



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI DAN ANALISIS SISTEM MAXIMUM POWER POINT
TRACKER BERBASIS RANGKAIAN BOOST CONVERTER**

SKRIPSI

**WAYAN WICAK ANANDUTA
0706163685**

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

i

Universitas Indonesia



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI DAN ANALISIS SISTEM MAXIMUM POWER POINT
TRACKER BERBASIS RANGKAIAN BOOST CONVERTER**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**WAYAN WICAK ANANDUTA
0706163685**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Wayan Wicak Ananduta
NPM : 0706163685

Tanda Tangan :
Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Wayan Wicak Ananduta
NPM : 0706163685
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Simulasi dan Analisis Sistem Maximum Power Point Tracker berbasis Rangkaian Boost Converter

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Feri Yusivar M. Eng (.....)

Penguji : (.....)

Penguji : (.....)

Penguji : (.....)

Ditetapkan di :

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saya memohon maaf apabila terjadi kesalahan dalam penulisan skripsi ini. Saya juga menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan laporan seminar ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Feri Yusivar, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini,
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral,
3. Putu Desy, yang juga selalu memberikan dukungan di saat saya menghadapi masalah,
4. Yuddy Syaifudin, M. Yasil Farabi, dan Rian Suryadiningrat yang telah banyak membantu selama proses pengerjaan laporan seminar ini, dan
5. Sahabat-sahabat saya yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu atas segala dukungan yang telah diberikan.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga laporan seminar ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 13 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Wayan Wicak Ananduta
NPM : 0706163685
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**SIMULASI DAN ANALISIS SISTEM MAXIMUM POWER POINT
TRACKER BERBASIS RANGKAIAN BOOST CONVERTER**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di :
Pada tanggal :
Yang menyatakan

(Wayan Wicak Ananduta)

ABSTRAK

Nama : Wayan Wicak Ananduta
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Simulasi dan Analisis Sistem *Maximum Power Point Tracker* berbasis Rangkaian *Boost Converter* dengan Algoritma *Incremental Conductance Method*

Sistem *Maximum Power Point Tracker (MPPT)* merupakan sistem yang dapat membuat sel surya bekerja pada titik kerja optimal sehingga sel surya mampu menghasilkan daya maksimalnya. Pada penelitian ini, sistem MPPT menggunakan rangkaian *Boost Converter* sebagai pengendali tegangan sel surya dan algoritma *Incremental Conductance Method (ICM)* sebagai algoritma MPPT pencari titik kerja optimal. Proses perancangan sistem termasuk perancangan simulasi sistem telah diuraikan. Analisa dilakukan melalui simulasi yang dilakukan pada MATLAB/Simulink. Untuk menunjang simulasi, model sel surya juga dirancang dengan acuan dari sel surya KC50T produksi Kyocera. Sistem MPPT yang telah dirancang kemudian disimulasikan dan dilihat performanya. Berdasarkan hasil simulasi, sistem MPPT yang dirancang telah berhasil mencari titik kerja optimal model sel surya dan mampu merespon perubahan kondisi lingkungan dengan mencari titik kerja optimal yang baru. Sistem MPPT ini kemudian juga telah berhasil membuat sel surya bekerja pada titik kerja optimal tersebut. Sistem MPPT yang dirancang memiliki kualitas yang baik, dengan rasio osilasi sebesar 3,21%, waktu transien sebesar 0,27s, dan rasio daya 99,90%.

Kata kunci: MPPT, ICM, Boost Converter

ABSTRACT

Name : Wayan Wicak Ananduta
Study Program : Electrical Engineering
Title : Simulation and Analysis of Boost Converter Based Maximum Power Point Tracker System

The Maximum Power Point Tracker (MPPT) System is a system that works in order to make a photovoltaic works at its optimal work point where it produces the maximum power. In this research, the MPPT System uses a Boost Converter Circuit in order to control the output voltage of the photovoltaic and Incremental Conductance Method as the MPPT algorithm which will search the maximum power point. The design of the system has been proposed. The analysis of the system is by simulating the system in MATLAB/Simulink. In order to support the simulation, a photovoltaic model has also been proposed according to KC50T solar cell module from Kyocera. The MPPT System has been simulated and the performance of the system has been analyzed. Based on the simulation results, the MPPT System has successfully search the maximum power point (MPP) even when the environmental conditions are changed. It also can control the photovoltaic so that it works at its MPP. The quality of the MPPT System has been evaluated. It has Osilation Rasio of 3,21%, transient time of 0,27s, and Power Ratio of 99,90%.

Keywords: MPPT, ICM, Boost Converter

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR PERSAMAAN.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Metodologi Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Sel Surya (<i>Photovoltaic</i>).....	5
2.1.1 Prinsip Kerja Sel Surya.....	6
2.1.2 Persamaan Karakteristik Sel Surya.....	7
2.1.3 Modul Sel Surya.....	12
2.2 Algoritma <i>Incremental Conductance Method (ICM)</i>	12
2.3 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	14
2.4 Fungsi Alih dan Ruang Keadaan.....	18
2.5 Pengendali PI.....	20
2.6 Penalaan Metode Ciancone-Marlin.....	21
2.7 Sinyal PWM.....	23
2.8 Parameter Kualitas Sistem MPPT.....	25
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM MPPT.....	25
3.1 Rancangan Sistem MPPT dengan Boost Converter.....	26
3.2 Model Sel Surya.....	28
3.2.1 Kurva Karakteristik I-V dan P-V Model Sel Surya KC50T.....	30
3.2.2 Persamaan Keluaran Model Sel Surya.....	35
3.3 Algoritma <i>Incremental Conductance Method</i>	36
3.3.1 Diagram alir algoritma ICM.....	36
3.3.2 Uji Coba Algoritma ICM dengan Model Sel Surya.....	38
3.3.3 Uji Coba Algoritma ICM pada Perubahan Kondisi Lingkungan.....	42
3.4 Blok Pembuat Sinyal PWM.....	45
3.5 Model Boost Converter.....	46
3.5.1 Penentuan Nilai Komponen dan Tegangan Keluaran Boost Converter.....	51

3.5.2	Simulasi Rangkaian Boost Converter	53
3.5.3	Fungsi Alih Boost Converter	55
3.6	Blok Pengendali PI.....	56
3.6.1	Penalaan Pengendali PI dengan Metode Ciancone-Marlin.....	58
3.6.2	Simulasi Rangkaian Boost Converter dengan Blok Pengendali PI.....	59
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS.....		62
4.1	Analisis Kestabilan Sistem.....	63
4.2	Diagram Blok Simulasi Sistem MPPT.....	65
4.3	Simulasi Sistem MPPT pada Kondisi Lingkungan Tetap.....	67
4.4	Simulasi Sistem pada Kondisi Lingkungan yang Berubah	71
4.4.1	Perubahan <i>Irradiance</i>	71
4.4.2	Perubahan Suhu Sel Surya	76
4.4.3	Perubahan <i>Irradiance</i> dan Suhu Sel Surya	80
4.5	Kualitas Sistem MPPT	83
4.5.1	Pengaruh Algoritma ICM.....	89
4.5.2	Pengaruh Komponen Boost Converter	91
4.6	Pengaruh Model Sel Surya terhadap Keluaran Sistem MPPT	97
BAB 5 KESIMPULAN		100
DAFTAR PUSTAKA		103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Gambar Proses Pembebasan Elektron oleh Foton.....	6
Gambar 2.2. Rangkaian Pengganti Sel Surya	8
Gambar 2.3. Kurva Karakteristik I-V dan P-V pada Sel Surya	11
Gambar 2.4. Rangkaian <i>Boost Converter</i>	15
Gambar 2.5. Rangkaian <i>Boost Converter</i> ketika <i>switch</i> tertutup	15
Gambar 2.6. Rangkaian <i>Boost Converter</i> ketika <i>switch</i> terbuka	16
Gambar 2.7. Gambar Proses Analisis PRC	23
Gambar 2.8. Sinyal PWM	23
Gambar 2.9. Pembentukan Sinyal PWM	24
Gambar 3.1. Rancangan Sistem MPPT	26
Gambar 3.2. Diagram Blok Model Sel Surya	29
Gambar 3.3. Diagram Blok Simulasi Model Sel Surya	31
Gambar 3.4. Kurva I-V KC50T pada Kondisi Pengukuran Standar	32
Gambar 3.5. Kurva P-V KC50T pada Kondisi Pengukuran Standar	32
Gambar 3.6. Kurva I-V pada 15 Sel Surya Tersusun Seri	34
Gambar 3.7. Kurva P-V pada 15 Sel Surya Tersusun Seri	34
Gambar 3.8. Diagram Alir Algoritma ICM	37
Gambar 3.9. Diagram Blok Simulasi Algoritma ICM	39
Gambar 3.10. Grafik $V_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Algoritma ICM	39
Gambar 3.11. Grafik $I_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Algoritma ICM	40
Gambar 3.12. Grafik $P_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Algoritma ICM	41
Gambar 3.13. Diagram Blok Simulasi Algoritma ICM dengan λ Berubah-ubah	43
Gambar 3.14. Grafik $V_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Bagian 3.3.3	43
Gambar 3.15. Grafik $I_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Bagian 3.3.3	44
Gambar 3.16. Grafik $P_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Bagian 3.3.3	44
Gambar 3.19. Model Sistem MPPT dan Sel Surya	46
Gambar 3.17. Diagram Blok Simulasi Sinyal PWM	46
Gambar 3.18. Sinyal PWM	46
Gambar 3.20. Rangkaian Boost Converter	47
Gambar 3.21. Rangkaian Boost Converter <i>Switch</i> Terbuka	48
Gambar 3.22. Rangkaian Boost Converter <i>Switch</i> Tertutup	49
Gambar 3.23. Diagram Blok Simulasi Rangkaian Boost Converter	54
Gambar 3.24. Grafik $V_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Rangkaian Boost Converter	54
Gambar 3.25. Diagram Blok Lingkaran Tertutup Sistem MPPT	57
Gambar 3.26. Grafik $V_{PV}(t)$ Boost Converter dengan Perubahan Set Point	58
Gambar 3.27. Diagram Blok Simulasi Boost Converter dengan Pengendali PI	60
Gambar 3.28. Grafik $V_{PV}(t)$ Simulasi Boost Converter dengan Pengendali PI	61
Gambar 3.29. Grafik $D(t)$ Simulasi Boost Converter dengan Pengendali PI	62
Gambar 4.1. Diagram Blok Lingkaran Tertutup Sistem MPPT	64
Gambar 4.2. Diagram Bode Fungsi Alih Sistem MPPT $H(s)$	65
Gambar 4.3. Diagram Blok Simulasi Sistem MPPT	66
Gambar 4.4. $V_{PV}(t)$ pada Kondisi Pengukuran Standar	68
Gambar 4.5. $I_{PV}(t)$ pada Kondisi Pengukuran Standar	69

Gambar 4.6. $P_{PV}(t)$ pada Kondisi Pengukuran Standar	69
Gambar 4.7. $V_{PV}(t)$ pada Simulasi <i>Irradiance</i> Bervariasi.....	72
Gambar 4.8. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi <i>Irradiance</i> Bervariasi	72
Gambar 4.9. $P_{PV}(t)$ pada Simulasi <i>Irradiance</i> Bervariasi	73
Gambar 4.10. Kurva I-V dan P-V pada <i>Irradiance</i> yang Bervariasi	75
Gambar 4.11. $V_{PV}(t)$ pada Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi	77
Gambar 4.12. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi.....	78
Gambar 4.13. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi.....	78
Gambar 4.14. Kurva I-V dan P-V pada Suhu Sel Surya yang Bervariasi.....	79
Gambar 4.15. $V_{PV}(t)$ pada Simulasi λ dan T Bervariasi.....	80
Gambar 4.16. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi λ dan T Bervariasi	81
Gambar 4.17. $P_{PV}(t)$ pada Simulasi λ dan T Bervariasi	81
Gambar 4.18. Pengukuran Besaran Osilasi pada Grafik $V_{PV}(t)$	84
Gambar 4.19. Pengukuran Waktu Transien pada Grafik $V_{PV}(t)$	86
Gambar 4.20. Grafik $V_{PV}(t)$ dengan 3 ΔV berbeda	89
Gambar 4.21. Grafik $V_{PV}(t)$ pada 3 Nilai C_1 yang Bervariasi.....	93
Gambar 4.22. Grafik $V_{PV}(t)$ pada 3 Nilai L yang Bervariasi	93
Gambar 4.23. Diagram Bode H(s) dengan C_1 yang bervariasi	95
Gambar 4.24. Diagram Bode H(s) dengan L Bervariasi.....	96
Gambar 4.25. Grafik $V_{PV}(t)$ dengan τ bervariasi	98
Gambar 4.26. Diagram Bode H(s) dengan τ Bervariasi.....	99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tabel Penalaan Ciancone-Marlin.....	22
Tabel 3.1. Karakteristik KC50T (Kyocera KC50T Datasheet).....	30
Tabel 3.2. Tabel Variabel Tetap Boost Converter	52
Tabel 4.1 Tabel Nilai Parameter Sistem MPPT	67
Tabel 4.2. Variasi Kondisi <i>Irradiance</i>	71
Tabel 4.3. Pengolahan Data Simulasi <i>Irradiance</i> Bervariasi.....	75
Tabel 4.4. Variasi Kondisi Suhu Sel Surya.....	76
Tabel 4.5. Pengolahan Data Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi	79
Tabel 4.6. Variasi Kondisi <i>Irradiance</i> dan Suhu Sel Surya.....	80
Tabel 4.7. Pengolahan Data Simulasi λ dan T Bervariasi.....	82
Tabel 4.8. Rasio Osilasi Sistem MPPT pada Tiap Simulasi	85
Tabel 4.9. Waktu Transien Sistem MPPT pada Tiap Simulasi.....	86
Tabel 4.10. Rasio Daya Sistem MPPT pada Tiap Simulasi.....	87
Tabel 4.11. Perbandingan Parameter Kualitas MPPT pada 3 ΔV Berbeda	90
Tabel 4.12. Perbandingan Parameter Kualitas MPPT pada L dan C_1 Bervariasi	92
Tabel 4.13. PM dan GM H(s) pada L Bervariasi	96
Tabel 4.14. Parameter Kualitas Sistem MPPT pada 3 variasi τ	97

DAFTAR PERSAMAAN

(2.1).....	8
(2.2).....	9
(2.3).....	9
(2.4).....	9
(2.5).....	9
(2.6).....	9
(2.7).....	12
(2.8).....	14
(2.9).....	14
(2.10).....	14
(2.11).....	16
(2.12).....	16
(2.13).....	16
(2.14).....	16
(2.15).....	16
(2.16).....	17
(2.17).....	17
(2.18).....	17
(2.19).....	17
(2.20).....	17
(2.21).....	17
(2.22).....	18
(2.23).....	18
(2.24).....	19
(2.25).....	19
(2.26).....	19
(2.27).....	20
(2.28).....	20
(2.29).....	21
(2.30).....	21
(2.31).....	21
(2.32).....	21
(2.33).....	22
(2.34).....	22
(2.35).....	22
(2.36).....	24
(2.37).....	24
(2.38).....	25
(2.39).....	25
(3.1).....	28
(3.2).....	35
(3.3).....	35
(3.4).....	35

(3.5).....	35
(3.6).....	36
(3.7).....	48
(3.8).....	48
(3.9).....	48
(3.10).....	48
(3.11).....	48
(3.12).....	49
(3.13).....	49
(3.14).....	49
(3.15).....	49
(3.16).....	50
(3.17).....	50
(3.18).....	55
(3.19).....	56
(3.20).....	56
(3.21).....	56
(3.22).....	57
(3.23).....	57
(3.24).....	59
(4.1).....	64
(4.2).....	64
(4.3).....	64

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, penelitian mengenai sumber energi terbarukan sangat gencar dilakukan. Sumber-sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan antara lain sumber energi tenaga angin, sumber energi tenaga air, hingga sumber energi tenaga matahari. Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial adalah sumber energi tenaga matahari. Cahaya matahari dapat digunakan dan dikonversi menjadi energi listrik melalui sel surya. Kelebihan yang dimiliki oleh sumber energi tenaga matahari adalah cahaya matahari dapat diperoleh dengan mudah, gratis, dan dalam jumlah yang banyak setiap hari.

Oleh karena itu, pengembangan sel surya saat ini sedang menjadi topik hangat dalam penelitian. Prinsip dasar dari sel surya adalah efek fotolistrik. Efek fotolistrik ini sendiri sudah mulai diteliti sejak tahun 1839 hingga akhirnya pada tahun 1959 *Bell Laboratory* mengembangkan dan mempublikasikan sel surya pertama yang terbuat dari silikon dengan efisiensi 6% yang kemudian dengan cepat berkembang hingga memiliki efisiensi 10% (Goetzberger & Hoffman, 2005).

Permasalahan utama yang terdapat pada sel surya adalah efisiensi dari sel surya yang cukup kecil, dibandingkan dengan pembangkit listrik dari sumber lainnya. Efisiensi Sel Surya yang ada telah komersial dan dijual di pasar saat ini hanya berkisar 10-15%, dengan rekor efisiensi terbesar dalam skala laboratorium sebesar 39% (Wibowo, 2007). Oleh karena itu para peneliti saat ini fokus pada cara meningkatkan efisiensi sel surya tersebut.

Salah satu aspek penting yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dari sel surya tersebut adalah adanya sistem pencari daya maksimum (*Maximum Power Point Tracker*) pada sel surya. Sesuai dengan namanya, sistem *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) bertujuan untuk mencari titik kerja sel surya dimana sel

surya mampu menghasilkan daya maksimum dan membuat sel surya bekerja di titik kerja optimal tersebut.

Algoritma MPPT adalah bagian utama dari sistem MPPT. Algoritma MPPT adalah algoritma yang berfungsi untuk mencari titik kerja optimal sel surya. Saat ini sudah banyak algoritma MPPT yang digunakan, antara lain *Perturbation and Observation Method (P&O)*, *Incremental Conductance Method (ICM)*, *Constant Voltage*, *Parasitic Capacitance*, *Fuzzy logic*, sampai *Neural Network*. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri. Metode yang banyak digunakan adalah *Incremental Conductance Method (ICM)*. Metode ini sederhana namun tetap memiliki kemampuan dalam menentukan titik daya maksimum dengan baik tanpa terpengaruh berbagai perubahan pada sel surya, seperti penuaan, perubahan kondisi lingkungan, penurunan kemampuan sel surya (Liu & Lopes, 2004).

Algoritma MPPT ini diimplementasikan pada suatu rangkaian DC-DC Converter yang berfungsi untuk mengendalikan sel surya agar dapat bekerja pada titik kerja yang ditentukan oleh algoritma MPPT. Ada berbagai jenis rangkaian DC-DC Converter, seperti Boost Converter, Buck Converter, Buck-Boost Converter, dan Cuck Converter (Hart, 1997). Tiap jenis converter memiliki fungsi dan karakteristik masing-masing. Boost Converter adalah DC-DC Converter yang banyak digunakan pada sistem MPPT.

Berdasarkan penjelasan di atas, maka pada skripsi ini, penulis melakukan penelitian mengenai sistem MPPT pada sel surya. Sistem MPPT yang penulis analisa adalah sistem MPPT dengan algoritma ICM sebagai algoritma MPPT dengan rangkaian Boost Converter sebagai rangkaian pengendali titik kerja sel surya.

1.2 Perumusan Masalah

Sistem MPPT yang dirancang, disimulasikan, dan dianalisis pada penelitian ini adalah sistem MPPT dengan algoritma ICM sebagai algoritma MPPT dan

rangkaian Boost Converter sebagai rangkaian pengendali tegangan sel surya. Sistem MPPT ini akan digunakan pada suatu modul sel surya yang terhubung pada jaringan listrik PLN atau disebut juga dengan istilah *Grid-Connected Photovoltaic*. Modul sel surya yang digunakan terdiri atas 15 panel sel surya Kyocera KC50T. Dengan adanya sistem MPPT ini, diharapkan modul sel surya ini mampu bekerja pada titik kerja optimalnya. Sedangkan keluaran sistem MPPT ini kemudian akan masuk ke dalam suatu inverter yang akan mengubah tegangan DC yang dikeluarkan sel surya menjadi listrik AC yang serupa dengan listrik pada jaringan PLN, yaitu memiliki tegangan maksimum 220 Volt. Oleh karena akan masuk ke sistem inverter, keluaran yang diharapkan dari sistem MPPT ini adalah suatu tegangan listrik dengan nilai konstan.

