



UNIVERSITAS INDONESIA

Metode *MPPT* Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali *PI*

SKRIPSI

**BENG TITO
0806330724**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

Metode *MPPT* Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali *PI*

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

BENG TITO

0806330724

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Beng Tito

NPM : 0806330724

Tanda Tangan



Tanggal : 19 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Beng Tito
NPM : 0806330724
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Metode *MPPT* Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali *PI*

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 : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M. T. (.....)
Penguji : Dr. Abdul Halim, M. Eng. (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 19 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, proses bimbingan tugas akhir di departemen teknik elektro Universitas Indonesia telah memberikan pelajaran berharga kepada penulis tentang aplikasi ilmu pengetahuan pada perancangan sistem *maximum power point tracking* untuk pembangkit listrik tenaga surya. Bagaimana mengendalikan tegangan sel surya agar daya yang dihasilkan maksimal.

Terima kasih kepada Tuhan YME karena penulis telah diberikan kesempatan untuk menambah ilmu pengetahuan melalui tulisan ini. Terima kasih juga penulis ucapkan untuk orang-orang yang telah memberikan dukungannya.

- (1) Dr. Ir. Feri Yusivar, M. Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tugas akhir ini,
- (2) seluruh teman – teman yang luar biasa yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu,
- (3) Orang tua yang telah memberikan dukungannya sejak penulis dilahirkan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini, kritik dan saran dapat diberikan kepada penulis agar penulis dapat menjadi lebih baik lagi di masa mendatang. Mohon maaf atas segala kekurangan, semoga tulisan ini bermanfaat bagi kita semua.

Depok, Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Beng Tito
NPM : 0806330724
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian 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:

Metode *MPPT* Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali *PI* beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : 19 Juni 2012

Yang menyatakan


(Beng Tito)

ABSTRAK

Nama : Beng Tito
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Metode *MPPT* Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali *PI*

Metode *MPPT Incremental Conduction Method (ICM)* dan *Perturbation and Observation (P&O)* tidak dapat mencari titik kerja maksimum (*MPP*) sel surya secara cepat dengan sedikit osilasi di *MPP*. Hal ini terjadi karena besar perpindahan titik kerja yang diberikan oleh metode tersebut tetap. Tujuan penelitian ini adalah merancang metode *MPPT* berdasarkan pengendali *PI* yang mampu mencapai *MPP* dengan cepat dan dengan osilasi mendekati nol. Perancangan didasarkan pada studi literatur dan ujicoba simulasi. Hasil simulasi menunjukkan waktu penjajakan dari algoritma yang diusulkan jauh lebih cepat dibanding algoritma *ICM* dengan osilasi yang dapat diset sampai mendekati nol.

Kata Kunci : *MPPT, ICM, P&O, pengendali PI*

ABSTRACT

Name : Beng Tito
Study Program : Electrical Engineering
Title : New *MPPT* Technique for Solar Cell Based on *PI* Controller

MPPT method *Incremental Conduction Method (ICM)* and *Perturbation and Observation (P&O)* can not quickly track the maximum power point (*MPP*) of solar cell with less oscillation around *MPP*. This is happens because of the working point's movement given by the method always has a same distance. The purpose of this research is to design *MPPT* method based on *PI* controller which able to reach the *MPP* quickly and the oscillation is near to zero. Design based on study literature and simulation. The result shows the proposed algorithm has much faster tracking time than *ICM* algorithm and the oscillation can be set to near zero.

Keywords: *MPPT, ICM, P&O, PI* controller

DAFTAR ISI

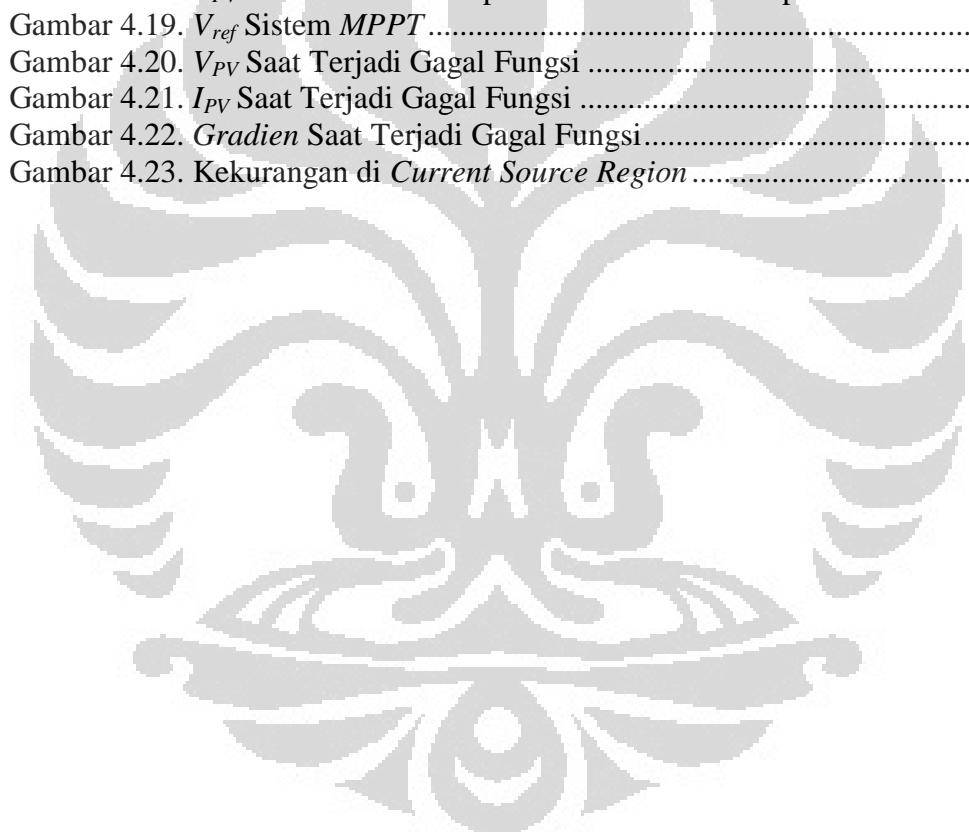
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR PERSAMAAN.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Metodologi Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sel Surya (<i>Photovoltaic</i>).....	5
2.1.1 Prinsip Kerja Sel Surya.....	5
2.1.2 Persamaan Karakteristik Sel Surya.....	6
2.1.3 Modul Sel Surya.....	9
2.2 Maximum Power Point Tracking.....	10
2.2.1 <i>Incremental Conductance</i>	10
2.2.2 <i>Perturbation & Observation (P&O)</i>	11
2.3 Pengendali <i>PI</i>	13
2.3.1 Fungsi Alih Pengendali <i>PI</i>	13
2.3.2 Penalaan <i>Trial-Error</i>	14
2.4 <i>Boost Converter</i>	16
2.5 Sinyal <i>PWM</i>	19
2.6 Parameter Kualitas Sistem <i>MPPT</i>	19
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM <i>MPPT</i>.....	21
3.1 Model Sel Surya.....	21
3.1.1 Persamaan Matematis Model Sel Surya.....	22
3.1.2 Simulasi Model Sel Surya.....	23
3.1.2.1 Perbedaan Radiasi Matahari.....	25
3.1.2.2 Perbedaan Suhu Sel.....	26
3.2 Blok Pembuat Sinyal <i>PWM</i>	26
3.3 Model <i>Boost Converter</i>	27

3.3.1	Penentuan Nilai Komponen Model <i>Boost Converter</i>	29
3.3.2	Simulasi Model <i>Boost converter</i>	30
3.4	Blok Pengendali <i>PI</i>	32
3.4.1	Simulasi <i>Boost Converter</i> dengan Pengendali	33
3.5	Algoritma <i>Incremental Conductance Method</i>	35
3.5.1	Simulasi Algoritma <i>ICM</i> dengan Model Sel Surya.....	35
3.6	Algoritma <i>MPPT</i> Baru Berdasarkan Pengendali <i>PI</i>	37
3.6.1	Penentuan <i>Error</i> Pengendali <i>PI MPPT</i>	37
3.6.2	Algoritma <i>MPPT</i> Berdasarkan Pengendali <i>PI</i>	38
3.6.3	Faktor Linearitas Sel Surya	39
3.6.4	Simulasi Algoritma <i>PI MPPT</i> dengan Model Sel Surya.....	41
3.7	Rancangan Sistem <i>MPPT</i> dengan <i>Boost Converter</i>	43
3.7.1	Persamaan Ruang Keadaan Sistem <i>MPPT</i>	45
3.7.1.1	Linearisasi	49
3.7.1.2	Matriks Ruang Keadaan Sistem <i>MPPT</i>	50
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS		52
4.1	Analisis Kestabilan Sistem	52
4.2	Blok Diagram Simulasi Sistem <i>MPPT</i>	54
4.3	Simulasi Sistem <i>MPPT</i> pada Kondisi Lingkungan yang Berubah	56
4.3.1	Perubahan Radiasi Matahari.....	58
4.3.2	Perubahan Suhu Sel.....	60
4.4	Perbandingan Sistem <i>MPPT PI</i> dengan <i>MPPT ICM</i>	62
4.4.1	Ujicoba Penjajakan dari Kiri	62
4.4.2	Ujicoba Penjajakan dari Kanan	63
4.4.3	Total Daya yang Dihasilkan.....	63
4.5	Pengaruh Algoritma <i>MPPT</i>	65
4.5.1	Linearisasi Vs Nonlinearisasi	65
4.5.2	Pengaruh V_{ref} untuk Perhitungan <i>Error</i>	66
4.6	Gagal Fungsi.....	67
4.7	Kekurangan di <i>Current Source Region</i>	69
BAB 5 KESIMPULAN		70
DAFTAR PUSTAKA		71

DAFTAR GAMBAR

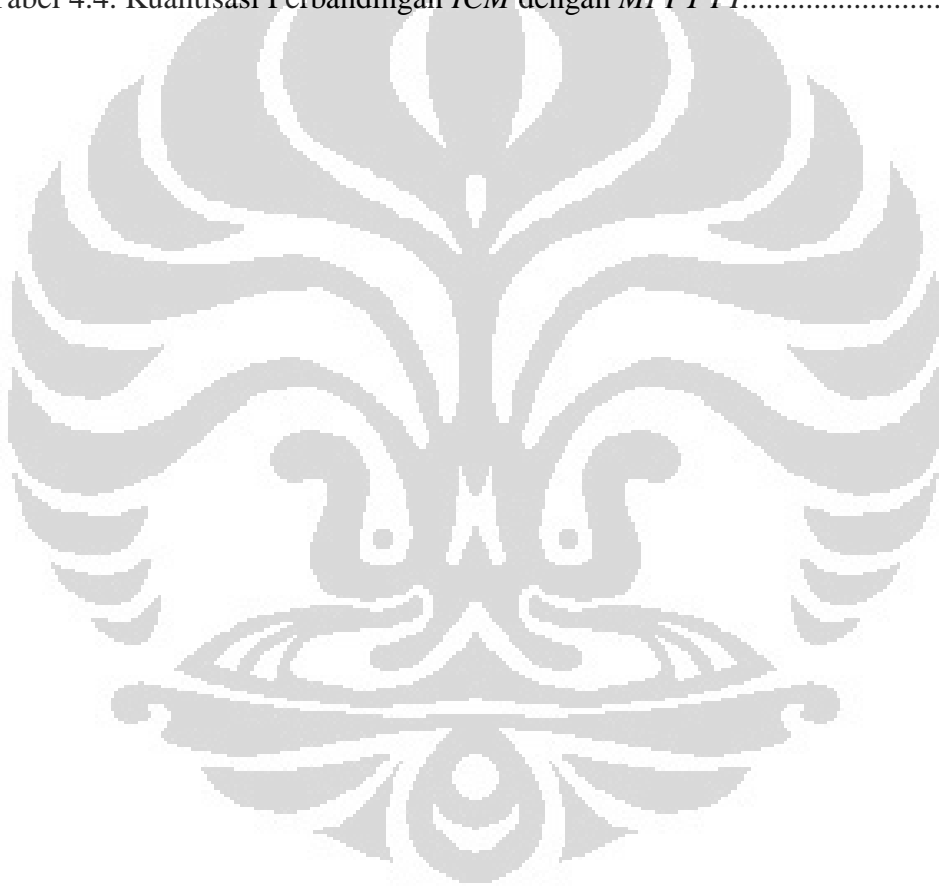
Gambar 2.1. Skema Efek <i>Photovoltaic</i>	6
Gambar 2.2. Rangkaian Pengganti Sel Surya	7
Gambar 2.3. Karakteristik Sel <i>Photovoltaic</i> Terhadap Perbedaan Radiasi.....	8
Gambar 2.4. Karakteristik Sel <i>Photovoltaic</i> Terhadap Perbedaan Suhu	8
Gambar 2.5. <i>Flowchart</i> Algoritma <i>ICM</i>	12
Gambar 2.6. Respon untuk <i>Gain</i> Terlalu Besar	14
Gambar 2.7. Respon untuk <i>Gain</i> Terlalu Kecil.....	15
Gambar 2.8. Respon untuk Integrator Terlalu Kecil.....	15
Gambar 2.9. Respon untuk Integrator Terlalu Besar	15
Gambar 2.10. Rangkaian <i>Boost Converter</i>	16
Gambar 2.11. Rangkaian <i>Boost Converter</i> Saat <i>Switch</i> Tertutup	17
Gambar 2.12. Rangkaian <i>Boost Converter</i> Saat <i>Switch</i> Terbuka.....	18
Gambar 3.1. Blok Diagram Model Sel Surya	22
Gambar 3.2. Blok Diagram Simulasi Model Sel Surya	23
Gambar 3.3. Kurva Karakteristik <i>V-I</i> Model Sel Surya pada <i>STC</i>	24
Gambar 3.4. Kurva Karakteristik <i>V-I</i> Model Statis Sel Surya	25
Gambar 3.5. Kurva Karakteristik <i>V-I</i> Model Sel Surya pada Radiasi Berbeda	25
Gambar 3.6. Kurva Karakteristik <i>V-I</i> Model Sel Surya pada Suhu Berbeda.....	26
Gambar 3.7. (a) Blok Diagram Pembuat Sinyal <i>PWM</i> . (b) Sinyal <i>PWM</i>	27
Gambar 3.8. Model <i>Boost Converter</i>	28
Gambar 3.9. Model <i>Boost Converter</i> <i>Switch</i> Terbuka	28
Gambar 3.10. Model <i>Boost Converter</i> <i>Switch</i> Tertutup.....	29
Gambar 3.11. Blok Diagram Simulasi Model <i>Boost Converter</i>	30
Gambar 3.12. Respon Model <i>Boost Converter</i>	32
Gambar 3.14. Blok Diagram Simulasi Pengendalian <i>Boost Converter</i>	33
Gambar 3.13. Rancangan Pengendali <i>PI</i> Pada <i>Boost Converter</i>	33
Gambar 3.15. Respon Model <i>Boost Converter</i> dengan Pengendali <i>PI</i>	34
Gambar 3.16. Keluaran Pengendali <i>PI</i> <i>Boost Converter</i>	34
Gambar 3.17. Blok Diagram Simulasi <i>ICM</i> dengan Model Sel Surya	35
Gambar 3.18. V_{PVref} Algoritma <i>ICM</i> pada <i>STC</i>	36
Gambar 3.19. Kurva karakteristik <i>P-V</i> Model Sel Surya pada <i>STC</i>	36
Gambar 3.20. Karakteristik dP/dV Terhadap Perubahan Suhu Sel.....	39
Gambar 3.21. Linearisasi karakteristik dP/dV Sel Surya.....	39
Gambar 3.22. Visualisasi Persamaan (3.18) dan (3.19).....	40
Gambar 3.23. Blok Diagram Simulasi <i>PI MPPT</i> dengan Model Sel Surya	42
Gambar 3.24. V_{PVref} Algoritma <i>PI MPPT</i> pada <i>STC</i>	42
Gambar 3.25. <i>Error Gradien</i> <i>PI MPPT</i> pada <i>STC</i>	43
Gambar 3.26. Rancangan Sistem <i>MPPT</i>	44
Gambar 3.27. Sistem <i>MPPT</i> <i>ICM</i>	44
Gambar 3.28. Rancangan Sistem <i>MPPT</i>	45
Gambar 3.29. Linearisasi Karakteristik <i>V-I</i> Sel Surya.....	49
Gambar 4.1. Titik Kerja Untuk Analisis Kestabilan	53
Gambar 4.2. Letak <i>Pole</i> pada <i>Current Source Region</i>	53
Gambar 4.3. Letak <i>Pole</i> pada <i>Control Region</i>	53

Gambar 4.4. Letak <i>Pole</i> pada <i>Voltage Source Region</i>	54
Gambar 4.5. Blok Diagram Simulasi Sistem <i>MPPT</i>	55
Gambar 4.6. V_{PV} Sistem <i>MPPT</i> pada <i>STC</i>	57
Gambar 4.7. Daya Sistem <i>MPPT</i> pada <i>STC</i>	57
Gambar 4.8. <i>Gradien</i> Kurva <i>P-V</i> Sistem <i>MPPT</i> pada <i>STC</i>	57
Gambar 4.9. V_{PV} Sistem <i>MPPT</i> Terhadap Perubahan Radiasi Matahari	59
Gambar 4.10. Daya Sistem <i>MPPT</i> Terhadap Perubahan Radiasi Matahari.....	59
Gambar 4.11. <i>Gradien</i> Sistem <i>MPPT</i> Terhadap Perubahan Radiasi Matahari....	59
Gambar 4.12. V_{PV} Sistem <i>MPPT</i> Terhadap Perubahan Suhu.....	61
Gambar 4.13. Daya Sistem <i>MPPT</i> Terhadap Perubahan Suhu.....	61
Gambar 4.14. <i>Gradien</i> Sistem <i>MPPT</i> Terhadap Perubahan Suhu.....	61
Gambar 4.15. Perbandingan <i>PI</i> dengan <i>ICM</i> pada Penjajakan dari Kiri	62
Gambar 4.16. Perbandingan <i>PI</i> dengan <i>ICM</i> pada Penjajakan dari Kanan	63
Gambar 4.17. Perbandingan Daya <i>PI</i> dengan <i>ICM</i>	64
Gambar 4.18. V_{PV} Sistem <i>MPPT</i> Tanpa Linearisasi Terhadap Perubahan Suhu .	66
Gambar 4.19. V_{ref} Sistem <i>MPPT</i>	66
Gambar 4.20. V_{PV} Saat Terjadi Gagal Fungsi	67
Gambar 4.21. I_{PV} Saat Terjadi Gagal Fungsi	68
Gambar 4.22. <i>Gradien</i> Saat Terjadi Gagal Fungsi.....	68
Gambar 4.23. Kekurangan di <i>Current Source Region</i>	69



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Karakteristik Utama Metode-Metode <i>MPPT</i>	3
Tabel 2.1. Algoritma <i>P&O</i>	12
Tabel 3.1. Spesifikasi Modul KC50T	21
Tabel 3.2. Tabel Variabel Tetap Model <i>Boost Converter</i>	30
Tabel 3.3. Definisi Daerah Linearisasi.....	41
Tabel 3.4. Tabel Parameter <i>PI MPPT</i>	41
Tabel 4.1. Tabel Kuantisasi Letak <i>Pole</i>	54
Tabel 4.2. Data Simulasi Perbedaan Radiasi Matahari.....	58
Tabel 4.3. Data Simulasi Perbedaan Suhu Sel	60
Tabel 4.4. Kuantisasi Perbandingan <i>ICM</i> dengan <i>MPPT PI</i>	64



DAFTAR PERSAMAAN

(2.1)	6
(2.2)	7
(2.3)	9
(2.4)	9
(2.5)	10
(2.6)	10
(2.7)	11
(2.8)	11
(2.9)	11
(2.10)	11
(2.11)	13
(2.12)	13
(2.13)	13
(2.14)	13
(2.15)	13
(2.16)	13
(2.17)	17
(2.18)	17
(2.19)	17
(2.20)	18
(2.21)	18
(2.22)	18
(2.23)	18
(2.24)	18
(2.25)	18
(2.26)	19
(2.27)	19
(2.28)	19
(2.29)	20
(3.1)	22
(3.2)	22
(3.3)	23
(3.4)	23
(3.5)	23
(3.6)	24
(3.7)	28
(3.8)	28
(3.9)	29
(3.10)	29
(3.11)	37
(3.12)	37
(3.13)	38
(3.14)	38
(3.15)	38

(3.16)	38
(3.17)	38
(3.18)	40
(3.19)	40
(3.20)	46
(3.21)	46
(3.22)	46
(3.23)	46
(3.24)	46
(3.25)	46
(3.26)	47
(3.27)	47
(3.28)	47
(3.29)	48
(3.30)	48
(3.31)	48
(3.32)	48
(3.33)	48
(3.34)	48
(3.35)	49
(3.36)	49
(3.37)	50
(3.38)	50
(3.39)	50
(3.40)	51
(3.41)	51

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi matahari dapat diperoleh dengan mudah dan gratis, namun hasil konversinya tidak sepenuhnya dapat diperoleh dengan mudah dan gratis. Kelebihan yang dimiliki energi matahari adalah energi cahaya matahari berlimpah ruah, kita dapat memasang panel surya di atap rumah tanpa merugikan tetangga yang memasang panel surya juga, kita dapat memasang panel surya di mobil pribadi, di peralatan elektronik pribadi tanpa ada yang merasa dirugikan karena energi matahari kita ambil.

Energi matahari dikonversi menjadi energi listrik dengan efisiensi hanya sebesar 18%. Angka tersebut semakin berkurang pada saat energi tersebut digunakan ke peralatan listrik karena pengaruh efisiensi pengatur tegangan, *batere*, kabel, dan *inverter* menjadi sekitar 10-15% (Enslin, 1990).

Pada dasarnya, efisiensi konversi sel surya dihitung pada saat sel surya bekerja di titik optimumnya. Jika sel surya tidak bekerja pada titik optimumnya maka efisiensi yang kecil tersebut akan semakin kecil. Cara untuk menjaga sel surya bekerja pada titik optimumnya adalah dengan menerapkan algoritma *maximum power point tracking (MPPT)*.

Rata-rata harian peningkatan daya yang dihantarkan *MPPT* adalah sebesar 16-43% dibanding tidak menggunakan *MPPT*. Peningkatan daya terbesar terjadi pada saat kondisi lingkungan berubah secara cepat (Enslin, 1990). Hal ini dikarenakan titik kerja optimum sel surya berubah seiring perubahan kondisi lingkungan.

Pada saat ini setidaknya terdapat 19 metode *MPPT* yang berbeda (Esrn & Chapman, 2007). Tabel 1.1 menunjukkan karakteristik dari metode-metode *MPPT* yang telah dibahas oleh Esrn & Chapman, 2007. *PV Array Dependent* memiliki nilai 'Yes' jika metode *MPPT* yang digunakan tidak dapat bekerja untuk panel sel surya ataupun tempat meletakkan panel yang lain. *True MPPT* memiliki nilai 'Yes' jika titik kerja yang diberikan oleh metode tersebut bukan hasil prediksi dari penyederhanaan persamaan matematis. *Periodic Tuning* memiliki nilai 'Yes'

jika parameter dari metode yang digunakan perlu disesuaikan kembali untuk setiap musim yang berbeda ataupun untuk penuaan alat.

Metode yang *robust* dan sering digunakan adalah *Perturbation & Observation (P&O)* dan *Incremental Conductance (ICM)*. Namun, kedua metode ini memiliki kelemahan yaitu pada waktu yang dibutuhkan untuk mencari titik kerja optimum dan osilasi di titik kerja.

1.2 Perumusan Masalah

Memahami karakteristik sel surya untuk mengaplikasikan pengendali *PI* sebagai *MPPT* pada 15 modul sel surya Kyocera KC50T. Memperbaiki lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik kerja optimum sel surya dan besar osilasi di titik kerja referensi yang diberikan oleh algoritma *MPPT*.

1.3 Batasan Penelitian

Penulis membatasi penelitian pada simulasi rancangan *MPPT* baru dengan basis rangkaian *Boost converter*. Pembahasan pada penelitian ini mengenai proses perancangan algoritma *MPPT* baru, analisis sistem *MPPT*, dan perbandingan *MPPT* baru dengan algoritma *ICM*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

- a. Mengaplikasikan pengendali *PI* sebagai *MPPT*.
- b. Memahami dan merancang simulasi sistem *MPPT*.
- c. Membandingkan *PI MPPT* dengan algoritma *ICM*.
- d. Mengetahui kualitas sistem *MPPT* yang dibangun dan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kualitas sistem *MPPT* tersebut.

