solar irradiance*.

Dari gambar 4.10, terlihat bahwa sistem akan menjadi tidak stabil ketika diberikan *gain* sebesar  $5.28 \times 10^5$ . Nilai *gain* tersebut tentunya sangatlah besar sehingga sistem akan tetap stabil. Berikutnya akan dilihat pengaruh perubahan beban dengan kenaikan 10 ohm dari 50 ohm hingga 110 ohm terhadap besar *gain* yang akan menjadi batas kestabilan sistem dengan menggunakan TKA.



Gambar 4.11. Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 hingga 110 ohm terhadap masukan *solar irradiance*.



Gambar 4.12. Grafik batas *gain* kestabilan sistem vs. beban terhadap masukan *solar irradiance*.

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa seiring bertambahnya besar beban, batas *gain* kestabilan sistem berubah-ubah. Untuk kenaikan beban dari 50 ohm hingga

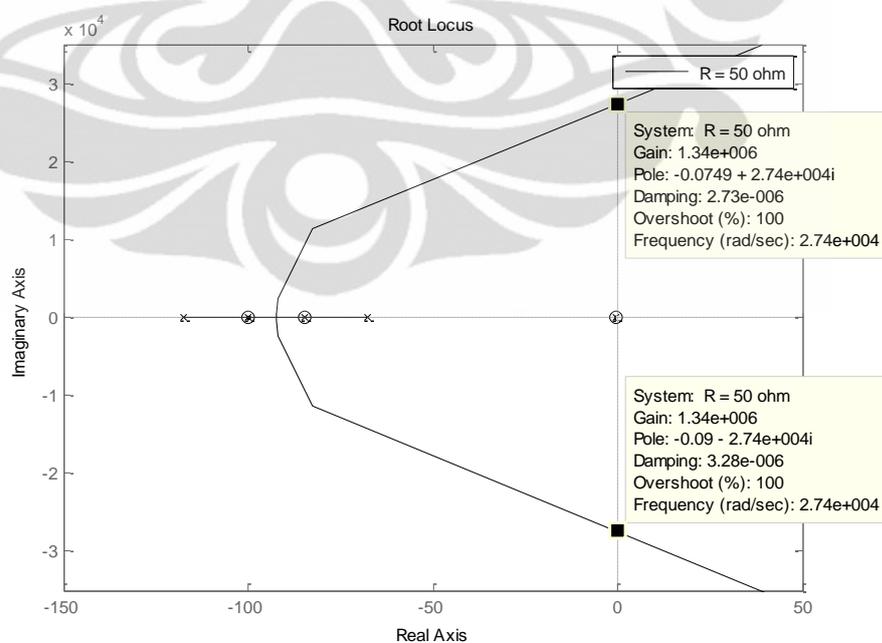
70 ohm, batas *gain* kestabilan sistem turun dari  $5.28 \times 10^5$  hingga  $4.55 \times 10^5$ . Sedangkan untuk perubahan beban dari 70 ohm hingga 110 ohm, terlihat bahwa batas *gain* kestabilan sistem kembali naik dari  $4.55 \times 10^5$  hingga  $7.52 \times 10^5$ .

Dari gambar 4.12, terlihat bahwa grafik hubungan antara batas *gain* kestabilan vs. beban berbentuk parabola terbuka ke atas. Penurunan besar batas *gain* kestabilan sistem terjadi pada beban 50 hingga 80. Namun walaupun nilainya turun, angka  $4.48 \times 10^5$  masih sangatlah besar untuk menjadi batas *gain* kestabilan sistem sehingga sistem cenderung akan selalu stabil.

Lalu untuk kenaikan beban dari 80 hingga 110 ohm, terlihat bahwa batas *gain* kestabilan sistem naik dari  $4.48 \times 10^5$  hingga  $7.52 \times 10^5$ . Ini menunjukkan bahwa semakin besar beban, akan semakin besar pula batas *gain* kestabilan sistem sehingga sistem cenderung akan selalu stabil jika beban semakin besar.