1.3 Batasan Penelitian

Penulis membatasi penelitian pada sistem MPPT dengan basis rangkaian Boost Converter dengan algoritma ICM sebagai algoritma MPPT. Pembahasan di dalam penelitian ini mengenai proses rancang bangun sistem MPPT, simulasi sistem MPPT, dan analisis mengenai sistem MPPT tersebut berdasarkan hasil simulasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Memahami fungsi sistem MPPT pada sel surya.
2. Memahami algoritma ICM sebagai algoritma MPPT dan rangkaian Boost Converter sebagai basis sistem MPPT.
3. Memahami dan merancang simulasi sistem MPPT.
4. Mengetahui kualitas sistem MPPT yang dibangun dan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kualitas sistem MPPT tersebut.

1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian yang penulis lakukan adalah melalui simulasi pada MATLAB/Simulink. Seluruh sistem MPPT dibuat blok-blok simulasinya pada

MATLAB/Simulink dengan menggunakan C-Mex sebagai alat utama untuk membuat program-program simulasi. Simulasi yang dibangun didasarkan pada studi pustaka yang penulis lakukan. Maka kemudian pembahasan mengenai sistem MPPT adalah berdasarkan literatur dan simulasi yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada Bab 1, penulis membahas mengenai latar belakang mengapa penulis melakukan penelitian ini, tujuan penelitian, batasan penelitian, dan metodologi penelitian yang penulis lakukan. Pada Bab 2, penulis memberikan dasar teori yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini. Pada bab ini dijelaskan mengenai sel surya, algoritma MPPT, rangkaian Boost Converter, pengendali PI, dan sinyal PWM. Selain itu dijelaskan pula mengenai persamaan ruang keadaan, fungsi alih, dan diagram bode yang digunakan untuk melakukan analisis sistem. Pada Bab 3, penulis membahas mengenai proses perancangan sistem MPPT, dimana terdapat pembahasan mendalam mengenai tiap bagian dari sistem MPPT. Pada Bab 4, penulis membahas mengenai simulasi sistem MPPT yang dibuat dan analisis pada sistem MPPT tersebut termasuk analisis kualitas sistem MPPT dan faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas sistem MPPT tersebut. Skripsi ini diakhiri pada Bab 5 yang berisi mengenai 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 bahan tersebut dipaparkan pada cahaya. Selama cahaya mengenai bahan semikonduktor tersebut maka sel surya ini akan selalu menghasilkan energi listrik, dan ketika sel surya tidak dipaparkan cahaya, sel surya ini berhenti menghasilkan energi listrik. Bahkan beberapa sel surya mampu tetap menghasilkan energi (Luque & Hegedus, 2003).

Sel surya ini merupakan teknologi yang sangat menjanjikan tidak hanya bagi para peneliti namun juga bagi masyarakat umum. Hal ini karena Sel surya memiliki beberapa keuntungan antara lain:

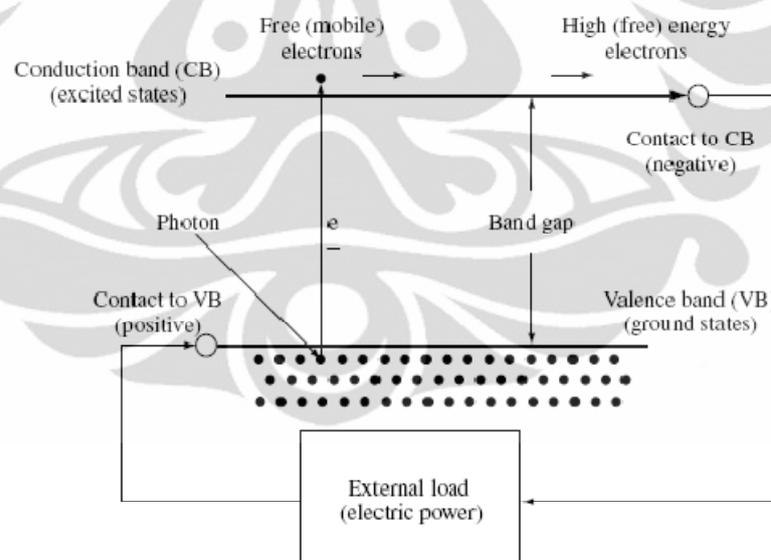
1. Merupakan konversi langsung energi cahaya menjadi energi listrik
2. Tidak menggunakan sistem mekanis yang menimbulkan gangguan
3. Tidak memerlukan suhu tinggi
4. Tidak menghasilkan polusi
5. Mempunyai umur yang panjang
6. Sumber energinya gratis untuk diperoleh
7. Sumber energi yang fleksibel yang mampu menghasilkan daya dari mikrowatt hingga megawatt (Goetzberger & Hoffman, 2005).

Sedangkan beberapa kelemahan dari sel surya antara lain (Luque & Hegedus, 2003):

1. Biaya instalasi tinggi
2. Kurangnya keandalan sistem penunjang termasuk sistem penyimpanan energi
3. Kurang tersedianya sistem yang dapat terintegrasi dengan Sel Surya secara komersial saat ini
4. Rendahnya efisiensi secara ekonomis

2.1.1 Prinsip Kerja Sel Surya

Sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor memiliki elektron yang terikat dengan lemah pada suatu pita energi yang disebut sebagai pita valensi. Ketika ada energi yang lebih besar dari batas *threshold* energi (*band gap energy*) yang diberikan pada elektron valensi tersebut, maka ikatan pada elektron tersebut putus sehingga elektron tersebut dapat bebas bergerak pada suatu pita energy baru yang disebut sebagai pita konduksi yang dapat menghasilkan listrik melalui bahan tersebut. Elektron bebas yang berada pada pita konduksi dipisahkan dari pita valensi oleh suatu pita pemisah. Energi yang dibutuhkan untuk membebaskan elektron ini dapat dihasilkan dari foton, yang merupakan partikel dari cahaya.



Gambar 2.1. Gambar Proses Pembebasan Elektron oleh Foton
(Luque & Hegedus, 2003)

Gambar 2.1 di atas menggambarkan apa yang terjadi pada Sel Surya ketika dipaparkan pada cahaya. Foton-foton yang merupakan partikel dari

cahaya akan menabrak elektron dan ketika energi foton tersebut cukup maka akan mendorong elektron keluar dari pita valensi (*VB*), melewati pita pemisah (*band gap*) ke pita konduksi (*CB*). Kemudian ada suatu *selective contact* yang mengumpulkan elektron pada pita konduksi dan menggerakkan elektron tersebut. Elektron yang bergerak inilah kemudian disebut sebagai arus listrik. Energi dari elektron-elektron ini kemudian digunakan sebagai energi listrik untuk mengerjakan berbagai hal, sebelum kemudian disimpan kembali ke pita valensi melalui *selective contact* yang kedua.

Sel surya juga sering dianggap memiliki suatu *pn junction* yang muncul karena adanya "*doping*". *Doping* ini menyebabkan salah satu *selective contact* menjadi sisi p (banyak muatan positif) dan yang satunya menjadi sisi n (banyak muatan negatif). Pemodelan dan pemahaman prinsip kerja sel surya menjadi lebih sederhana dan mudah dengan menggunakan konsep *pn junction* ini.

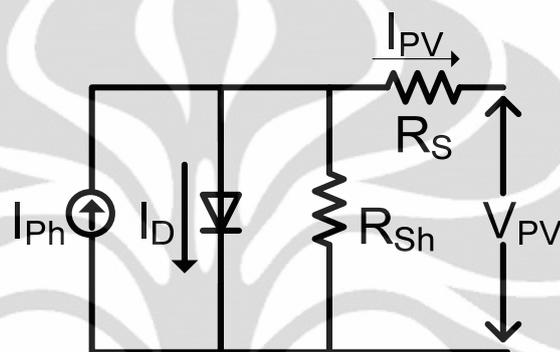
Untuk aplikasi yang sebenarnya, sel surya dalam jumlah yang banyak saling dihubungkan dan disatukan menjadi satu unit yang disebut sebagai Modul Sel Surya. Modul Sel Surya ini sendiri tidak hanya terdiri sel-sel surya, tetapi juga terdiri atas peralatan elektronik yang dibutuhkan untuk melakukan koneksi antara Modul Sel Surya dengan sistem lainnya dan tergantung pada sistem Modul Sel Surya tersebut, yang antara lain:

1. Suatu elemen penyimpanan energi untuk Modul Sel Surya yang berdiri sendiri.
2. *Grid* pada Modul Sel Surya dengan sistem *grid connected*
3. Beban AC atau beban DC sesuai dengan *DC/DC converter* atau *DC/AC converter* yang digunakan (Castaner & Silvester, 2002).

2.1.2 Persamaan Karakteristik Sel Surya

Berbagai penelitian yang mempelajari sel surya dan aplikasinya menggunakan model rangkaian listrik yang ekuivalen dengan sel surya

untuk mendeskripsikan hubungan antara arus keluaran dan tegangan keluaran sel surya. Rangkaian ekuivalen dari sel surya ini terdiri atas sumber arus yang dihasilkan dari proses konversi, sebuah diode, sebuah resistor parallel, dan sebuah resistor seri (Tsai, Tu, & Su, 2008). Gambar 2.2 berikut ini adalah gambar rangkaian ekuivalen dari sebuah sel surya:



Gambar 2.2. Rangkaian Pengganti Sel Surya

I_{Ph} adalah arus yang dihasilkan oleh sel surya hasil konversi dari energi matahari. Berdasarkan penjelasan pada bagian prinsip kerja, sel surya memiliki suatu *pn junction* yang direpresentasikan oleh sebuah diode, dimana arus yang mengalir pada diode tersebut adalah I_D . Sedangkan R_S adalah hambatan yang merepresentasikan sebagai daya yang terbuang (*losses*) karena resistivitas bahan dan R_{Sh} adalah hambatan yang merepresentasikan daya yang terbuang karena adanya hubung singkat pada daerah emitor atau karena adanya *shunt* sepanjang batasan sel. Keluaran dari sel surya ini adalah arus I_{PV} dan tegangan V_{PV} .

Dengan menggunakan analisa menggunakan Hukum Arus Kirchoff pada rangkaian ekuivalen tersebut, maka rangkaian tersebut dapat direpresentasikan menjadi persamaan sebagai persamaan (2.1) berikut:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (2.1)$$

Karena arus I_{ph} adalah arus yang dihasilkan dari proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik, maka arus I_{ph} ini nilainya berubah-ubah tergantung pada perubahan *irradiance* (λ) dan suhu sel surya (T_C). *Irradiance* adalah turunan radiasi cahaya terhadap waktu yang menyatakan daya yang dihasilkan dari radiasi elektromagnetik cahaya pada suatu permukaan. Berikut ini adalah persamaan yang merepresentasikan hubungan I_{ph} dengan λ dan T_C .

$$I_{Ph} = (I_{SC} \lambda / \lambda_{ref}) + K_I(T_C - T_{ref}) \quad (2.2)$$

I_D adalah arus yang mengalir pada dioda dan memiliki persamaan yaitu:

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{AKT_c} \right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

I_S adalah arus saturasi dari sel surya dan memiliki hubungan dengan suhu sel surya sesuai dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_G \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{kA} \right) \quad (2.4)$$

Sementara itu, arus I_{RS} yang merupakan arus *reverse saturation* dapat diperoleh berdasarkan persamaan:

$$I_{RS} = I_{SC} / (e^{\frac{qV_{oc}}{AKT_c}} - 1) \quad (2.5)$$

Maka persamaan (2.1) dapat ditulis seperti persamaan (2.6) berikut untuk memperoleh persamaan karakteristik dari I_{PV}

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{AKT_c}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{R_{Sh}} \quad (2.6)$$

Berikut ini adalah keterangan variabel yang terdapat pada persamaan (2.1) sampai (2.6).

- I_{PV} : Arus keluaran sel surya (Ampere)
- I_{Ph} : Arus hasil konversi energi (Ampere)
- I_O : Arus saturasi sel surya (Ampere)
- V_{PV} : Tegangan keluaran sel surya (Volt)
- I_{SC} : Arus hubung singkat rangkaian (Ampere)
- λ : *Irradiance* (KW/m²)

λ_{ref} : *Irradiance* referensi (KW/m^2)

T_C : Suhu sel surya (Kelvin)

K_I : Koefisien suhu

T_{ref} : Suhu referensi Sel Surya (Kelvin)

I_{RS} : Arus *reverse saturation* (Ampere)

K : konstanta Boltzman (1.38×10^{-23})

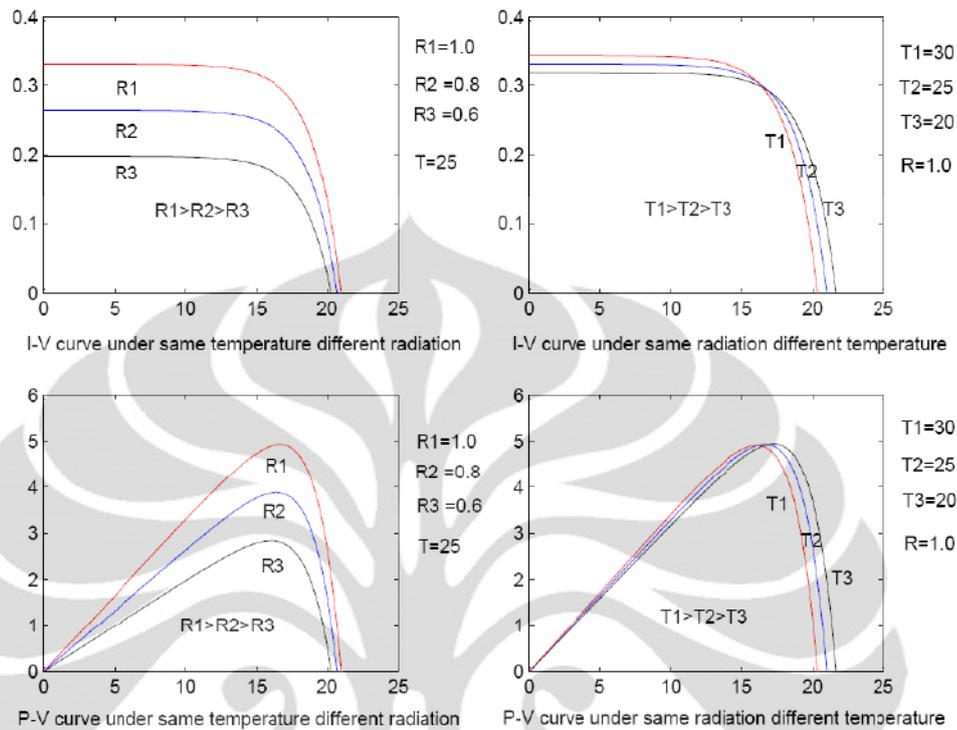
A : *Ideality factor*

q : Muatan elektron (1.6×10^{-19} Coloumb)

V_{OC} : Tegangan rangkaian terbuka (Volt)

I_{SC} dan V_{OC} diukur pada kondisi suhu $T_{\text{ref}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ dan *irradiance* $\lambda_{\text{ref}} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$. T_{ref} dan λ_{ref} merupakan kondisi pengukuran standar yang terdefinisi pada IEC 61215 International Standard. Nilai I_{SC} dan V_{OC} ini dapat diketahui melalui *datasheet* sel surya tersebut. Sedangkan faktor idealitas (A) memiliki nilai yang berbeda tergantung pada jenis material yang digunakan sebagai bahan semikonduktor sel surya, pada umumnya berkisar antara 1 dan 2. (Tsai, Tu, & Su, 2008).

Melalui persamaan karakteristik sel surya di atas maka kemudian dapat diperoleh kurva hubungan antara arus keluaran (I_{PV}) dan tegangan keluaran (V_{PV}) serta kurva hubungan antara daya keluaran (P_{VP}) dengan tegangan keluaran V_{PV} dalam grafik seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kurva Karakteristik I-V dan P-V pada Sel Surya (Yi & Lu fa, 2009)

Seperti yang dapat dilihat dari Gambar 2.3 di atas, grafik hubungan antara I dan V memiliki bentuk seperti 2 gambar teratas, sedangkan grafik hubungan antara P dan V memiliki bentuk seperti 2 gambar di bawahnya. Grafik kiri atas menunjukkan 3 buah kurva I(V) yang terbentuk dengan nilai *irradiance* (λ) yang berbeda-beda dengan suhu yang dijaga konstan. Sedangkan grafik kiri bawah menunjukkan 3 buah kurva P(V) dengan nilai λ yang bervariasi. Variasi nilai λ dapat dilihat pada keterangan grafik dimana satuan dari parameter λ tersebut adalah kW/m^2 . Grafik kanan atas menunjukkan 3 buah kurva I(V) yang terbentuk untuk nilai suhu (T) yang berbeda dengan nilai *irradiance* dijaga konstan, sedangkan grafik kanan bawah menunjukkan kurva P(V) dengan variasi suhu (T) tersebut. Variasi nilai T juga dapat dilihat pada keterangan grafik, dimana satuan dari T adalah $^{\circ}\text{C}$.

Grafik I(V) menunjukkan bahwa Sel Surya dapat beroperasi pada tegangan dan arus keluaran yang berbeda-beda dengan daerah operasi yang cukup luas. Grafik P(V) menunjukkan daya keluaran Sel Surya yang dihasilkan untuk tiap daerah operasi tegangan keluaran. Dengan bentuk grafik P(V) seperti Gambar 2.3 di atas dapat disimpulkan bahwa tiap Sel Surya memiliki titik tegangan operasi optimal dimana pada titik tersebut daya keluaran yang dihasilkan oleh Sel Surya berada pada nilai maksimal. Titik tegangan operasi optimal ini bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan (nilai suhu dan iradiasi). Hal ini dapat dilihat pada kedua grafik P(V).

2.1.3 Modul Sel Surya

Daya yang dihasilkan oleh satu sel surya saja tidaklah cukup besar. Oleh karena itu, biasanya sel-sel surya digabungkan dalam suatu modul sel surya agar mampu menghasilkan daya yang cukup besar dan dapat digunakan. Suatu Modul Sel Surya terdiri atas beberapa sel surya yang dihubungkan baik secara seri ataupun paralel tergantung pada konfigurasi yang digunakan. Berdasarkan (Tsai, Tu, & Su, 2008), bila terdapat sejumlah N_P sel surya yang terpasang paralel dan sejumlah N_S sel surya yang terpasang seri pada suatu modul sel surya, maka modul sel surya tersebut memiliki persamaan karakteristik seperti pada persamaan (2.7) berikut:

$$I_{PV} = N_P I_L - N_P I_o \left(e^{\frac{q(V_{PV}/N_S + R_S I_{PV}/N_P)}{AKT_c}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} N_P / N_S + R_S I_{PV}}{R_{Sh}} \quad (2.7)$$

2.2 Algoritma Incremental Conductance Method (ICM)

Sel surya dapat memiliki titik kerja yang berubah-ubah sesuai dengan grafik hubungan I_{PV} dan V_{PV} pada Gambar 2.3 di atas. Selain itu, perubahan suhu atau *irradiance* juga akan menyebabkan kurva I_{PV} - V_{PV} berubah. Agar sel surya ini dapat terus bekerja pada titik optimalnya, yaitu titik dimana daya yang dihasilkan

maksimal, maka diperlukan suatu algoritma yang mampu menemukan titik operasi optimal sel surya. Algoritma ini disebut sebagai algoritma *Maximum Power Point Tracker (MPPT)*.

Saat ini sudah ada banyak algoritma MPPT yang dirancang untuk menemukan titik kerja optimum dari sel surya. (Schmid & Schmidt, 2003) mengelompokkan algoritma MPPT yang ada dalam 2 kelompok, yaitu:

1. MPPT tak langsung

MPPT jenis ini memiliki algoritma untuk mengestimasi nilai tegangan MPP melalui pengukuran dan asumsi yang sederhana. Beberapa contohnya antara lain:

- Tegangan operasi dari sel surya diganti-ganti tiap musim secara manual. Selama musim dingin tegangan MPP disetel ke nilai yang lebih tinggi karena terjadi penurunan suhu sel surya.
- Tegangan operasi dari sel surya disetel berdasarkan suhu dari Modul Sel Surya secara manual
- Tegangan operasi dari sel surya diperoleh dari menghitung tegangan *open-circuit* lalu dikali dengan suatu konstanta, misalnya 0,8, dimana tegangan *open-circuit* diukur secara periodik.