Tabel 1.1. Karakteristik Utama Metode-Metode *MPPT*

Metode <i>MPPT</i>	<i>PV</i> Array Dependent	True <i>MPPT</i>	Analog/ Digital	Periodic Tunning	Waktu	Kompleksitas Pemasangan	Sensor
<i>Hill-climbing/ P&O</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Both</i>	<i>No</i>	<i>Varies</i>	<i>Low</i>	<i>V, I</i>
<i>IncCond</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>No</i>	<i>Varis</i>	<i>Med</i>	<i>V, I</i>
<i>Fractional V_{OC}</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Both</i>	<i>No</i>	<i>Med</i>	<i>Low</i>	<i>V</i>
<i>Fractional I_{SC}</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Both</i>	<i>No</i>	<i>Med</i>	<i>Med</i>	<i>I</i>
<i>Fuzzy Logic Control</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>No</i>	<i>Fast</i>	<i>High</i>	<i>Varies</i>
<i>Neural Network</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>Yes</i>	<i>Fast</i>	<i>High</i>	<i>Varies</i>
<i>RCC</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Analog</i>	<i>No</i>	<i>Fast</i>	<i>Low</i>	<i>V, I</i>
<i>Current Sweep</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>Yes</i>	<i>Slow</i>	<i>High</i>	<i>V, I</i>
<i>DC Link Capacitor Droop Control</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Both</i>	<i>No</i>	<i>Med</i>	<i>Low</i>	<i>V</i>
<i>Load I or V Maximization</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Analog</i>	<i>No</i>	<i>Fast</i>	<i>Low</i>	<i>V, I</i>
<i>dP/dV or dP/dI Feedback Control</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>No</i>	<i>Fast</i>	<i>Med</i>	<i>V, I</i>
<i>Array Reconfiguration</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Digital</i>	<i>Yes</i>	<i>Slow</i>	<i>High</i>	<i>V, I</i>
<i>Linear Current Control</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Digital</i>	<i>Yes</i>	<i>Fast</i>	<i>Med</i>	<i>Irradiance</i>
<i>I_{MPP} & V_{MPP} Computation</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>Yes</i>	<i>N/A</i>	<i>Med</i>	<i>Irradiance Temperature</i>
<i>State_based <i>MPPT</i></i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>	<i>Both</i>	<i>Yes</i>	<i>Fast</i>	<i>High</i>	<i>V, I</i>
<i>OCC <i>MPPT</i></i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Both</i>	<i>Yes</i>	<i>Fast</i>	<i>Med</i>	<i>I</i>
<i>BFV</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Both</i>	<i>Yes</i>	<i>N/A</i>	<i>Low</i>	<i>None</i>
<i>LRCM</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>	<i>Digital</i>	<i>No</i>	<i>N/A</i>	<i>High</i>	<i>V, I</i>
<i>Slide Control</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>	<i>Digital</i>	<i>No</i>	<i>Fast</i>	<i>Med</i>	<i>V, I</i>

(Esrasm & Chapman, 2007)

1.5 Metodologi Penelitian

Untuk menguji algoritma yang dibangun maka dilakukan simulasi dengan MATLAB/ Simulink. Algoritma maupun karakteristik alat-alat yang disimulasikan ditulis dalam C-MEX. Penulis juga melakukan studi pustaka sebagai dasar penelitian dan simulasi. Analisis dilakukan berdasarkan hasil simulasi dan studi pustaka.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada BAB 1, dibahas mengenai latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan penelitian, dan metodologi penelitian yang digunakan. Pada BAB 2, diberikan dasar teori yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini. Di bagian ini dijelaskan mengenai sel surya, *MPPT*, pengendali *PI*, *boost converter*, dan sinyal *PWM*. BAB 3 membahas perancangan sistem *MPPT*, mulai dari memodelkan sel surya, membuat model *boost converter*, menguji model *boost converter*, merancang pengendali *boost converter*, sampai pembahasan mengenai perancangan algoritma *MPPT ICM* dan algoritma *MPPT* yang diusulkan. Pada BAB 4 ditampilkan hasil simulasi sistem *MPPT* yang dirancang, selain itu juga diberikan analisis perbandingan algoritma *ICM* dengan algoritma yang diusulkan. BAB 5 berisi kesimpulan dari penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya (*Photovoltaic*)

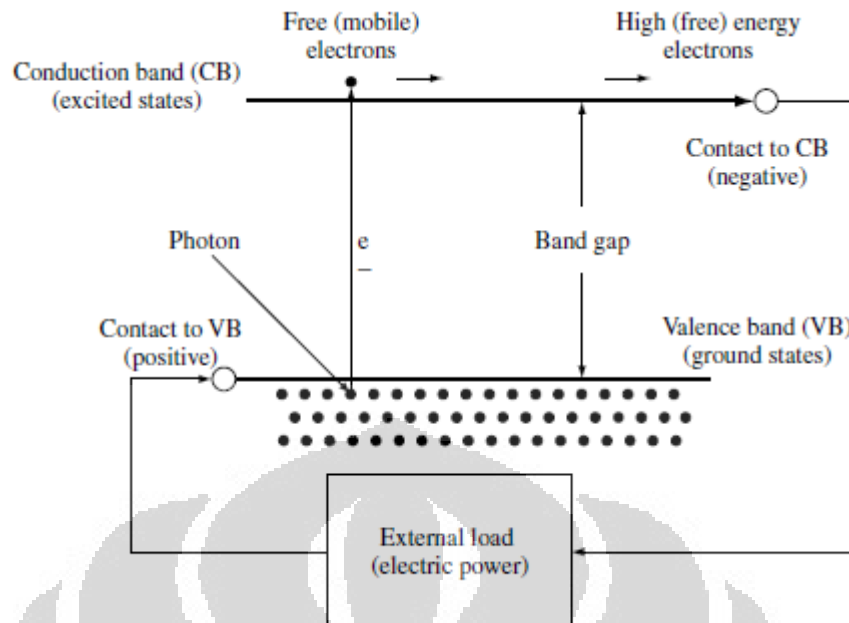
Sel surya didefinisikan sebagai teknologi yang menghasilkan listrik dc dari suatu bahan semikonduktor ketika dipaparkan oleh cahaya. Selama bahan semikonduktor tersebut dipaparkan oleh cahaya maka sel surya akan selalu menghasilkan energi listrik, dan ketika tidak dipaparkan oleh cahaya, sel surya berhenti menghasilkan energi listrik (Hegedus & Luque, 2003).

2.1.1 Prinsip Kerja Sel Surya

Sel Surya terbuat dari bahan semikonduktor memiliki elektron yang terikat dengan lemah pada suatu pita energi yang disebut pita valensi. Ketika energi yang lebih besar dari batas *threshold (band gap energy)* diberikan kepada elektron di pita valensi tersebut, maka ikatan elektron tersebut akan putus. Kemudian elektron tersebut bergerak bebas pada suatu pita energi baru yang disebut pita konduksi. Elektron bebas pada pita konduksi dapat menghasilkan listrik. Energi yang dibutuhkan untuk membebaskan elektron ini dapat berasal dari foton, yang merupakan partikel dari cahaya.

Gambar 2.1 menunjukkan proses yang terjadi pada sel surya ketika dipaparkan cahaya. Foton-foton yang merupakan partikel cahaya menabrak elektron. Ketika energi foton tersebut cukup maka elektron akan didorong keluar dari pita valensi (*VB*) melewati pita pemisah (*band gap*) menuju pita konduksi (*CB*). Kemudian suatu *selective contact* mengumpulkan elektron-elektron pada pita konduksi dan menggerakkan elektron-elektron tersebut. Elektron yang bergerak inilah yang disebut sebagai arus listrik. Energi dari arus listrik digunakan untuk mengerjakan berbagai hal sebelum kembali menuju pita valensi melalui *selective contact* yang kedua.

Sel surya sering dianggap sebagai suatu *pn junction* karena adanya "*doping*". *Doping* ini menyebabkan salah satu *selective contact* menjadi sisi p (banyak muatan positif) dan yang lain menjadi sisi n (banyak muatan negatif).



Gambar 2.1. Skema Efek *Photovoltaic*

(Hegedus & Luque, 2003)

Pemodelan dan pemahaman prinsip kerja sel surya menjadi lebih sederhana dengan menggunakan konsep *pn junction*.

2.1.2 Persamaan Karakteristik Sel Surya

Persamaan eksponensial untuk memodelkan *sel photovoltaic* diturunkan dari hukum fisika untuk *pn junction* dan secara umum diterima sebagai representasi karakteristik sel ditunjukkan oleh persamaan (2.1) (Nema, Nema, & Agnihotri, 2010).

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{q(V + IR_s)}{NKT} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

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),

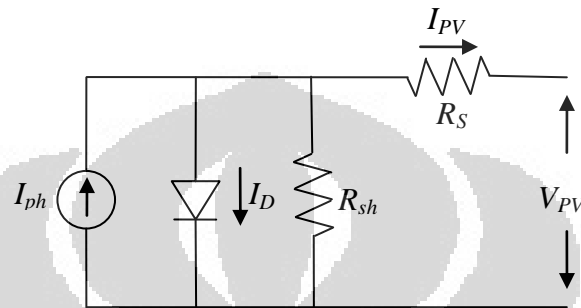
T adalah suhu junction dalam *Kelvin* (K).

N faktor idealitas dari dioda,

R_s adalah tahanan seri dari dioda,

R_{sh} adalah tahanan shunt dari dioda,

Dari persamaan (2.1), dapat digambarkan rangkaian pengganti dari *sel photovoltaic*, yaitu seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Rangkaian Pengganti Sel Surya

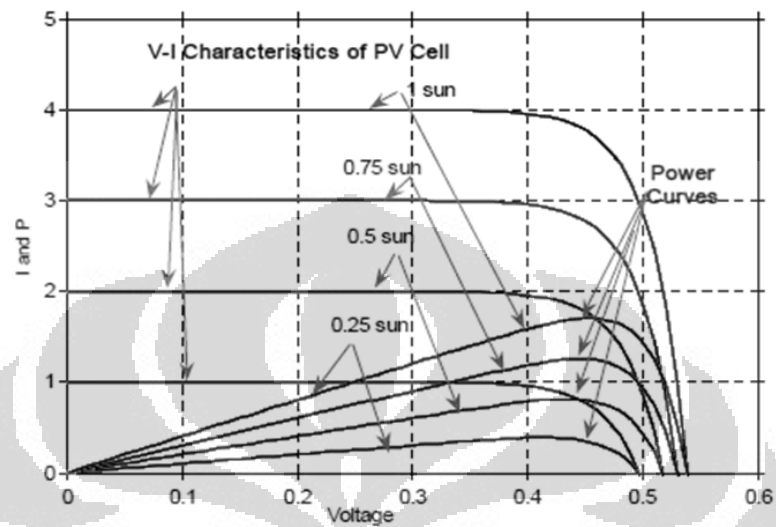
Keluaran dari *sel photovoltaic* sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, yaitu radiasi matahari dan suhu sel. Dari persamaan (2.1), arus yang dibangkitkan oleh foton, I_{ph} , berhubungan dengan radiasi matahari, λ , sebagai berikut

$$I_{ph} = [I_{SC} + k_I(T - 298)] \frac{\lambda}{100} \quad (2.2)$$

k_I adalah koefisien suhu arus hubung singkat, I_{SC} adalah arus hubung singkat pada suhu 25°C, T adalah suhu sel, dan λ adalah radiasi matahari dalam kW/m^2 .

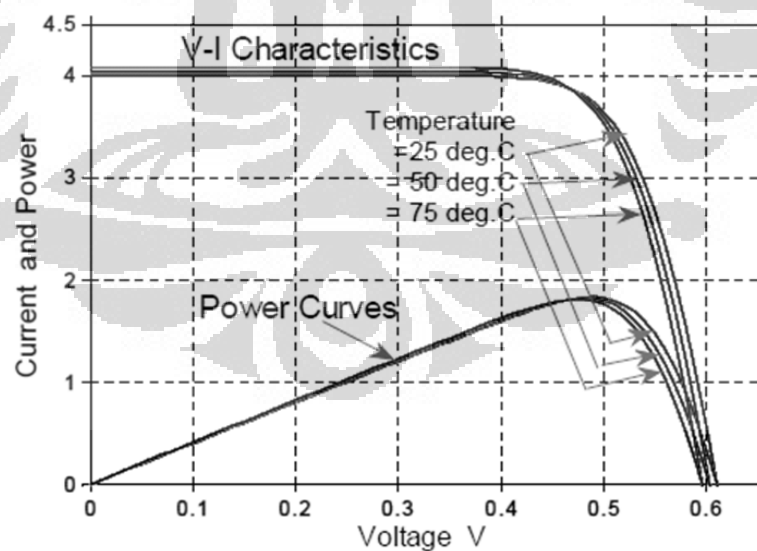
Berdasarkan persamaan (2.2), dapat dilihat pada saat suhu konstan, arus yang dibangkitkan oleh foton secara langsung proporsional terhadap radiasi matahari. Pengaruh perubahan radiasi matahari pada kurva karakteristik $V-I$ dapat dilihat pada Gambar 2.3. I_{SC} adalah arus pada saat terjadi hubung singkat, dan biasanya nilai tegangannya nol. Pada Gambar 2.3, yang dimaksud I_{SC} adalah pada saat nilai tegangannya nol. V_{OC} merupakan tegangan pada saat rangkaian terbuka, sehingga tidak ada arus yang mengalir. Pada Gambar 2.3, yang dimaksud V_{OC} adalah pada saat nilai arus nol. Radiasi matahari satu *sun* artinya sebesar $1000 W/m^2$; $0,75 sun$ sebesar $750 W/m^2$; $0,5 sun$ sebesar $500 W/m^2$, dst. Jika radiasi matahari yang jatuh ke *sel photovoltaic* berkurang, I_{SC} dan V_{OC} juga berkurang,

tetapi perubahan V_{OC} tidak terlalu signifikan seperti pada I_{SC} (Nema, Nema, & Agnihotri, 2010).



Gambar 2.3. Karakteristik Sel *Photovoltaic* Terhadap Perbedaan Radiasi

(Nema, Nema, & Agnihotri, 2010)



Gambar 2.4. Karakteristik Sel *Photovoltaic* Terhadap Perbedaan Suhu

(Nema, Nema, & Agnihotri, 2010)

Suhu sel dapat mempengaruhi arus hubung singkat, I_{sc} , seperti diberikan oleh persamaan (2.2) dan mengubah arus saturasi dioda dalam *sel photovoltaic* seperti diberikan oleh persamaan (2.3).

$$I_s(T) = I_s \left[\frac{T}{T_{nom}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{T}{T_{nom}} - 1 \right) \frac{E_g}{NV_t} \right] \quad (2.3)$$

$T_{nom} = 273 \text{ K}$, I_s adalah arus *reverse saturation*, E_g adalah *band gap energy* dari semikonduktor dan V_t adalah tegangan thermal pada suhu ruangan. Arus *reverse saturation* dapat diperoleh melalui persamaan berikut

$$I_s = I_{sc} / \left(\exp \frac{qV_{OC}}{NKT} - 1 \right) \quad (2.4)$$

V_{OC} adalah tegangan rangkaian terbuka.

Berdasarkan persamaan persamaan (2.3), sangat jelas arus saturasi dari dioda *sel photovoltaic* bergantung pada suhu, arus saturasi meningkat seiring peningkatan suhu sel. Gambar 2.4 menunjukkan pengaruh suhu sel terhadap kurva karakteristik $V-I$, peningkatan arus saturasi akan memperkecil tegangan rangkaian terbuka, V_{OC} .

2.1.3 Modul Sel Surya

Sebuah *sel photovoltaic* adalah unit dasar yang mampu menghasilkan tegangan antara 0,5 sampai 0,8 Volt bergantung pada teknologi yang digunakan. Tegangan yang kecil tersebut tidak cukup untuk digunakan secara komersial, oleh karena itu, *sel photovoltaic* diintegrasikan dan dihubungkan dalam suatu modul untuk menghasilkan tegangan yang paling tidak dapat digunakan untuk mengisi *batere 12 Volt*.

Modul sel surya adalah kongregasi dari *sel photovoltaic* secara seri agar dapat menghasilkan tegangan yang cocok untuk mengisi *batere 12 Volt* (Nema, Nema, & Agnihotri, 2010). Sebuah *sel photovoltaic* menghasilkan tegangan antara 0,5 - 0,6 Volt dan memiliki hubungan tegangan-arus yang *nonlinear* seperti pada persamaan (2.1). Untuk modul *photovoltaic* persamaannya diperoleh melalui modifikasi dari persamaan (2.1) dengan mengabaikan R_s & R_{sh} . Persamaan modul *photovoltaic* diberikan oleh persamaan (2.5).

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_s \left(\exp \frac{qV}{NKTn_s} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Dimana n_p dan n_s adalah jumlah sel yang disusun paralel dan seri.

2.2 Maximum Power Point Tracking

Tegangan dan arus keluaran sel surya memiliki karakteristik *nonlinear* seperti ditunjukkan persamaan (2.1). Hal tersebut juga dapat dilihat pada plot kurva P - V hasil simulasi karakteristik sel surya pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4. Parameter kualitas keluaran sel surya dapat dilihat melalui parameter *Fill Factor* yang diberikan oleh persamaan (2.6).

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (2.6)$$

Dimana V_{MP} dan I_{MP} merupakan titik kerja maksimum/ *Maximum Power Point (MPP)* dari tegangan dan arus sel surya (Green, 1982). Titik kerja maksimum sel surya berubah seiring perubahan radiasi matahari dan suhu sel.

Sel surya tidak akan secara otomatis bekerja pada titik kerja maksimumnya, melainkan harus dikendalikan. *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* adalah metode yang digunakan untuk mencari titik kerja maksimum sel surya dan mempertahankan sel surya bekerja di titik tersebut.

Banyak jurnal yang membahas metode-metode *MPPT*. Terdapat 19 metode *MPPT* yang memiliki perbedaan mendasar seperti ditunjukkan pada Tabel 1.1; Setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda-beda (Esrarn & Chapman, 2007). Beberapa metode yang *robust* seperti *Incremental Conductance* dan *Perturbation & Observation (P&O)* memiliki kelemahan pada waktu penjajakan dan osilasi pada *MPP*. Metode yang telah disempurnakan oleh *fuzzy logic* mampu menunjukkan kualitas yang lebih baik.

2.2.1 Incremental Conductance

Metode *Incremental Conductance (ICM)* bekerja berdasarkan *gradien* kurva P - V atau kurva P - I karakteristik sel surya (Esrarn & Chapman, 2007). Titik kerja maksimum sel surya terletak pada nilai tegangan yang berbeda untuk setiap

kondisi lingkungan yang berbeda, disebut V_{MPP} . *MPPT* memberikan V_{ref} agar titik kerja sel surya terdapat di nilai V_{MPP} tersebut. *Flowchart* dari algoritma *ICM* ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Karakteristik *P-V* sel surya merupakan fungsi daya terhadap tegangan, mencapai titik maksimum ketika *gradien*-nya bernilai nol.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.7)$$

Karena $P = V.I$, maka:

$$\frac{d(V.I)}{dV} = \frac{V.dI + dV.I}{dV} \quad (2.8)$$

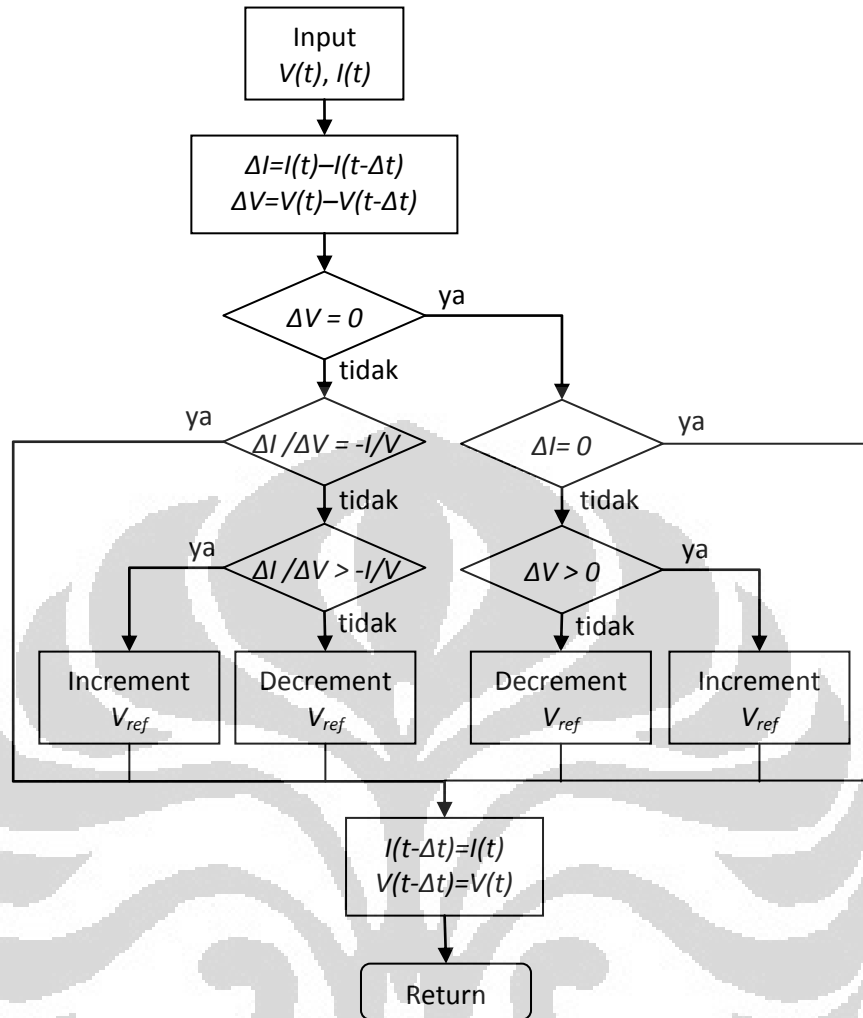
$$V \frac{dI}{dV} + I = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.10)$$

Perubahan V_{ref} yang diberikan *ICM* tetap untuk setiap iterasi. Besar perubahan V_{ref} tersebut dipertimbangkan dari waktu penjajakan menuju nilai maksimum dan osilasi pada nilai maksimum. Kedua parameter tersebut memiliki hubungan terbalik, sehingga selalu terdapat kompensasi untuk setiap parameter yang ingin diperbaiki. Perubahan V_{ref} yang besar akan mempercepat waktu penjajakan, namun sulit mencapai V_{MPP} dan menyebabkan osilasi di sekitar *MPP*. Oleh karena itu, modifikasi dari algoritma *ICM* yang telah berkembang selama ini adalah dengan membuat besar perubahan V_{ref} bervariasi (Mei, Shan, Liu, & Guerrero, 2011).

2.2.2 Perturbation & Observation (P&O)

Metode *Perturbation & Observation* terdiri dari dua tahap, *perturb* yaitu mengubah V_{ref} dan *observation* yaitu menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Jika perubahan daya positif maka *perturb* selanjutnya akan tetap pada arah yang sama, sedangkan jika perubahan daya negatif maka *perturb* akan dibalik (Esrarn & Chapman, 2007). Tabel 2.1 menjelaskan algoritma *perturbation dan observation*.



Gambar 2.5. Flowchart Algoritma ICM

(Esrarn & Chapman, 2007)

Tabel 2.1. Algoritma P&O

Perturbation	Perubahan Daya	Perturbation Selanjutnya
Positif	Positif	Positif
Positif	Negatif	Negatif
Negatif	Positif	Negatif
Negatif	Negatif	Positif

(Esrarn & Chapman, 2007)

Seperti halnya *ICM*, besar *perturb* yang diberikan tetap. Untuk itu, masalah waktu penjajakan dan osilasi *MPP* diselesaikan dengan menggunakan besar *perturbation* yang bervariasi (Piegarri & Rizzo, 2010).

2.3 Pengendali *PI*

Pengendali adalah tentang membuat karakteristik keluaran proses sesuai dengan yang dikehendaki dengan memanipulasi masukan proses secara otomatis (Sung, Lee, & Lee, 2009).

2.3.1 Fungsi Alih Pengendali *PI*

Struktur pengendali *PI* terdiri dari dua bagian:

$$\text{Proportional (P) part: } u_p(t) = K_c(y_s(t) - y(t)) \quad (2.11)$$

$$\text{Integral (I) part: } u_i(t) = \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t (y_s(\tau) - y(\tau)) d\tau \quad (2.12)$$

Keluaran dari pengendali *PI* adalah hasil penjumlahan dari kedua bagian diatas:

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) \quad (2.13)$$

$$u(t) = K_c(y_s(t) - y(t)) + \frac{K_c}{\tau_i} \int_0^t (y_s(\tau) - y(\tau)) d\tau \quad (2.14)$$

Dimana $y_s(t)$, $y(t)$, dan $u(t)$ adalah *set point*, keluaran proses, dan keluaran pengendali *PI*. Konstanta k_c , τ_i disebut *gain proporsional* dan integrator. Dalam penggunaannya, *set point* dan parameter pengendali k_c dan τ_i diset oleh pengguna.