#### 4.4.2 Analisis TKA Terhadap Masukan Suhu Sel

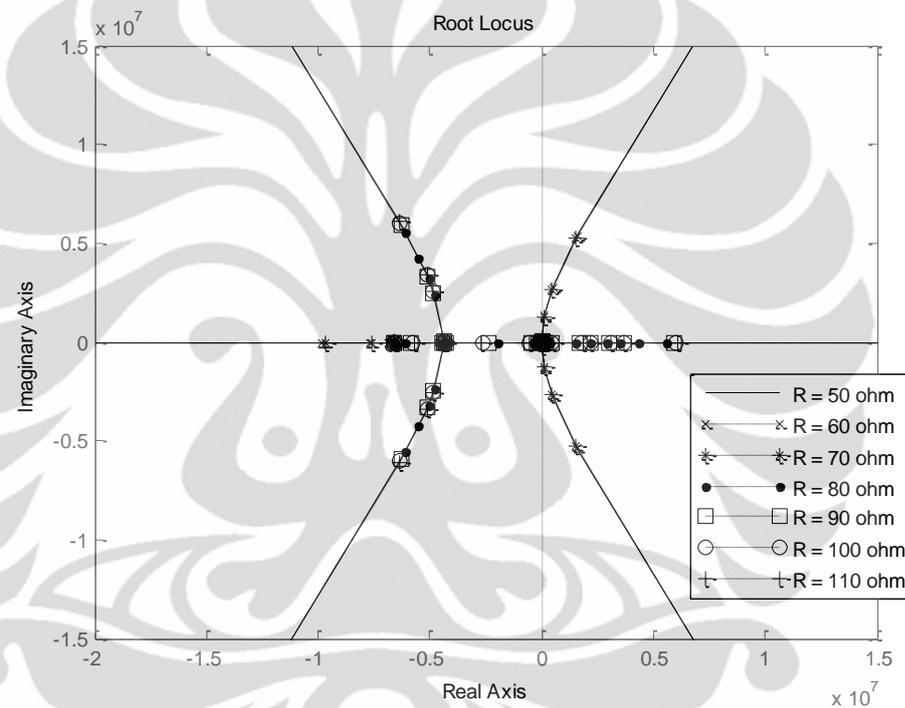
Lalu berikutnya akan dianalisis TKA perubahan beban terhadap masukan suhu sel. Gambar 4.13 merupakan grafik TKA sistem dengan beban sebesar 50 ohm terhadap masukan suhu sel.



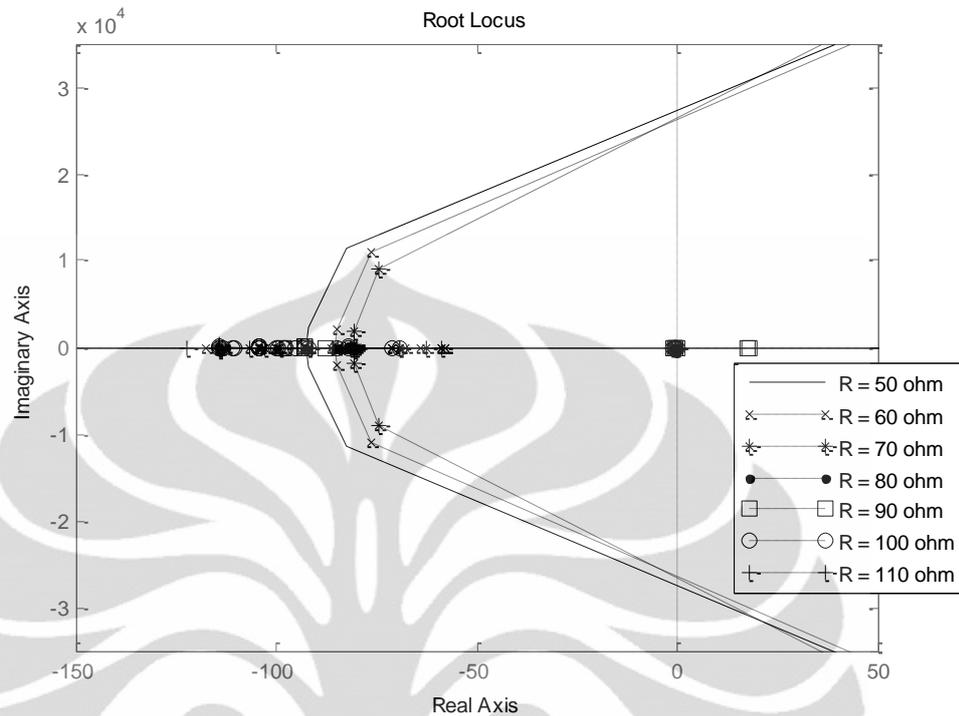
Gambar 4.13. Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm terhadap masukan suhu sel.

Dari gambar 4.13, terlihat bahwa besarnya *gain* yang dapat membuat sistem menjadi tidak stabil adalah di sekitar nilai  $1.34 \times 10^6$ . Nilai *gain* tersebut tentunya sangatlah tinggi sehingga sistem cenderung akan stabil pada kondisi beban 50 ohm.

Berikutnya akan dilihat pengaruh kenaikan beban terhadap batas *gain* kestabilan sistem dengan menaikkan beban sebesar 10 ohm dari 50 ohm hingga 110 ohm.



Gambar 4.14. Grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm hingga 110 ohm terhadap masukan suhu sel.



Gambar 4.15. Hasil perbesaran grafik Tempat Kedudukan Akar sistem untuk beban sebesar 50 ohm hingga 110 ohm terhadap masukan suhu sel pada sumbu nyata dari -150 hingga 50 dan untuk sumbu imajiner dari  $-3.5 \times 10^4$  hingga  $3.5 \times 10^4$ .