Kelebihan dari MPPT jenis ini adalah kesederhanaannya. Namun dengan metode ini, nilai tegangan operasi optimal yang diperoleh hanya berupa nilai estimasi dan metode ini tidak dapat beradaptasi ketika terjadi perubahan kinerja sel surya karena umur sel surya.

2. MPPT langsung

MPPT jenis ini menentukan tegangan operasi optimal berdasarkan pengukuran arus keluaran dan tegangan keluaran atau daya keluaran secara langsung. Hal ini membuat MPPT ini mampu beradaptasi ketika terjadi perubahan performa dari Modul sel surya tersebut. Yang termasuk contoh dari MPPT jenis ini adalah:

- *Perturbation and Observation Method (P&O)*
- *Incremental Conductance Method (ICM)*

Dengan kemampuan dari MPPT jenis ini, tentu MPPT jenis ini akan menghasilkan nilai tegangan operasi optimal yang lebih akurat dibandingkan dengan MPPT jenis tak langsung.

Metode *Incremental Conductance Search (ICM)* merupakan jenis MPPT langsung. Metode penentuan titik daya maksimum atau titik tegangan operasi optimal dengan memanfaatkan sifat bahwa suatu fungsi, dalam hal ini adalah fungsi daya terhadap tegangan, akan mencapai titik maksimum ketika gradiennya bernilai 0. Atau sesuai dengan persamaan:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.8)$$

Karena $P = I.V$, maka:

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

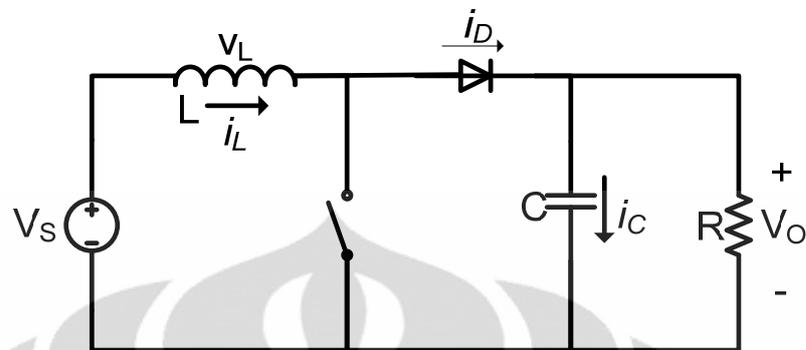
$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.10)$$

Algoritma ICM ini akan meningkatkan atau menurunkan nilai tegangan operasi hingga persamaan (2.10) tercapai (Yan, Fei, Jinjun, & Shanxu, 2008). Namun karena algoritma ICM ini memberikan peningkatan dan penurunan nilai tegangan operasi secara konstan, maka nilai tegangan operasi yang tercapai akan beresilasi disekitar titik tegangan operasi optimal.

2.3 Rangkaian Boost Converter

Boost Converter adalah suatu *DC-DC converter* yang menggunakan kerjanya dengan membuka dan menutup suatu *switch* secara periodik (Hart, 1997). Dikatakan sebagai Boost Converter karena tegangan keluaran dari rangkaian ini lebih besar daripada tegangan masukannya.

Suatu rangkaian Boost Converter terdiri atas induktor, kapasitor, resistor, diode dan switch. Rangkaian dari suatu Boost Converter adalah seperti pada gambar 2.4 sebagai berikut:

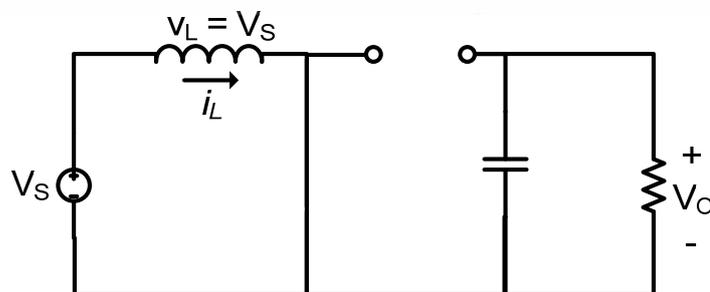


Gambar 2.4. Rangkaian *Boost Converter*

Hart (1997) juga lebih jauh menjelaskan mengenai prinsip kerja rangkaian ini melalui analisa rangkaian ini ketika switch terbuka dan switch tertutup. Dalam analisa yang dilakukan, asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Rangkaian ini dapat mencapai kondisi tunak (*steady-state*).
2. Periode dari *switching* adalah T dimana *switch* tertutup selama waktu DT dan terbuka selama waktu $(1-D)T$ dimana D adalah *duty cycle*.
3. Arus yang melalui induktor adalah arus kontinyu.
4. Kapasitas kapasitor dianggap sangat besar sehingga tegangan keluaran terjaga constant pada nilai tegangan V_o .
5. Seluruh komponen ideal.

Ketika *switch* tertutup, maka rangkaian ekuivalen dari rangkaian Boost Converter ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5. Rangkaian *Boost Converter* ketika *switch* tertutup

Ketika switch tertutup, maka diode berada pada mode *reverse biased*. Berdasarkan Hukum Tegangan Kirchoff pada *loop* tertutup yang berisi sumber, induktor dan *switch* yang tertutup diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \text{ atau } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (2.11)$$

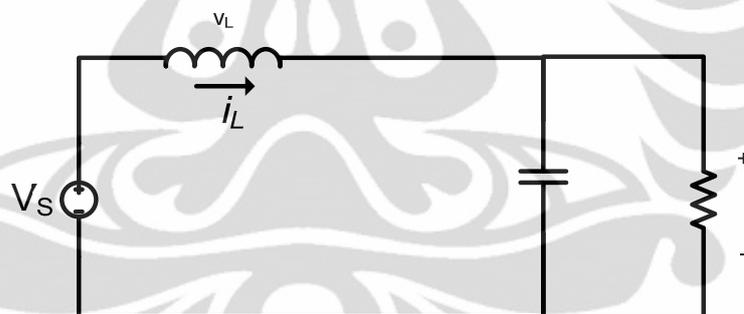
Karena besarnya perubahan arus konstan, maka arus meningkat secara linear ketika *switch* ditutup. Maka laju perubahan arus pada induktor menjadi:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L} \quad (2.12)$$

Maka dapat diperoleh nilai Δi_L pada saat *switch* tertutup:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.13)$$

Sedangkan pada saat *switch* terbuka, rangkaian ekuivalen dari rangkaian Boost Converter ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2.6. Rangkaian *Boost Converter* ketika *switch* terbuka

Ketika *switch* terbuka, arus yang tersimpan pada induktor mengalir karena diode menjadi berada pada mode *forward biased* untuk menyediakan jalur untuk arus induktor tersebut. Dengan mengasumsikan tegangan keluaran V_O konstan, maka tegangan pada induktor adalah:

$$v_L = V_S - V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.14)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2.15)$$

Karena laju perubahan arus pada induktor konstan, maka arus berubah secara linear ketika *switch* terbuka. Perubahan pada arus induktor ketika *switch* terbuka adalah:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (2.16)$$

Maka Δi_L pada saat *switch* terbuka adalah:

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} \quad (2.17)$$

Pada kondisi tunak (*steady-state*), total perubahan pada arus induksi harus bernilai nol. Maka berdasarkan persamaan (2.13) dan (2.18) dapat diperoleh:

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{V_S DT}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.19)$$

Maka dapat diperoleh V_O :

$$V_O = \frac{V_S}{1-D} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) menunjukkan hubungan antara V_O dan V_S pada rangkaian Boost Converter. Jika *switch* selalu terbuka dan D bernilai nol, maka tegangan keluaran akan bernilai sama dengan tegangan masukan, dan semakin besar nilai D , maka tegangan keluaran akan semakin besar hingga ketika D bernilai 1 tegangan keluaran akan bernilai tak hingga. Namun nilai tak hingga tersebut hanya akan tercapai pada kondisi yang ideal, sedangkan pada kondisi yang sebenarnya, karena tiap komponen memiliki *losses*, hal tersebut tidak akan tercapai. Berdasarkan persamaan (2.20), dapat disimpulkan bahwa Boost Converter akan menghasilkan tegangan keluaran yang nilainya lebih besar atau sama dengan tegangan masukannya. Namun Boost Converter tidak dapat menghasilkan tegangan keluaran yang nilainya lebih kecil dibandingkan dengan tegangan masukannya.

Sementara itu, untuk menentukan nilai minimum induktansi (L_{min}) pada induktor yang digunakan agar Boost Converter dapat bekerja pada frekuensi *switching* f , maka dapat digunakan persamaan berikut:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (2.21)$$

Sedangkan nilai kapasitansi kapasitor dapat diperoleh berdasarkan persamaan untuk menentukan *ripple* tegangan yang diinginkan, sesuai dengan persamaan berikut:

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{D}{RCf} \quad (2.22)$$

2.4 Fungsi Alih dan Ruang Keadaan

Fungsi alih dan ruang keadaan adalah 2 buah metode yang digunakan untuk memodelkan, menganalisis, dan mendesain suatu sistem. Fungsi adalah suatu representasi matematis yang merupakan persamaan aljabar dari persamaan diferensial yang menghubungkan antara masukan dan keluaran dari suatu sistem. Persamaan diferensial antara masukan dan keluaran dapat diperoleh melalui pemodelan matematis ataupun penurunan teoritis dari sistem tersebut. Persamaan diferensial dalam domain waktu (t) tersebut kemudian diubah menjadi suatu persamaan aljabar dalam domain s melalui transformasi Laplace.

Bila diketahui masukan suatu sistem adalah $R(s)$ dan keluaran sistem tersebut adalah $C(s)$, maka fungsi alih dari sistem ini dapat dinyatakan sebagai $G(s)$ sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (2.23)$$

Melalui fungsi alih ini, informasi mengenai respon transien dan stabilitas sistem dapat diperoleh. Kemudian desain pengendali pada sistem juga dapat dilakukan melalui fungsi alih ini.

Kelebihan utama dari fungsi alih adalah informasi mengenai respon transien dan stabilitas sistem dapat dengan cepat diperoleh. Namun, kekurangan dari fungsi alih adalah fungsi alih hanya dapat digunakan pada sistem yang linear dan *time invariant* atau sistem yang dapat didekati dengan pendekatan tersebut.

Berbeda dengan fungsi alih, ruang keadaan selain dapat digunakan pada sistem yang linear dan *time invariant*, juga dapat digunakan pada sistem yang non linear, *time-varying*, dan multi input multi output. Persamaan ruang keadaan dari suatu sistem dapat dinyatakan pada persamaan (2.24) dan (2.25) berikut:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (2.25)$$

Dimana:

\mathbf{x} = vektor keadaan sistem

$\dot{\mathbf{x}}$ = turunan vektor keadaan terhadap waktu

\mathbf{y} = vektor keluaran sistem

\mathbf{u} = vektor masukan

\mathbf{A} = matriks sistem

\mathbf{B} = matriks masukan

\mathbf{C} = matriks keluaran

\mathbf{D} = matriks *feedforward*

Ruang keadaan dan fungsi alih memiliki hubungan sehingga jika terdapat suatu sistem yang linear dan *time invariant*, sistem tersebut dapat direpresentasikan dalam fungsi alih dan ruang keadaan. Representasi ruang keadaan dari sistem tersebut pun kemudian dapat ditransformasikan ke bentuk fungsi alih dan juga sebaliknya. Adapun proses transformasi dari ruang keadaan menjadi fungsi alih sistem dilakukan berdasarkan persamaan (2.26) berikut:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (2.26)$$

Analisis yang dapat dilakukan pada fungsi alih dan ruang keadaan sistem melingkupi analisis respon transien, analisis respon kondisi tunak, dan kestabilan sistem. Untuk analisis respon transien, terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan, antara lain:

- a. *Rise Time*(T_R): Waktu yang diperlukan respon untuk bergerak dari nilai 10% ke 90% dari nilai akhir respon.
- b. *Peak Time*(T_P): Waktu yang diperlukan untuk mencapai puncak pertama atau tertinggi.
- c. *Percent Overshoot*(%OS): Perbandingan antara besarnya *overshoot* dengan nilai akhir dari respon
- d. *Settling Time*(T_S): Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan tetap berada pada daerah 98% dari nilai akhir respon.

Sementara itu, respon pada kondisi tunak dapat dilihat melalui *error steady state* sistem berdasarkan persamaan:

$$e_{ss} = \frac{\text{Masukan} - \text{Nilai akhir respon}}{\text{Masukan}} \times 100\% \quad (2.27)$$

Analisis lain yang dapat dilakukan adalah melalui diagram bode sistem. Diagram bode merupakan representasi respon sistem terhadap perubahan frekuensi dan digambarkan melalui 2 grafik, yaitu grafik magnitude dan grafik fasa. Dari analisis melalui bode dapat diketahui kestabilan sistem. Batas kestabilan dari suatu sistem adalah pada saat fungsi alih memiliki magnitude 1 dan fasa -180° .

Selain itu, pengaruh magnitude dan fasa terhadap kestabilan sistem juga dapat diketahui melalui parameter Gain Margin dan Phase Margin. Gain Margin didefinisikan sebagai seberapa besar Gain (Penguatan) yang dapat diberikan sampai sistem mencapai kondisi tidak stabil. GM dapat dilihat melalui seberapa besar perbedaan Magnitude terhadap 0 dB ketika fasa sistem -180° . Sedangkan Phase Margin didefinisikan sebagai seberapa besar penambahan fasa yang dapat diberikan pada sistem sampai sistem mencapai kondisi tidak stabil. PM dapat dilihat melalui seberapa besar perbedaan fasa sistem terhadap -180° ketika Magnitude sistem 0 dB.

2.5 Pengendali PI

Pengendali PI (Proporsional-Integral) terdiri atas pengendali proporsional (P) dan kompesator integral murni (I). Kompensator integral murni adalah suatu pengendali sistem yang menggunakan sebuah integrator murni dengan menempatkan sebuah *pole* lingkaran terbuka pada di *origin* sehingga menaikkan tipe sistem dan membuat eror sistem menjadi nol. Pengendali PI ini mengalikan eror dengan suatu konstanta proporsional dan kemudian menjumlahkannya (Nise, 2008). Persamaan (2.28) berikut ini menunjukkan fungsi alih dari pengendali PI:

$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (2.28)$$

Dimana:

K_p = Konstanta proporsional

T_I = Konstanta waktu integral

Dengan adanya pengendali PI pada suatu sistem, maka eror sistem tersebut pada kondisi tunak adalah nol. Dengan demikian akan meningkatkan kualitas sistem.

2.6 Penalaan Metode Ciancone-Marlin

Ada banyak metode untuk mendesain pengendali PI, baik melalui fungsi alih sistem ataupun secara empiris melalui penalaan. Metode penalaan lebih sering digunakan karena lebih mudah dilakukan dibandingkan melalui analisis fungsi alih melalui Tempat Kedudukan Akar atau pun diagram Bode. Desain pengendali PI yang dilakukan pada sistem ini adalah melalui penalaan metode Ciancone-Marlin. Adapun langkah-langkah penalaan metode Ciancone-Marlin ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai parameter fungsi alih FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) dari sistem. Adapun fungsi alih FOPDT adalah:

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta_p s}}{\tau_p s + 1} \quad (2.29)$$

2. Menghitung *fractional deadtime* T_f berdasarkan persamaan (2.30) di bawah ini.

$$T_f = \frac{\theta_p}{\theta_p + \tau_p} \quad (2.30)$$

3. Menentukan μ' dan τ' berdasarkan tabel variabel penalaan Ciancone-Marlin di bawah ini
4. Menghitung konstanta K_P dari pengendali PI sesuai dengan persamaan (2.31)

$$K_P = \frac{\mu'}{K} \quad (2.31)$$

5. Menghitung konstanta T_I dari pengendali PI sesuai dengan persamaan (2.32)

$$T_I = \tau'(\theta_p + \tau_p) \quad (2.32)$$

Tabel 2.1. Tabel Penalaan Ciancone-Marlin
(Ciancone & Marlin, 1992)

T_f	μ'	τ'
0	1.1	0.23
0.1	1.1	0.23
0.2	1.8	0.23
0.3	1.1	0.72
0.4	1.0	0.72
0.5	0.8	0.70
0.6	0.59	0.67
0.7	0.42	0.60
0.8	0.32	0.53

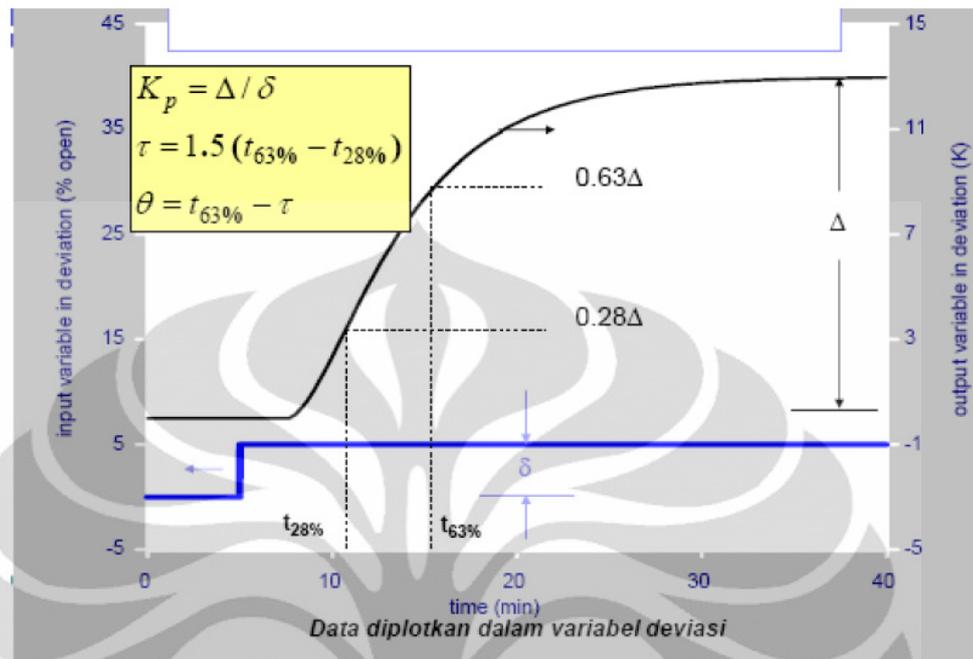
Penentuan FOPDT dapat dilakukan melalui analisis *Process Reaction Curve* (PRC). Untuk melakukan analisis PRC, sistem yang sudah berada pada kondisi tunak diubah nilai set pointnya. Kemudian dilihat respon sistem terhadap perubahan set point yang terjadi. Gambar 2.7 menunjukkan gambar analisis PRC.

Untuk lebih jelasnya, nilai parameter-parameter FOPDT dapat diperoleh berdasarkan persamaan (2.33), (2.34), dan (2.35) berikut ini

$$K = \frac{\Delta}{\delta} \quad (2.33)$$

$$\tau_p = 1,5(t_{63\%} - t_{28\%}) \quad (2.34)$$

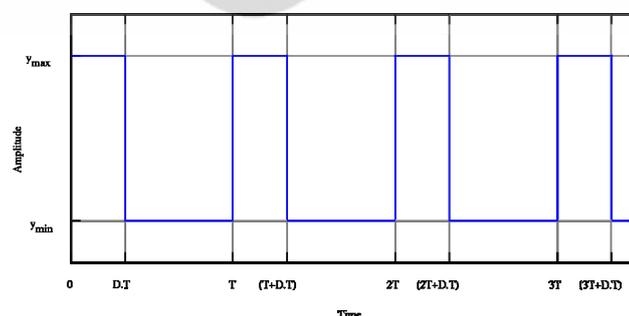
$$\theta_p = t_{63\%} - \tau_p \quad (2.35)$$



Gambar 2.7. Gambar Proses Analisis PRC (Marlin, 2000)

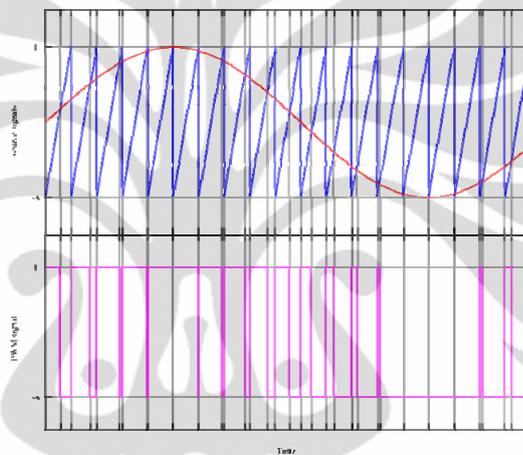
2.7 Sinyal PWM

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. Gambar 2.8 menunjukkan gambar sinyal PWM.