Masukan dan keluaran pengendali *PI* adalah $y_s(t)-y(t)$ dan $u(t)$. Maka fungsi alih dari pengendali *PI* adalah

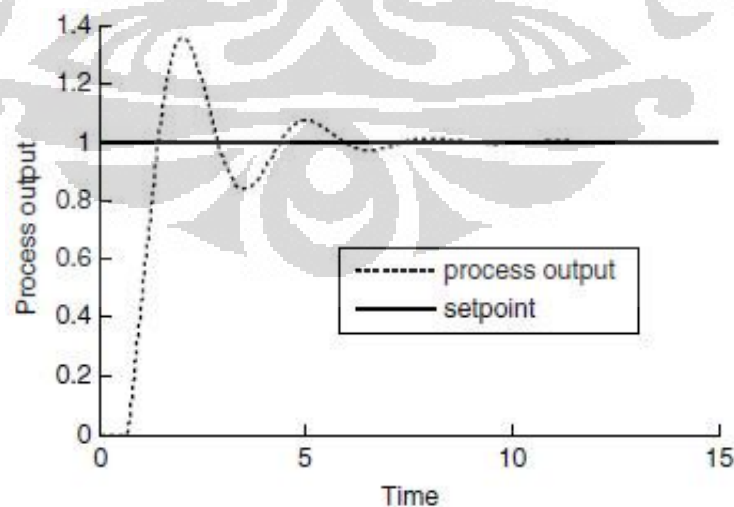
$$G_C(s) = \frac{u(s)}{y_s(s) - y(s)} \quad (2.15)$$

$$G_C(s) = k_c + \frac{k_c}{\tau_i s} \quad (2.16)$$

2.3.2 Penalaan *Trial-Error*

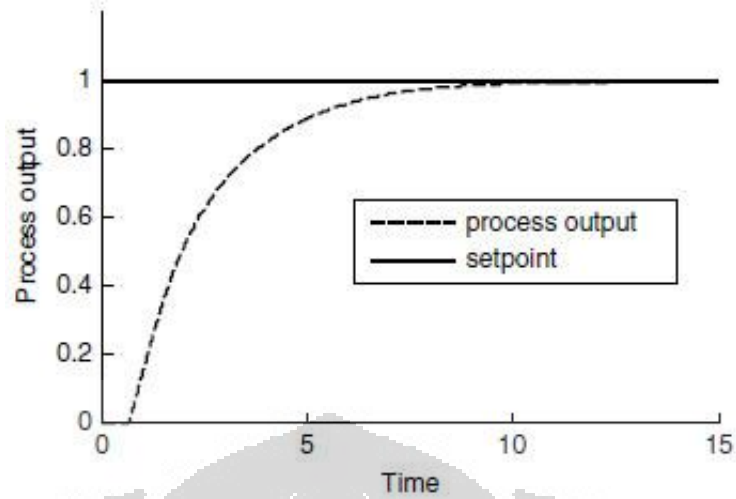
Penalaan digunakan untuk menentukan nilai parameter pengendali dengan menganalisis respon dinamik dari keluaran proses yang dikendalikan. Untuk melakukan penalaan dengan metode *trial-error* sangat penting untuk mengetahui efek dari parameter pengendali terhadap keluaran proses. Pengendali biasanya menunjukkan respon dinamik sebagai berikut terhadap penalaan parameter untuk perubahan *step* pada *set point* (Sung, Lee, & Lee, 2009).

- Respon 1. Untuk perubahan *step* pada *set point*, jika keluaran proses menunjukkan osilasi yang besar, seperti ditunjukkan Gambar 2.6, artinya *gain proporsional* K_c terlalu besar.
- Respon 2. Untuk perubahan *step* pada *set point*, jika keluaran proses menunjukkan respon *overdamped*, seperti pada Gambar 2.7, artinya *gain proporsional* K_c terlalu kecil.
- Respon 3. Untuk perubahan positif *step* pada *set point*, jika keluaran proses berosilasi dan tetap diatas *set point* lebih lama daripada dibawah *set point*, seperti ditunjukkan Gambar 2.8, artinya integrator τ_i terlalu kecil.
- Respon 4. Untuk perubahan positif *step* pada *set point*, jika keluaran proses berosilasi dan tetap dibawah *set point* lebih lama daripada diatas *set point*, seperti ditunjukkan Gambar 2.9, artinya integrator τ_i terlalu besar.

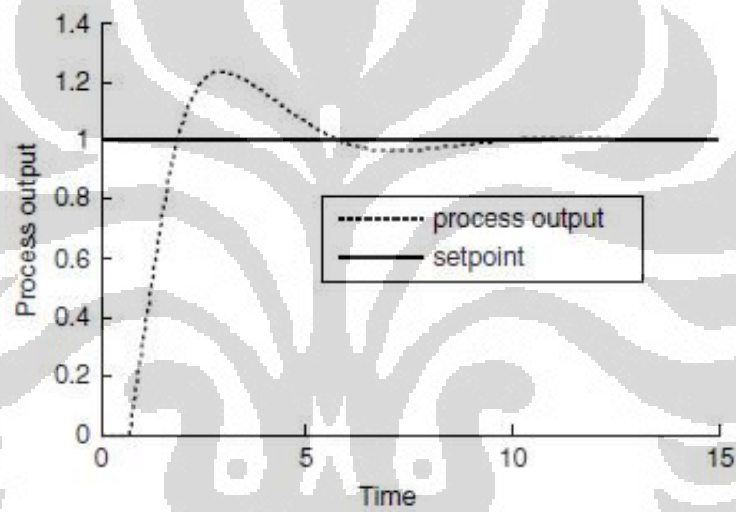


Gambar 2.6. Respon untuk *Gain* Terlalu Besar

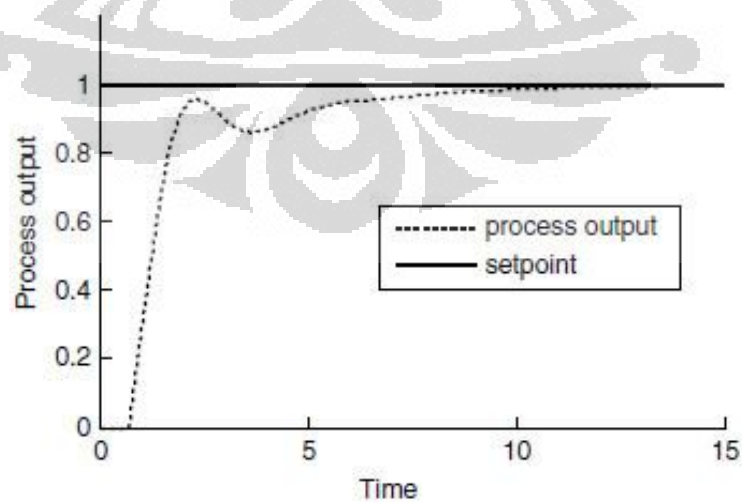
(Sung, Lee, & Lee, 2009)



Gambar 2.7. Respon untuk *Gain* Terlalu Kecil



Gambar 2.8. Respon untuk Integrator Terlalu Kecil



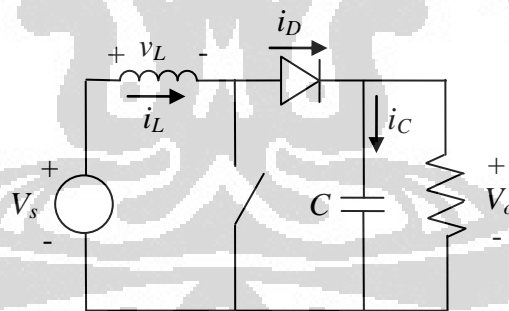
Gambar 2.9. Respon untuk Integrator Terlalu Besar

(Sung, Lee, & Lee, 2009)

Hal terakhir yang penting dalam penalaan *trial-and-error* adalah menjaga *gain proporsional* sebesar mungkin. Respon dinamik *loop tertutup* menjadi lebih lambat seiring penalaan *trial-and-error* jika berfokus pada keempat respon diatas tanpa berusaha menjaga *gain proporsional* tetap besar.

2.4 Boost Converter

Dc-dc converter adalah rangkaian elektronika daya untuk mengkonversi *level* tegangan *dc* ke *level* tegangan *dc* yang berbeda. Salah satu jenis dari *dc-dc converter* adalah *boost converter* (Hart, 1997). *Boost converter* adalah suatu *dc-dc converter* yang memiliki arus masukan kontinu dan arus keluaran diskontinyu (Xiao, Dunford, Palmer, & Capel, 2007). Karakteristik tersebut membuat *boost converter* digunakan untuk sistem *MPPT*, sebab ketika arus terputus maka tegangan yang terukur akan sama dengan tegangan *rangkaian terbuka*. Gambar rangkaian *boost converter* ditunjukkan oleh Gambar 2.10. *Boost converter* bekerja dengan cara membuka dan menutup *switch* secara berkala.

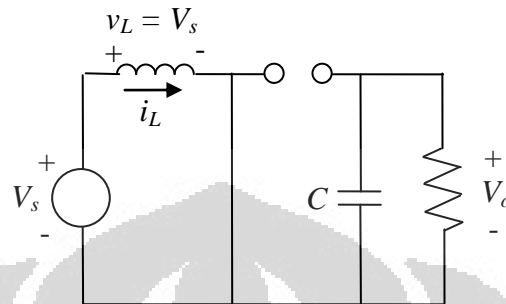


Gambar 2.10. Rangkaian *Boost Converter*

Untuk menganalisis hubungan tegangan dan arus pada rangkaian *boost converter*, digunakan beberapa asumsi, yaitu:

- Kondisi *steady-state* ada.
- Periode *switching* adalah T , dan *switch* tertutup untuk waktu DT dan terbuka untuk $(1 - D)T$.
- Arus induktor kontinu (selalu bernilai positif).

- d. Kapasitor sangat besar, dan tegangan keluaran konstan.
- e. Komponen ideal.



Gambar 2.11. Rangkaian *Boost Converter* Saat *Switch* Tertutup

Ketika *switch* tertutup, dioda mengalami *reversed-bias*. Gambar 2.11 menunjukkan rangkaian *boost converter* ketika *switch* tertutup. Hukum tegangan Kirchoff untuk rangkaian *boost converter* pada saat *switch* tertutup adalah

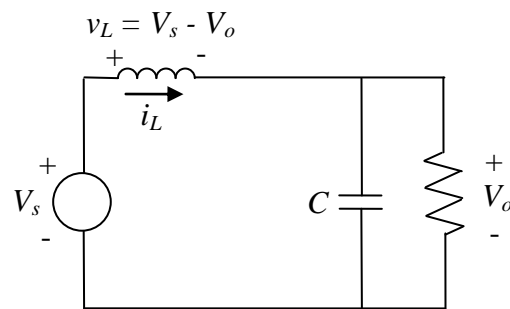
$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \text{ atau } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (2.17)$$

Perubahan arus bernilai konstan, sehingga arus meningkat secara linear ketika *switch* tertutup. Perubahan arus induktor adalah

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (2.18)$$

Solusi untuk Δi_L untuk *switch* tertutup

$$(\Delta i_L)_{\text{closed}} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.19)$$



Gambar 2.12. Rangkaian *Boost Converter* Saat *Switch* Terbuka

Gambar 2.12 menunjukkan gambar rangkaian *boost converter* ketika *switch* terbuka. Ketika *switch* terbuka, dioda menjadi *forward-bias*. Dengan mengasumsikan tegangan keluaran V_o konstan, tegangan pada induktor adalah

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

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.21)$$

Perubahan arus induktor konstan, sehingga arus berubah secara linear ketika *switch* terbuka. Perubahan arus induktor ketika *switch* terbuka adalah

$$\frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (2.22)$$

Solusi untuk Δi_L ,

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \quad (2.23)$$

Jika bekerja sampai kondisi *steady-state*, total perubahan arus di induktor sama dengan nol. Menggunakan persamaan (2.19) dan (2.23), dapat ditentukan hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran *boost converter*.

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{V_s D T}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.25)$$

Solusi untuk V_o ,

$$V_s(D + 1 - D) - V_o(1 - D) = 0 \quad (2.26)$$

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (2.27)$$

Persamaan (2.27) menunjukkan ketika *switch* terbuka dan D sama dengan nol, keluaran sama dengan masukan. Ketika nilai *duty ratio* meningkat, keluaran lebih besar daripada masukan. *Boost converter* dapat menghasilkan tegangan keluaran lebih besar atau sama dengan tegangan masukan (Hart, 1997).

2.5 Sinyal PWM

Pulse Width Modulation (PWM) adalah sinyal yang umum digunakan untuk mengendalikan daya pada divais elektronik. *PWM* menggunakan sebuah gelombang persegi panjang yang lebar pulsanya dimodulasi sehingga menghasilkan variasi pada nilai rata-rata gelombang tersebut.

Cara paling sederhana untuk membuat sinyal *PWM* adalah dengan metode *intersective*. Metode *intersective* menggunakan sinyal segitiga atau sinyal gigi gergaji (*saw tooth*) sebagai gelombang modulasi dan komparator. Ketika sinyal referensi lebih besar daripada gelombang modulasi, maka sinyal *PWM* berada pada kondisi *High*, dan sebaliknya ketika sinyal referensi lebih kecil daripada gelombang modulasi, maka sinyal *PWM* berada pada kondili *Low*.

Variabel yang menunjukkan perbandingan antara lebar kondisi *High* dengan periode 1 gelombang dari sinyal *PWM* disebut dengan *Duty cycle (D)*, atau dapat dinyatakan sebagai:

$$D = \frac{t_{High}}{T} \quad (2.28)$$

2.6 Parameter Kualitas Sistem MPPT

Kualitas sistem *MPPT* tentu perlu diukur agar performa dari sistem *MPPT* tersebut dapat diketahui. Pengukuran kualitas sistem *MPPT* juga berguna

untuk proses pengembangan sistem *MPPT* . Terdapat tiga parameter yang dapat menentukan kualitas sistem *MPPT* (Yi & Fa, 2009), yaitu:

a. Parameter Dinamis

Merupakan waktu yang dibutuhkan oleh sistem *MPPT* untuk mencari titik daya maksimal ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel atau radiasi matahari berubah). Semakin cepat waktu yang dibutuhkan, semakin baik sistem *MPPT* tersebut.

b. Parameter Statis

Merupakan besar fluktuasi nilai daya keluaran ketika titik daya maksimum sudah tercapai dan tidak terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel dan radiasi matahari tidak berubah). Semakin kecil fluktuasi yang terjadi, maka semakin baik algoritma *MPPT* tersebut.

c. Parameter Rasio Daya Aktual dan Daya Ideal

Merupakan perbandingan antara daya keluaran yang aktual dalam satu periode waktu dengan daya maksimum yang diukur pada kondisi kerja sel surya tersebut. Nilai parameter ini akan berkisar antara 0 sampai 100%.

Rasio Daya dapat diperoleh berdasarkan persamaan

$$\text{Rasio Daya} = \frac{\text{Daya Aktual}}{\text{Daya Maksimum Teoritis}} \times 100\% \quad (2.29)$$

Semakin besar nilai rasio ini, semakin baik algoritma *MPPT* tersebut.

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM MPPT

3.1 Model Sel Surya

Fakultas Teknik Universitas Indonesia memiliki 15 modul sel surya produksi Kyocera dengan model KC50T, oleh karena itu model sel surya dibangun berdasarkan spesifikasi modul sel surya tersebut. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi dari sel surya KC50T dalam *STC*.

Tabel 3.1. Spesifikasi Modul KC50T

Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{OC})	21,7 Volt
Arus Hubung Singkat (I_{SC})	3,31 Ampere
Koef. Temp Arus	$1,33 \times 10^{-3} A/^{\circ}C$
Jml Sel per Modul	36

(Kyocera KC50T Datasheet)

Data yang ditampilkan pada Tabel 3.1 merupakan data yang dibutuhkan untuk membangun model sel surya. Satu modul sel surya terdiri dari 36 sel yang disusun seri untuk mendapatkan tegangan yang lebih besar. Oleh karena itu, V_{OC} yang tertulis dalam *specification sheet* merupakan V_{OC} untuk 36 sel yang disusun seri. Berdasarkan hal tersebut, V_{OC} untuk hanya satu selnya adalah $21,7/36 = 0,6028$ Volt. Maka, nilai V_{OC} yang akan dimasukkan ke dalam persamaan-persamaan sel surya selanjutnya adalah 0,6028 Volt.

Model sel surya yang dibangun harus menyerupai karakteristik sel surya sebenarnya seperti yang telah dijelaskan pada BAB 2. Persamaan utama yang digunakan untuk membangun model adalah persamaan (2.5). Pada persamaan tersebut nilai R_s dan R_{sh} diabaikan karena efeknya kecil. R_s dibentuk oleh sebagian besar resistansi material semikonduktor yang digunakan untuk membuat sel, sebagian besar resistansi kontak metalik dan interkoneksi, dan resistansi antara kontak metalik dan semikonduktor. R_{sh} disebabkan oleh kebocoran pada *pn*

junction. Besar pengaruh R_s dan R_{sh} dapat diselidiki dengan membandingkannya ke karakteristik resistansi sel surya yang didefinisikan sebagai

$$R_{CH} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (3.1)$$

Jika R_s jauh lebih kecil dari R_{CH} atau R_{sh} jauh lebih besar, maka pengaruh R_s dan R_{sh} kecil (Green, 1982).

Di sisi lain, pada penelitian lainnya, yaitu perancangan simulator sel surya, nilai R_s dan R_{sh} tidak diabaikan. Persamaan yang digunakan menyerupai persamaan (2.1) untuk satu modul sel surya. Persamaan (2.1) digunakan untuk mencari nilai I sel surya, namun ' T ' terdapat dalam ruas kiri maupun ruas kanan persamaan tersebut. Untuk menyederhanakan persamaan tersebut dan membuat model sel surya semakin mendekati sel surya sebenarnya, dalam perancangan simulator sel surya ditambahkan *Low Pass Filter (LPF)* pada arus sel surya agar muncul dinamika. Oleh karena itu, pada perancangan model sel surya penelitian ini juga ditambahkan *Low Pass Filter* pada arus sel surya.

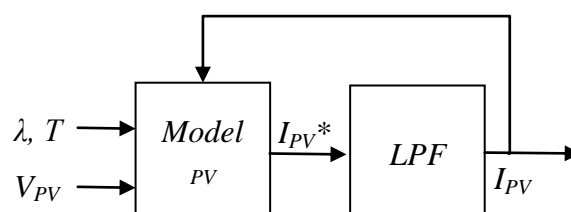
3.1.1 Persamaan Matematis Model Sel Surya

Persamaan baru perlu didapatkan dengan melibatkan fungsi alih *LPF* ke persamaan (2.5). Fungsi alih *LPF* yang digunakan adalah sebagai berikut

$$y = \frac{1}{\tau s + 1} x \quad (3.2)$$

Dimana τ , y , dan x adalah konstanta waktu, keluaran *LPF*, dan masukan *LPF*.

Gambar 3.1 menunjukkan blok diagram dari model sel surya yang dirancang. V_{PV} merupakan variabel bebas yang nilainya akan menentukan titik kerja sel surya, oleh karena itu V_{PV} dijadikan masukan bersama radiasi matahari dan suhu sel. Arus sel surya dari persamaan karakteristik sel surya statis disebut I_{PV}^* , sedangkan arus keluaran model sel surya keseluruhan disebut I_{PV} .



Gambar 3.1. Blok Diagram Model Sel Surya

Berdasarkan fungsi alih LPF , arus keluaran model sel surya ini adalah

$$I_{PV} = \frac{1}{\tau s + 1} I_{PV}^* \quad (3.3)$$

Sehingga dapat diperoleh persamaan diferensial dari model sel surya adalah

$$sI_{PV} = \frac{I_{PV}^*}{\tau} - \frac{I_{PV}}{\tau} \quad (3.4)$$

$$\frac{d}{dt} I_{PV} = \frac{n_p I_{ph}}{\tau} - \frac{n_p I_s}{\tau} \left(\exp \frac{qV_{PV}}{NKTn_s} - 1 \right) - \frac{I_{PV}}{\tau} \quad (3.5)$$

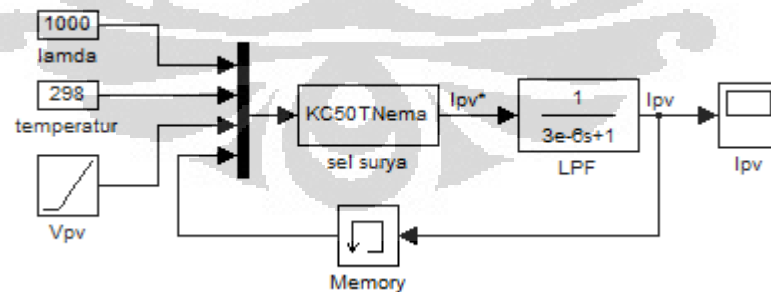
Dimana

I_{ph} mengacu pada persamaan 2.2

I_s mengacu pada persamaan 2.3 dan 2.4

3.1.2 Simulasi Model Sel Surya

Untuk mengujicoba persamaan matematis diatas, dibangun simulasi dengan menggunakan MATLAB/ Simulink. Gambar 3.2 menunjukkan blok diagram simulasi model sel surya yang dibangun. Persamaan statis sel surya ditulis dalam C-MEX dengan nama file $KC50TNema.c$, sedangkan blok LPF diambil dari *library* MATLAB/ Simulink.



Gambar 3.2. Blok Diagram Simulasi Model Sel Surya

Pertama, besar radiasi matahari dan suhu lingkungan diset pada kondisi standar (STC) yaitu 1000 W/m^2 dan 298 K , sementara V_{PV} merupakan fungsi linear yang nilainya akan bertambah seiring bertambahnya waktu simulasi. Pada blok

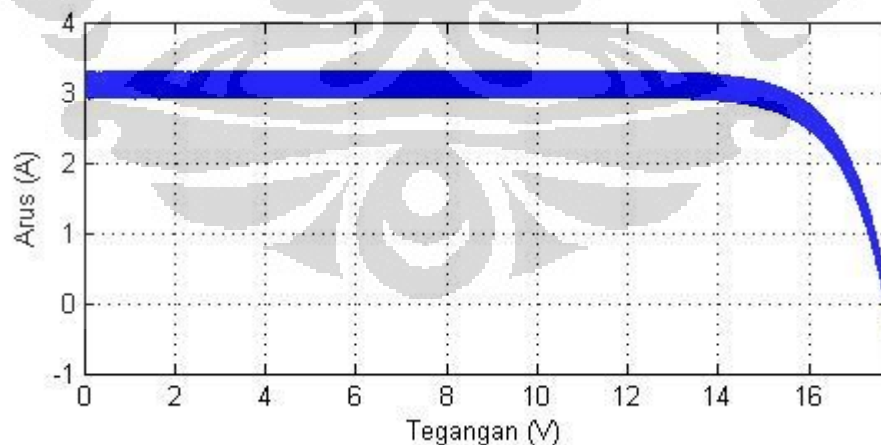
LPF , nilai konstanta waktu, τ , yang digunakan adalah 3×10^{-6} . N dan E_g diset pada nilai 1 dan 1,11 eV.

Untuk menentukan arus yang dibangkitkan oleh foton, I_{ph} , digunakan persamaan (2.2). Dalam persamaan (2.2), nilai radiasi matahari, λ , dinormalisasi dengan cara dibagi 100, sedangkan dalam model sel surya ini nilai tersebut tidak dinormalisasi. Persamaan (2.2) tanpa normalisasi menjadi

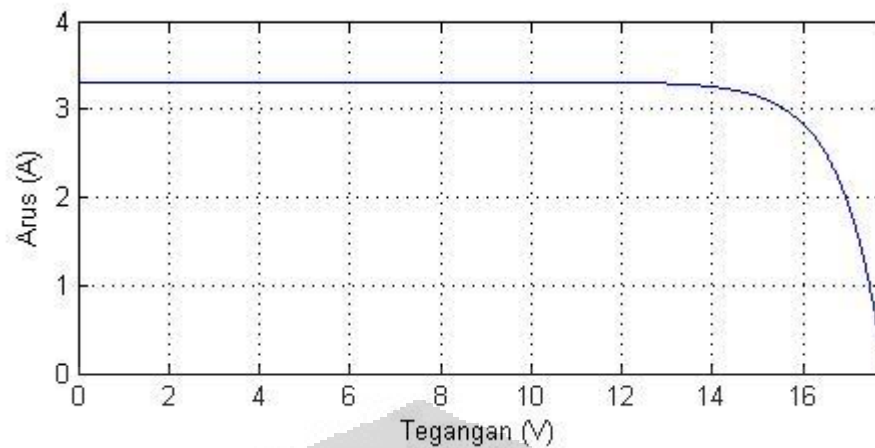
$$I_{ph} = [I_{SC} + k_I(T - 298)]\lambda \quad (3.6)$$

Kurva karakteristik $V-I$ model sel surya hasil simulasi yang dibangun dapat dilihat pada Gambar 3.3. *Ripple* pada arus muncul akibat dinamika yang diberikan oleh LPF . Gambar 3.4 menunjukkan kurva karakteristik $V-I$ tanpa LPF . Nilai τ yang kecil seharusnya menyebabkan besar pengaruh dinamik sel surya juga kecil sehingga kurva karakteristik menyerupai karakteristik sel surya statis.

Gambar 3.3 dan Gambar 3.4 menyerupai Gambar 2.3 – Gambar 2.4 pada BAB 2, sampai tahap ini model dapat dikatakan sesuai karakteristik sel surya sebenarnya. Nilai arus menurun semakin bertambahnya tegangan dan semakin cepat menurun setelah melewati *threshold* seperti karakteristik *pn junction*.



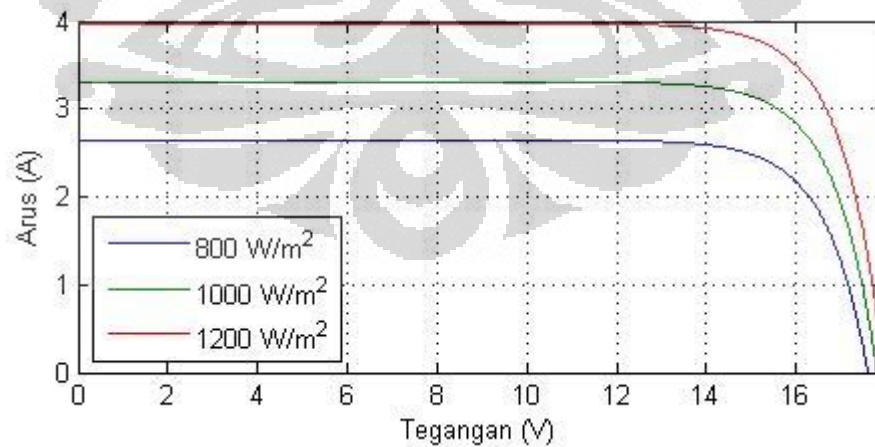
Gambar 3.3. Kurva Karakteristik $V-I$ Model Sel Surya pada STC



Gambar 3.4. Kurva Karakteristik V - I Model Statis Sel Surya

3.1.2.1 Perbedaan Radiasi Matahari

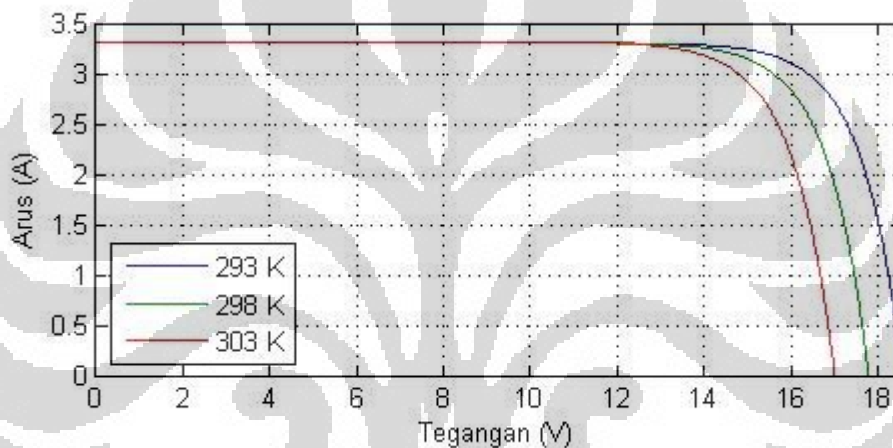
Model juga diujicoba pada kondisi lingkungan yang berbeda-beda. Gambar 3.5 menunjukkan kurva karakteristik V - I model sel surya pada paparan radiasi matahari yang berbeda. Pada BAB 2 dijelaskan semakin kecil radiasi matahari yang sampai pada *sel photovoltaic* maka I_{SC} dan V_{OC} juga semakin kecil. Hal tersebut sesuai dengan hasil simulasi model sel surya yang dibangun.