Dari grafik 4.14 dan 4.15 terlihat bahwa untuk besar beban dari 50 hingga 70 ohm, sistem ada kemungkinan tidak stabil karena memotong sumbu imajiner. Batas *gain* untuk beban 50, 60, dan 70 ohm berturut-turut adalah  $1.34 \times 10^6$ ,  $1.25 \times 10^6$ , dan  $1.94 \times 10^6$ . Angka-angka tersebut tentunya sangatlah tinggi untuk sebuah *gain* sehingga sistem cenderung akan stabil.

Lalu untuk grafik TKA dengan besar beban 80, 90, 100, dan 110 ohm terhadap masukan suhu sel, terlihat bahwa grafik tidak memotong sumbu imajiner dan selalu berada di daerah kiri sumbu imajiner. Oleh karena itu, sistem akan selalu stabil untuk berapa pun nilai *gain* yang diberikan.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Pada skripsi ini telah dirancang sebuah PV simulator menggunakan buck converter, model statik sel surya, *low-pass filter*, pengendali PI, dan PWM Generator. Dari simulator yang telah dibuat, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Perubahan suhu sel mempengaruhi keluaran sistem, namun tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan *solar irradiance*. Pada grafik perubahan lamda, terlihat bahwa jika besar lamda masukan turun dari  $1000\text{W/m}^2$  menjadi  $600\text{W/m}^2$ , arus yang dihasilkan turun sekitar 1 Ampere lebih, sedangkan untuk perubahan suhu sel dari  $40^{\circ}\text{C}$  menjadi  $27^{\circ}\text{C}$ , hanya sedikit perubahan arus, yaitu kurang dari 0,5 Ampere.
2. Dari diagram bode, perubahan besar beban sangat mempengaruhi sistem. Sistem terlihat seperti sistem orde tiga jika dilihat dari fasenya. Semakin besar beban, *gain margin* sistem akan semakin besar sehingga sistem akan selalu stabil.
3. Dari diagram bode, perubahan besar Kp dan Ki tidak terlalu mempengaruhi sistem. Sistem terlihat seperti sistem orde tiga jika dilihat dari fasenya. Sistem dapat dinyatakan stabil karena memiliki *gain margin* yang selalu positif.
4. Dari grafik TKA dengan mengubah beban, terlihat bahwa sistem akan menjadi tidak stabil jika diberikan nilai *gain* sistem yang relatif tinggi, yaitu minimal sekitar  $4.48 \times 10^5$  untuk masukan perubahan *solar irradiance*, dan  $1.25 \times 10^6$  untuk masukan perubahan suhu sel. Karena besar *gain* tersebut sangatlah tinggi, sehingga sistem dapat dinyatakan *robust* terhadap perubahan beban dan cenderung akan selalu stabil.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Adamo, F., Attivissimo, F., Nisio, A., Lanzolla, A., & Spadavecchia, M. (2009). PARAMETERS ESTIMATION FOR A MODEL OF PHOTOVOLTAIC PANELS. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology September 6–11, 2009*, (pp. 964-967). Lisbon, Portugal.
- [2] Altas, I., & Sharaf, A. (2007). A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. 341-345.
- [3] González-Longatt, F. M. (2005). Model of Photovoltaic Module in Matlab™.
- [4] Gunawan, & Yusivar, F. (2009). Rancang Bangun DC-DC Buck Converter dengan PID Diskrit sebagai Pengendali Tegangan Keluaran.
- [5] Iyer, N., & Ramaswamy, V. (2007). MODELING AND SIMULATION OF A SWITCHED MODE POWER SUPPLY USING SIMULINK.
- [6] King, D., Hansen, B., Kratochvil, J., & Quintana, M. (1997). Dark Current-Voltage Measurements on Photovoltaic Modules as a Diagnostic or Manufacturing Tool. *26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29-October 3*. California: Sandia National Laboratories.
- [7] Koran, A., Sano, K., Kim, R.-Y., & Lai, J.-S. (2009). Design of a Photovoltaic Simulator with a Novel Reference Signal Generator and Two-Stage LC Output Filter. 319-326.
- [8] Lin, L. K. (2009). *A Hybrid Wind/Solar Energy Converter*.
- [9] Marnoto, T., Sopian, K., Daud, W., Algoul, M., & Zaharim, A. (2007). Mathematical Model for Determining the Performance Characteristics of Multi-Crystalline Photovoltaic Modules. *Proc. of the 9th WSEAS Int. Conf. on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, Trinidad and Tobago, November 5-7, 2007*.
- [10] Tsai, H.-L., Tu, C.-S., & Su, Y.-J. (2008). Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008*. San Francisco.

## DAFTAR PUSTAKA

- McDowall, Robert. 2008. Fundamentals of HVAC Control Systems. Burlington: Elsevier Science.
- Nise, Norman S. 2004. Control Systems Engineering 4<sup>th</sup> ed. India: Brijbasi Art Press Ltd.
- Wiley, John. 2002. Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice. Great Britain: Thomson Press Limited.