Gambar 2.8. Sinyal PWM

Cara paling sederhana untuk membuat sebuah sinyal PWM adalah dengan metode *intersective*. Metode *intersective* menggunakan sinyal segitiga atau sinyal gigi gergaji (*saw tooth*) sebagai gelombang modulasi dan komparator. Gambar 2.9 menunjukkan gambar pembuatan sinyal PWM. Gelombang modulasi yang digunakan adalah gelombang gigi gergaji (warna biru). Bila sinyal referensi (warna merah) lebih besar daripada gelombang modulasi, maka sinyal PWM berada pada kondisi *High* (1), dan sebaliknya ketika sinyal referensi lebih kecil daripada gelombang modulasi, maka sinyal PWM berada pada kondisi *Low* (0).



Gambar 2.9. Pembentukan Sinyal PWM

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

$$D = \frac{t_{\text{High}}}{T} \quad (2.36)$$

Dimana

t_{High} : periode waktu ketika kondisi High

T : periode 1 gelombang sinyal PWM

Telah disebutkan bahwa sinyal PWM ini memiliki nilai rata-rata. Nilai rata-rata dari sinyal PWM bergantung pada besarnya nilai D, atau dapat dinyatakan sebagai persamaan (2.37) berikut ini:

$$V_{\text{avg}} = D \cdot V_{\text{High}} \quad (2.37)$$

2.8 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. Ada 3 parameter yang dapat menentukan kualitas sistem MPPT (Yi & Lu fa, 2009). yaitu:

1. **Parameter Dinamis:** Merupakan parameter yang diukur melalui pengukuran waktu yang dibutuhkan sistem MPPT untuk mencari titik daya maksimal ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel surya atau *irradiance* berubah). Semakin cepat waktu yang dibutuhkan, semakin baik sistem MPPT tersebut.
2. **Parameter Statis:** Merupakan parameter yang diukur dari seberapa besar fluktuasi nilai daya keluaran ketika titik daya maksimum sudah tercapai ketika tidak terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu dan *irradiance* tidak berubah). Semakin kecil fluktuasi yang terjadi, maka semakin baik algoritma MPPT tersebut. Parameter statis ini dapat berupa rasio osilasi tegangan, yang dapat diperoleh berdasarkan persamaan (2.38) berikut:

$$\text{Rasio Osilasi} = \frac{\text{Osilasi Tegangan}}{\text{Tegangan Rata-rata}} \times 100\% \quad (2.38)$$

Semakin kecil rasio osilasi yang dimiliki oleh sistem MPPT, maka sistem MPPT tersebut semakin baik kualitasnya.

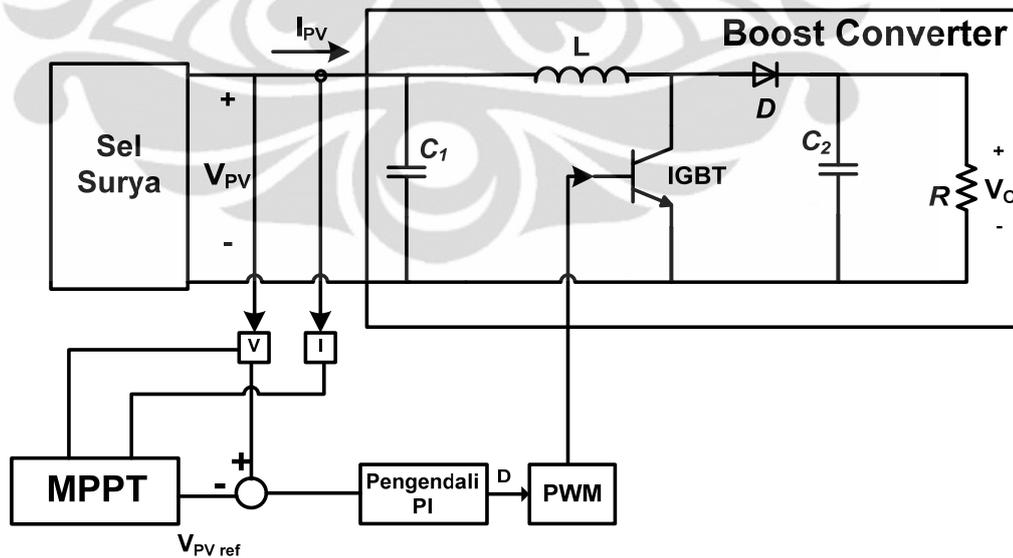
3. **Parameter Rasio Daya Aktual dan Daya Ideal:** Merupakan perbandingan antara daya keluaran yang aktual dalam satu periode waktu dengan daya maksimum yang diukur pada saat kondisi kerja dari sel surya tersebut tercapai. Nilai parameter ini akan berkisar antara 0 sampai 100% dan semakin besar nilai rasio ini, semakin baik algoritma MPPT tersebut. Rasio Daya dapat diperoleh berdasarkan persamaan (2.39) berikut ini:

$$\text{Rasio Daya} = \frac{\text{Daya Aktual}}{\text{Daya Maksimum Teoritis}} \times 100\% \quad (2.39)$$

BAB 3 PERANCANGAN SISTEM MPPT

3.1 Rancangan Sistem MPPT dengan Boost Converter

Pada bab 2 telah dijelaskan bahwa daya yang dihasilkan oleh sel surya sangat bergantung pada *irradiance* dan suhu sel surya tersebut. Telah dijelaskan lebih lanjut pula, bahwa tegangan keluaran dan arus keluaran dari sel surya memiliki hubungan yang tidak linear, melainkan sesuai dengan grafik pada gambar 2.3. Pada gambar 2.3 yang menunjukkan kurva daya fungsi tegangan terlihat bahwa terdapat suatu titik kerja dimana daya yang dihasilkan oleh sel surya maksimal. Titik tersebut merupakan titik kerja tegangan optimal. Sistem MPPT dirancang untuk mengendalikan tegangan keluaran sel surya agar sel surya mampu bekerja pada titik kerja tegangan optimal tersebut. Sistem MPPT ini menggunakan rangkaian Boost Converter sebagai pengendali tegangan keluaran dari sel surya. Agar Boost Converter ini mampu memberikan nilai tegangan optimal yang tepat, maka digunakan algoritma ICM sebagai algoritma MPPT pada sistem ini.



Gambar 3.1. Rancangan Sistem MPPT

Gambar 3.1 menunjukkan rancangan sistem MPPT dengan rangkaian Boost Converter. Terlihat pada Gambar 3.1 bahwa suatu sel surya dihubungkan dengan sistem MPPT. Sistem MPPT ini memiliki 4 blok yang memiliki fungsinya masing-masing, yaitu blok rangkaian Boost Converter, blok MPPT, dan blok pengendali PI. Sel surya dihubungkan dengan rangkaian Boost Converter.

Dalam sistem ini, tegangan masukan pada blok rangkaian Boost Converter adalah tegangan sel surya. Pada blok rangkaian Boost Converter ini, tegangan masukan dikendalikan agar sesuai dengan nilai referensi yang diberikan oleh algoritma MPPT, sedangkan tegangan keluaran dari Boost Converter dijaga konstan pada suatu nilai tertentu.

Algoritma MPPT berfungsi untuk mencari nilai tegangan sel surya yang optimal. Dengan pengendalian pada tegangan masukan rangkaian Boost Converter seperti ini maka sel surya akan dipaksa untuk bekerja pada titik kerja yang optimal. Algoritma yang digunakan sebagai algoritma MPPT adalah algoritma ICM. Agar algoritma ICM mampu menemukan titik kerja optimal, algoritma ini membutuhkan pengukuran nilai tegangan dan arus sel surya sehingga masukan dari blok algoritma ICM ini adalah arus dan tegangan sel surya.

Agar tegangan sel surya dapat dikendalikan, maka pada sistem ini dibuat sebagai sistem lingkaran tertutup dan diberikan suatu pengendali. Pengendali yang digunakan pada sistem ini adalah pengendali PI. Masukan dari pengendali PI adalah selisih nilai tegangan referensi yang diperoleh dari algoritma MPPT dan nilai tegangan sel surya yang sebenarnya. Keluaran dari pengendali PI adalah nilai *duty cycle* dari sinyal PWM. Nilai *duty cycle* ini kemudian masuk ke blok PWM yang berfungsi untuk menghasilkan sinyal PWM yang sesuai dengan nilai *duty cycle* masukannya. Sinyal PWM ini yang akan menjadi sinyal *switching* pada switch IGBT rangkaian Boost Converter. Melalui proses tersebut tegangan

sel surya dapat dikendalikan hingga diharapkan mampu bekerja pada titik kerja optimalnya.

3.2 Model Sel Surya

Prinsip kerja dan karakteristik sel surya telah dijelaskan pada Bab 2. Model sel surya yang dibangun harus memiliki karakteristik seperti sel surya yang sebenarnya. Model sel surya dapat dibangun dengan menggunakan persamaan karakteristik sel surya seperti pada persamaan (2.7) sebagai prinsip utama. Hal ini karena persamaan tersebut merupakan representasi matematis yang lengkap mengenai karakteristik tegangan dan arus keluaran sel surya. Pada beberapa jurnal ditemukan bahwa model matematis sel surya diperoleh dari persamaan (2.7) yang disederhanakan atau dilinearisasi. Sebagai contoh, (Xiao, Dunford, Palmer, & Capel, 2007) menggunakan pendekatan linearisasi hubungan arus dan tegangan sel surya serta metode *piecewise* pada kurva I-V untuk memperoleh model sel surya.

Model sel surya yang digunakan pada penelitian ini menggunakan persamaan (2.7). Persamaan (2.7) menjadi model statis dari sel surya. Model statis ini hanya akan memberikan hubungan antara arus dan tegangan sel surya. Agar model sel surya yang dibentuk dapat semakin mendekati sel surya sebenarnya, maka model sel surya dibentuk sebagai model yang dinamik, dimana respon yang dikeluarkan model memiliki dinamika. Agar model dinamik sel surya dapat diperoleh, maka ditambahkan suatu blok *Low Pass Filter*. Penambahan persamaan *Low Pass Filter* akan memberikan karakteristik transien pada model statik sel surya tersebut. Adapun persamaan umum dari *Low Pass Filter* yang digunakan adalah:

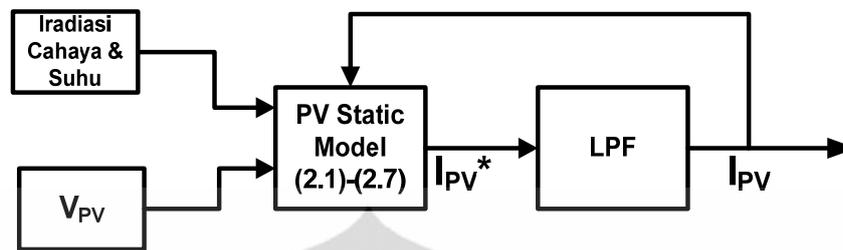
$$y = \frac{1}{\tau s + 1} x \quad (3.1)$$

Dimana

τ : konstanta waktu

y : keluaran LPF

x : masukan LPF



Gambar 3.2. Diagram Blok Model Sel Surya

Gambar 3.2 menunjukkan diagram blok dari model sel surya yang dirancang. Pada gambar (3.2) dapat dilihat bahwa terdapat 2 blok utama, yaitu blok model statik sel surya dan blok *Low Pass Filter*. Pada blok model statik sel surya, terdapat persamaan-persamaan karakteristik sel surya sesuai dengan persamaan (2.1) sampai (2.7). Masukan dari blok ini adalah nilai *irradiance*, suhu sel surya, jumlah sel yang terhubung seri, tegangan sel surya dan arus sel surya. *Irradiance* dan suhu sel surya merupakan 2 parameter kondisi lingkungan yang berpengaruh terhadap besarnya arus sel surya. Karena model sel surya ini dirancang untuk sistem *Grid-Connected Solar Cell*, maka modul sel surya ini terdiri atas beberapa sel surya yang dihubungkan secara seri. Hal ini ditandai dengan adanya parameter jumlah sel surya yang terhubung seri. Tegangan keluaran sel surya dibuat sebagai masukan untuk menjadikan tegangan sel surya sebagai sebuah variabel bebas. Artinya titik kerja sel surya ditentukan berdasarkan nilai tegangan sel surya tersebut. Sementara itu, nilai arus sel surya juga menjadi masukan pada model sel surya statis ini agar persamaan karakteristik sel surya dapat terpenuhi. Keluaran dari blok model statik sel surya adalah arus sel surya I_{PV}^* .

I_{PV}^* yang merupakan arus sel surya hasil perhitungan model statik sel surya kemudian dijadikan masukan pada blok *Low Pass Filter*. I_{PV}^* ini kemudian diolah berdasarkan persamaan LPF sehingga menghasilkan keluaran I_{PV} , yang menjadi keluaran dari model sel surya secara keseluruhan. Arus sel surya keluaran model ini juga diumpanbalik ke blok model statik sel surya agar dapat memenuhi persamaan karakteristik sel surya.

Pada penelitian ini, sel surya yang menjadi acuan adalah sel surya produksi Kyocera dengan model KC50T. Tabel 3.1 menunjukkan beberapa karakteristik dari sel surya KC50T

Tabel 3.1. Karakteristik KC50T (Kyocera KC50T Datasheet)

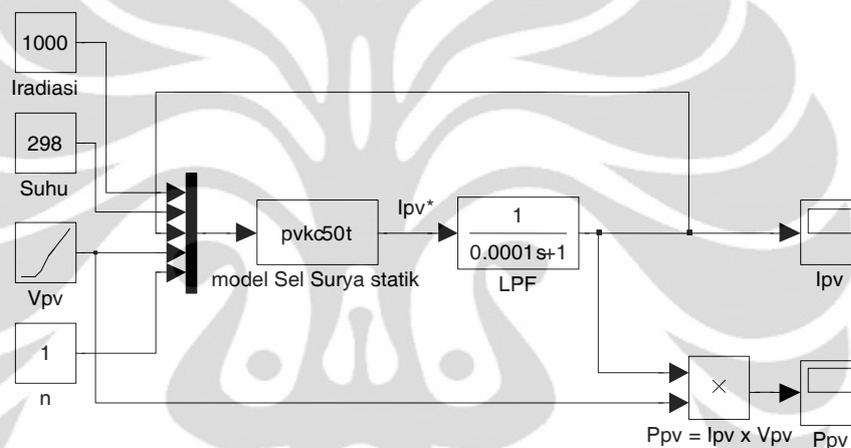
Karakteristik	Nilai
Rating Daya	54 Watt +10% -5%
Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{OC})	21,7 V
Arus Hubung Singkat (I_{SC})	3,31 A
Koefisien suhu V_{OC}	$-8,21 \times 10^{-2} \text{ V}^\circ\text{C}$
Koefisien suhu I_{SC}	$1,33 \times 10^{-3} \text{ A}^\circ\text{C}$
Tegangan Kerja Optimal (V_{MPP})	17,4 V
Hambatan seri model (R_S)	0,691 Ω
Hambatan shunt model (R_{Sh})	10850 Ω

Pada tabel tersebut terdapat spesifikasi karakteristik dari model sel surya KC50T. Dengan data-data pada tabel tersebut maka model statik sel surya dari KC50T dapat dibangun. Nilai R_S dan R_{Sh} diperoleh berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh (Lin, 2009) pada kondisi pengukuran standar ($T=25^\circ\text{C}$ dan $\lambda=1000\text{W/m}^2$). Menurut (Lin, 2009), nilai R_S dan R_{Sh} ini berubah-ubah tergantung pada suhu sel surya dan *irradiance*. Namun, melihat perubahan yang terjadi terhadap perubahan kondisi lingkungan tidak terlalu signifikan maka nilai R_S dan R_{Sh} yang digunakan adalah nilai R_S dan R_{Sh} konstan tetap sesuai dengan yang tertera pada tabel 1.

3.2.1 Kurva Karakteristik I-V dan P-V Model Sel Surya KC50T

Sel surya KC50T tentu memiliki karakteristik arus dan tegangan keluaran seperti sel surya pada umumnya. Maka model sel surya ini tentu diharapkan mampu menghasilkan tegangan dan arus keluaran yang sesuai

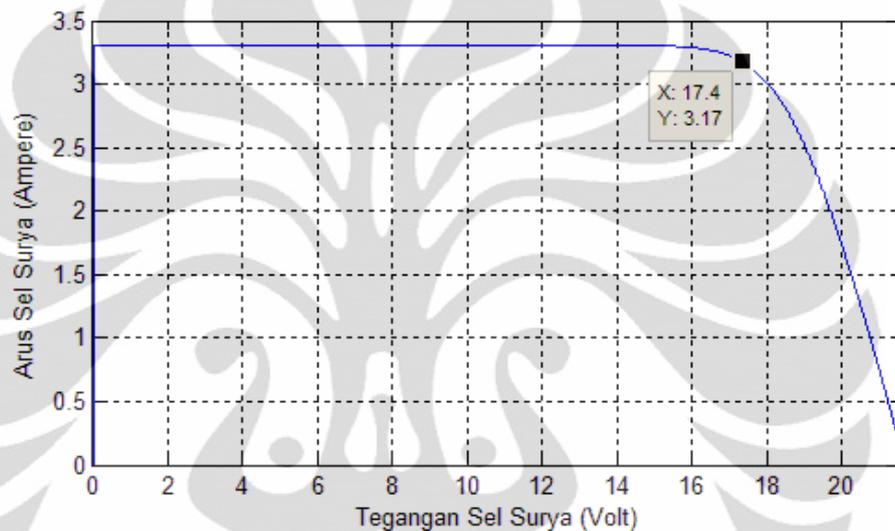
dengan keluaran sel surya sebenarnya itu. Karakteristik ini dapat dilihat melalui kurva I-V dan P-V dari model. Kurva I-V dan P-V dibentuk dengan melihat bagaimana nilai arus sel surya dan daya sel surya jika tegangan sel surya bertambah secara linear terus-menerus hingga mencapai titik tegangan V_{OC} nya. Maka untuk mensimulasikan hal ini, model statik sel surya yang sudah dibangun akan dites dengan cara masukan nilai tegangan sel surya pada blok model sel surya statis ditambah terus menerus secara linear.



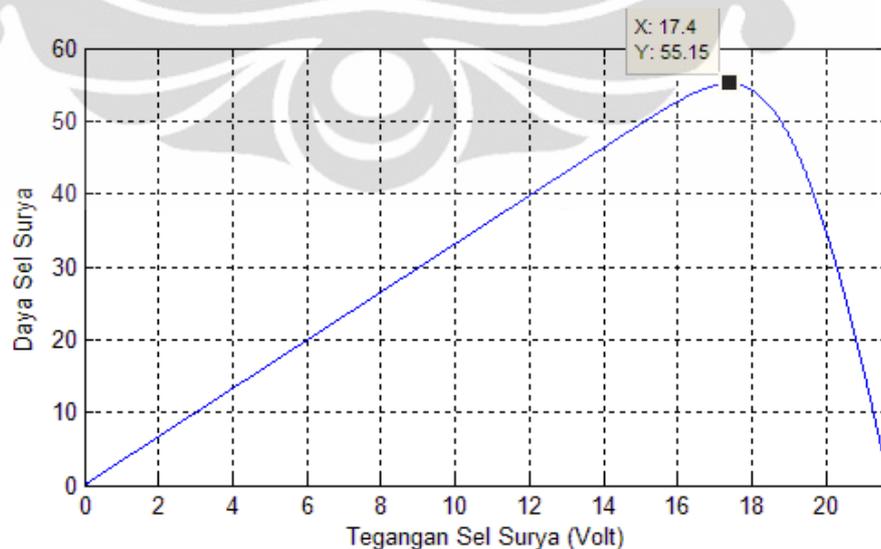
Gambar 3.3. Diagram Blok Simulasi Model Sel Surya

Diagram blok untuk simulasi ini adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3. Pada simulasi ini, blok model statik sel surya ditulis pada C-MEX dengan nama **pvkc50t.c**, sedangkan blok LPF adalah suatu blok *transfer function* yang sudah ada pada *library* MATLAB/Simulink. Dapat dilihat pada gambar 3.3, tegangan sel surya V_{PV} yang menjadi masukan blok model statik sel surya adalah sebuah fungsi linear yang nilainya akan bertambah secara linear seiring dengan bertambahnya waktu simulasi. Kondisi lingkungan simulasi disetel pada kondisi pengukuran standar, yaitu nilai *irradiance* ditentukan pada nilai 1000 W/m^2 dan suhu sel surya pada suhu 298 K. Sementara itu, jumlah sel surya yang digunakan adalah 1 karena karakteristik yang ingin dilihat adalah untuk 1 sel surya saja.