Gambar 3.5. Kurva Karakteristik V - I Model Sel Surya pada Radiasi Berbeda

3.1.2.2 Perbedaan Suhu Sel

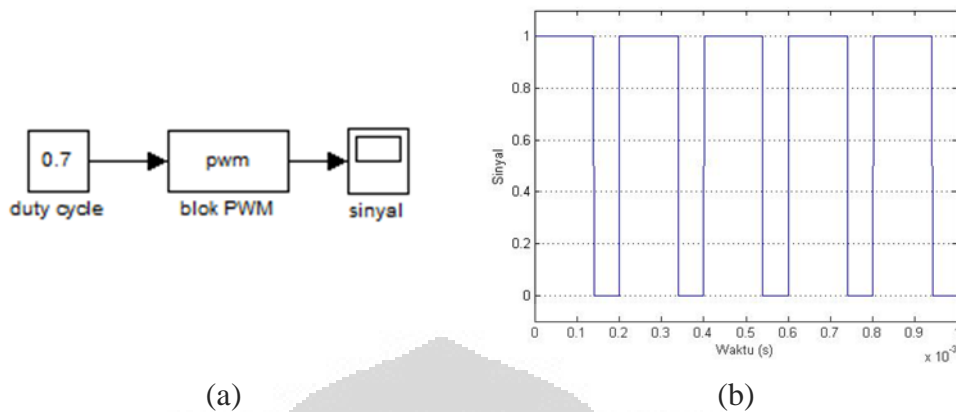
Gambar 3.6 menunjukkan kurva karakteristik $V-I$ model sel surya pada suhu sel yang berbeda. Sebelumnya, pada BAB 2 dijelaskan seiring peningkatan suhu sel, arus saturasi juga akan meningkat, sehingga tegangan rangkaian terbuka semakin kecil. Hasil simulasi model juga menunjukkan hal tersebut. Oleh karena itu dapat disimpulkan model sel surya yang dibangun telah menyerupai karakteristik sel surya sebenarnya. Model sel surya siap untuk mengujicoba algoritma *MPPT* yang akan diusulkan.



Gambar 3.6. Kurva Karakteristik $V-I$ Model Sel Surya pada Suhu Berbeda

3.2 Blok Pembuat Sinyal *PWM*

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. Seperti yang telah dijelaskan pada BAB 2, 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*.



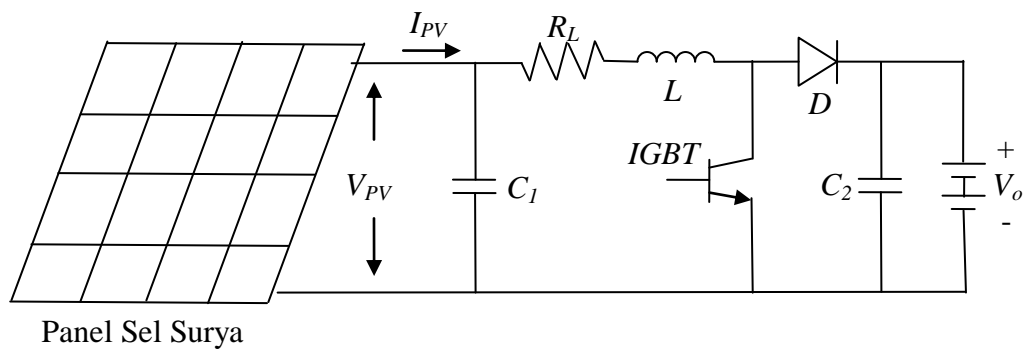
Gambar 3.7. (a) Blok Diagram Pembuat Sinyal *PWM*. (b) Sinyal *PWM*

Blok pembuat sinyal *PWM* ini dibuat dalam C-MEX dengan nama file *PWM.c*. Gambar blok diagram pembuat sinyal *PWM* diberikan pada Gambar 3.7(a). Besar frekuensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 5 kHz . Gambar 3.7(b) menunjukkan hasil sinyal *PWM* yang dibangun. Sinyal kembali naik pada detik ke $0,2 \times 10^{-3}$ dengan tetap kondisi *High* selama $0,14 \times 10^{-3}$. Hal tersebut membuktikan bahwa sinyal yang dibangun telah sesuai dengan periode $1/f = 0,2 \times 10^{-3}$ dan *duty cycle* 0,7 ($0,7 \times 0,2 \times 10^{-3} = 0,14 \times 10^{-3}$) seperti yang diberikan pada *port* masukan.

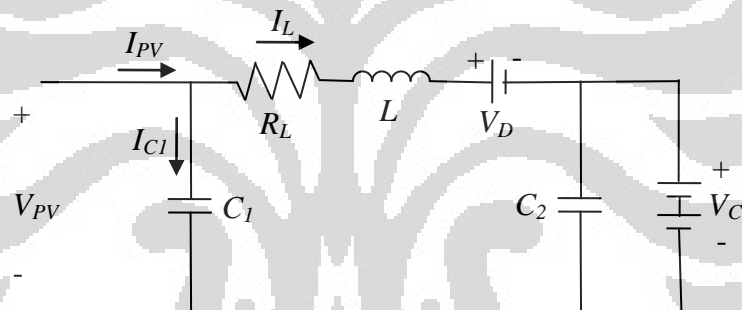
3.3 Model *Boost Converter*

Rangkaian *boost converter* digunakan untuk menaikkan *level* tegangan *dc* ke *level* tegangan *dc* tertentu dengan mengendalikan *duty cycle* pada *switch*-nya. Sel surya dihubungkan dengan rangkaian *boost converter* agar tegangan sel surya dapat dikendalikan. Gambar 3.8 menunjukkan *boost converter* yang telah dihubungkan dengan sel surya.

Tegangan masukan *boost converter* dihubungkan ke sel surya sementara tegangan keluarannya dihubungkan dengan *batere* (Xiao, Dunford, Palmer, & Capel, 2007). Oleh karena itu tegangan keluaran dari model *boost converter* ini konstan. R_L adalah hambatan dalam yang terdapat pada induktor L .

Gambar 3.8. Model *Boost Converter*

Pada saat *switch* terbuka, maka rangkaian *boost converter* menjadi seperti Gambar 3.9.

Gambar 3.9. Model *Boost Converter Switch* Terbuka

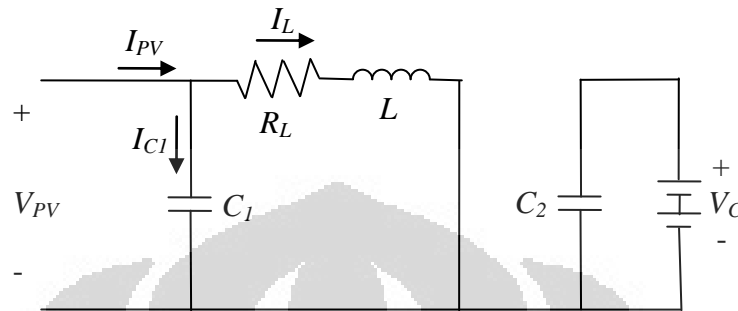
Dengan mengaplikasikan Hukum Kirchoff pada rangkaian pada Gambar 3.9 akan diperoleh dua persamaan, yaitu

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} I_L + \frac{1}{L} V_{PV} - \left(\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L} \right) \quad (3.7)$$

$$\frac{dV_{PV}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_L + \frac{1}{C_1} I_{PV} \quad (3.8)$$

Ditambah dengan persamaan (3.5) untuk model sel surya, maka dapat diperoleh persamaan keadaan *boost converter switch* terbuka.

Pada saat *switch* tertutup, rangkaian *boost converter* menjadi seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Model *Boost Converter Switch* Tertutup

Kembali dengan mengaplikasikan Hukum Kirchoff pada rangkaian dapat diperoleh dua persamaan, yaitu

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{R_L}{L}I_L + \frac{1}{L}V_{PV} \quad (3.9)$$

$$\frac{dV_{PV}}{dt} = -\frac{1}{C_1}I_L + \frac{1}{C_1}I_{PV} \quad (3.10)$$

Dari kedua persamaan diatas dan persamaan (3.5) untuk keluaran model sel surya, maka dapat diperoleh persamaan keadaan untuk *switch* tertutup.

3.3.1 Penentuan Nilai Komponen Model *Boost Converter*

Pada rangkaian *boost converter* ini, tegangan keluaran bernilai konstan karena terhubung dengan *batere*. Daya yang disimpan ini selanjutnya akan dihubungkan dengan *grid* untuk menyuplai kebutuhan beban. *Grid* disalurkan oleh PLN ke rumah-rumah dengan nilai tegangan maksimum sebesar 220 Volt dan minimum sebesar -220 Volt. Tegangan yang berasal dari sel surya adalah tegangan *dc*, oleh karena itu, sebelum dihubungkan ke *grid* terlebih dahulu diubah oleh suatu sistem *inverter* menjadi tegangan *ac* yang sama seperti yang disalurkan oleh PLN. Agar sistem *inverter* mampu mengeluarkan tegangan *ac* dengan

rentang 440 Volt, maka nilai tegangan *batere* juga harus memiliki nilai mendekati 440 Volt. Pada penelitian ini V_C dianggap konstan pada nilai 400 Volt.

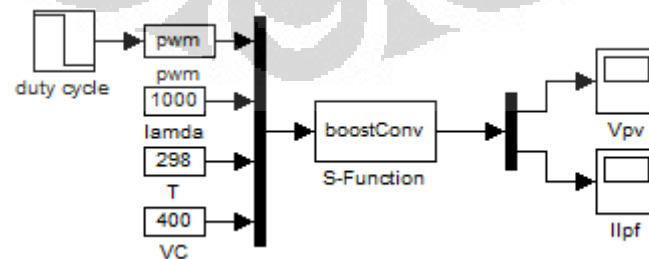
Penentuan nilai *induktansi* dan nilai *kapasitansi* dalam model *boost converter* ini dipertimbangkan dari *respon transien* dan *ripple* yang dihasilkan rangkaian melalui simulasi. Tabel 3.2 menunjukkan nilai tiap variabel tetap yang terdapat pada model *boost converter* yang digunakan.

Tabel 3.2. Tabel Variabel Tetap Model *Boost Converter*

No	Variabel	Nilai
1	L	0,1 mH
2	C_I	3,2 mF
3	R_L	0,15 Ω
4	V_D	0,62 Volt
5	V_C	400 Volt

3.3.2 Simulasi Model *Boost converter*

Untuk melihat respon model rangkaian *boost converter*, maka dilakukan simulasi dengan menggunakan MATLAB/ Simulink. Gambar 3.10 menunjukkan blok diagram simulasi model *boost converter* yang dibangun. Model sel surya yang telah dibahas pada subbab 3.1 digabungkan ke dalam model *boost converter* ini karena merupakan bagian dari rangkaian model *boost converter*.



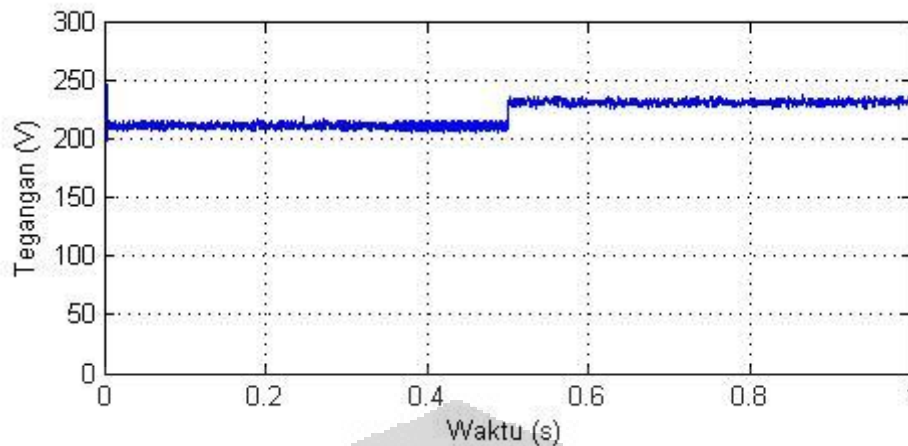
Gambar 3.11. Blok Diagram Simulasi Model *Boost Converter*

Model sel surya yang dimasukkan ke dalam model *boost converter* direpresentasikan oleh persamaan (3.4) sebagai persamaan arus keluaran sel surya, persamaan (3.6) sebagai persamaan arus yang dibangkitkan oleh foton, dan persamaan (2.3)-(2.4) untuk mencari arus saturasi. Selanjutnya, algoritma *boost converter* dibagi menjadi dua bagian, yaitu pada saat *switch* terbuka dan pada saat *switch* tertutup. Pada saat *switch* terbuka persamaan yang digunakan adalah persamaan (3.7)-(3.8), sedangkan pada saat *switch* tertutup persamaan yang digunakan adalah persamaan (3.9)-(3.10). Seluruh persamaan diatas ditulis dalam C-MEX dengan nama file *boostConv.c*.

Blok pembuat sinyal *PWM* menggunakan blok yang sebelumnya dibahas pada subbab 3.2. Sinyal *PWM* digunakan untuk mengendalikan *switch* pada rangkaian *boost converter* dimana akan menentukan besar tegangan yang muncul pada C_1 atau V_{PV} . I_{LPF} pada keluaran blok *boost converter* merupakan I_{PV} yang telah melalui *LPF* untuk mendapatkan karakteristik dinamik. V_{PV} dan I_{LPF} dikeluarkan dari blok *boost converter* karena akan dikendalikan oleh *MPPT*.

Masukan dari blok *boost converter* ini terdiri dari dua bagian, pertama masukan untuk model sel surya dan kedua masukan untuk model *boost converter*. Seperti yang telah dibahas pada subbab 3.1, masukan dari model sel surya adalah radiasi matahari, λ , dan suhu sel, T . Masukan dari model *boost converter* adalah *duty cycle* dan nilai tegangan output *boost converter* yang dijaga konstan, V_C . Nilai *duty cycle* yang diberikan merupakan fungsi *step* untuk melihat respon transien dari model yang dibangun. *Duty cycle* berkurang dari 0,475 ke 0,425 pada detik ke 0,5.

Gambar 3.12 menunjukkan hasil simulasi model *boost converter* yang dibangun. Persamaan (2.27) pada BAB 2 telah menjelaskan hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran *boost converter*. Pada saat nilai *duty cycle* sebesar 0,475, maka nilai tegangan masukan *boost converter* yang sesuai untuk tegangan keluaran 400 Volt adalah 210 Volt, dan pada saat *duty cycle* 0,425, maka nilai tegangan masukan *boost converter* yang sesuai adalah 230 Volt. Tegangan masukan model *boost converter* yang dibangun merupakan tegangan sel surya yang memiliki karakteristik *nonlinear*. Oleh karena itu, respon dari model *boost converter* yang dibangun juga *nonlinear* (Xiao, Dunford, Palmer, &



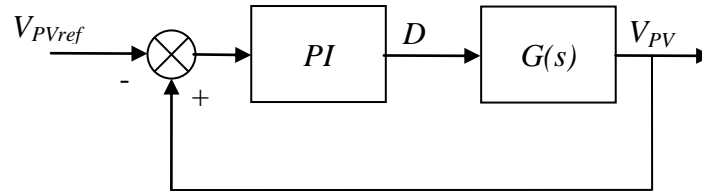
Gambar 3.12. Respon Model *Boost Converter*

Capel, 2007). Hasil respon model *boost converter* yang ditunjukkan oleh Gambar 3.12 telah sesuai dengan landasan teori, sehingga model *boost converter* siap digunakan untuk mengujicoba algoritma *MPPT* yang diusulkan.

3.4 Blok Pengendali *PI*

Tegangan sel surya, V_{PV} , pada rangkaian *boost converter* diatas dibuat agar dapat dikendalikan menuju nilai tertentu sesuai *set point* yang diberikan. Pengendali *PI* digunakan untuk mengendalikan nilai tegangan tersebut. Variabel yang mempengaruhi V_{PV} adalah *duty cycle*. Oleh karena itu, keluaran pengendali *PI* dengan *plant* sistem *boost converter* adalah nilai *duty cycle*, D .

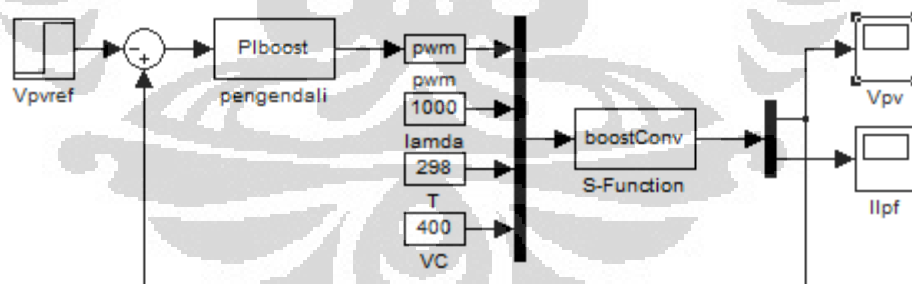
Gambar 3.12 menunjukkan respon model *boost converter* terhadap masukan step negatif. Dapat dilihat pada gambar, respon model terbalik dengan masukan yang diberikan. Ketika model diberikan step negatif, model menunjukkan respon positif. Oleh karena itu, masukan blok pengendali *PI* pada desain pengendalian lingkaran tertutup *boost converter* terbalik. *Set point* memiliki nilai negatif, sementara *feedback* dari model *boost converter* memiliki nilai positif. Gambar 3.13 menunjukkan desain pengendalian loop tertutup *boost converter* dengan pengendali *PI*.



Gambar 3.13. Rancangan Pengendali *PI* Pada *Boost Converter*

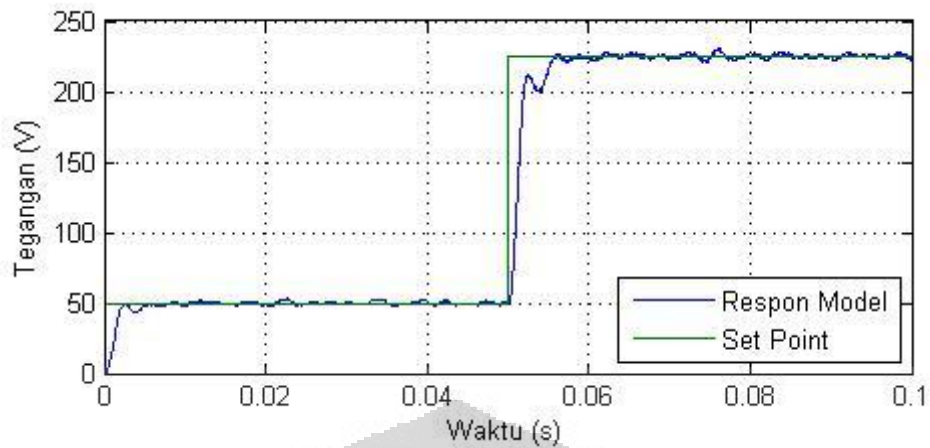
3.4.1 Simulasi *Boost Converter* dengan Pengendali

Persamaan (2.16) adalah persamaan fungsi alih pengendali *PI* yang digunakan. Nilai parameter pengendali yang digunakan, $K_c=5,6 \times 10^{-4}$ dan $\tau_i=3,8 \times 10^{-4}$, diperoleh melalui penalaan dengan metode *trial-error* seperti yang dijelaskan pada anak subbab 2.3.2. Program ditulis dalam C-MEX dengan nama file *PIboost.c*. Simulasi dibangun di MATLAB/ Simulink. Gambar 3.14 menunjukkan blok diagram simulasi pengendalian *boost converter* dengan pengendali *PI* dengan nilai *set point*, V_{PVref} , 50 Volt pada $0 < t < 0,05$ dan 225 Volt pada $0,005 \leq t < 0,1$. Besar waktu sampling pengendali *boost converter* yang digunakan adalah 10 kHz.



Gambar 3.14. Blok Diagram Simulasi Pengendalian *Boost Converter*

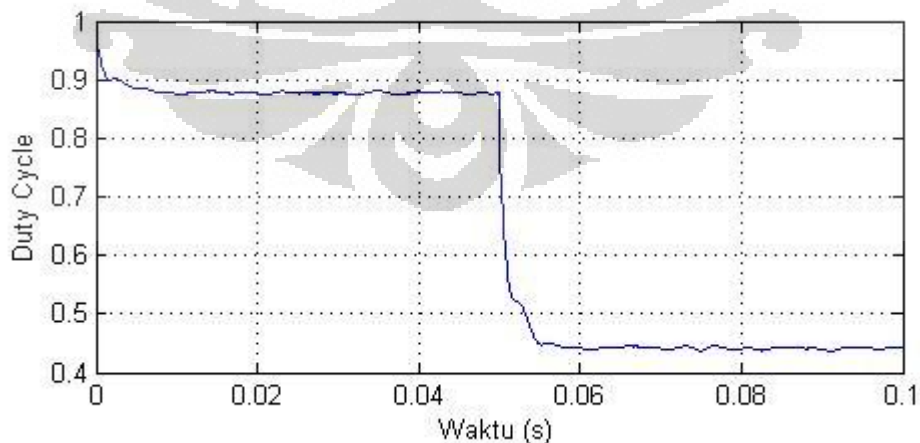
Gambar 3.15 menunjukkan respon model *boost converter* yang telah dikendalikan. Garis berwarna hijau menunjukkan nilai *set point* yang diberikan sementara garis berwarna biru menunjukkan respon model *boost converter* yang dikendalikan, V_{PV} . Dengan adanya pengendali *PI*, V_{PV} keluaran model *boost converter* sesuai dengan V_{PVref} yang diberikan. Hal ini dapat dilihat dari letak garis



Gambar 3.15. Respon Model *Boost Converter* dengan Pengendali *PI*

biru yang mengikuti garis berwarna hijau. Pada saat *set point* berubah dari 50 Volt menjadi 225 Volt pada $t = 0,05$; V_{PV} juga ikut berubah secara bertahap. Dengan demikian, pengendali *PI* yang dibangun teruji dapat digunakan untuk mengendalikan V_{PV} atau tegangan masukan model *boost converter*.

Nilai *duty cycle* keluaran pengendali *PI* ditunjukkan pada Gambar 3.16. Nilai *duty cycle* yang sesuai untuk V_{PVref} yang diberikan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (2.27). Pada saat V_{PVref} 50 Volt, nilai *duty cycle* yang sesuai adalah 0,875 dan saat V_{PVref} 225 Volt, nilai *duty cycle* yang sesuai adalah 0,4375; Hal tersebut sesuai dengan gambar 3.16.



Gambar 3.16. Keluaran Pengendali *PI Boost Converter*

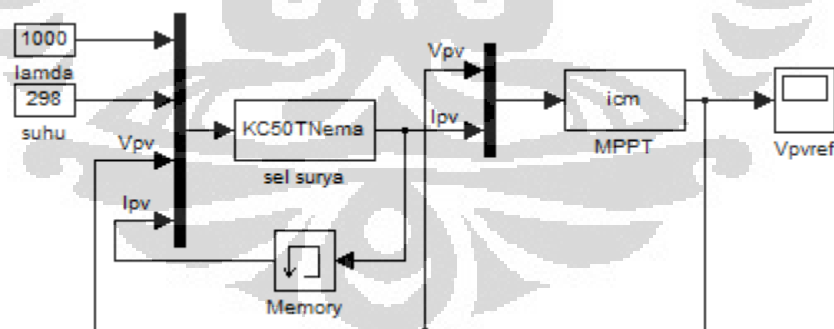
3.5 Algoritma Incremental Conductance Method

Paper ini mengusulkan metode *MPPT* baru yang menggunakan pengendali *PI*. Sebelumnya, untuk membandingkan metode yang diusulkan maka dibangun juga algoritma *MPPT* yang sudah terkenal, yaitu *Incremental Conduction Method (ICM)*. Algoritma *ICM* sendiri telah dijelaskan sebelumnya pada anak subbab 2.2.1 di BAB 2.