Pada blok LPF, nilai konstanta waktu (τ) yang digunakan adalah 0,0001. Analisis penentuan τ akan dijelaskan pada Bab 4. Hasil simulasi menunjukkan grafik hubungan antara arus model sel surya dengan tegangan model sel surya seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.4 dan juga grafik hubungan antara daya model sel surya dengan tegangan model sel surya seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.4. Kurva I-V KC50T pada Kondisi Pengukuran Standar

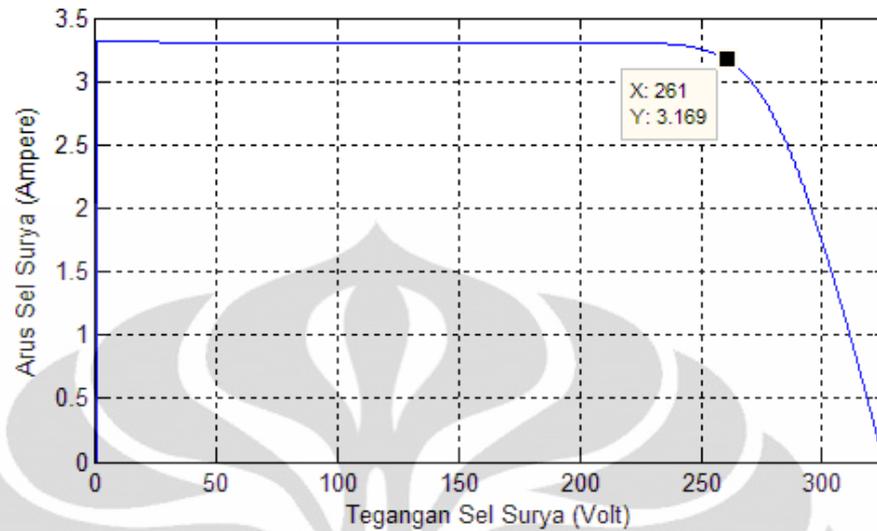


Gambar 3.5. Kurva P-V KC50T pada Kondisi Pengukuran Standar

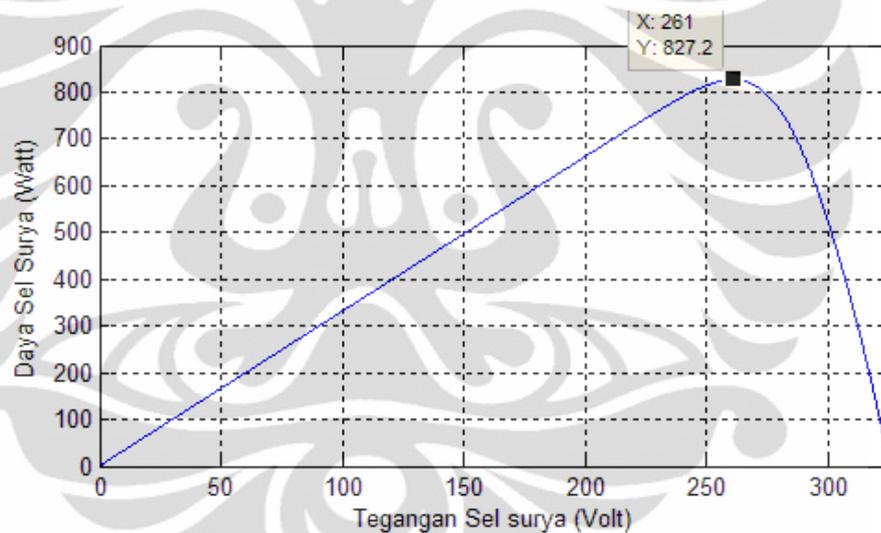
Gambar 3.4 dan gambar 3.5 menunjukkan bahwa model sel surya yang dibangun telah mampu menghasilkan kurva karakteristik I-V dan P-V yang serupa seperti kurva I-V dan P-V pada umumnya. Pada kurva I-V ditandai dengan penurunan nilai I yang lambat seiring dengan bertambahnya tegangan hingga titik disekitar $V=17,4$ Volt yang merupakan daerah lutut (*knee*) dari grafik. Setelah titik tersebut arus mengalami penurunan yang sangat drastis bila tegangan bertambah sedikit saja. Pada kurva P-V, kurva yang terbentuk menyerupai bentuk gunung dimana terdapat titik puncak nilai daya yang dapat dicapai oleh model ini.

Melalui kedua kurva ini juga dapat dilihat bagaimana karakteristik dari model sel surya KC50T itu sendiri. Pada kurva P-V terlihat bahwa sel surya memiliki daya maksimal sebesar 55,15 Watt ketika bekerja pada tegangan sel surya 17,4 Volt. Dari kurva I-V terlihat bahwa pada saat tegangan 17,4 Volt, arus yang dihasilkan oleh sel surya adalah 3,17 Ampere. Jika dibandingkan dengan data yang diperoleh mengenai sel surya KC50T pada tabel 1, nilai daya maksimal hasil simulasi sudah berada dalam rating daya dari sel surya KC50T dan titik tegangan optimal dari sel surya ini yaitu 17,4 Volt sudah mampu dicapai oleh model sel surya ini.

Telah disebutkan bahwa model sel surya yang akan digunakan adalah model yang memiliki beberapa sel surya di dalamnya. Pada penelitian ini, jumlah sel surya yang digunakan ditentukan sebanyak 15 dan seluruh sel dihubungkan seri. Dengan mengubah nilai masukan n menjadi 15 dan menjalankan diagram blok simulasi seperti pada gambar 3.3, maka kemudian dapat dilihat bagaimana kurva karakteristik I-V dan P-V untuk model 15 sel surya KC50T yang tersusun seri.



Gambar 3.6. Kurva I-V pada 15 Sel Surya Tersusun Seri



Gambar 3.7. Kurva P-V pada 15 Sel Surya Tersusun Seri

Gambar 3.6 menunjukkan kurva I-V dari model sel surya ini sedangkan gambar 3.7 menunjukkan kurva P-V dari model sel surya ini. Terlihat bahwa bentuk kurva I-V dan P-V yang terbentuk serupa seperti pada model untuk 1 sel saja. Walaupun bentuk kurva sama, namun nilai tegangan V_{OC} dan V_{MPP} menjadi berbeda. V_{OC} pada model ini adalah 325,5 Volt dan V_{MPP} pada model ini adalah 261 Volt. Nilai ini adalah 15 kali lipat dari nilai model 1 sel surya. Hal ini sesuai dengan prinsip

memasang seri beberapa buah sumber tegangan yang sama. Sementara itu, nilai arus hubung singkat I_{SC} dan I_{MPP} tetap pada nilai 3,31 A dan 3,17 A. Oleh karena itu daya yang dihasilkan oleh model ini menjadi 15 kali lipat dari model 1 sel, dimana daya maksimal yang dapat dicapai adalah sebesar 827,2 Watt.

3.2.2 Persamaan Keluaran Model Sel Surya

Model sel surya ini dibutuhkan dalam proses analisis sistem secara keseluruhan dibagian selanjutnya. Oleh karena itu, persamaan keluaran dari model sel surya ini perlu didapatkan terlebih dahulu. Persamaan (2.2), (2.4), (2.5) dan (2.7) menunjukkan model statik dari sel surya. Dengan menganggap arus sel surya dari persamaan karakteristik sel surya sebagai I_{PV}^* dan arus keluaran model sel surya adalah I_{PV} , maka berdasarkan pada fungsi alih LPF, arus keluaran dari model sel surya ini adalah:

$$I_{PV} = \frac{1}{\tau s + 1} I_{PV}^* \quad (3.2)$$

Sehingga dapat diperoleh persamaan diferensial dari model sel surya adalah sesuai dengan persamaan 3.2

$$sI_{PV} = \frac{I_{PV}^*}{\tau} - \frac{I_{PV}}{\tau} \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} I_{PV} = \frac{I_{Ph}}{\tau} - \frac{I_S}{\tau} \left(\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV} R_S)}{N_S A k T_C} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_S}{\tau R_{Sh}} - \frac{I_{PV}}{\tau} \quad (3.4)$$

Dimana

- I_{Ph} mengacu pada persamaan (2.2)
- I_S mengacu pada persamaan (2.4) dan (2.5)

Pada persamaan (3.4) terdapat fungsi nonlinear. Untuk analisis sistem, fungsi nonlinear ini akan mempersulit analisis. Maka dilakukan linearisasi pada persamaan (3.4) dengan deret Taylor. Hasil linearisasi dari persamaan (3.4) dapat dilihat pada persamaan (3.5) berikut:

$$\frac{d}{dt} \Delta I_{PV} = \frac{I_L}{\tau} - \left(\frac{1}{\tau} + \frac{R_S}{R_{Sh} \tau} + \frac{I_{RS} M}{\tau} \left(\frac{q R_S}{A k T_C} \right) \right) \Delta I_{PV} - \left(\frac{1}{N_S R_{Sh} \tau} + \frac{I_{RS} M}{\tau} \left(\frac{q}{N_S A k T_C} \right) \right) \Delta V_{PV} \quad (3.5)$$

Dimana

$$M = \exp \left(\frac{q((V_{PV0}/N_S) + I_{PV0}R_S)}{AkT_C} \right) \quad (3.6)$$

V_{PV0} : titik kerja tegangan sel surya

I_{PV0} : titik kerja arus sel surya

3.3 Algoritma Incremental Conductance Method

Metode MPPT yang digunakan pada sistem ini adalah *Incremental Conductance Method (ICM)*. Prinsip dasar dari metode ini telah dijelaskan pada bab 2. Algoritma ini termasuk jenis MPPT langsung yang memberikan rekomendasi tegangan operasi sel surya berdasarkan nilai tegangan dan arus sel surya. Metode ICM ini merupakan metode pencarian daya maksimal dengan cara menyusuri kurva hingga mencapai titik maksimal kurva. Algoritma dari kedua metode ini sederhana namun memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mencari titik maksimum. Karena kesederhanaannya maka untuk mengimplementasikan algoritma ini membutuhkan biaya yang rendah bila dibandingkan dengan biaya implementasi untuk algoritma-algoritma lain yang lebih kompleks seperti logika fuzzy dan neural network (referensi Liu and Lopez).

3.3.1 Diagram alir algoritma ICM

Pada bagian 2.2.1 telah dijelaskan mengenai prinsip dasar dari algoritma ICM. Algoritma ICM ini dapat dinyatakan dalam bentuk diagram alir. Gambar 3.8 menunjukkan diagram alir dari algoritma ICM yang akan digunakan pada sistem MPPT.

Keterangan variabel yang digunakan pada Gambar 3.8:

$V(k)$: Tegangan keluaran Sel Surya pada sampling k

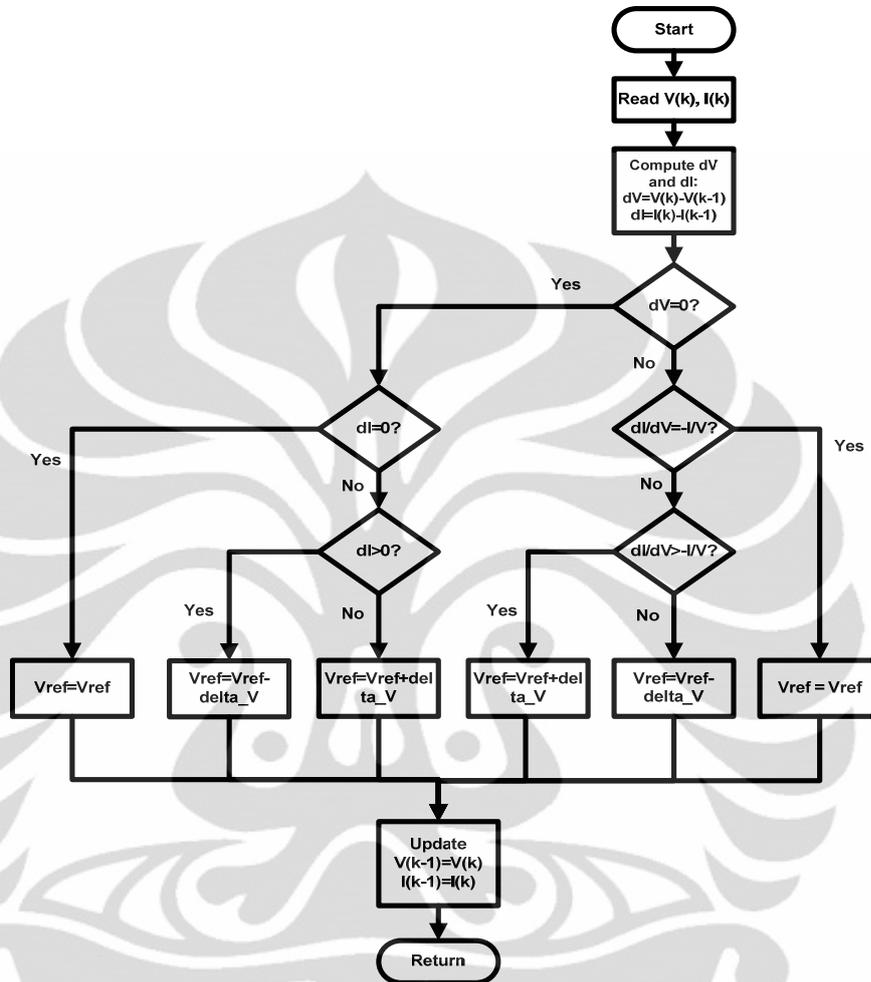
$I(k)$: Arus keluaran Sel Surya pada sampling k

$V(k-1)$: Tegangan keluaran Sel Surya pada sampling k-1

$I(k-1)$: Arus keluaran Sel Surya pada sampling k-1

V_{ref} : Rekomendasi tegangan operasi Sel Surya

delta_V : Konstanta perubahan V_{ref}



Gambar 3.8. Diagram Alir Algoritma ICM

Algoritma ICM memiliki data masukan berupa $V(k)$ dan $I(k)$. Mula-mula algoritma ini menghitung perbedaan tegangan saat ini $V(k)$ dengan tegangan pada *sampling* sebelumnya $V(k-1)$, yaitu $dV = V(k) - V(k-1)$, dan juga menghitung perbedaan arus saat ini $I(k)$ dengan arus pada *sampling* sebelumnya $I(k-1)$, yaitu $dI = I(k) - I(k-1)$. Sesuai dengan prinsip dasar algoritma ini dimana daya maksimum terjadi pada saat $dP/dV = 0$ atau $dI/dV = -I/V$, maka kemudian dilihat apakah $dV = 0$ dan apakah $dI = 0$.

- Jika $dV = 0$ dan $dI = 0$, artinya titik tersebut adalah titik daya maksimum, sehingga V_{ref} tidak mengalami perubahan.

Jika dV bernilai 0 sedangkan dI tidak bernilai 0, maka perlu diperhatikan nilai dI tersebut.

- Jika $dV = 0$ dan $dI > 0$, maka $V_{ref} = V_{ref} - \text{delta_}V$.
- Sedangkan jika $dV = 0$ dan $dI < 0$, maka $V_{ref} = V_{ref} + \text{delta_}V$.

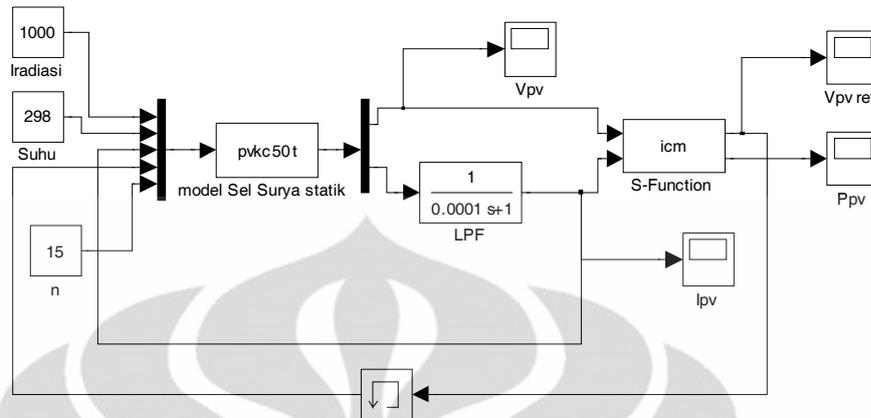
Ketika dV dan dI tidak bernilai 0, maka persamaan $dI/dV = -I/V$ yang digunakan sebagai kriteria penentu perubahan V_{ref} .

- Jika $dI/dV = -I/V$ maka V_{ref} konstan karena pada V_{ref} tersebut terjadi daya maksimum.
- Sedangkan jika $dI/dV > -I/V$, maka $V_{ref} = V_{ref} + \text{delta_}V$ karena titik tersebut berada pada slope positif dari kurva $P(V)$.

Jika $dI/dV < -I/V$, maka $V_{ref} = V_{ref} - \text{delta_}V$ karena titik tersebut berada pada slope negative dari kurva $P(V)$.

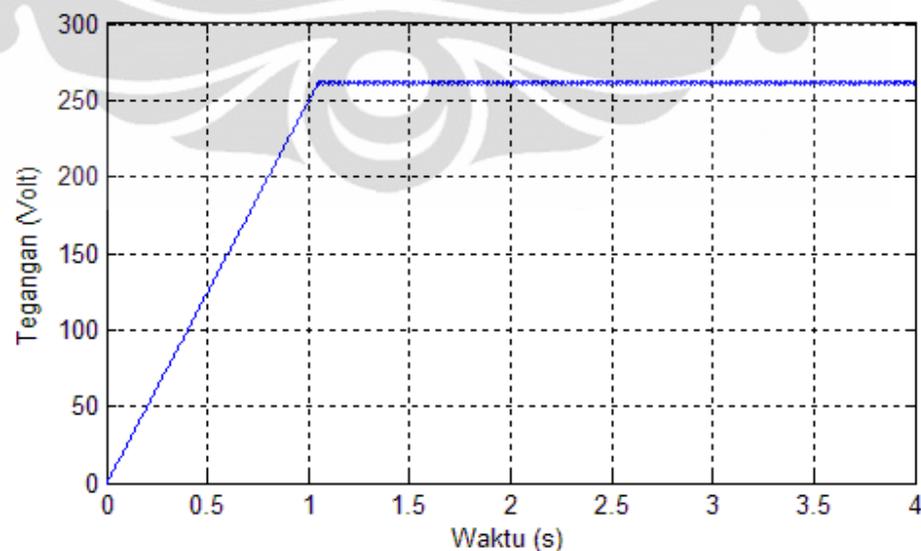
3.3.2 Uji Coba Algoritma ICM dengan Model Sel Surya

Untuk memverifikasi apakah algoritma ICM yang dibangun sudah benar, maka algoritma ICM ini perlu diujicoba pada model sel surya yang telah dirancang sebelumnya. Uji coba ini dilakukan dengan simulasi pada MATLAB/Simulink. Gambar 3.9 menunjukkan diagram MATLAB/Simulink untuk melakukan uji coba ini. Pada simulasi ini, terdapat model sel surya yang terdiri atas blok model statik sel surya dan LPF dan juga terdapat blok algoritma ICM. Ada sedikit modifikasi pada blok model statik sel surya, dimana nilai tegangan sel surya juga dijadikan keluaran. Nilai ini akan digunakan untuk menjadi masukan pada blok algoritma ICM. Blok algoritma ICM ditulis dalam bahasa pemrograman C dalam C-MEX, yaitu dengan nama file **icm.c**. Keluaran dari blok ICM adalah tegangan referensi sel surya yang langsung menjadi masukan ke model sel surya sehingga model sel surya akan bekerja pada nilai tegangan referensi yang diberikan oleh blok ICM.