3.5.1 Simulasi Algoritma *ICM* dengan Model Sel Surya

Untuk mengujicoba algoritma *ICM* yang dibangun, algoritma *ICM* tersebut ditulis dalam C-MEX dengan nama file *ICM.c* dan disimulasikan dengan menggunakan MATLAB/ Simulink. Besar ΔV dan waktu sampling yang digunakan adalah 2 Volt dan 100 Hertz. Waktu sampling yang digunakan cukup lambat sebab sistem harus mencapai kondisi *steady state* dulu untuk setiap iterasi (Femia, Petrone, Spagnuolo, & Vitelli, 2005; Liu, Duan, Liu, Liu, & Kang, 2008).

Gambar 3.17 menunjukkan blok diagram simulasi algoritma *ICM* dengan model sel surya yang dibangun. Model sel surya yang digunakan adalah model sel surya statis agar kondisi ideal tercapai. Simulasi dengan model sel surya dinamik yang telah dihubungkan dengan *boost converter* akan diujicoba pada BAB 4.

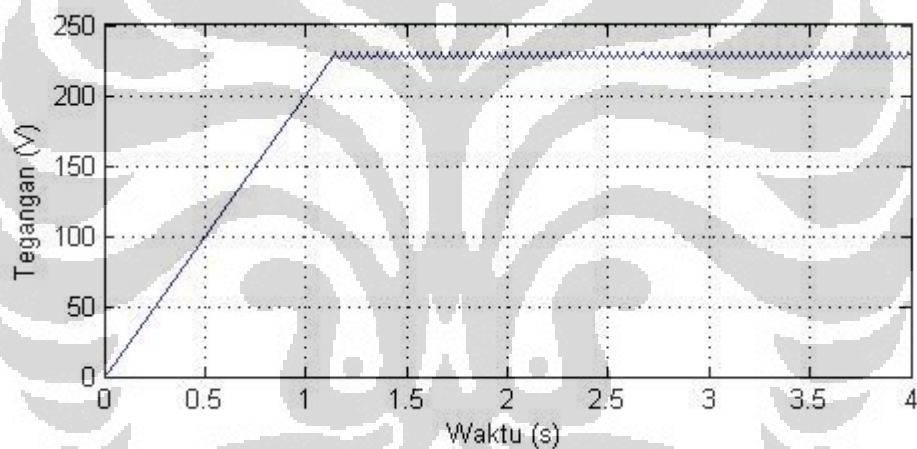


Gambar 3.17. Blok Diagram Simulasi *ICM* dengan Model Sel Surya

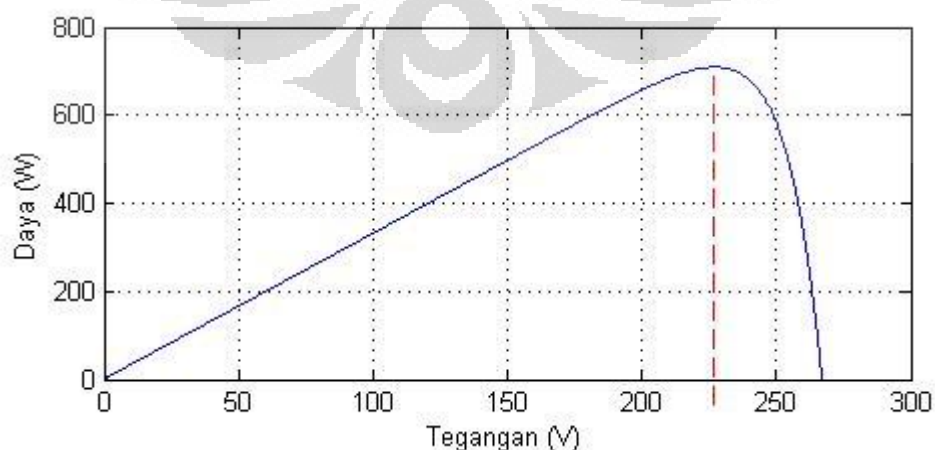
Ujicoba simulasi dilakukan menggunakan kondisi lingkungan standar, radiasi matahari 1000 W/m^2 dan suhu sel 298 K . V_{PV} dikendalikan oleh algoritma *ICM*, sehingga dalam blok diagram simulasi ini, V_{PV} berasal dari keluaran blok *ICM*. Masukkan dari blok *ICM* adalah V_{PV} dan I_{PV} sesuai algoritma *ICM* yang dijelaskan pada BAB 2. Persamaan-persamaan model sel surya yang dijelaskan

pada subbab 3.1 tidak akan mengubah nilai V_{PV} yang masuk ke dalam blok sel surya, sehingga V_{PV} yang masuk ke blok *ICM* yang seharusnya adalah V_{PV} dari model sel surya, langsung diambil dari keluaran blok *ICM* sendiri. Sedangkan I_{PV} diambil dari blok model sel surya karena diproses dalam blok model sel surya.

Gambar 3.18 menunjukkan V_{PVref} yang dihasilkan oleh algoritma *ICM*. Pada kondisi lingkungan standar, algoritma *ICM* memberikan V_{PVref} 228 Volt sebagai titik kerja sel surya. Gambar 3.19 menunjukkan kurva *P-V* model sel surya pada kondisi lingkungan standar. Daya maksimum yang dapat dikeluarkan sel surya pada kondisi lingkungan standar terjadi pada saat titik kerja V_{PV} sebesar 226 - 228 Volt. Hasil ini membuktikan algoritma *ICM* dapat mencari titik kerja maksimum sel surya dan mempertahankan sel surya bekerja di titik tersebut.



Gambar 3.18. V_{PVref} Algoritma *ICM* pada *STC*



Gambar 3.19. Kurva karakteristik *P-V* Model Sel Surya pada *STC*

3.6 Algoritma MPPT Baru Berdasarkan Pengendali PI

Pada BAB 2 telah dijelaskan bahwa metode *ICM* memiliki kelemahan pada waktu penjajakan dan osilasi pada *MPP* akibat besar perubahan V_{ref} yang tetap. Modifikasi dari metode *ICM* adalah dengan membuat besar perubahan V_{ref} bervariasi. Hal yang sama juga terjadi pada metode *P&O*. Untuk membuat besar perubahan V_{ref} bervariasi dapat dilakukan dengan menambahkan sistem kendali cerdas seperti *fuzzy logic* (Esrarn & Chapman, 2007) maupun tanpa menggunakan sistem kendali cerdas (Mei, Shan, Liu, & Guerrero, 2011; Piegari & Rizzo, 2010).

Besar perubahan V_{ref} yang bervariasi sesungguhnya juga dapat dilakukan dengan menggunakan pengendali biasa. Seperti dijelaskan pada BAB 2, *MPP* dapat dicapai jika nilai dP/dV nol. Pengendali *PI* dapat membuat nilai tersebut menuju nol dengan kecepatan tinggi ketika titik kerja masih jauh dari *MPP* dan menjadi lebih lambat ketika dekat dengan *MPP*. Dengan demikian, waktu penjajakan dapat lebih cepat dan osilasi pada *MPP* kecil. Perhitungan *error* masukan pengendali akan menentukan kualitas *MPPT* yang dibangun.

3.6.1 Penentuan *Error* Pengendali *PI MPPT*

Pengendali *PI* untuk *MPPT* didesain untuk membuat sel surya bekerja pada titik dimana nilai *gradien* pada kurva *P-V* nol. Oleh karena itu, *set point* untuk pengendali *PI MPPT* konstan bernilai nol, sementara *feedback*-nya adalah *gradien* dari kurva *P-V* itu sendiri. Berdasarkan kurva *P-V* pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4, *gradien* positif artinya titik kerja berada pada sebelah kiri *MPP*, maka V_{ref} harus ditambah, sedangkan *gradien* negatif sebaliknya. Jadi *error* pengendali *PI* untuk *MPPT* terbalik, *set point* sebagai masukan negatif, sedangkan *feedback* sebagai masukan positif.

$$error = -0 + \frac{dP}{dV} \quad (3.11)$$

Karena $P = V.I$, maka

$$error = \frac{dV.I + dI.V}{dV} \quad (3.12)$$

$$error = I + \frac{dI \cdot V}{dV} \quad (3.13)$$

Pada sistem diskrit, besar dI dapat dihitung sebagai

$$dI = \Delta I \quad (3.14)$$

$$\Delta I = I - I_{prev} \quad (3.15)$$

Dengan cara yang sama, besar dV dapat dihitung sebagai

$$dV = \Delta V \quad (3.16)$$

$$\Delta V = V - V_{prev} \quad (3.17)$$

3.6.2 Algoritma *MPPT* Berdasarkan Pengendali *PI*

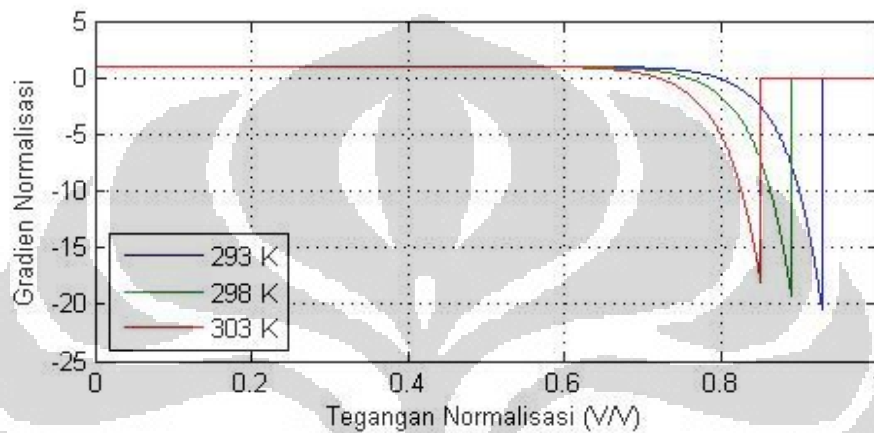
Pengendali *PI MPPT* bertujuan mengendalikan sistem agar mencapai nilai *error* nol dengan cara memberikan tegangan referensi, V_{ref} , sebagai titik kerja sel surya. Ketika nilai *error* jauh dari nol, maka perubahan V_{ref} yang diberikan besar agar *set point* cepat tercapai, dan ketika *error* telah mendekati nol, maka perubahan V_{ref} yang diberikan kecil agar tidak terjadi osilasi.

Algoritma *MPPT* yang diusulkan dirancang untuk memberikan V_{ref} dengan dua tujuan yang berbeda. Pertama, V_{ref} dengan besar perubahan yang konstan untuk menghitung *error* yang digunakan sebagai masukan pengendali *PI MPPT*. Kedua, V_{ref} dengan besar perubahan yang bervariasi yang berasal dari pengendali *PI MPPT* untuk mencari titik kerja maksimum secara cepat dan menjaga sistem bekerja di titik tersebut.

Pengendali *PI MPPT* memerlukan *feedback* dari *plant* berupa nilai *gradien* kurva *P-V*. Karena kurva *P-V* karakteristik sel surya memiliki sifat *nonlinear*, maka nilai $\Delta P/\Delta V$ harus dihitung dengan menggunakan nilai ΔV yang kecil. Hal ini berbeda dengan tujuan pengendali *PI* sesungguhnya yang memvariasikan nilai ΔV , oleh karena itu, pada perancangan *MPPT* ini, V_{ref} di-*update* secara bergantian oleh pengendali *PI* dan penghitung *gradien*.

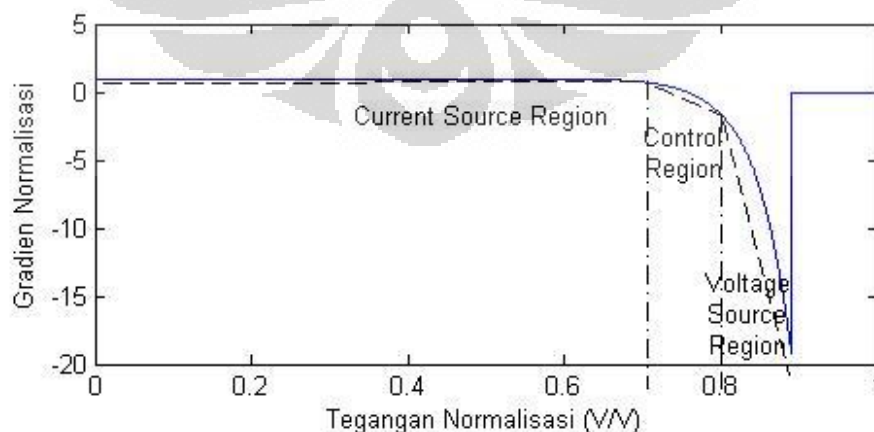
3.6.3 Faktor Linearitas Sel Surya

Sel surya memiliki karakteristik *nonlinear* dan *time-variant*. Jika pada pengendalian model *boost converter* tidak memperhatikan sifat *linearitas* yang dimiliki *plant*. Pada pengendalian untuk *MPPT* ini akan dilihat pengaruh sifat *linearitas* dari karakteristik sel surya. Karakteristik sel surya yang *nonlinear* dan *time-variant* menyebabkan nilai *error* yang akan dikendalikan juga memiliki karakteristik tidak linear seperti ditunjukkan Gambar 3.20.



Gambar 3.20. Karakteristik dP/dV Terhadap Perubahan Suhu Sel

Linearisasi dapat digambarkan pada kurva $V-I$ (Xiao, Dunford, Palmer, & Capel, 2007) maupun pada kurva $m-V$ seperti ditunjukkan Gambar 3.21. Akibat dari linearisasi adalah pembagian daerah kerja menjadi tiga bagian. Pada tulisan ini, daerah yang terdapat *MPP* didalamnya disebut *control region*. Masing-masing daerah akan memiliki nilai parameter pengendali *PI* yang berbeda-beda.



Gambar 3.21. Linearisasi karakteristik dP/dV Sel Surya

Dalam algoritma *MPPT* yang diusulkan, diperlukan metode untuk memisahkan *control region*, *current source region*, dan *voltage source region*, agar aksi kendali yang diberikan dapat disesuaikan. Salah satu cara memisahkannya diberikan oleh persamaan (3.18). Garis *C* pada Gambar 3.22 didapatkan melalui persamaan (3.18) (Mei, Shan, Liu, & Guerrero, 2011).

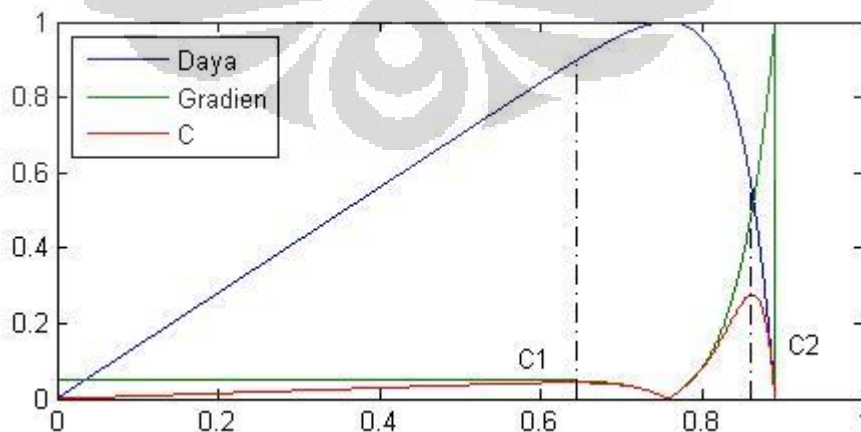
$$C = P^n \left| \frac{dP}{dI} \right| \quad (3.18)$$

Dimana *P* adalah daya yang dihasilkan sel surya, *n* adalah orde, *dP* adalah perubahan daya, dan *dI* adalah perubahan arus.

Garis *C* pada sebelah kiri dan kanan *MPP* masing-masing memiliki satu titik maksimum. Jika garis *C* bagian kiri disebut *C1* dan garis *C* bagian kanan disebut *C2*, maka daerah sekitar *MPP* dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{cases} \frac{\Delta C1}{\Delta V} > 0 & , \text{current source region} \\ \frac{\Delta C1}{\Delta V} \leq 0 & , \text{control region} \\ \frac{\Delta C2}{\Delta V} \geq 0 & , \text{control region} \\ \frac{\Delta C2}{\Delta V} < 0 & , \text{voltage source region} \end{cases} \quad (3.19)$$

Semakin besar *n*, maka daerah dekat *MPP* akan semakin sempit (Mei, Shan, Liu, & Guerrero, 2011).



Gambar 3.22. Visualisasi Persamaan (3.18) dan (3.19)

(Mei, Shan, Liu, & Guerrero, 2011)

Metode diatas tidak cukup sederhana untuk digunakan pada algoritma yang diusulkan. Pada algoritma *PI MPPT* yang diusulkan, metode yang digunakan untuk memisahkan *control region*, *current source region*, dan *voltage source region* hanya memanfaatkan nilai *gradien*. Seperti diunjukkan Gambar 3.21, *control region* memiliki nilai *gradien* disekitar nol. Pembagian daerah linearisasi dalam penelitian ini diberikan oleh Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Definisi Daerah Linearisasi

Daerah Linearisasi	Definisi
<i>Current Source Region</i>	$\text{error} > 2$
<i>Control Region</i>	$-4 \leq \text{error} \leq 2$
<i>Voltage Source Region</i>	$\text{error} < -4$

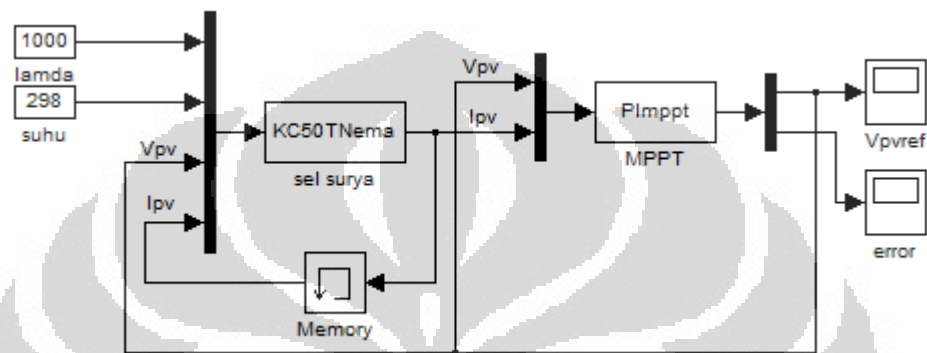
3.6.4 Simulasi Algoritma *PI MPPT* dengan Model Sel Surya

Untuk mengujicoba algoritma yang diusulkan, dibangun simulasi dengan menggunakan MATLAB/ Simulink. Algoritma ditulis dalam C-MEX dengan nama file PIMPPT .c. Waktu sampling yang digunakan disamakan dengan waktu sampling untuk algoritma *ICM*, yaitu 100 Hertz. Nilai parameter pengendali ditentukan melalui metode *trial-error* seperti dijelaskan pada anak subbab 2.3.2. Tabel 3.4 menunjukkan nilai parameter pengendali untuk masing-masing daerah.

Tabel 3.4. Tabel Parameter *PI MPPT*

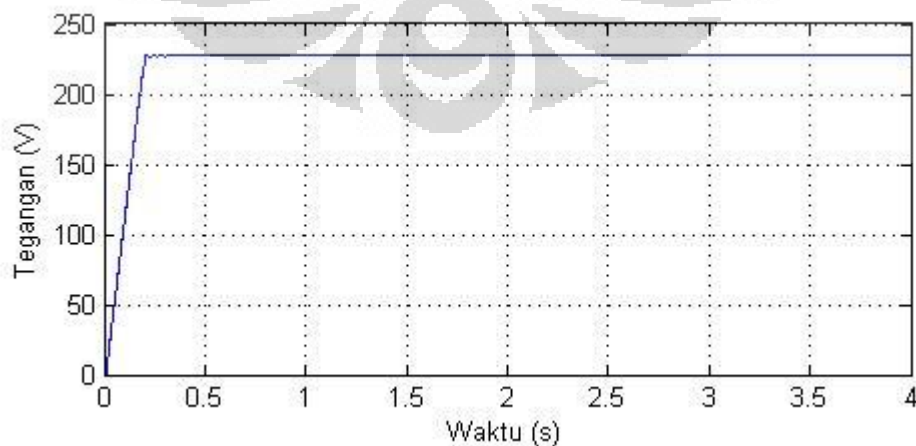
<i>Current Source Region</i>	K_c	0,8
	τ_i	$0,7 \times 10^{-3}$
<i>Control Region</i>	K_c	0,3
	τ_i	$0,6 \times 10^{-3}$
<i>Voltege Source Region</i>	K_c	0,5
	τ_i	$0,7 \times 10^{-3}$

Gambar 3.23 menunjukkan blok diagram simulasi yang dibangun. Masukan dari blok *MPPT* adalah V_{PV} dan I_{PV} untuk menghitung *error* masukan pengendali. Persamaan-persamaan model sel surya tidak mengubah nilai V_{PV} yang masuk ke dalam blok sel surya tersebut. Oleh karena itu, V_{PV} yang masuk ke blok *MPPT* yang seharusnya adalah V_{PV} dari model sel surya langsung diambil dari keluaran blok *MPPT* sendiri.



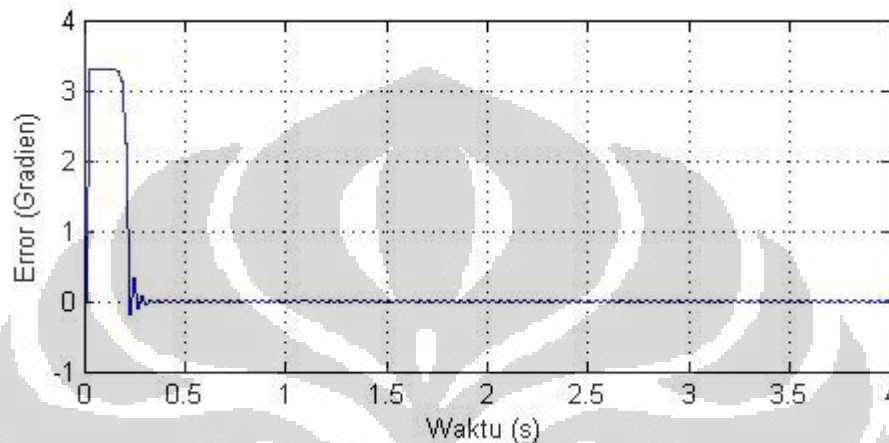
Gambar 3.23. Blok Diagram Simulasi *PI MPPT* dengan Model Sel Surya

Gambar 3.24 menunjukkan V_{PVref} yang dihasilkan oleh algoritma *PI MPPT* pada *STC*. Titik kerja yang diberikan oleh algoritma *PI MPPT* adalah 227 Volt. Hal ini sesuai dengan titik kerja maksimum model sel surya pada kondisi lingkungan standar yang ditunjukkan Gambar 3.19, yaitu sebesar 226-228 Volt. Hasil ini membuktikan algoritma *PI MPPT* dapat mencari titik kerja maksimum sel surya dan mempertahankan sel surya bekerja di titik tersebut.



Gambar 3.24. V_{PVref} Algoritma *PI MPPT* pada *STC*

Algoritma *PI MPPT* mengendalikan *error* yang berupa *gradien* agar menuju nol. Gambar 3.25 menunjukkan nilai *error* hasil pengendalian sel surya oleh *PI MPPT*. Dapat dilihat pada gambar tersebut nilai *gradien* menuju nol seiring pertambahan waktu.



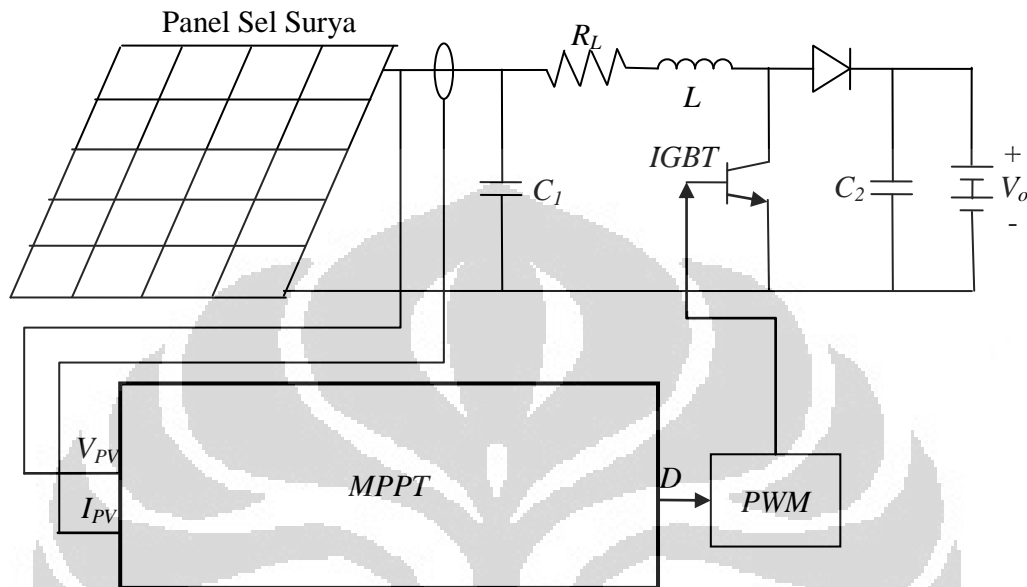
Gambar 3.25. *Error Gradien PI MPPT* pada *STC*

3.7 Rancangan Sistem *MPPT* dengan *Boost Converter*

Seperti telah dijelaskan pada BAB 2, sel surya memiliki titik kerja maksimum dimana daya yang dihasilkan oleh sel surya tersebut adalah yang paling besar dalam kondisi lingkungan yang bersangkutan. Telah dijelaskan pula sel surya tidak secara otomatis bekerja pada titik kerja maksimum tersebut, melainkan harus dirancang suatu sistem agar sel surya dapat berkeja pada titik maksimumnya. Rangkaian *dc-dc converter* dapat digunakan untuk mengatur tegangan sel surya dan algoritma *MPPT* dapat memberikan tegangan referensi yang sesuai untuk dihubungkan ke sel surya tersebut.