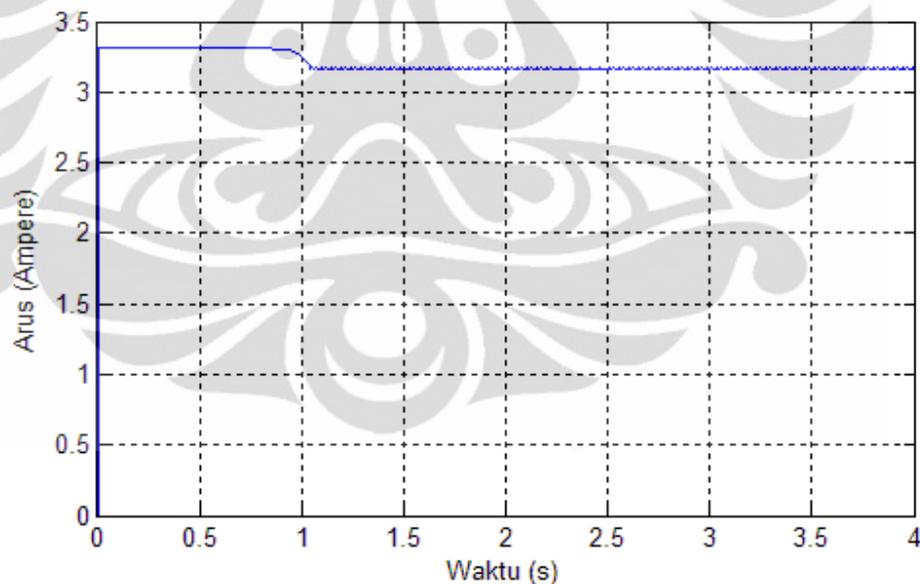
Gambar 3.9. Diagram Blok Simulasi Algoritma ICM

Simulasi dilakukan selama 4 detik pada kondisi pengujian standar, yaitu pada kondisi *irradiance* (λ) sebesar 1000 W/m^2 dan suhu sel surya (T_C) sebesar 298 K. Gambar 3.10, 3.11 dan 3.12 menunjukkan hasil simulasi yang telah dilakukan. Gambar 3.10 menunjukkan grafik tegangan sel surya yang diperoleh dari algoritma ICM sebagai fungsi waktu, sedangkan gambar 3.11 menunjukkan grafik arus keluaran sel surya sebagai fungsi waktu, dan gambar 3.12 adalah grafik daya sel surya terhadap waktu.



Gambar 3.10. Grafik $V_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Algoritma ICM

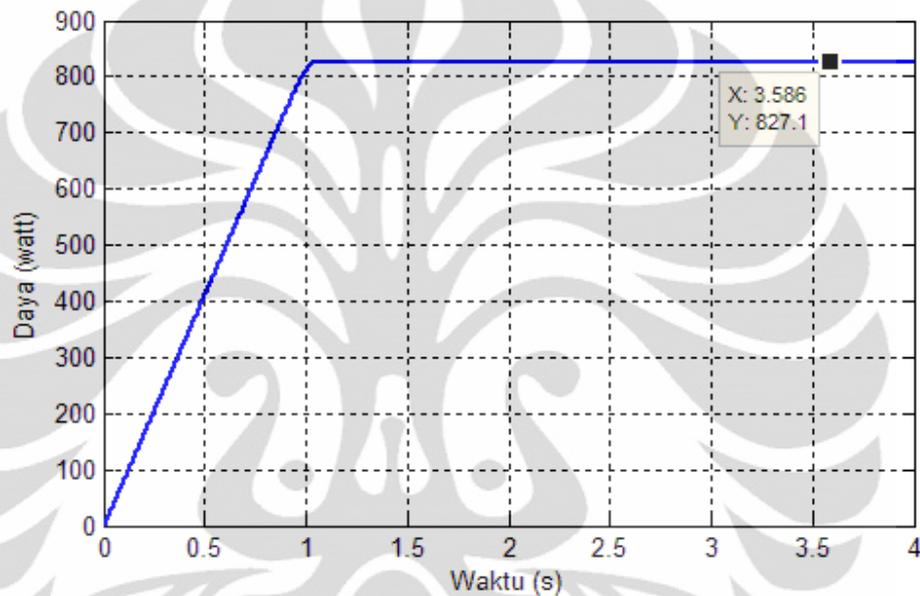
Berdasarkan grafik tegangan sel surya fungsi waktu pada gambar 3.10 yang terbentuk, dapat dilihat bahwa algoritma ICM mencari titik kerja tegangan sel surya yang optimal. Proses ini dapat dilihat pada daerah transien grafik, atau ketika nilai tegangan sel surya terus bertambah sampai mencapai suatu titik. Pada saat $t > 1,102s$, nilai tegangan sel surya beresilasi, yang artinya algoritma ICM telah menemukan titik kerja sel surya. Nilai rata-rata dari data tegangan sel surya yang beresilasi (data yang digunakan pada saat $t > 1,102s$) adalah 261 Volt. Nilai ini dapat dianggap sebagai titik kerja optimal sel surya yang berhasil ditemukan oleh algoritma ICM. Algoritma ini akan terus beresilasi disekitar angka tersebut sampai terjadi perubahan kondisi lingkungan yang menyebabkan perubahan titik kerja sel surya. Osilasi terjadi karena karakteristik dari algoritma ini yang akan terus memperbarui referensi tegangan sel surya.



Gambar 3.11. Grafik $I_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Algoritma ICM

Ketika algoritma ICM ini masih dalam proses mencari titik kerja optimal, tentunya nilai arus sel surya akan berubah-ubah seiring dengan perubahan nilai tegangan sel surya. Dapat dilihat pada grafik arus

keluaran sel surya bahwa arus sel surya berubah menelusuri kurva I-V sampai pada titik dimana telah tercapai titik kerja optimal dan kemudian berosilasi disekitarnya. Nilai rata-rata dari data arus sel surya yang berosilasi (data arus sel surya yang diambil pada saat $t > 1,102s$) adalah 3,17 Ampere.



Gambar 3.12. Grafik $P_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Algoritma ICM

Gambar 3.12 menunjukkan grafik daya yang dihasilkan sel surya sebagai fungsi waktu. Sesuai dengan perubahan arus dan tegangan sel surya, daya sel surya bertambah hingga titik kerja optimal tercapai. Berdasarkan algoritma ICM ini, daya maksimal yang dapat dihasilkan adalah 827,1 Watt. Nilai ini diperoleh berdasarkan perhitungan rata-rata data daya sel surya pada $t > 1,102s$.

Untuk menentukan apakah algoritma ICM ini telah berhasil menemukan titik kerja optimal, maka hasil simulasi ini dapat dibandingkan dengan hasil simulasi pada bagian 3.2.2. Pada simulasi untuk menentukan kurva I-V dan P-V dari sel surya, kondisi lingkungan

yang digunakan sama, yaitu pada saat *irradiance* 1000 W/m² dan suhu sel surya 298 K. Berdasarkan kurva P-V yang terbentuk pada gambar 3.7, tegangan sel surya yang paling optimal adalah pada saat $V_{PV} = 261$ Volt dimana daya yang dihasilkan adalah 827,2 Watt. Jika dibandingkan dengan nilai yang diperoleh oleh algoritma ICM, maka terlihat bahwa hasil pencarian oleh algoritma ICM telah berhasil menemukan titik kerja optimal dari model sel surya dengan benar.

3.3.3 Uji Coba Algoritma ICM pada Perubahan Kondisi Lingkungan

Algoritma ICM ini harus mampu mencari titik kerja optimal pada kondisi lingkungan tertentu, dan jika terjadi perubahan kondisi lingkungan maka algoritma MPPT ini harus mencari titik kerja optimal yang baru yang sesuai. Kondisi lingkungan ini direpresentasikan oleh nilai *irradiance* dan suhu sel surya. Maka, pada simulasi yang akan dilakukan, kondisi *irradiance* berubah-ubah sedangkan suhu sel surya dijaga konstan. Berdasarkan simulasi ini akan dilihat apakah algoritma ICM ini mampu menemukan titik kerja optimal dari sel surya bila terjadi perubahan kondisi lingkungan.

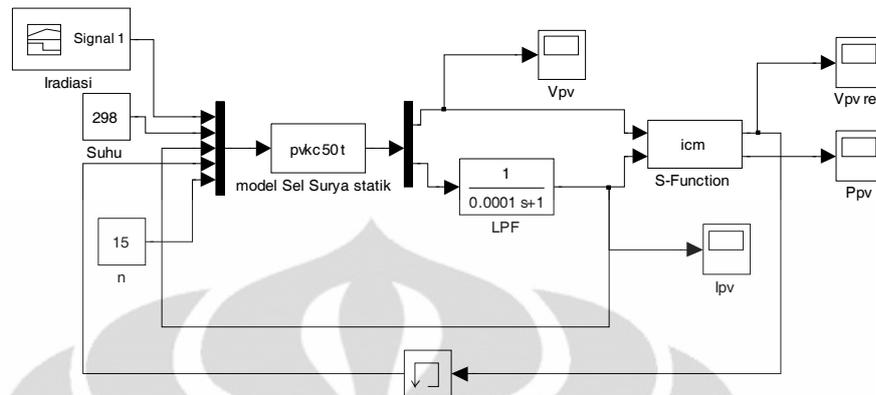
Pada simulasi ini, suhu sel surya disetel pada suhu 298 K sedangkan nilai *irradiance* berubah-ubah berdasarkan kondisi berikut ini:

Pada $t < 4s$, $\lambda = 1000 \text{ W/m}^2$

Pada $4s < t < 8s$, $\lambda = 800 \text{ W/m}^2$

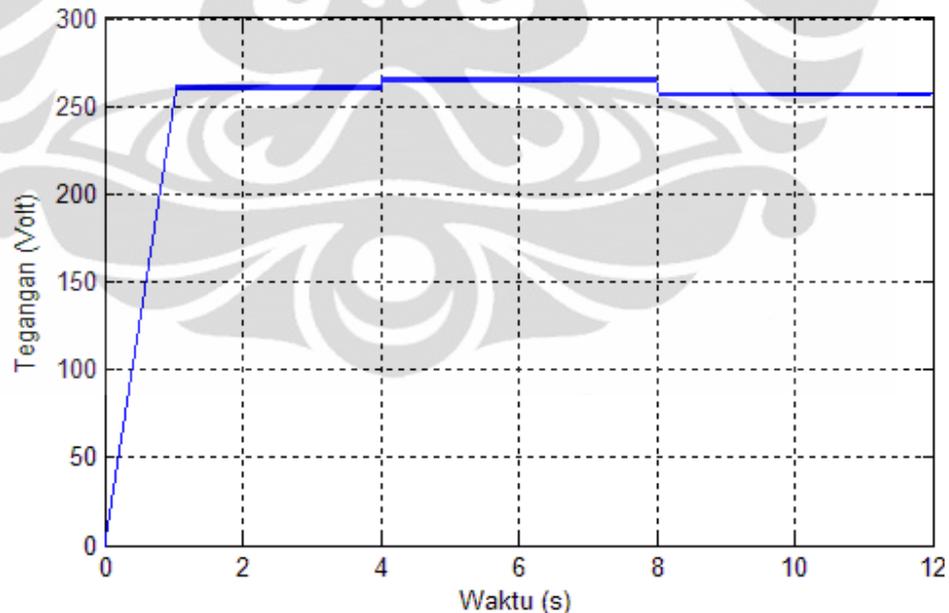
Pada $8s < t < 12s$, $\lambda = 1200 \text{ W/m}^2$

Gambar 3.13 menunjukkan diagram simulasi pada MATLAB/Simulink dimana terlihat bahwa nilai *irradiance* dikeluarkan dari sebuah *signal builder* yang akan memberikan sinyal sesuai dengan ketentuan di atas.

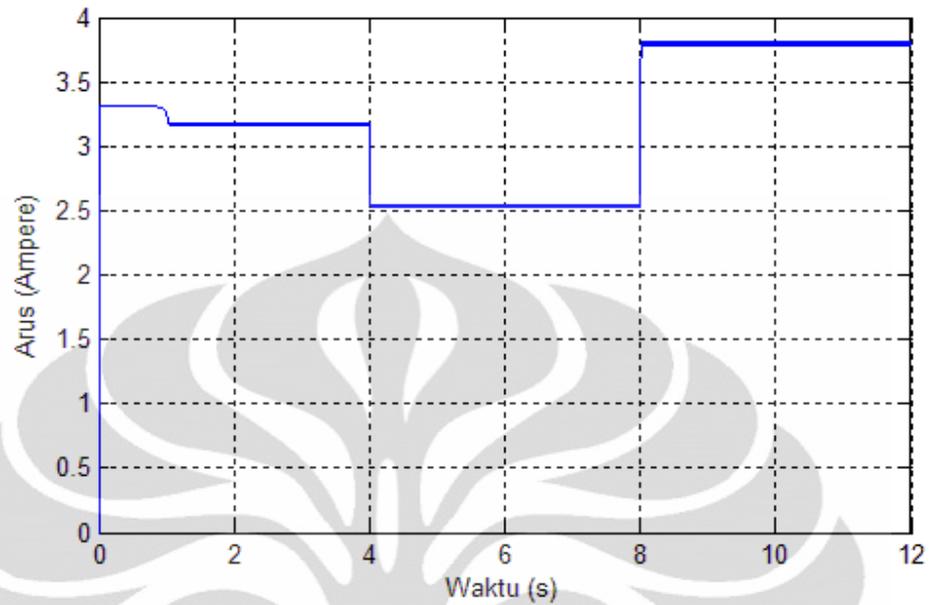


Gambar 3.13. Diagram Blok Simulasi Algoritma ICM dengan λ Berubah-ubah

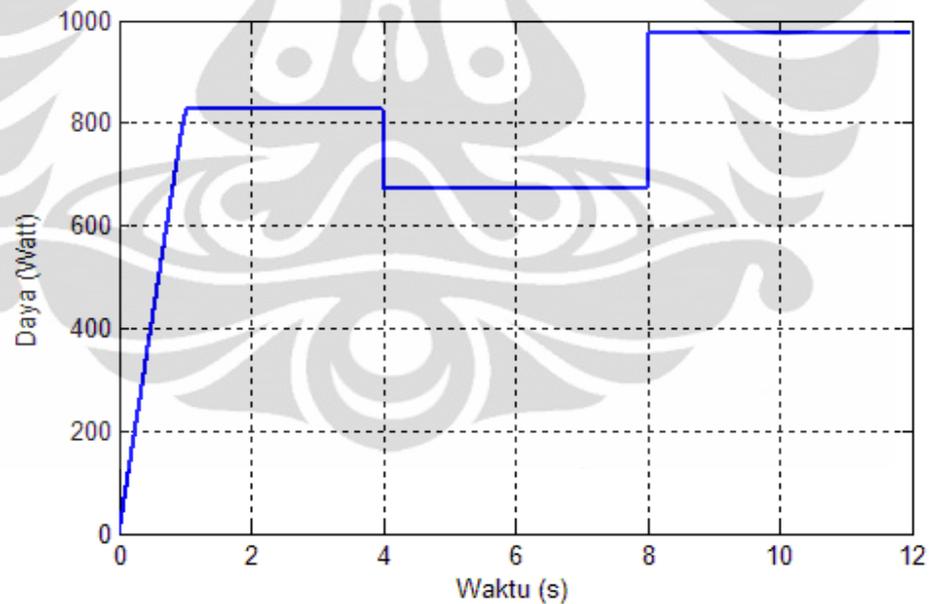
Setelah menjalankan simulasi di atas, maka kemudian diperoleh hasil dari simulasi ini. Gambar 3.14, 3.15 dan 3.16 menunjukkan hasil simulasi, yaitu secara berturut-turut grafik tegangan sel surya fungsi waktu, grafik arus sel surya fungsi waktu, dan grafik daya sel surya sebagai fungsi waktu.



Gambar 3.14. Grafik $V_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Bagian 3.3.3



Gambar 3.15. Grafik $I_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Bagian 3.3.3



Gambar 3.16. Grafik $P_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Bagian 3.3.3

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi pertama, saat *irradiance* bernilai 1000 W/m^2 , tegangan optimal sel surya adalah 261 Volt dimana arus yang dihasilkan sebesar 3,17 Ampere sehingga daya

maksimal sel surya adalah sebesar 827,1 Watt. Kemudian ketika terjadi perubahan kondisi *irradiance* menjadi 800 W/m^2 , sel surya mengalami perubahan titik kerja dan memberikan tegangan keluaran sebesar 265,0 Volt dan arus sel surya sebesar 2,54 Ampere serta menghasilkan daya sebesar 672,6 Watt. Kembali ketika terjadi kenaikan nilai *irradiance* menjadi 1200 W/m^2 , titik kerja sel surya berubah menjadi pada $V_{PV} = 256,75 \text{ Volt}$ dan $I_{PV} = 3,80 \text{ Ampere}$ sehingga menghasilkan daya sebesar 974,6 Watt. Berdasarkan grafik dan data tersebut terlihat bahwa ketika terjadi perubahan nilai *irradiance*, algoritma ICM memberikan nilai referensi tegangan sel surya yang baru.

Berdasarkan dua simulasi yang telah dilakukan pada bagian 3.3.2 dan 3.3.3, dapat disimpulkan bahwa algoritma ICM dapat berfungsi sebagai algoritma MPPT karena telah mampu menemukan titik kerja optimal dari sel surya pada suatu kondisi lingkungan tertentu, dan ketika kondisi lingkungan ini berubah, algoritma ICM akan mampu memberikan nilai titik kerja optimal tegangan sel surya yang baru yang sesuai. Dengan demikian algoritma ICM yang telah dibangun ini dapat digunakan pada sistem MPPT yang akan dibuat.

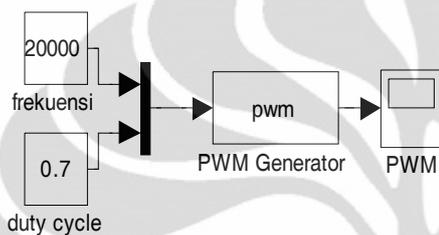
3.4 Blok Pembuat Sinyal PWM

Sinyal PWM adalah sinyal yang digunakan sebagai pengatur buka tutup *switch* pada rangkaian Boost Converter. Sebelum masuk ke bagian Boost Converter, maka terlebih dahulu dibahas mengenai perancangan blok pembuat sinyal PWM yang akan menjadi sinyal pengatur pada rangkaian Boost Converter ini.

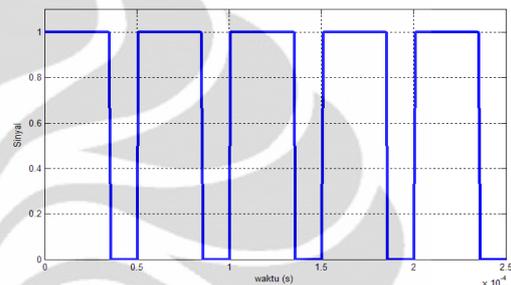
Pada bagian 2.7 telah dijelaskan mengenai proses terbentuknya sinyal PWM. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian 2.7, bentuk sinyal PWM tergantung pada *duty cycle* (D) dari sinyal PWM tersebut. Nilai D pada sistem MPPT ini diperoleh dari blok pengendali PI. Selain nilai D, frekuensi sinyal PWM juga

harus ditentukan. Pada sistem MPPT ini, frekuensi sinyal PWM yang digunakan adalah 20 kHz.

Blok pembuat sinyal PWM ini juga dibuat dalam C-Mex dengan nama **pwm.c**. Gambar 3.17 menunjukkan simulasi dari blok pembuat sinyal PWM. Nilai D dibuat pada kondisi konstan pada nilai 0,7. Sinyal PWM yang dibentuk dan dikeluarkan oleh pembuat sinyal PWM adalah seperti pada gambar 3.18.

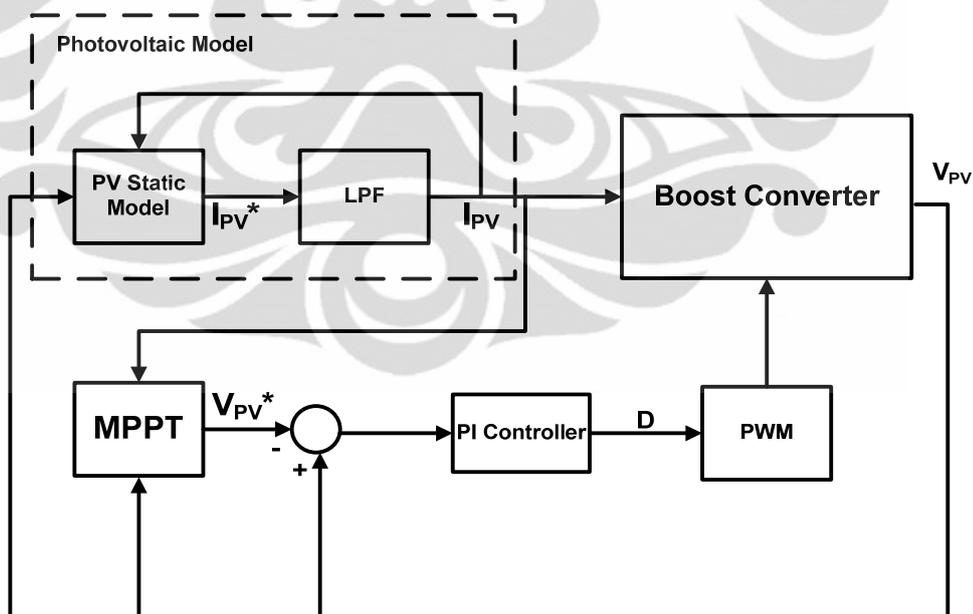


Gambar 3.17. Diagram Blok Simulasi Sinyal PWM

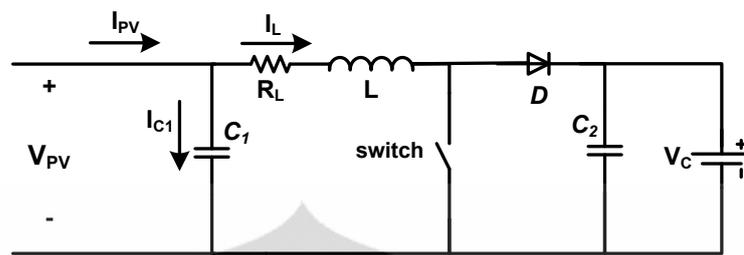


Gambar 3.18. Sinyal PWM

3.5 Model Boost Converter



Gambar 3.19. Model Sistem MPPT dan Sel Surya



Gambar 3.20. Rangkaian Boost Converter

Gambar 3.19 menunjukkan sistem MPPT dengan model sel surya secara keseluruhan. Sedangkan Gambar 3.20 menunjukkan sistem Boost Converter yang digunakan pada sistem MPPT. Pada Boost Converter ini variabel yang dikendalikan adalah tegangan masukan Boost Converter.

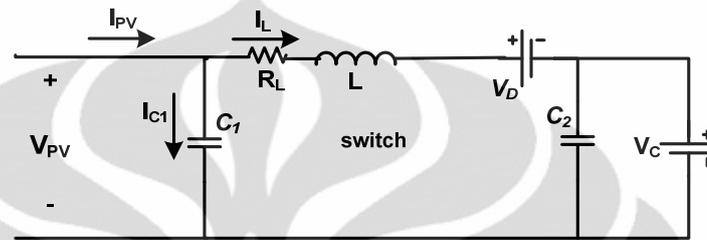
Seperti yang telah dijelaskan, sistem MPPT ini menggunakan rangkaian Boost Converter yang akan dikendalikan tegangan masukannya. Tegangan masukan dari Boost Converter adalah tegangan keluaran sel surya (V_{PV}). Oleh karena itu V_{PV} adalah keluaran dari blok rangkaian Boost Converter ini. Sementara itu, Model sel surya memberikan arus keluaran sel surya yaitu I_{PV} sebagai masukan pada sistem Boost Converter. Masukan lain dari blok rangkaian Boost Converter ini adalah sinyal PWM yang dihasilkan oleh blok pembuat sinyal PWM.

Pada gambar 3.20 dapat dilihat bahwa tegangan keluaran dari rangkaian Boost Converter dijaga konstan sehingga dalam analisis ini dianggap sebagai suatu tegangan konstan V_C . R_L adalah hambatan dalam yang terdapat pada induktor L . I_{C1} merupakan arus yang mengalir melalui kapasitor C_1 , sedangkan I_L adalah arus yang mengalir pada induktor. Diode D sendiri akan memiliki tegangan *on* V_D .

Model persamaan ruang keadaan digunakan untuk memodelkan dan membangun blok rangkaian Boost Converter dari sistem MPPT ini. Penurunan matriks ruang keadaan sistem dilakukan dengan metode *state space averaging* (Hart, 1997). Analisis dengan metode *state space averaging* dilakukan karena rangkaian Boost Converter memiliki switch, sehingga rangkaian Boost Converter

ini memiliki 2 kondisi yang berbeda pada saat beroperasi, yaitu pada saat switch terbuka dan pada saat switch tertutup.

Pada saat switch terbuka, maka rangkaian Boost Converter menjadi seperti pada gambar 3.21.



Gambar 3.21. Rangkaian Boost Converter *Switch* Terbuka

Dengan mengaplikasikan Hukum Kirchoff pada gambar 3.12 diperoleh dua buah persamaan yaitu persamaan (3.7) dan (3.8).

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

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

Kedua persamaan ini merupakan persamaan keadaan dari rangkaian Boost Converter untuk switch terbuka. Ditambah dengan persamaan model sel surya pada persamaan (3.4), maka dapat diperoleh persamaan keadaan Boost Converter untuk *switch* terbuka. Namun pada analisis sistem melalui fungsi alih, persamaan model sel surya yang digunakan adalah persamaan (3.5). Maka kemudian dapat dibentuk matriks ruang keadaan seperti pada persamaan (3.9).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_D}{L} - \frac{V_C}{L} \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

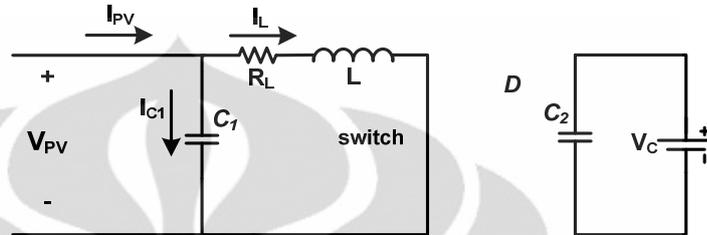
Dimana,

$$A_{32} = -\frac{1}{N_S R_{Sh} \tau} - \frac{I_0 M q}{N_S A k T C \tau} \quad (3.10)$$

$$A_{33} = -\frac{1}{\tau} - \frac{R_S}{R_{Sh} \tau} - \frac{I_0 M q R_S}{A k T C \tau} \quad (3.11)$$

$$B_{31} = I_L - I_O(M - 1) \quad (3.12)$$

Pada saat switch tertutup, maka rangkaian Boost Converter menjadi seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.22. Rangkaian Boost Converter *Switch* Tertutup

Kembali dengan mengaplikasikan Hukum Kirchoff pada rangkaian kemudian diperoleh dua persamaan yaitu persamaan (3.13) dan (3.14).

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{R_L}{L} I_L + \frac{1}{L} V_{PV} \quad (3.13)$$

$$\frac{dV_{PV}}{dt} = -\frac{1}{C_1} I_L + \frac{1}{C_1} I_{PV} \quad (3.14)$$

Dari kedua persamaan di atas dan persamaan keluaran model sel surya yaitu persamaan (3.4), telah diperoleh persamaan keadaan untuk *switch* tertutup. Namun pada analisa, sama seperti pada saat *switch* terbuka, persamaan model sel surya yang digunakan adalah persamaan(3.5). Maka kemudian dibentuk matriks ruang keadaan untuk switch tertutup seperti pada persamaan (3.15).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dimana,

A_{32} : persamaan 3.10

A_{33} : persamaan 3.11

B_{31} : persamaan 3.12

Dengan metode *state space averaging*, maka matriks ruang keadaan 3.9 dan 3.15 dijumlah dengan terlebih dahulu diberikan faktor pengali D untuk switch tertutup dan 1-D untuk switch terbuka. Maka pada akhirnya diperoleh matriks ruang keadaan yang dapat merepresentasikan keseluruhan kondisi rangkaian Boost Converter, yaitu pada persamaan 3.7.

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_D}{L} - \frac{V_C}{L} \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} \right) \times (1 - D) \\
 & \left(\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} \right) \times D \\
 & \hline
 & \begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(-\frac{V_D}{L} - \frac{V_C}{L}\right) \times (1 - D) \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

Dimana,

A_{32} : persamaan 3.10

A_{33} : persamaan 3.11

B_{31} : persamaan 3.12

Dengan keluaran dari matriks ruang keadaan adalah V_{PV} , maka persamaan keluaran dari sistem ini adalah sebagai berikut:

$$y = [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Berdasarkan penjabaran di atas, persamaan (3.16) dan (3.17) menunjukkan persamaan ruang keadaan Boost Converter dengan model sel surya sebagai masukannya. Persamaan keadaan ini yang akan digunakan untuk analisis rangkaian Boost Converter dalam sistem MPPT.

3.5.1 Penentuan Nilai Komponen dan Tegangan Keluaran Boost Converter

Pada rangkaian Boost Converter ini, tegangan keluaran dijaga konstan yaitu V_C . Hal ini dilakukan karena keluaran dari sistem MPPT ini kemudian akan diubah oleh suatu sistem inverter menjadi tegangan AC yang sama seperti listrik yang disalurkan oleh PLN di rumah-rumah. Listrik PLN di rumah-rumah memiliki nilai tegangan maksimum sebesar 220 Volt dan minimum sebesar -220 Volt. Agar sistem inverter ini mampu mengeluarkan tegangan AC dengan rentang 440 Volt, maka keluaran dari sistem MPPT ini juga harus memiliki nilai mendekati 440 Volt. Maka pada penelitian ini V_C dianggap konstan pada nilai 400 Volt.

Pada bab 2 telah dijelaskan mengenai penentuan nilai induktansi minimum pada induktor dan nilai kapasitansi minimum pada kapasitor. Penentuan nilai induktansi minimum dilakukan dengan menggunakan persamaan (2.21) sedangkan penentuan nilai kapasitansi minimum dilakukan berdasarkan persamaan (2.22). Rangkaian Boost Converter ini didesain untuk bekerja pada frekuensi PWM 20 kHz. Rangkaian Boost Converter ini harus dapat bekerja pada rentang duty cycle yang lebar, yaitu $0,01 \leq D \leq 0,99$. Telah diketahui bahwa tegangan keluaran dari Boost Converter adalah 400 Volt. Sistem MPPT ini akan bekerja pada sel surya yang menghasilkan daya sekitar 700 sampai 900 Watt. Dengan menggunakan nilai daya maksimal yang mampu dihasilkan sel surya pada pengukuran standar, yaitu 827,2 W, maka dapat diperoleh hambatan beban sistem yaitu:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{400^2}{827,2} = 193,42 \Omega$$

Dalam perhitungan induktansi minimum, nilai $D=0,01$ digunakan agar sistem dapat bekerja di rentang D yang telah ditetapkan. Maka perhitungan untuk nilai induktansi minimum pada Boost Converter ini, sesuai dengan persamaan (2.21), adalah:

$$L_{min} = \frac{0,01(1 - 0,01)^2 193,42}{2(20000)} = 4,74 \times 10^{-5} H$$

Nilai induktansi minimum telah diperoleh yaitu $4,74 \times 10^{-5}$ H. Pada Boost Converter ini, nilai induktansi L dari induktor yang akan digunakan sedikit di atas nilai L_{min} agar lebih tahan terhadap variasi beban. Ditetapkan nilai L pada Boost Converter ini adalah $6,6 \times 10^{-5}$ H. Induktor L pada rangkaian ini dianggap memiliki hambatan dalam yaitu R_L dengan nilai $0,15 \Omega$.

Penentuan kapasitansi kapasitor C_2 dilakukan melalui persamaan (2.22). Rangkaian Boost Converter ini diharapkan menghasilkan tegangan keluaran yang memiliki ripple sebesar 1%. Nilai D yang digunakan adalah 0,99 agar Boost Converter dapat bekerja pada rentang duty cycle yang telah ditetapkan. Maka perhitungan nilai C_2 minimum pada Boost Converter ini sesuai dengan persamaan (2.22) adalah:

$$C_{2min} = \frac{0,99}{(193,42)(20000)(0,01)} = 24,75 \mu F$$

Sementara itu, kapasitansi kapasitor C_1 harus cukup besar sehingga mampu menyimpan muatan sampai dengan daya maksimal yang mampu dikeluarkan oleh sel surya. Pada penelitian ini, nilai kapasitansi kapasitor C_1 adalah $9,4 \times 10^{-3}$ F.

Sebagai keterangan tambahan, diode memiliki tegangan reverse sebesar 0,62 Volt. Untuk merangkum penjelasan ini, tabel 3.2 menunjukkan nilai tiap variabel tetap yang terdapat pada rangkaian Boost Converter.

Tabel 3.2. Tabel Variabel Tetap Boost Converter

NO	VARIABEL	NILAI
1	L	66 μ H
2	C_1	9,4 mF
3	C_2	47,4 μ F

4	R_L	0,15 Ω
5	V_D	0,62 Volt
6	V_C	400 Volt

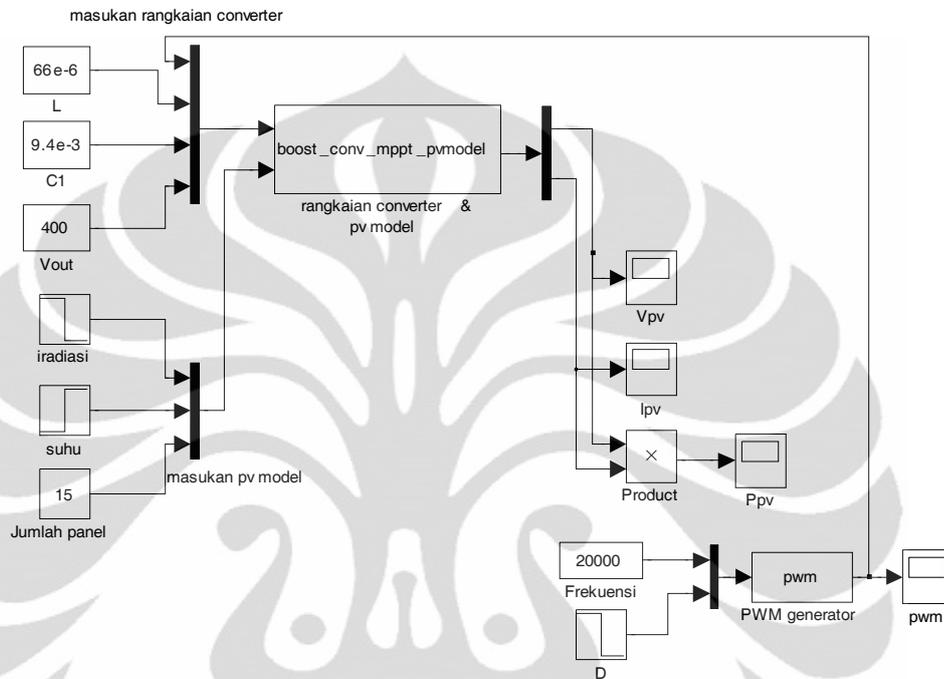
3.5.2 Simulasi Rangkaian Boost Converter

Berdasarkan model ruang keadaan Boost Converter yang telah dibahas maka kemudian simulasi dari rangkaian Boost Converter dibuat. Pada blok simulasi rangkaian Boost Converter pada sistem MPPT, persamaan ruang keadaan (3.16) tidak digunakan karena pada persamaan (3.16) merupakan persamaan hasil linearisasi. Persamaan keluaran dari model sel surya yang digunakan adalah persamaan yang belum dilinearisasi, yaitu persamaan (3.4). Maka dalam pemrograman blok rangkaian Boost Converter ini persamaan ruang keadaan yang digunakan kondisional bergantung pada kondisi switch apakah terbuka atau tertutup. Jika switch terbuka, maka persamaan diferensial yang digunakan sebagai persamaan ruang keadaan adalah persamaan (3.4), (3.7) dan (3.8). Sedangkan jika switch tertutup maka persamaan diferensial yang digunakan sebagai persamaan ruang keadaan adalah persamaan (3.4), (3.13) dan (3.14). Berdasarkan seluruh persamaan tersebut, kemudian program C-Mex dari model Boost Converter ini ditulis.

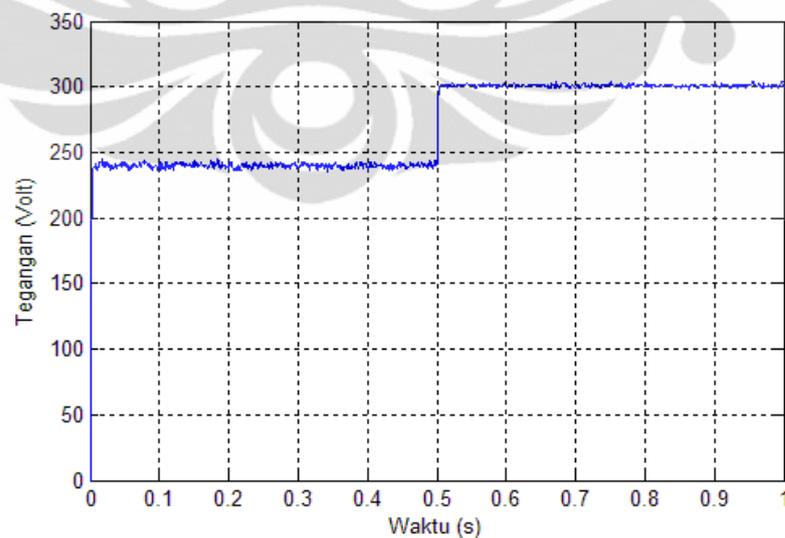
Gambar 3.23 menunjukkan diagram blok simulasi dari rangkaian Boost Converter ini. Model Boost Converter yang telah diperoleh mengikutsertakan model sel surya didalamnya, maka dapat dilihat pada diagram blok bahwa masukan untuk model sel surya juga diperlukan. Kondisi lingkungan dari sel surya disetel pada kondisi pengukuran standar ($T=298K$ dan $\lambda=1000W/m^2$). Telah dijelaskan bahwa pengatur *switch* pada rangkaian Boost Converter ini adalah sinyal PWM. Maka dalam simulasi ini diperlukan blok pembuat sinyal PWM, dalam gambar terlihat dengan nama *PWM generator*. Maka masukan sistem ini adalah nilai duty cycle D . Pada simulasi ini, duty cycle D akan berupa suatu sinyal step sebagai berikut:

$$0 \leq t < 0,5, D=0,4$$

$$0,5 \leq t \leq 1, D=0,25$$



Gambar 3.23. Diagram Blok Simulasi Rangkaian Boost Converter



Gambar 3.24. Grafik $V_{PV}(t)$ Hasil Simulasi Rangkaian Boost Converter

Gambar 3.24 menunjukkan grafik $V_{PV}(t)$ yang terbentuk jika sinyal PWM yang masuk ke rangkaian Boost Converter merupakan step dari $D=0,4$ menjadi $D=0,25$ pada saat $t=0,5s$. Pada grafik ini terlihat bahwa pada saat $D=0,4$, V_{PV} beresilasi di sekitar 240 V. Ketika $t=0,5s$ kemudian D diubah menjadi 0,25. Hal ini menyebabkan nilai V_{PV} berubah menjadi beresilasi disekitar 300 V. Maka terlihat bahwa perubahan masukan sistem, yaitu *duty cycle* D , menyebabkan perubahan keluaran sistem, yaitu nilai V_{PV} . Hubungan yang dimiliki oleh D dan V_{PV} adalah berbanding terbalik. Hal ini dapat dilihat ketika nilai D diperkecil maka V_{PV} justru meningkat.