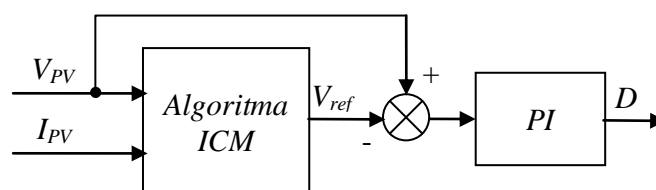
Gambar 3.26 menunjukkan blok diagram keseluruhan sistem *MPPT* dengan *boost converter* yang dirancang pada penelitian ini. Blok *MPPT* memiliki masukan berupa hasil pengukuran tegangan dan arus sel surya dari rangkaian *boost converter*. Tegangan dan arus sel surya digunakan untuk mencari titik kerja maksimum yang dapat dilakukan oleh sel surya. Untuk mencapai titik kerja

maksimum yang telah dicari, *MPPT* memberikan *duty cycle*. Nilai *duty cycle* dari blok *MPPT* menjadi masukan blok *PWM* sebagai pembuat sinyal *PWM* dan akan digunakan untuk mengendalikan tegangan masukan *boost converter*.



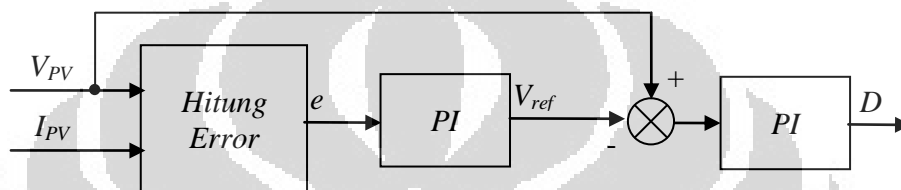
Gambar 3.26. Rancangan Sistem *MPPT*

Gambar 3.27 menunjukkan rancangan blok *MPPT* konvensional dengan algoritma *ICM*. Hasil pengukuran V_{PV} dan I_{PV} digunakan oleh algoritma *ICM* untuk menentukan titik kerja maksimum sel surya. Keluaran algoritma *ICM* adalah V_{ref} yang akan membuat sel surya bekerja di titik maksimum seiring pertambahan waktu. Satu buah pengendali *PI* kemudian digunakan untuk mencari nilai *duty cycle* yang tepat untuk V_{ref} yang diberikan. Walaupun tidak terlihat seperti lingkaran tertutup, namun pengendali *PI* tersebut dipasang dalam sebuah lingkaran tertutup dengan set point dari algoritma *ICM* dan *feedback* dari hasil pengukuran rangkaian *boost converter*.



Gambar 3.27. Sistem *MPPT ICM*

Gambar 3.28 menunjukkan rancangan blok *MPPT* yang diusulkan. Terdapat dua buah pengendali *PI* pada rancangan blok *MPPT* yang diusulkan. Pengendali *PI* pertama untuk *MPPT* dan pengendali *PI* kedua untuk mengendalikan *boost converter*. *Error* masukan *PI* pertama dihitung dalam blok hitung *error* berdasarkan nilai V_{PV} dan I_{PV} yang terukur dari *boost converter*. Keluaran *PI* pertama adalah V_{ref} yang kemudian menjadi nilai *set point* *PI* kedua. Keluaran *PI* kedua adalah *duty cycle* untuk mengendalikan tegangan masukan *boost converter*.



Gambar 3.28. Rancangan Sistem *MPPT*

3.7.1 Persamaan Ruang Keadaan Sistem *MPPT*

Persamaan ruang keadaan sistem secara keseluruhan dapat dibangun menggunakan persamaan-persamaan dari model sel surya, *boost converter*, dan pengendali. Persamaan keadaan dari rangkaian *boost converter* untuk *switch* terbuka diberikan oleh persamaan (3.5), (3.7), dan (3.8), sedangkan persamaan keadaan untuk *switch* tertutup diberikan oleh persamaan (3.5), (3.9), dan (3.10). Untuk melihat hubungan dari kedua keadaan tersebut, yaitu pengaruh nilai *duty cycle* terhadap rangkaian *boost converter*, dapat digunakan metode *state space averaging*. Namun, sebelum menggunakan metode *state space averaging*, persamaan keluaran model sel surya pada persamaan (3.5) harus dilinearisasikan terlebih dahulu.

Persamaan diferensial dari model sel surya pada persamaan (3.5) mempunyai fungsi *nonlinear*. Hasil linearisasi deret Taylor pada persamaan (3.5) dengan menganggap $n_p = 1$ ditunjukkan pada persamaan (3.20).

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \Delta I_{PV} = & \left\{ -\frac{qI_s}{\tau NKTn_s} \exp \frac{qV_{PV0}}{NKTn_s} \right\} \Delta V_{PV} + \left\{ -\frac{1}{\tau} \right\} \Delta I_{PV} \\
& + \left\{ \frac{I_{SC} + k_I [T - 298]}{\tau} \right\} \Delta \lambda \\
& + \left\{ \frac{I_s}{\tau} \left[\frac{3T_0^2}{T_{nom}^3} + \frac{T_0^3 E_g}{T_{nom}^4 NV_t} \right] \exp \left[\frac{E_g}{NV_t} \left(\frac{T_0}{T_{nom}} - 1 \right) \right] \right\} \Delta T
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Dimana V_{PV0} adalah titik kerja tegangan sel surya

Sehingga, bentuk matriks ruang keadaan *boost converter switch* terbuka menjadi seperti ditunjukkan oleh persamaan (3.21).

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} I_L \\ \frac{d}{dt} V_{PV} \\ \frac{d}{dt} I_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_C \\ \lambda \\ T \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Sedangkan matriks ruang keadaan dari *boost converter* untuk *switch* tertutup ditunjukkan oleh persamaan (3.22).

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} I_L \\ \frac{d}{dt} V_{PV} \\ \frac{d}{dt} I_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_C \\ \lambda \\ T \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

Dimana

$$A_{32} = -\frac{qI_s}{\tau NKTn_s} \exp \frac{qV_{PV0}}{NKTn_s} \tag{3.23}$$

$$B_{33} = \frac{I_{SC} + k_I [T - 298]}{\tau} \tag{3.24}$$

$$B_{34} = \frac{I_s}{\tau} \left[\frac{3T_0^2}{T_{nom}^3} + \frac{T_0^3 E_g}{T_{nom}^4 NV_t} \right] \exp \left[\frac{E_g}{NV_t} \left(\frac{T_0}{T_{nom}} - 1 \right) \right] \tag{3.25}$$

Metode *state space averaging* adalah menjumlahkan matriks ruang keadaan *boost converter* untuk *switch* terbuka dan *switch* tertutup setelah diberikan faktor pengali $1-D$ untuk *switch* terbuka dan D untuk *switch* tertutup. Hasil penjumlahan matriks tersebut merepresentasikan keseluruhan keadaan rangkaian *boost converter* termasuk pengaruh *duty cycle*.

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} I_L \\ \frac{d}{dt} V_{PV} \\ \frac{d}{dt} I_{PV} \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_C \\ \lambda \\ T \end{bmatrix} \times (1-D) \\
 \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} I_L \\ \frac{d}{dt} V_{PV} \\ \frac{d}{dt} I_{PV} \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_C \\ \lambda \\ T \end{bmatrix} \times D \\
 \hline
 \begin{pmatrix} \frac{d}{dt} I_L \\ \frac{d}{dt} V_{PV} \\ \frac{d}{dt} I_{PV} \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1-D}{L} & -\frac{1-D}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_C \\ \lambda \\ T \end{bmatrix} \quad (3.26)
 \end{aligned}$$

Berdasarkan matriks ruang keadaan pada persamaan (3.26), dapat ditentukan persamaan diferensial dari *boost converter* secara keseluruhan. Persamaan diferensial *boost converter* secara keseluruhan diberikan oleh persamaan (3.27), (3.28), dan (3.29).

$$\frac{d}{dt} I_L = -\frac{R_L}{L} I_L + \frac{1}{L} V_{PV} - \left(\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L} \right) (1-D) \quad (3.27)$$

$$\frac{d}{dt} V_{PV} = -\frac{1}{C_1} I_L + \frac{1}{C_1} I_{PV} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{PV} = & \left\{ -\frac{qI_s}{\tau NKTn_s} \exp \frac{qV_{PV0}}{NKTn_s} \right\} V_{PV} + \left\{ -\frac{1}{\tau} \right\} I_{PV} \\ & + \left\{ \frac{I_{SC} + k_I [T - 298]}{\tau} \right\} \lambda \\ & + \left\{ \frac{I_s}{\tau} \left[\frac{3T_0^2}{T_{nom}^3} + \frac{T_0^3 E_g}{T_{nom}^4 NV_t} \right] \exp \left[\frac{E_g}{NV_t} \left(\frac{T_0}{T_{nom}} - 1 \right) \right] \right\} T \end{aligned} \quad (3.29)$$

Setelah menentukan persamaan diferensial sistem, selanjutnya adalah persamaan diferensial pengendali. Sistem *MPPT* yang dibangun menggunakan dua buah pengendali *PI*. Pengendali *PI* pertama digunakan sebagai metode *MPPT*, sedangkan pengendali *PI* kedua digunakan untuk mengendalikan nilai *duty cycle* agar sesuai dengan V_{ref} yang diberikan.

Berdasarkan fungsi alih pengendali *PI* pada persamaan (2.16) dan masukan *error PI MPPT* yang diberikan oleh persamaan (3.13), maka persamaan diferensial pengendali *PI* pertama adalah

$$V_{PV}^* = k_{1p} \left(I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}} \right) + k_{1i} \int \left(I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}} \right) dt \quad (3.30)$$

Dengan mengasumsikan

$$\frac{d}{dt} x_1 = I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}} \quad (3.31)$$

Maka

$$V_{PV}^* = k_{1p} \left(I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}} \right) + k_{1i} x_1 \quad (3.32)$$

Sedangkan untuk pengendali *PI* kedua, *error* masukan pengendali dapat dilihat pada rancangan sistem pada Gambar 3.28. Persamaan diferensial pengendali *PI* kedua adalah

$$D = k_{2p}(V_{PV} - V_{PV}^*) + k_{2i} \int (V_{PV} - V_{PV}^*) dt \quad (3.33)$$

Dengan mengasumsikan

$$\frac{d}{dt} x_2 = V_{PV} - V_{PV}^* \quad (3.34)$$

Kemudian mensubstitusikan persamaan (3.31) ke dalam persamaan (3.33),

$$\frac{d}{dt}x_2 = V_{PV} - \left[k_{1p} \left(I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}} \right) + k_{1i}x_1 \right] \quad (3.35)$$

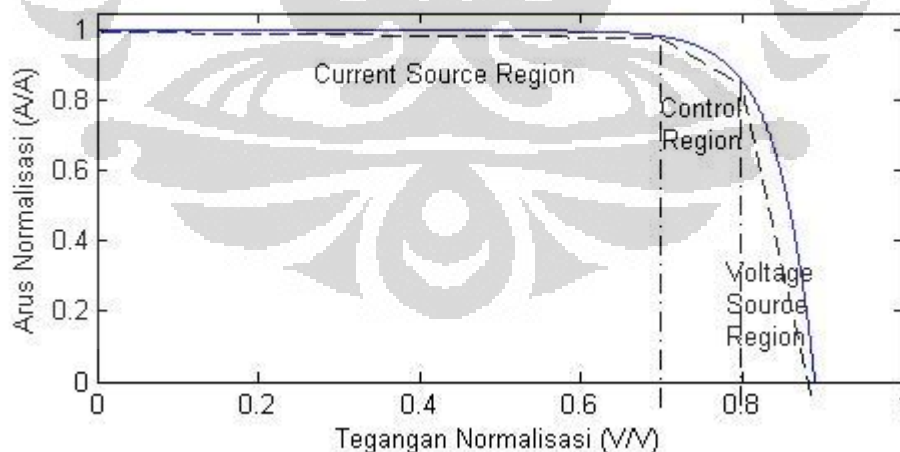
Maka

$$D = k_{2p}V_{PV} - k_{2p} \left[k_{1p} \left(I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}} \right) + k_{1i}x_1 \right] + k_{2i}x_2 \quad (3.36)$$

3.7.1.1 Linearisasi

Persamaan diferensial sistem *MPPT* secara keseluruhan direpresentasikan oleh persamaan (3.27), (3.28), (3.29), (3.31), dan (3.35). Sebelum digunakan, persamaan (3.27) harus disubstitusikan terlebih dahulu dengan persamaan (3.36). Sehingga, persamaan yang memiliki fungsi *nonlinear* adalah persamaan (3.27), (3.31), dan (3.35).

Linearisasi yang telah dilakukan adalah dengan cara membagi daerah kerja menjadi tiga bagian seperti ditunjukkan Gambar 3.21, yaitu *current source region*, *control region*, dan *voltage source region*. Pada Gambar 3.21, linearisasi digambarkan pada kurva *V-m*. Jika hal yang sama dilakukan pada kurva *V-I*, maka hasilnya seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.29.



Gambar 3.29. Linearisasi Karakteristik *V-I* Sel Surya

Berdasarkan Gambar 3.29, dapat diasumsikan bahwa tiap daerah linearisasi memiliki nilai dI/dV yang konstan. Sehingga, persamaan (3.27), (3.31), dan (3.35) menjadi persamaan linear.

3.7.1.2 Matriks Ruang Keadaan Sistem *MPPT*

Hasil substitusi persamaan (3.27) dan (3.36) adalah

$$\frac{d}{dt}I_L = -\frac{R_L}{L}I_L + \frac{1}{L}V_{PV} - \left(\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right) + \left(\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right)\left\{k_{2p}V_{PV} - k_{2p}\left[k_{1p}\left(I_{PV} + \frac{dI_{PV}V_{PV}}{dV_{PV}}\right) + k_{1i}x_1\right] + k_{2i}x_2\right\} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}I_L = & \left\{-\frac{R_L}{L}\right\}I_L + \left\{\frac{1}{L} + \left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]\left[k_{2p} - k_{1p}k_{2p}\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}\right]\right\}V_{PV} + \left\{-\left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]k_{1p}k_{2p}\right\}I_{PV} + \left\{-\left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]k_{1i}k_{2p}\right\}x_1 \\ & + \left\{\left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]k_{2i}\right\}x_2 + \left\{-\frac{V_D}{L} - \frac{V_C}{L}\right\} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Maka, matriks *A* sistem *MPPT* keseluruhan adalah

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt}I_L \\ \frac{d}{dt}V_{PV} \\ \frac{d}{dt}I_{PV} \\ \frac{d}{dt}x_1 \\ \frac{d}{dt}x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \left\{\frac{1}{L} + \left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]\left[k_{2p} - k_{1p}k_{2p}\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}\right]\right\} & -\left\{\left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]k_{1p}k_{2p}\right\} & -\left\{\left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]k_{1i}k_{2p}\right\} & \left\{\left[\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right]k_{2i}\right\} \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{qI_s}{\tau NKTn_s} \exp\left(\frac{qV_{PV0}}{NKTn_s}\right) & -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - k_{1p}\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} & -k_{1p} & -k_{1i} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Matriks B sistem $MPPT$ keseluruhan adalah

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_D \\ V_C \\ \lambda \\ T \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Keluaran dari matriks ruang keadaan rangkaian *boost converter* adalah V_{PV} , maka persamaan keluaran dari sistem ini adalah

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada BAB 3 telah dilakukan pemodelan rangkaian *boost converter* yang terhubung dengan sel surya. Sebelumnya, model sel surya dan pengendali rangkaian *boost converter* telah dibuat dan disimulasikan. Algoritma *MPPT ICM* dan algoritma *MPPT* baru berdasarkan pengendali *PI* telah dibuat dan disimulasikan. Di bagian akhir BAB 3, dirancang sistem *MPPT* dengan basis rangkaian *boost converter* yang memanfaatkan pengendali dan algoritma *MPPT* baru. Di BAB 4 ini, saatnya dibahas hasil simulasi dan analisis sistem *MPPT* keseluruhan yang dirancang.

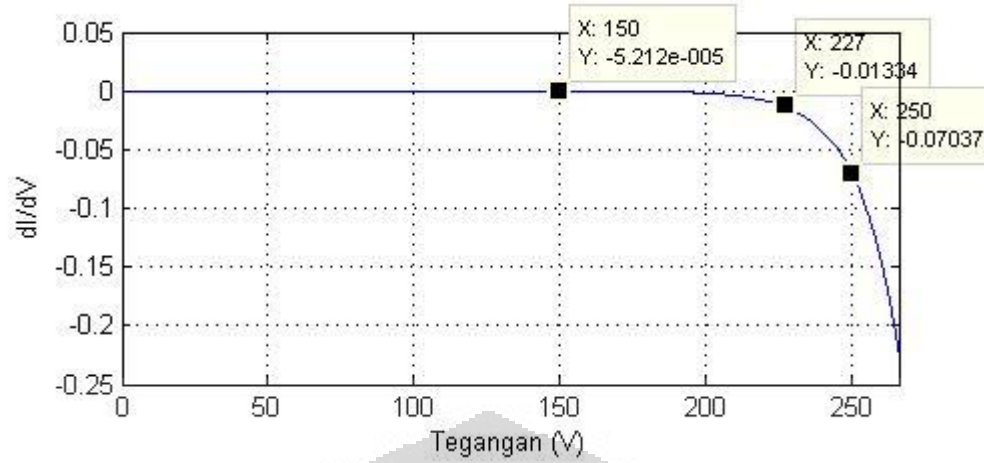
4.1 Analisis Kestabilan Sistem

Pada penelitian ini, analisis kestabilan dilakukan dengan melihat letak *pole* sistem *MPPT* dari *eigen value* matriks *A*. Analisis kestabilan akan dilihat pada tiga titik kerja. Titik kerja pertama terletak di *current source region*, titik kerja kedua terletak di *control region*, dan titik kerja ketiga terletak di *voltage source region*. Analisis dilakukan pada kondisi lingkungan standar, yaitu pada saat radiasi matahari 1000 W/m^2 dan suhu sel 298 K .

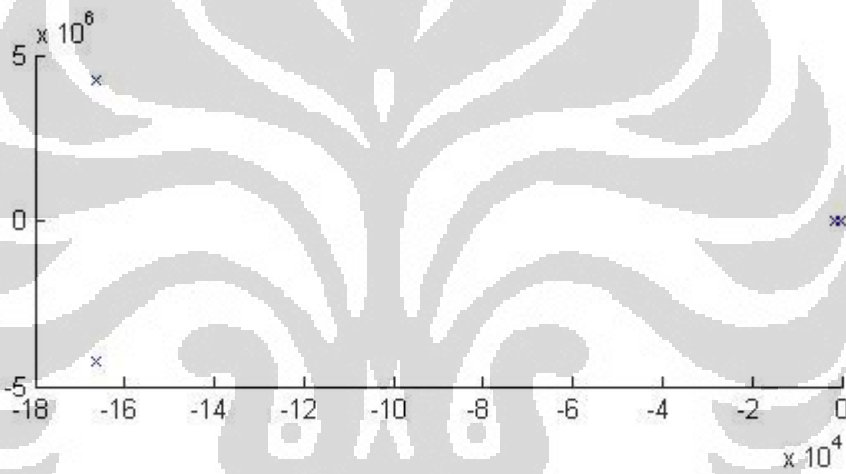
Gambar 4.1 menunjukkan letak titik kerja di tiap daerah linearisasi yang akan digunakan untuk analisis kestabilan. Analisis kestabilan pada daerah *current source region* akan dilakukan pada tegangan kerja 150 Volt , dimana besar dI/dV pada titik tersebut adalah $-5,212 \times 10^{-5}$, pada daerah *control region* dilakukan pada tegangan kerja 227 Volt , dimana besar dI/dV yang bersesuaian adalah $-0,013$, dan pada daerah *voltage source region* dilakukan pada tegangan kerja 250 Volt , dimana besar dI/dV yang bersesuaian adalah $-0,07$.

Letak *pole* pada masing-masing region diperlihatkan oleh Gambar 4.2, Gambar 4.3, dan Gambar 4.4 untuk *current source region*, *control region*, dan *voltage source region*. Nilai yang bersesuaian diberikan pada

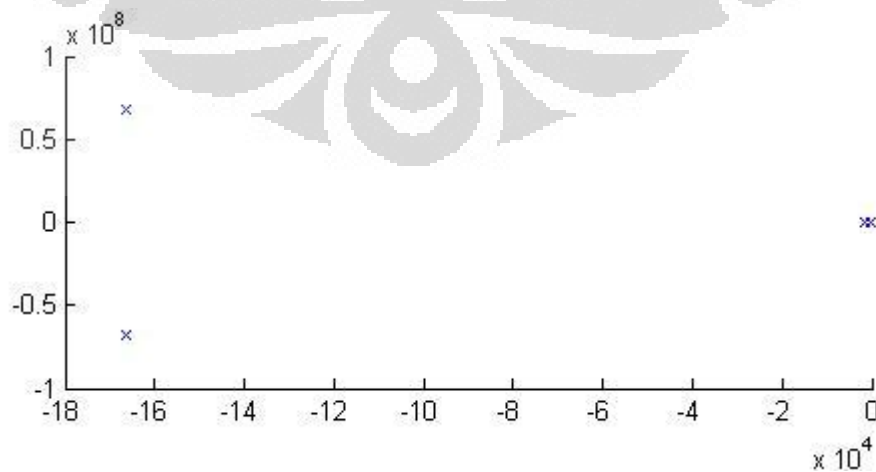
Tabel 4.1. Semua *pole* terletak di bagian kiri sumbu *imaginer*. Berdasarkan hal tersebut, sistem dinyatakan stabil. Keluaran sistem akan menuju nilai tertentu dan tetap di nilai tersebut, dimana disebut kondisi *steady state*.



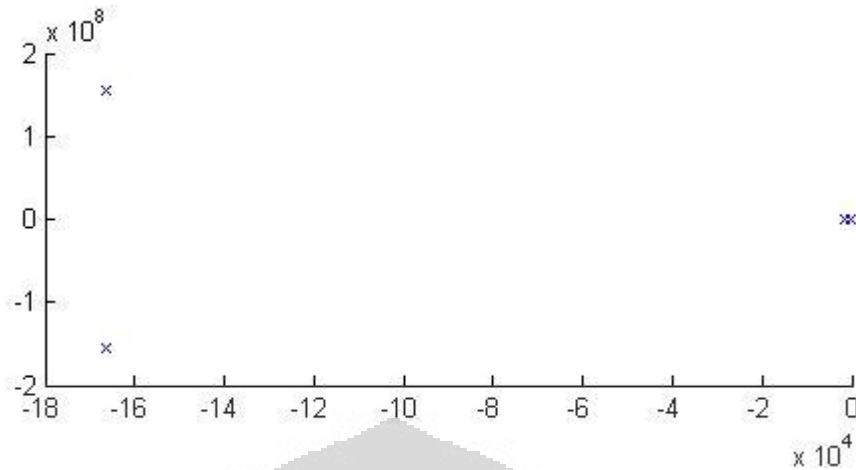
Gambar 4.1. Titik Kerja Untuk Analisis Kestabilan



Gambar 4.2. Letak Pole pada *Current Source Region*



Gambar 4.3. Letak Pole pada *Control Region*

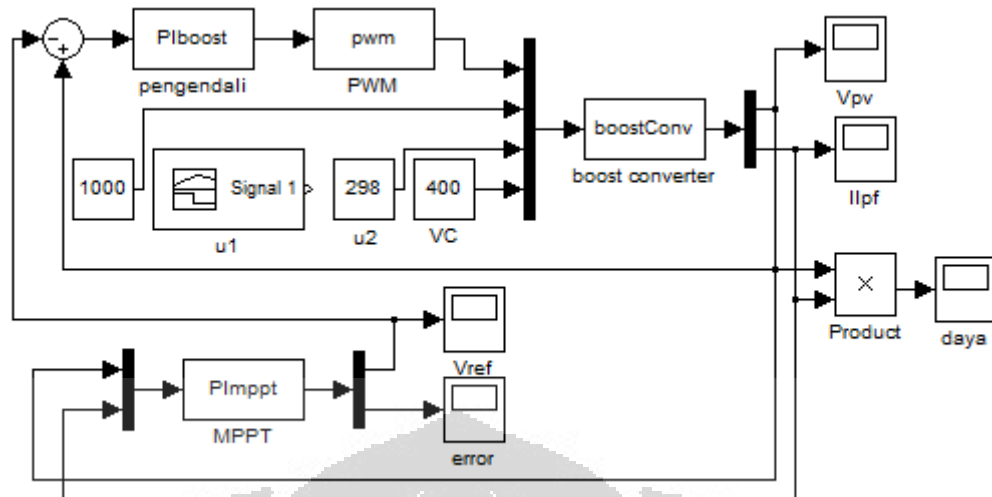
Gambar 4.4. Letak *Pole* pada *Voltage Source Region*Tabel 4.1. Tabel Kuantisasi Letak *Pole*

No	<i>Pole</i>		
	Current Source Region	Control Region	Voltage Source Region
1	$-1.663 \times 10^5 + 4.219 \times 10^6 i$	$-1.663 \times 10^5 + 6.775 \times 10^7 i$	$-1.663 \times 10^5 + 1.552 \times 10^8 i$
2	$-1.663 \times 10^5 - 4.219 \times 10^6 i$	$-1.663 \times 10^5 - 6.774 \times 10^7 i$	$-1.663 \times 10^5 - 1.552 \times 10^8 i$
3	-1.539×10^3	-1.539×10^3	-1.539×10^3
4	$-3.168 \times 10^2 + 1.348 \times 10^3 i$	$-3.168 \times 10^2 + 1.348 \times 10^3 i$	$-3.168 \times 10^2 + 1.348 \times 10^3 i$
5	$-3.168 \times 10^2 - 1.348 \times 10^3 i$	$-3.168 \times 10^2 - 1.348 \times 10^3 i$	$-3.168 \times 10^2 - 1.348 \times 10^3 i$

Pole nomor 1 memiliki *pole konjuget* yaitu nomor 2, *pole* nomor 4 memiliki *pole konjuget* yaitu nomor 5, sedangkan *pole* nomor 3 terletak di sumbu *real*. Nilai pengendali yang digunakan saat menghitung analisis kestabilan telah disesuaikan untuk masing-masing daerah pengendalian, sehingga seluruh sistem memiliki karakteristik *well-damped*.

4.2 Blok Diagram Simulasi Sistem MPPT

Blok diagram simulasi sistem *MPPT* dibangun sesuai dengan rancangan sistem yang telah dibuat pada BAB 3. Rancangan sistem *MPPT* yang diusulkan diperlihatkan oleh Gambar 3.26 dengan isi blok *MPPT* oleh Gambar 3.28. Bagian-bagian dari sistem *MPPT* keseluruhan telah disimulasikan dan nilai-nilai variabel yang digunakan juga telah diberikan pada BAB 3. Seperti sebelumnya, simulasi dibangun pada MATLAB/ Simulink. Blok Diagram simulasi sistem *MPPT* keseluruhan ditunjukkan oleh Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Blok Diagram Simulasi Sistem MPPT

Blok model *boost converter* pada sistem MPPT memiliki dua bagian masukan, yaitu masukan untuk model sel surya dan masukan *boost converter* itu sendiri. Masukan model sel surya adalah radiasi matahari dan suhu sel. Pada Gambar 4.5, radiasi matahari masuk ke *port 2* dari *multiplexer* yang masuk ke blok *boost converter*, sedangkan suhu sel masuk ke *port 3*. Nilai-nilai parameter kondisi lingkungan ini akan divariasikan untuk menguji algoritma MPPT yang dibangun. Masukan *boost converter* sendiri adalah sinyal PWM dari blok pembuat sinyal PWM dan tegangan output *boost converter*, V_C .

Algoritma MPPT yang diusulkan berada pada blok MPPT. Masukan dari blok MPPT adalah hasil pengukuran tegangan dan arus sel surya dari rangkaian *boost converter*. Keluaran dari blok MPPT adalah V_{ref} dan *error*. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 3.6, V_{ref} pada algoritma MPPT yang diusulkan merupakan hasil dari pengendali PI. Pengendali PI merupakan fungsi dari *error*. Untuk keperluan analisis, *error* masukan pengendali PI MPPT ini juga dikeluarkan dari blok MPPT.

Blok pengendali PI *boost converter* memiliki nilai *set point* berupa V_{ref} yang berasal dari algoritma MPPT dan *feedback* berupa V_{PV} dari pengukuran V_{PV} rangkaian *boost converter*. Keluaran pengendali adalah *duty cycle* yang menjadi masukan blok pembuat sinyal PWM. Keluaran blok pembuat sinyal PWM adalah sinyal PWM untuk mengendalikan *switch* rangkaian *boost converter*.

4.3 Simulasi Sistem *MPPT* pada Kondisi Lingkungan yang Berubah

Pertama, sistem dicoba pada kondisi lingkungan standar, radiasi matahari 1000 W/m^2 dan suhu sel 298 K . Tegangan sel surya, V_{PV} , inisial diset nol, artinya peninjakan dimulai dari sebelah kiri kurva *P-V*. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 4.6 – Gambar 4.8.

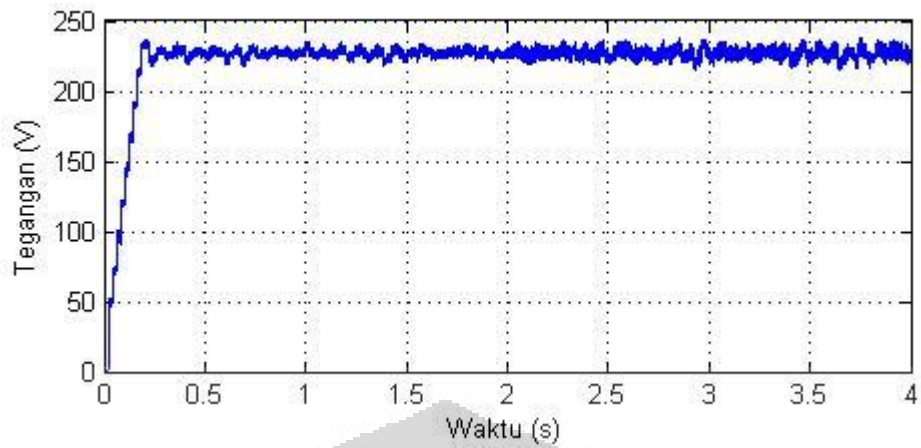
Gambar 4.6 merupakan tegangan sel surya, V_{PV} , sistem *MPPT* pada kondisi lingkungan standar. Garis warna biru pada Gambar 4.6 merupakan tegangan sel surya dari rangkaian *boost converter*. Pada kondisi lingkungan standar, titik kerja maksimum terletak antara $226\text{-}228 \text{ Volt}$. Dapat dilihat pada grafik, sistem *MPPT* yang dibangun memiliki titik kerja disekitar 228 Volt .

Waktu yang dibutuhkan oleh algoritma *PI MPPT* yang diusulkan untuk mencapai titik kerja maksimum adalah 19 cycle . 1 cycle senilai dengan waktu sampling dari algoritma *MPPT*. Waktu sampling yang digunakan pada algoritma *PI MPPT* adalah 100 Hertz atau setara dengan $0,001 \text{ s/cycle}$.

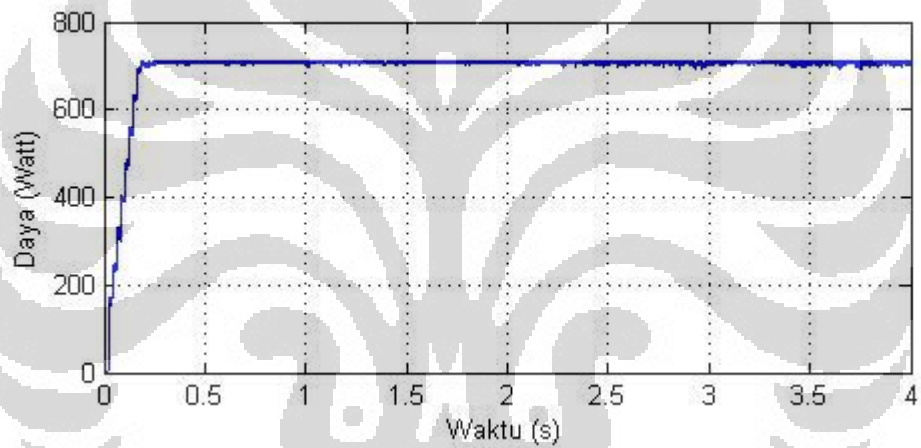
Gambar 4.7 menunjukkan daya yang dihasilkan oleh sistem *MPPT* pada kondisi lingkungan standar. Daya yang dihasilkan berada disekitar 708 Watt . Osilasi pada daya yang dihasilkan sistem lebih kecil dibandingkan osilasi pada V_{PV} . Daya yang diperoleh dari tegangan dikalikan dengan arus saling melemahkan, sehingga osilasi pada daya kecil.

Gambar 4.8 menunjukkan *gradien* kurva *P-V* atau *error* masukan pengendali *PI MPPT*. Peninjakan yang dimulai dari kiri kurva *P-V* menghasilkan nilai *gradien* positif. Oleh sebab itu, awalnya *gradien* sistem positif. Dengan menggunakan pengendali *PI*, nilai *gradien* tersebut dibuat agar menjadi nol. Osilasi pada *gradien* disekitar nol disebabkan ripple rangkaian *boost converter* yang digunakan. Pada simulasi tanpa menggunakan rangkaian *boost converter*, osilasi disekitar nol tersebut tidak ada seperti ditunjukkan Gambar 3.25.

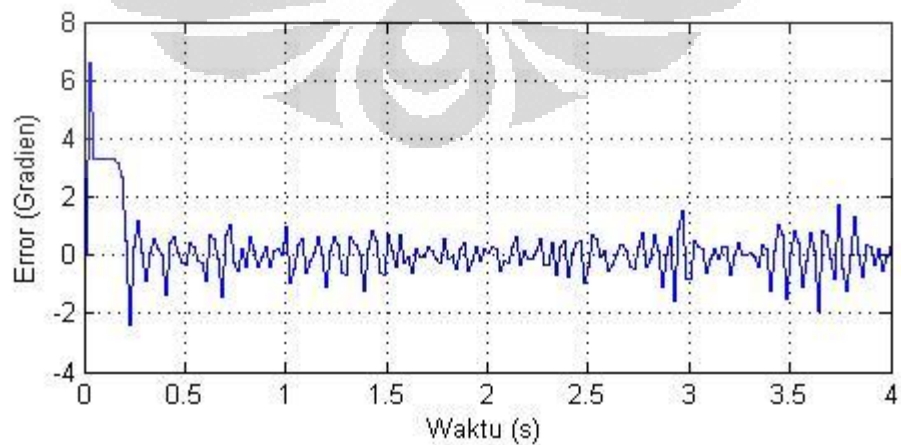
Secara keseluruhan, sistem *MPPT* mampu menemukan titik kerja maksimum dan mempertahankan sel surya bekerja di titik tersebut. Pada dasarnya model *boost converter* memang memiliki *ripple* natural yang tidak berasal dari algoritma *MPPT*, hal ini menyebabkan pengendali *PI MPPT* sulit mencapai kondisi *steady state*.



Gambar 4.6. V_{PV} Sistem MPPT pada STC



Gambar 4.7. Daya Sistem MPPT pada STC



Gambar 4.8. Gradien Kurva P-V Sistem MPPT pada STC

4.3.1 Perubahan Radiasi Matahari

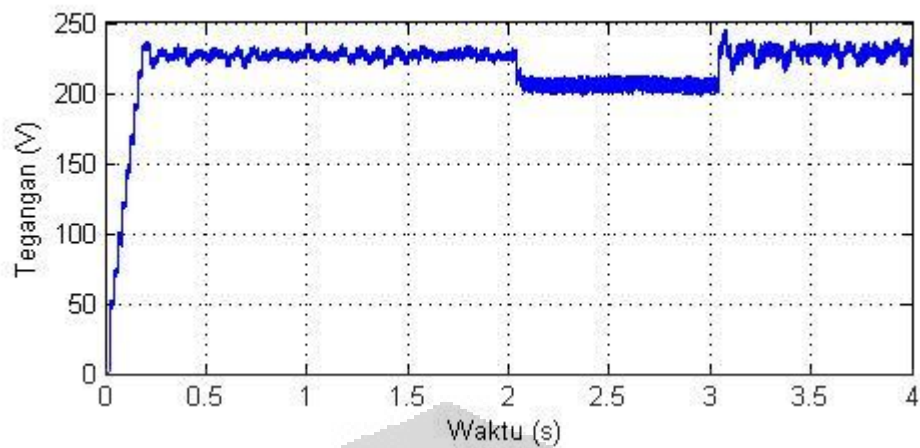
Kinerja sistem *MPPT* yang dibangun juga akan dilihat pada paparan radiasi matahari yang berubah-ubah. Oleh karena itu, dilakukan simulasi dengan mengasumsikan suhu sel tetap pada nilai 298 K dan radiasi matahari berubah-ubah. Pada saat $0 < t \leq 2$, radiasi matahari diset standar, yaitu 1000 W/m^2 ; saat $2 < t \leq 3$, radiasi matahari diturunkan nilainya hingga mencapai 200 W/m^2 ; saat $3 < t \leq 4$, radiasi matahari dinaikkan hingga mencapai 1200 W/m^2 .

Gambar 4.9 menunjukkan V_{PV} hasil pengukuran rangkaian *boost converter*. Saat terjadi perubahan radiasi matahari, algoritma *PI MPPT* memberikan titik kerja baru. Tidak terjadi *overshoot* pada saat radiasi matahari berubah. Seperti diketahui, sel surya memiliki karakteristik *nonlinear*, oleh karena itu *overshoot* ataupun respon yang lambat mungkin saja terjadi. Hal tersebut tidak terjadi sebab algoritma *PI MPPT* membedakan daerah linearisasi menjadi tiga bagian, masing-masing bagian memiliki parameter pengendali yang berbeda. Pada *voltage source region*, respon sistem sangat lambat, kemudian masuk *control region* menjadi lebih cepat, dan masuk ke *current source region* menjadi sangat cepat. Nilai parameter pengendali disesuaikan untuk karakteristik tiap daerah.

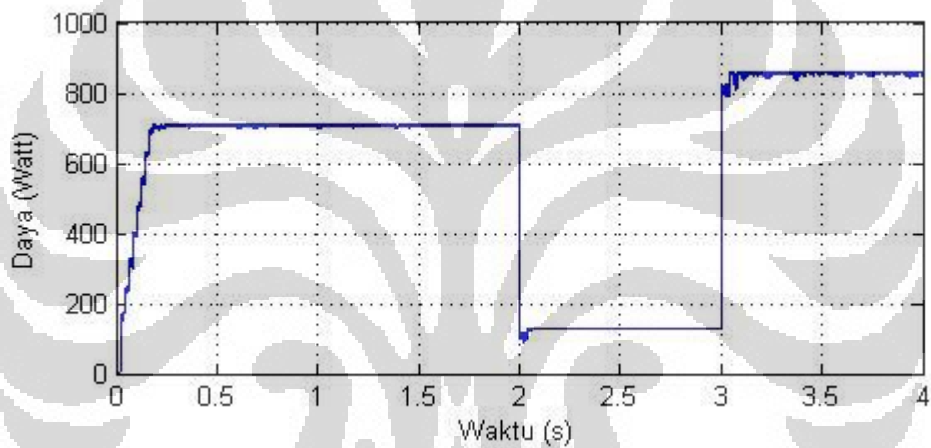
Gambar 4.10 menunjukkan daya yang dihasilkan oleh sistem *MPPT*. Dapat dilihat pada gambar, daya berbanding lurus dengan radiasi matahari. Sesuai dengan Gambar 2.3 sebelumnya pada BAB 2. Gambar 4.11 menunjukkan *error* masukan pengendali. Pada saat terjadi perubahan radiasi matahari yang pertama, nilai *error* menjadi negatif, hal ini menandakan peninjakan dimulai dari sebelah kanan *MPP*. Sedangkan pada perubahan radiasi matahari yang kedua, nilai *error* langsung positif, artinya peninjakan dimulai dari sebelah kiri. Kuantisasi hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Data Simulasi Perbedaan Radiasi Matahari

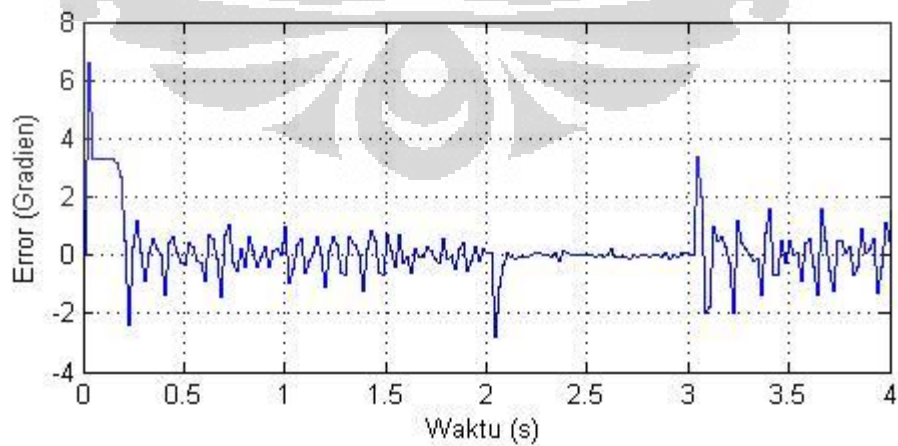
λ W/m^2	Teoritis		Simulasi		Error (%)	
	V_{PV} (V)	P_{PV} (V)	V_{PV} (V)	P_{PV} (V)	V_{PV} (V)	P_{PV} (V)
1000	227,35	709,24	227	709	0,15	0,03
200	206,3	127,95	206	127,5	0,15	0,35
1200	229,75	860,55	229,5	860	0,11	0,06
Rata-Rata					0,14	0,15



Gambar 4.9. V_{PV} Sistem *MPPT* Terhadap Perubahan Radiasi Matahari



Gambar 4.10. Daya Sistem *MPPT* Terhadap Perubahan Radiasi Matahari



Gambar 4.11. *Gradien* Sistem *MPPT* Terhadap Perubahan Radiasi Matahari

4.3.2 Perubahan Suhu Sel

Sistem *MPPT* juga diujicoba pada perubahan suhu sel. Simulasi dibangun dengan mengasumsikan nilai radiasi matahari konstan pada kondisi standar 1000 W/m^2 dan nilai suhu sel berubah. Pertama, suhu sel diset pada kondisi standar, yaitu 298 K pada $0 < t \leq 2$, kemudian turun menjadi 293 K pada $2 < t \leq 3$, kemudian naik menjadi 303 K pada $3 < t \leq 4$.

Hasil pengukuran tegangan sel surya, V_{PV} , sistem *MPPT* terhadap perubahan suhu ditunjukkan pada Gambar 4.12. Saat suhu sel turun sebesar 5 K pada detik ke-2, algoritma *MPPT* memberikan V_{ref} yang lebih tinggi. Saat suhu sel naik sebesar 10 K pada detik ke-3, algoritma *MPPT* menurunkan nilai V_{ref} .

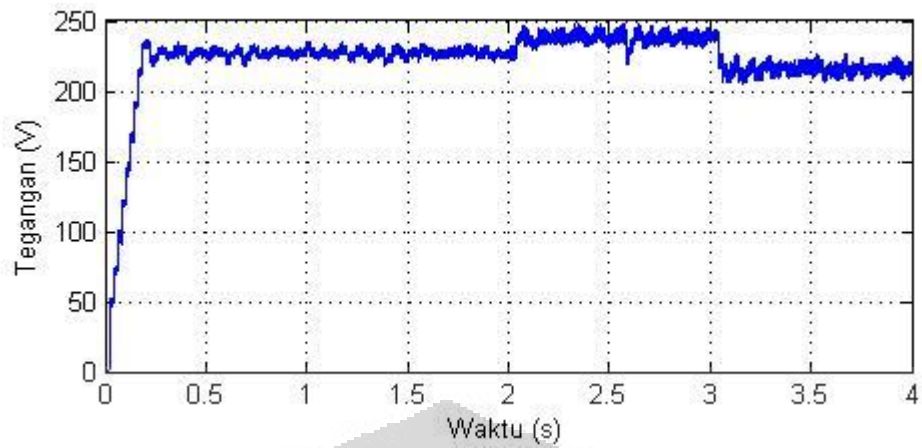
Gambar 4.13 menunjukkan daya yang dihasilkan sistem *MPPT* terhadap perubahan suhu. Pada saat detik ke-2, terjadi penurunan suhu sebesar 5 K , sehingga daya yang dihasilkan sistem *MPPT* meningkat. Hal ini sesuai dengan karakteristik sel surya pada Gambar 2.4. Pada saat detik ke-3, terjadi kenaikan suhu sel sebesar 10 K , sehingga daya yang dihasilkan sistem *MPPT* menurun.

Pada Gambar 2.4 dapat dicermati perubahan suhu menggeser kurva *P-V* karakteristik sel surya berlawanan arah. Pada saat suhu sel naik, kurva *P-V* karakteristik sel surya bergeser ke kiri. Hal tersebut menyebabkan titik kerja sel surya jatuh cukup dalam di sebelah kanan *MPP*, yaitu daerah yang memiliki *slope* daya curam. Efeknya adalah daya jatuh cukup jauh seperti yang terlihat pada Gambar 4.13 saat detik ke-3.

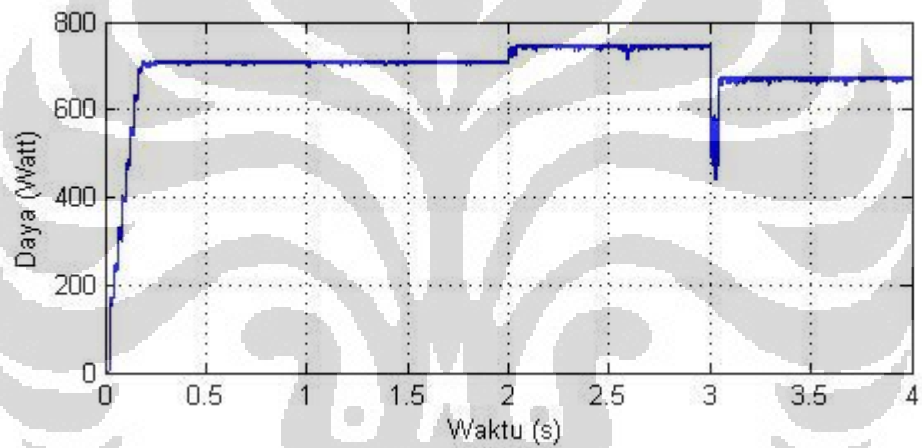
Gambar 4.14 menunjukkan *error* masukan *PI MPPT*. Pada detik ke-2, saat suhu sel turun, perubahan nilai *error* tidak terlalu signifikan karena titik kerja jatuh disebelah kiri *MPP*. Pada detik ke-3, saat suhu sel naik, perubahan nilai *error* besar karena titik kerja jatuh disebelah kanan *MPP*. Tabel 4.3 menunjukkan kuantisasi hasil simulasi sistem *MPPT* terhadap perubahan suhu.

Tabel 4.3. Data Simulasi Perbedaan Suhu Sel

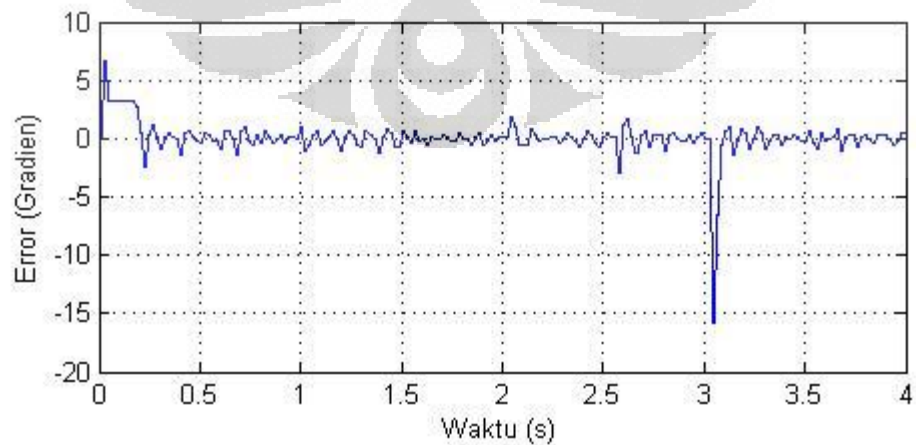
<i>T</i> <i>K</i>	Teoritis		Simulasi		Error (%)	
	$V_{PV} (V)$	$P_{PV} (V)$	$V_{PV} (V)$	$P_{PV} (V)$	$V_{PV} (V)$	$P_{PV} (V)$
298	227,35	709,24	227	709	0,15	0,03
293	238,85	746,42	239	745	0,06	0,19
303	215,9	672,07	215	671,5	0,42	0,08
Rata-Rata					0,17	0,1



Gambar 4.12. V_{PV} Sistem *MPPT* Terhadap Perubahan Suhu



Gambar 4.13. Daya Sistem *MPPT* Terhadap Perubahan Suhu



Gambar 4.14. *Gradien* Sistem *MPPT* Terhadap Perubahan Suhu

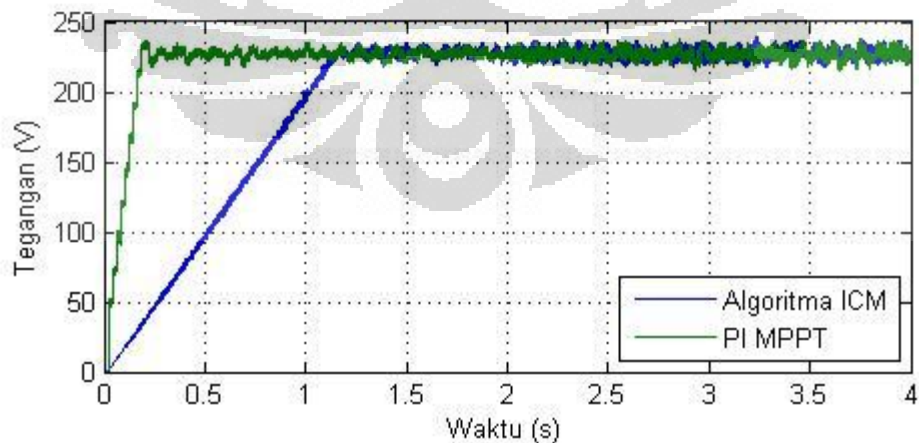
4.4 Perbandingan Sistem *MPPT PI* dengan *MPPT ICM*

Perbandingan sistem *MPPT PI* dengan *ICM* dilakukan untuk melihat perbaikan yang dapat dilakukan oleh sistem yang diusulkan. Untuk mendapatkan perbandingan yang tepat, blok-blok lain dalam sistem *MPPT* menggunakan blok yang sama dan waktu sampling blok *MPPT* juga menggunakan nilai yang sama.

4.4.1 Ujicoba Penjajakan dari Kiri

Sebelah kiri *MPP* adalah *current source region* dimana respon sistemnya lambat. Pada daerah ini nilai *gradien* di sepanjang titik kerja hanya memiliki sedikit perbedaan. Nilai parameter pengendali *PI MPPT* tidak dapat dirancang terlalu cepat namun juga tidak boleh lambat. Jika nilai parameter diset terlalu cepat maka *control region* dapat terlewati, bahkan *voltage source region* juga dapat terlewati. Nilai parameter pengendali *PI MPPT* yang paling baik adalah sedikit lebih cepat dari parameter pengendali pada *control region*.

Gambar 4.15 menunjukkan nilai V_{ref} jika penjajakan *MPP* dilakukan dari sebelah kiri. Garis berwarna biru merupakan V_{ref} dari algoritma *ICM*, sedangkan garis berwarna hijau merupakan V_{ref} dari algoritma *PI MPPT*. Algoritma *ICM* membutuhkan 110 *cycle* untuk sampai ke *MPP*, sedangkan algoritma *PI MPPT* hanya membutuhkan 19 *cycle*. Metode yang diusulkan memiliki waktu penjajakan yang lebih singkat dibanding metode *ICM*.

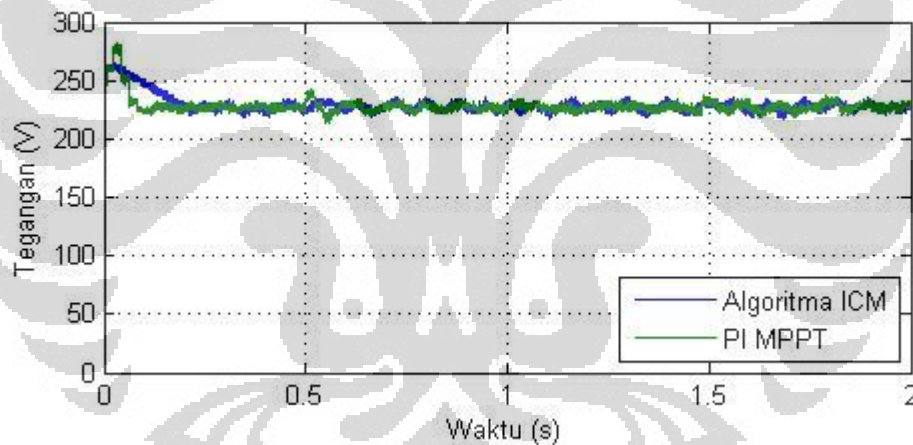


Gambar 4.15. Perbandingan *PI* dengan *ICM* pada Penjajakan dari Kiri

4.4.2 Ujicoba Penjajakan dari Kanan

Sebelah kanan *MPP* merupakan daerah *voltage source region*. Pada daerah ini, respon sistem sangat cepat. Nilai *gradien* di sepanjang titik kerja daerah ini memiliki perbedaan yang besar. Nilai parameter pengendali pada daerah ini diset yang paling lambat.

Gambar 4.16 menunjukkan nilai V_{ref} jika penjajakan dilakukan dari sebelah kanan. Garis berwarna biru merupakan V_{ref} untuk algoritma *ICM*, sedangkan garis berwarna hijau untuk algoritma *PI MPPT*. Metode *ICM* membutuhkan waktu 16 *cycle* untuk mencapai *MPP*, sedangkan metode *PI* membutuhkan waktu 8 *cycle*. Metode yang diusulkan menunjukkan waktu penjajakan yang lebih cepat baik dalam penjajakan dari kiri maupu dari kanan.

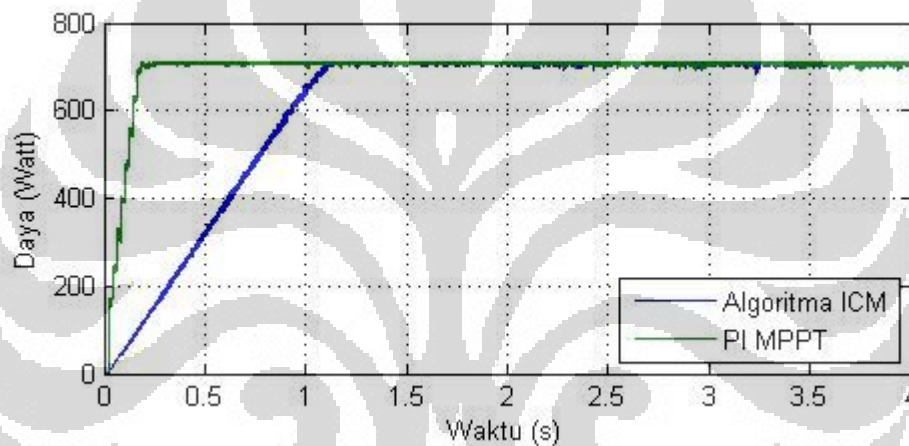


Gambar 4.16. Perbandingan *PI* dengan *ICM* pada Penjajakan dari Kanan

4.4.3 Total Daya yang Dihasilkan

V_{ref} yang diberikan oleh algoritma *ICM* maupun *PI MPPT* memiliki osilasi disekitar *MPP*. Pengaruh osilasi tersebut terdapat pada total daya maksimum yang dihasilkan oleh sistem *MPPT*. Osilasi yang besar menyebabkan total daya yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Untuk melihat perbandingan pengaruh osilasi dari algoritma *ICM* dan algoritma *PI MPPT*, maka sistem *MPPT* harus mencapai kondisi steady state terlebih dahulu.

Gambar 4.17 menunjukkan daya yang dihasilkan oleh sistem *MPPT ICM* dan *MPPT PI*. Garis berwarna biru menunjukkan daya yang dihasilkan oleh algoritma *ICM*, sedangkan garis berwarna hijau menunjukkan daya yang dihasilkan oleh algoritma *PI MPPT*. Daya dihitung dari detik ke-1,15 karena baik algoritma *ICM* maupun *PI MPPT* telah mencapai *MPP*. Algoritma *ICM* menghasilkan daya sebesar 2016,8 Watt; algoritma *PI MPPT* menghasilkan daya sebesar 2017,3 Watt. Algoritma yang diusulkan menghasilkan daya yang lebih besar dibanding algoritma *ICM*.



Gambar 4.17. Perbandingan Daya *PI* dengan *ICM*

Tabel 4.4 menunjukkan angka-angka perbandingan sistem *MPPT PI* dengan sistem *MPPT ICM* yang telah dijelaskan.

Tabel 4.4. Kuantisasi Perbandingan *ICM* dengan *MPPT PI*

Parameter	<i>ICM</i>	<i>PI MPPT</i>
Waktu Penjajakan dari Kanan	110 cycle	19 cycle
Waktu Penjajakan dari Kiri	16 cycle	8 cycle
Daya Total	2016,8 Watt	2017,3 Watt

4.5 Pengaruh Algoritma MPPT

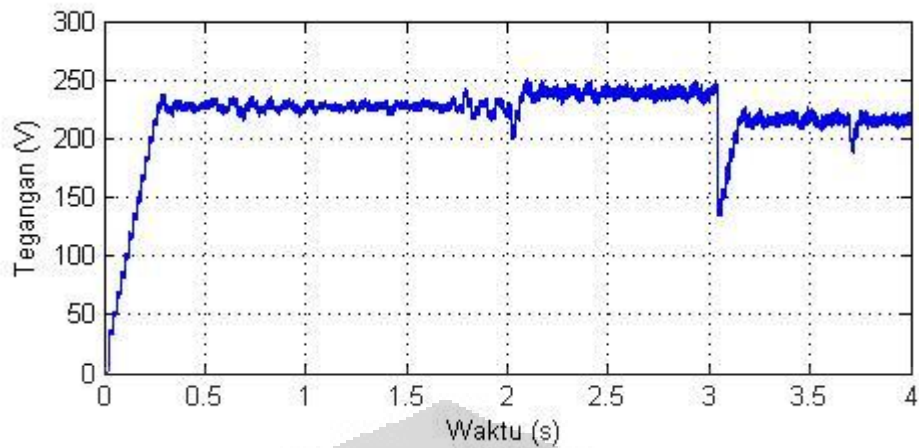
Algoritma *PI MPPT* yang digunakan akan sangat mempengaruhi kualitas waktu peninjakan dan osilasi disekitar *MPPT*. Nilai parameter pengendali *PI MPPT* yang berbeda dapat menghasilkan kualitas yang berbeda. Penggunaan *gain* proporsional yang terlalu besar atau integrator yang terlalu kecil dapat menyebabkan *overshoot* pada V_{ref} . *Overshoot* yang tinggi dapat menyebabkan *MPP* terlewat sehingga peninjakan harus dimulai dari sisi yang lain.

Selain nilai parameter pengendali *PI*, parameter lain yang harus diset adalah *update* V_{ref} untuk perhitungan *error*. Osilasi disekitar *MPP* dipengaruhi oleh nilai *update* V_{ref} untuk perhitungan *error*. Seperti dijelaskan pada anak subbab 3.6.2, *update* V_{ref} dibedakan berdasarkan dua tujuan, yaitu untuk menghitung *error* dan untuk masukan pengendali *PI MPPT*.

4.5.1 Linearisasi Vs Nonlinearisasi

Seperti dijelaskan pada anak subbab 3.6.3, *plant* yang dikendalikan oleh pengendali *PI* untuk *MPPT* memiliki karakteristik *nonlinear*. Pengendali *PI* untuk *boost converter* tidak membedakan daerah linearisasi walaupun didalam model *boost converter* terdapat model sel surya dimana karakteristiknya *nonlinear*. Tetapi, pada pengendali *PI* untuk *MPPT*, sifat linearitas *plant* diperhitungkan.

Untuk melihat pengaruh linearisasi yang dilakukan dapat dengan mengulang simulasi yang telah dilakukan pada anak subbab 4.3.2, tetapi kali ini tanpa membedakan daerah hasil linearisasi. Hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 4.18. Seperti yang telah dijelaskan, kenaikan suhu sel menyebabkan titik kerja jatuh pada bagian kanan *MPP*. Bagian kanan *MPP* adalah *voltage source region* dimana respon cepat. Nilai parameter pengendali *PI MPPT* yang digunakan disamakan dengan nilai parameter pengendali *PI MPPT* pada *control region*. Pada detik ke-3, suhu sel mengalami kenaikan dari 293 K menuju 303 K. V_{ref} yang diberikan oleh algoritma *PI MPPT* terlihat melewati *MPP* sampai ke sisi yang lain. Pada akhirnya algoritma *PI MPPT* mengulang peninjakan dari kiri *MPP*. Walaupun pada akhirnya algoritma berhasil menemukan *MPP*, hal tersebut memperlambat waktu peninjakan.

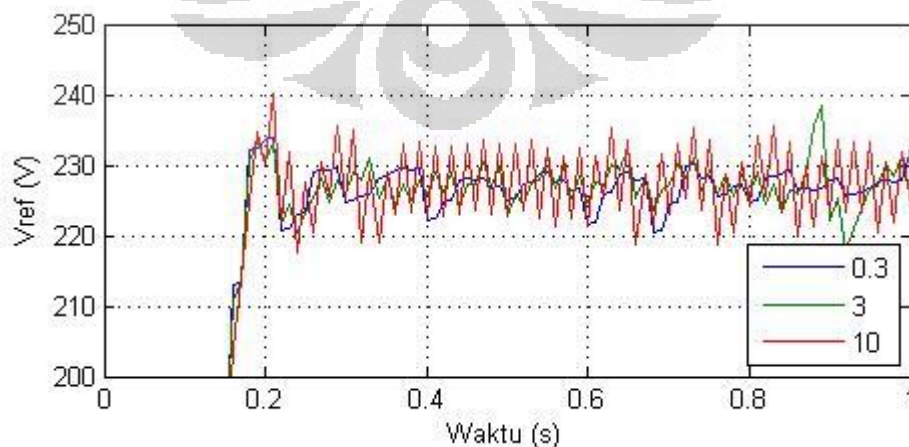


Gambar 4.18. V_{PV} Sistem *MPPT* Tanpa Linearisasi Terhadap Perubahan Suhu

4.5.2 Pengaruh V_{ref} untuk Perhitungan *Error*

Untuk perhitungan *error* masukan *PI MPPT*, V_{ref} di-update dengan suatu nilai yang kecil dan konstan. Hal ini dilakukan untuk memastikan nilai *gradien* kurva *P-V* yang didapatkan tepat di sepanjang titik kerja. Selain itu, besar nilai update V_{ref} yang kecil akan mengurangi osilasi pada *MPP*.

Gambar 4.19 menunjukkan nilai V_{ref} keluaran *PI MPPT*. Garis berwarna biru memiliki nilai update V_{ref} untuk menghitung *error* sebesar 0,3; warna hijau 3; dan warna merah 10. Dapat dilihat pada gambar, besar update V_{ref} hanya mempengaruhi osilasi pada titik kerja maksimum. Semakin kecil besar update, maka osilasi akan semakin kecil.

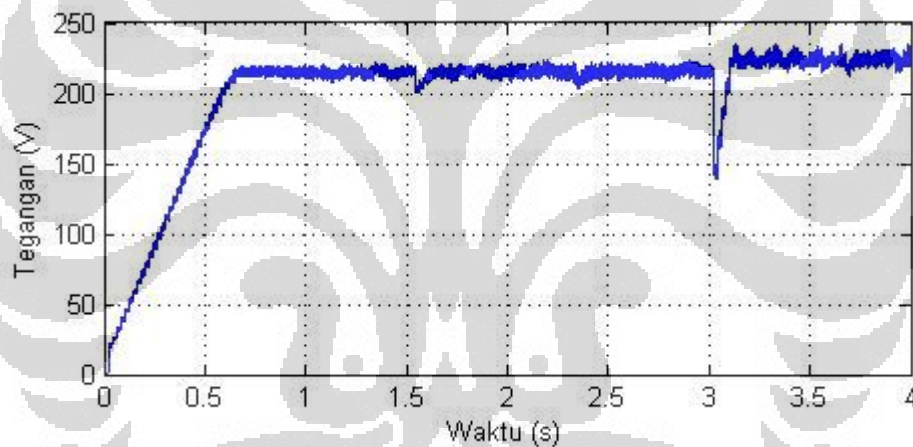


Gambar 4.19. V_{ref} Sistem *MPPT*

4.6 Gagal Fungsi

Gagal fungsi terjadi ketika V_{ref} yang diberikan oleh algoritma *MPPT* tidak semakin mendekati *MPP* melainkan menjauhinya. Untuk melihat peristiwa gagal fungsi, maka dilakukan simulasi sebagai berikut. Suhu sel diset pada kondisi standar, 298 K, radiasi matahari diubah pada detik ke-3 dari 400 W/m² menjadi 1000 W/m².

Gambar 4.20 menunjukkan V_{PV} yang diukur pada rangkaian *boost converter*. Pada detik ke-3, saat radiasi matahari meningkat, titik kerja maksimum sel surya, V_{PV} , juga ikut meningkat. Namun, sebelum naik, titik kerja sel surya terlihat sempat turun. Hal ini terjadi jika V_{ref} yang diberikan oleh algoritma *MPPT* salah, bukannya memberikan V_{ref} yang lebih tinggi melainkan lebih rendah.

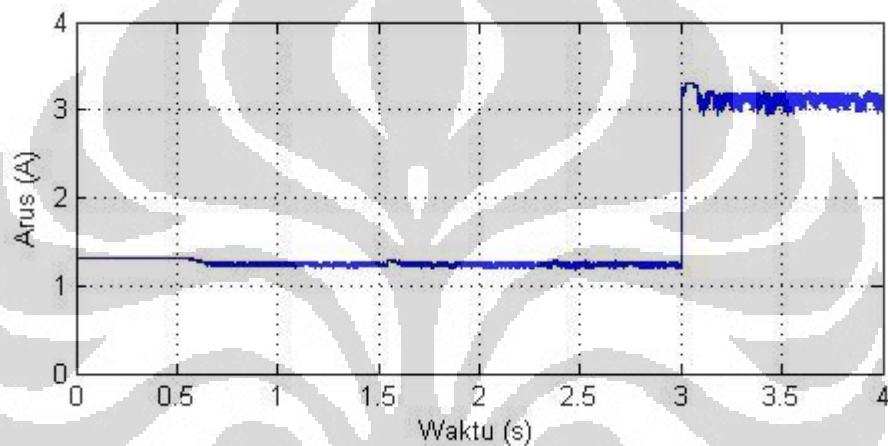


Gambar 4.20. V_{PV} Saat Terjadi Gagal Fungsi

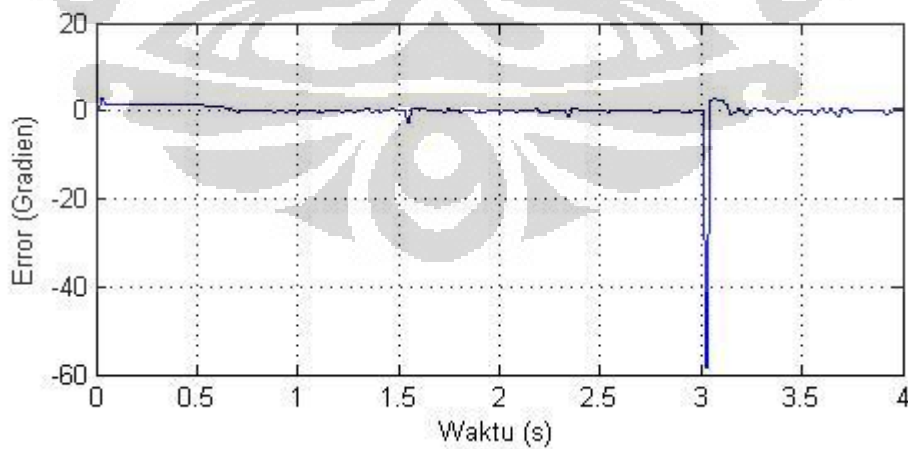
Hal tersebut dapat dipahami dengan melihat I_{PV} yang terukur pada rangkaian *boost converter*. Gambar 4.21 menunjukkan I_{PV} yang diukur pada rangkaian *boost converter*. Update V_{ref} untuk menghitung *error* masukan pengendali *PI MPPT* memiliki nilai yang kecil dan konstan serta positif. Jika nilai V_{PV} bertambah, I_{PV} akan menurun, seperti ditunjukkan Gambar 2.3 dan Gambar 2.4. Gagal fungsi ini terjadi karena pada saat algoritma menghitung *error* masukan pengendali *PI*, pada saat yang bersamaan terjadi kenaikan radiasi matahari. Kenaikan radiasi matahari akan meningkatkan I_{PV} . Perhitungan *error* melibatkan peningkatan V_{PV} , oleh karena itu seharusnya I_{PV} semakin kecil. Tetapi,

karena pada saat yang sama terjadi kenaikan radiasi matahari, maka I_{PV} malahan semakin besar. Hal ini menyebabkan perhitungan *error* salah. sehingga V_{ref} yang diberikan algoritma *PI MPPT* juga salah.

Gambar 4.22 menunjukkan *gradien* atau *error* masukan pengendali *PI MPPT*. Pada saat terjadi gagal fungsi, nilai *gradien* menjadi sangat ekstrim. Hal tersebut dapat digunakan sebagai parameter untuk mendeteksi gagal fungsi. Pada algoritma yang diusulkan ditambahkan *anti-windup* untuk mengurangi efek *gradien* ekstrim tersebut.



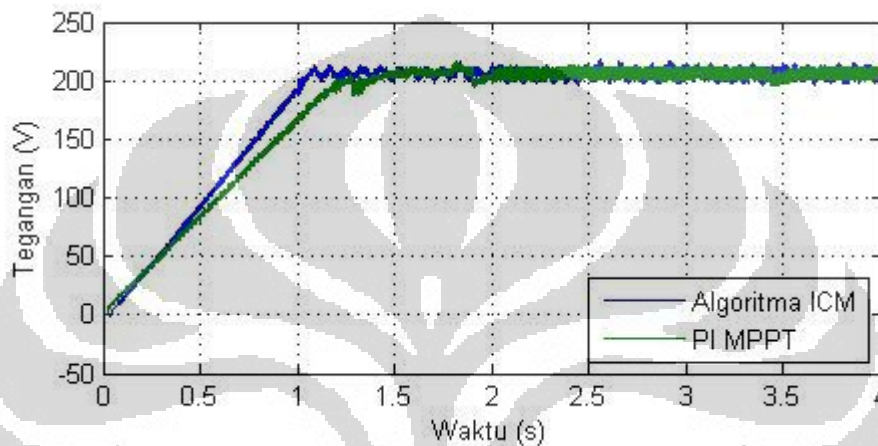
Gambar 4.21. I_{PV} Saat Terjadi Gagal Fungsi



Gambar 4.22. *Gradien* Saat Terjadi Gagal Fungsi

4.7 Kekurangan di *Current Source Region*

Pada *current source region*, kondisi lingkungan yang berbeda-beda memiliki nilai *gradien* yang cukup beragam untuk dapat disama-ratakan. Seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3 dan Gambar 2.4, kemiringan kurva *P-V* pada *current source region* lebih bervariasi dibandingkan daerah lainnya. Pengaruhnya dapat dilihat pada Gambar 4.23 berikut.



Gambar 4.23. Kekurangan di *Current Source Region*

Gambar 4.23 menunjukkan tegangan kerja sel surya, V_{PV} , pada radiasi matahari 200 W/m^2 dan suhu sel 298 K . Semakin kecil radiasi matahari maka kemiringan daerah *current source region* akan semakin landai, sesuai dengan Gambar 2.33. Kemiringan yang lebih landai menyebabkan nilai *gradien* yang akan menjadi *error* untuk masukan pengendali *PI MPPT* lebih kecil dibandingkan kondisi lingkungan standar. Hal tersebut menyebabkan besar perubahan tegangan yang dikeluarkan oleh pengendali menjadi kecil. Akibatnya, untuk radiasi matahari yang sangat kecil, algoritma *PI MPPT* memiliki waktu penjajakan yang lebih lambat dibandingkan kondisi lingkungan standar maupun algoritma *ICM*. Namun demikian, pada saat bekerja, titik kerja sel surya, V_{PV} , akan lebih sering berada di *control region*, sehingga hal tersebut tidak terlalu merugikan.

BAB 5 KESIMPULAN

- Pengendali *PI* dapat digunakan untuk *MPPT* dengan masukan *error* pengendali berupa *gradien* kurva *P-V* karakteristik sel surya.
- Sistem *MPPT* yang dirancang terdiri dari rangkaian *boost converter* yang terhubung ke sel surya, pembuat sinyal *PWM*, Pengendali tegangan masukan rangkaian *boost converter*, dan Blok *MPPT*.
- Sistem *MPPT* berdasarkan pengendali *PI* dapat memvariasikan perubahan V_{ref} untuk meningkatkan kualitas parameter statis maupun parameter dinamis sel surya.
- Pada *STC*, Model sel surya yang dibangun memiliki titik kerja maksimum 227,3 Volt.
- Berdasarkan simulasi, waktu yang dibutuhkan *MPPT ICM* untuk mencapai *MPP* pada *STC* jika tegangan inisial diset nol adalah 110 cycle, sedangkan waktu yang dibutuhkan *MPPT PI* yang diusulkan hanya 19 cycle.
- Berdasarkan simulasi, waktu yang dibutuhkan *MPPT ICM* untuk mencapai *MPP* pada *STC* jika tegangan inisial diset 260 Volt adalah 16 cycle, sedangkan waktu yang dibutuhkan *MPPT PI* yang diusulkan hanya 8 cycle.
- Berdasarkan simulasi, daya total yang dihasilkan *MPPT ICM* selama 4 detik, dimulai setelah *MPP* tercapai adalah 2016,8 Watt, sedangkan daya yang dihasilkan *MPPT PI* adalah 2017,3 Watt.

DAFTAR PUSTAKA

- Enslin, J. (1990). Maximum Power Point Tracking: a Cost Saving Necessity in Solar Energy Systems. *Industrial Electronics Society, 1990. IECON '90., 16th Annual Conference of IEEE* , 1073-1077.
- Esrarn, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , 22 (2), 439 - 449.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. *IEEE Transactions On Power Electronics* , 20 (4), 963-973.
- Green, M. A. (1982). *Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Hart, D. W. (1997). *Introduction to Power Electronics*. New Jersey: Prentics-Hall.
- Hegedus, S., & Luque, A. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Kyocera KC50T Datasheet. (t.thn.). Kyocera Corporation.
- Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., & Kang, Y. (2008). A Variable Step Size INC MPPT Method for p_v Systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , 55 (7), 2622 - 2628.
- Mei, Q., Shan, M., Liu, L., & Guerrero, J. M. (2011). A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for p_v Systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , 58 (6), 2427 - 2434.

- Nema, S., Nema, R. K., & Agnihotri, 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.
- Plegari, L., & Rizzo, R. (2010). Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. *Renewable Power Generation, IET* , 4 (4), 317 - 328.
- Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I.-B. (2009). *Process Identification and PID Control*. Singapore: Wiley-IEEE Press.
- Xiao, W., Dunford, W. G., Palmer, P. R., & Capel, A. (2007). Regulation of Photovoltaic Voltage. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , 54 (3), 1365 - 1374.
- Yi, K., & Fa, Y. L. (2009). The *Perturbation and Observation's* Method Based on the P-V Rate of Curve. *Computational Intelligence and Software Engineering, 2009. CiSE 2009. International Conference on*, (hal. 1-4). Baoding.