Persamaan (2.20) menunjukkan hubungan antara D dan V_S dengan V_O konstan. Karena pada sistem ini $V_S = V_{PV}$ dan $V_O = V_C$, maka persamaan (2.20) menjadi persamaan (3.18) berikut:

$$V_{PV} = V_C(1 - D) \quad (3.18)$$

Jika diketahui $D=0,4$ dan $V_C = 400$ Volt, maka berdasarkan persamaan (3.18), nilai V_{PV} adalah 240 Volt. Sedangkan jika diketahui $D=0,25$, maka berdasarkan persamaan (3.18), diperoleh nilai $V_{PV} = 300$ V. Hasil simulasi juga menunjukkan nilai yang sesuai dengan perhitungan secara teoritis. Persamaan (3.18) ini juga membuktikan bahwa memang hubungan antara V_{PV} dan D berbanding terbalik. Maka melalui simulasi ini dapat disimpulkan bahwa simulasi rangkaian Boost Converter yang dibangun sudah sesuai dan dapat digunakan pada sistem MPPT.

3.5.3 Fungsi Alih Boost Converter

Representasi fungsi alih sistem akan digunakan dalam analisis sistem MPPT ini. Oleh karena itu pada bagian ini akan dibahas mengenai fungsi alih dari rangkaian Boost Converter. Persamaan ruang keadaan dari rangkaian Boost Converter adalah persamaan (3.16) dan (3.17). Persamaan ruang keadaan ini dapat ditransformasikan ke dalam fungsi

alih sistem. Pada bab 2 telah dijelaskan mengenai proses transformasi persamaan ruang keadaan menjadi fungsi alih sistem. Keluaran dari sistem ini adalah tegangan sel surya (V_{PV}). Berdasarkan persamaan (2.20), V_{PV} sebanding dengan $1-D$, oleh karena itu, masukan dari fungsi alih ini adalah $1-D$. Maka, fungsi alih $G(s)$ adalah:

$$G(s) = \frac{V_{PV}(s)}{(1-D)(s)} \quad (3.19)$$

Untuk melakukan transformasi dari persamaan ruang keadaan menjadi fungsi alih $G(s)$ diperlukan matriks A , B , C , dan D . Persamaan (3.16) juga dapat ditulis menjadi seperti pada persamaan (3.20)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_{PV} \\ I_{PV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\left(\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1-D) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{31} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Maka matriks A , B , C , dan D dari persamaan ruang keadaan sistem ini adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & \frac{1}{C_1} \\ 0 & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -\left(\frac{V_D}{L} + \frac{V_C}{L}\right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \quad 1 \quad 0]; \quad D = 0$$

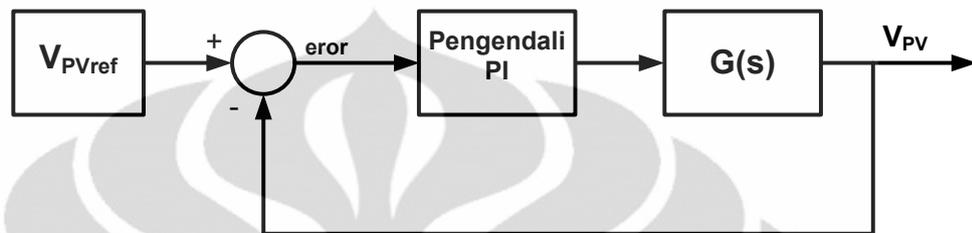
Berdasarkan persamaan transformasi ruang keadaan ke fungsi alih pada persamaan (2.26), maka dapat diperoleh fungsi alih dari $G(s)$ adalah sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{(V_D+V_C)s-A_{33}(V_D+V_C)}{LC_1s^3+(R_LC_1-A_{33}LC_1)s^2+(1-A_{33}R_LC_1-A_{32}L)s-(A_{32}R_L-A_{33})} \quad (3.21)$$

3.6 Blok Pengendali PI

Pengendali yang digunakan pada sistem MPPT ini adalah blok pengendali PI. Fungsi dan prinsip kerja dari pengendali PI telah dijelaskan pada bab 2. Fungsi alih dari pengendali PI pun telah disebutkan pada persamaan (2.28). Pengendalian yang dilakukan pada sistem MPPT ini adalah pengendalian pada

tegangan sel surya (V_{PV}). Pengendalian V_{PV} ini dilakukan melalui rangkaian Boost Converter. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian 3.5.3, fungsi alih dari Boost Converter ini adalah $G(s)$ yang sesuai dengan persamaan (3.21).



Gambar 3.25. Diagram Blok Lingkaran Tertutup Sistem MPPT

Gambar 3.25 menunjukkan diagram blok sistem pengendalian V_{PV} . Pengendali PI dipasang secara *cascade* dan sistem dibuat menjadi sistem lingkaran tertutup. Dengan sistem lingkaran tertutup ini, maka masukan menjadi nilai V_{PVref} . Nilai V_{PVref} ini diperoleh dari algoritma ICM. Masukan ke blok pengendali PI adalah nilai eror antara V_{PVref} dan V_{PV} . Sesuai dengan fungsinya, pengendali PI akan memberikan penguatan proporsional pada eror dan menjumlahkannya hingga konvergen menjadi nilai 1-D. Nilai 1-D ini kemudian menjadi masukan pada fungsi alih $G(s)$. Dengan adanya pengendali PI pada sistem lingkaran tertutup ini, maka diharapkan keluaran V_{PV} akan mengikuti nilai V_{PVref} .

Pada gambar rancangan sistem MPPT pada gambar 3.1, terlihat bahwa masukan dari MPPT, yaitu V_{PVref} bernilai negatif, sedangkan umpan balik V_{PV} bernilai positif. Ini berkebalikan dengan diagram blok gambar 3.25 di atas. Hal ini dilakukan karena keluaran dari pengendali PI yang diharapkan pada simulasi ini adalah nilai duty cycle D yang akan menjadi masukan ke dalam blok pembuat sinyal PWM. Seperti yang dapat dilihat pada diagram blok gambar 3.25,

$$(1 - D) = (V_{PVref} - V_{PV})G_{PI} \quad (3.22)$$

Maka, dapat diperoleh bahwa:

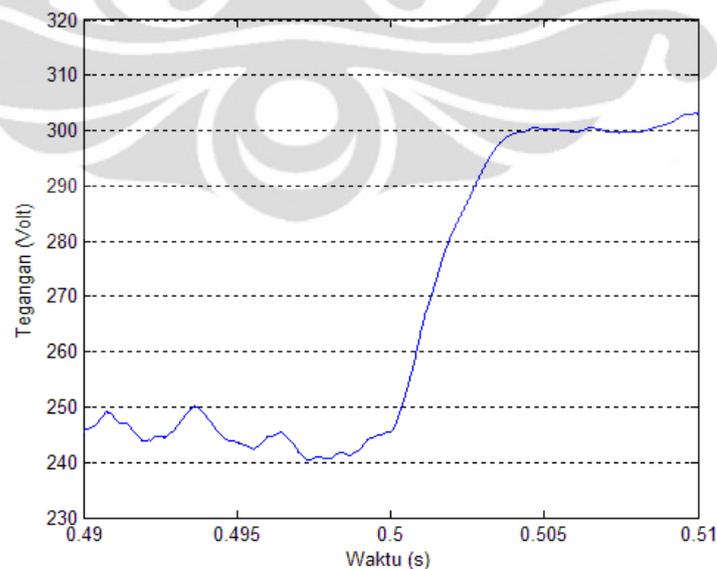
$$D = 1 + (-V_{PVref} + V_{PV})G_{PI} \quad (3.23)$$

Dapat dilihat bahwa tanda pada V_{PVref} dan V_{PV} menjadi berkebalikan jika keluaran yang ingin dihasilkan oleh pengendali PI adalah D. Jadi pembalikan tanda yang dilakukan agar keluaran pengendali PI dapat berubah menjadi nilai D sehingga sesuai untuk menjadi masukan pada blok pembuat sinyal PWM.

3.6.1 Penalaan Pengendali PI dengan Metode Ciancone-Marlin

Pengendali PI yang terdapat pada sistem MPPT ini memiliki Konstanta K_P dan T_I . Nilai kedua konstanta ini dapat diperoleh melalui proses penalaan. Metode penalaan yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Ciancone-Marlin. Metode penalaan Ciancone-Marlin ini telah dijelaskan pada bagian 2.6.

Langkah pertama yang dilakukan dalam metode penalaan Ciancone adalah menentukan konstanta FOPDT dari respon rangkaian Boost Converter. Untuk itu, terlebih dulu dilihat bagaimana respon rangkaian Boost Converter jika nilai set point D berubah. Untuk melihat respon rangkaian Boost Converter ini, maka simulasi seperti pada bagian 3.5.2 dilakukan (diagram blok simulasi seperti pada gambar 3.23) dengan mengubah nilai D pada saat $t=0,5s$ dari $D=0,4$ menjadi $D=0,25$.



Gambar 3.26. Grafik VPV(t) Boost Converter dengan Perubahan Set Point

Gambar 3.26 menunjukkan grafik V_{PV} sebagai respon dari model Boost Converter. Berdasarkan grafik ini diperoleh $t_{28\%}=0,5005s$ dan $t_{63\%}=0,5017s$. Maka berdasarkan persamaan (2.34) dan (2.35) diperoleh:

$$\tau_P = 1,5(0,5017-0,5006)=1,65 \times 10^{-3}$$

$$\theta_P = (t_{63\%}-0,5) - \tau_{FOPDT} = 5 \times 10^{-4}$$

Selain itu, berdasarkan persamaan (2.33), diperoleh juga penguatan K dari proses adalah:

$$K = \frac{300 - 240}{0,4 - 0,25} = 400$$

Maka kemudian dapat dihitung *fraction dead time* T_f sesuai dengan persamaan (2.30) yaitu:

$$T_f = \frac{5 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4} + 1,65 \times 10^{-3}} = 0,232$$

Berdasarkan tabel penalaan Ciancone, dengan $T_f=0,2$ diketahui bahwa $\mu'=1,8$ dan $\tau'=0,23$. Maka berdasarkan pada persamaan (2.31) dan (2.32) diperoleh hasil penalaan dengan metode Ciancone adalah:

$$K_P = 1,8/400 = 4,5 \times 10^{-3}$$

$$T_I = 0,23(5 \times 10^{-4} + 1,65 \times 10^{-3}) = 3,91 \times 10^{-4}$$

Karena K_P dan T_I telah didapatkan. Maka fungsi alih dari pengendali PI dapat dinyatakan seperti pada persamaan (3.24) berikut:

$$G_{PI}(s) = 4,5 \times 10^{-3} \left(1 + \frac{1}{3,91 \times 10^{-4} s} \right) \quad (3.24)$$

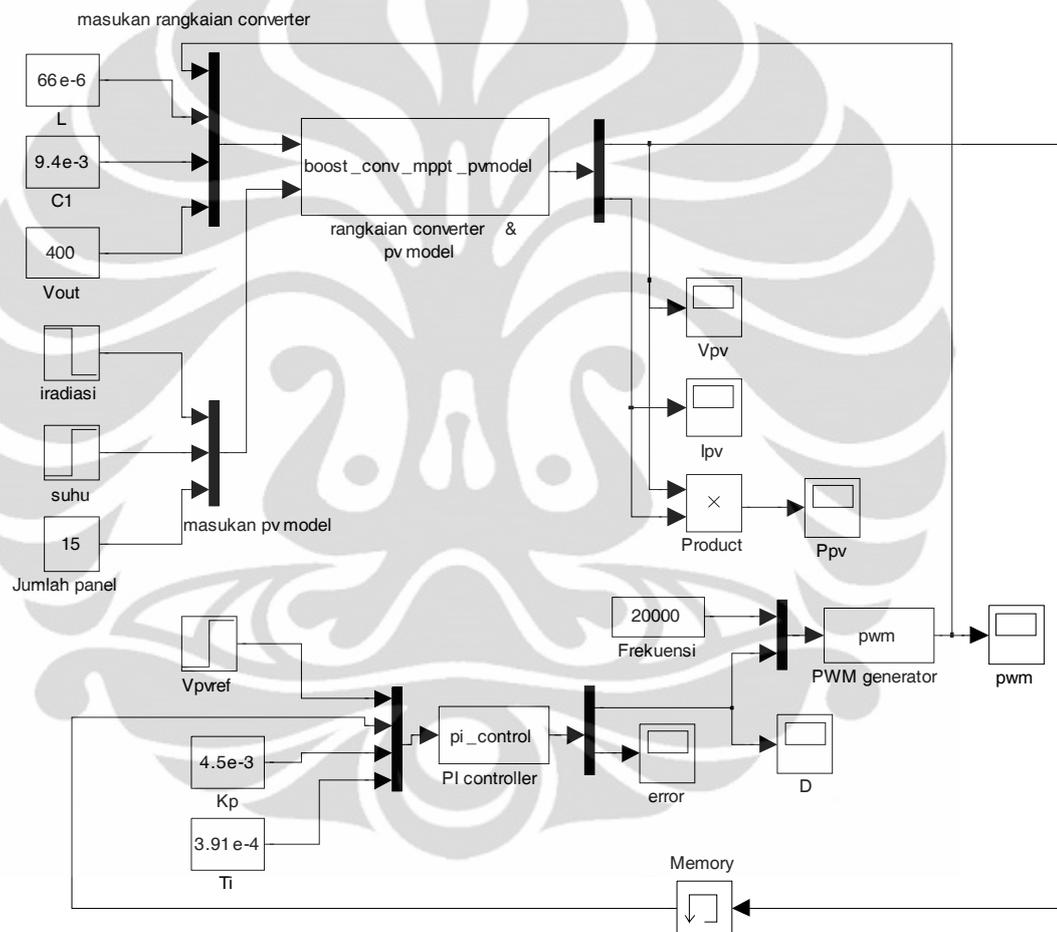
3.6.2 Simulasi Rangkaian Boost Converter dengan Blok Pengendali PI

Setelah nilai parameter K_P dan T_I diperoleh, maka kemudian blok pengendali PI dapat diaplikasikan pada rangkaian Boost Converter. Gambar 3.27 menunjukkan diagram blok simulasi rangkaian Boost Converter dengan tambahan blok pengendali PI. Blok pengendali PI diberi nama blok *PI controller* yang merupakan blok program C-Mex dengan nama **pi_control.c**. Blok ini dipasang di depan blok pembuat sinyal PWM karena blok pengendali PI ini akan menghasilkan sinyal *duty*

cycle D yang akan menjadi masukan pada blok pembuat sinyal PWM. Nilai K_P dan T_I yang digunakan sesuai dengan hasil penalaan yang telah dilakukan. Pada simulasi ini, nilai V_{PVref} adalah sinyal step yang disetel sebagai berikut:

$$0 \leq t < 2, V_{PVref} = 240 \text{ V}$$

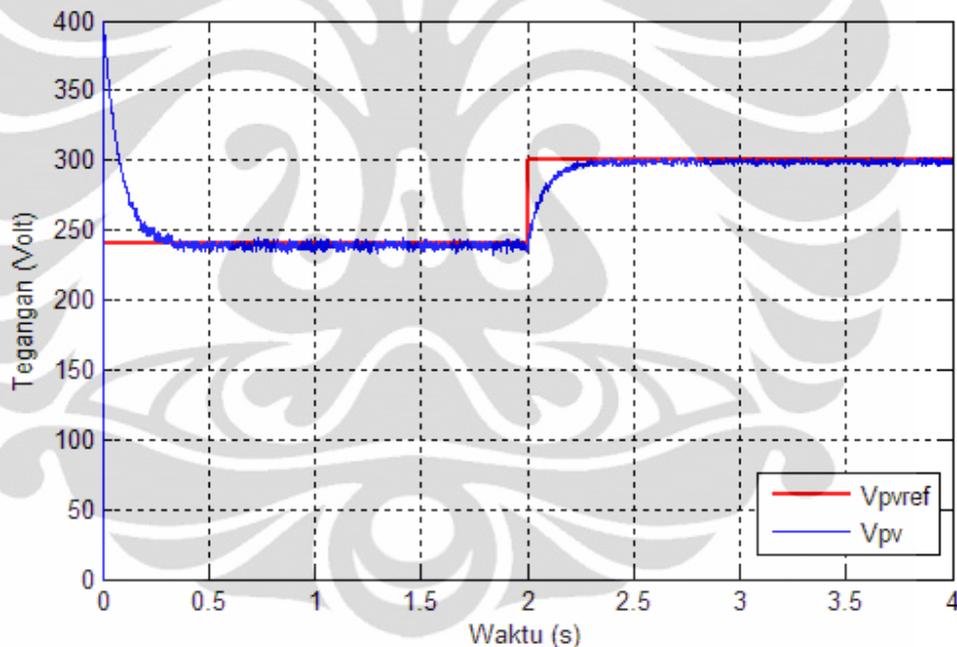
$$2 \leq t \leq 4, V_{PVref} = 300 \text{ V}$$



Gambar 3.27. Diagram Blok Simulasi Boost Converter dengan Pengendali PI

Gambar 3.28 menunjukkan grafik $V_{PV}(t)$ dan V_{PVref} hasil simulasi. Garis merah merupakan set point sistem, yaitu V_{PVref} . Sedangkan grafik biru merupakan keluaran sistem, yaitu V_{PV} . Berdasarkan grafik terlihat bahwa nilai keluaran V_{PV} mengikuti nilai setpointnya. Pada saat $t < 2s$, V_{PV}

mencapai kondisi tunak dengan beresilasi di sekitar 240V. Grafik menurun pada saat $t < 0,3s$ merupakan masa transien sebelum mencapai kondisi tunak dari kondisi awal sistem yang mati. Kemudian ketika $t = 2$, terjadi perubahan nilai V_{PVref} menjadi 300 V. Adanya pengendali PI menyebabkan keluaran, V_{PV} juga akan berubah, terlihat dari grafik bahwa V_{PV} berubah dari 240 V menuju 300 V pada saat $2 \leq t \leq 2,5s$. Pada akhirnya V_{PV} mencapai kondisi tunaknya yaitu beresilasi disekitar 300V. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa dengan adanya pengendali PI pada sistem Boost Converter ini, tegangan V_{PV} dapat diatur melalui pemberian set point V_{PVref} sesuai dengan yang diinginkan.

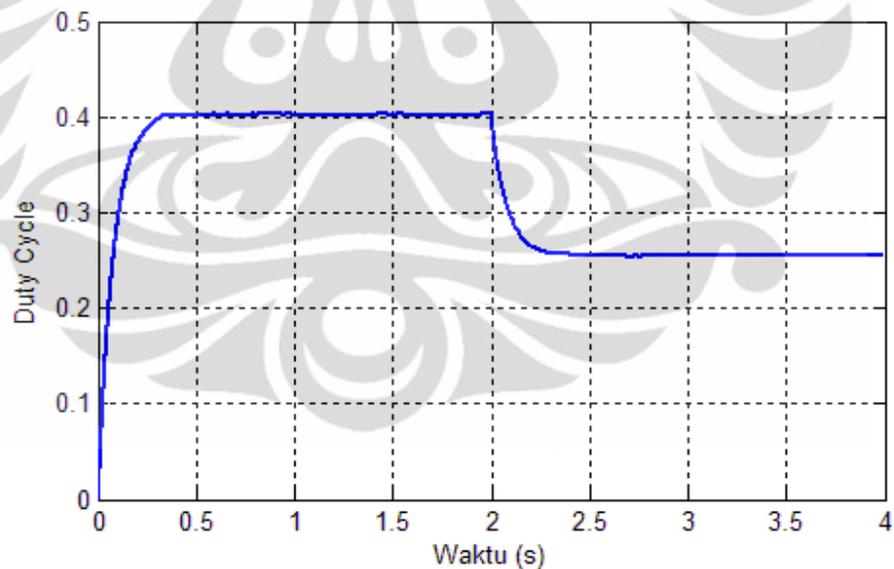


Gambar 3.28. Grafik $V_{PV}(t)$ Simulasi Boost Converter dengan Pengendali PI

Telah disebutkan bahwa pengendali PI ini memberikan keluaran berupa sinyal *duty cycle* D. Gambar 3.29 menunjukkan grafik sinyal kendali D yang dikeluarkan oleh pengendali PI. Berdasarkan grafik $D(t)$ terlihat bahwa pada saat $0 < t < 2$, ketika V_{PVref} disetel pada nilai 240 V, kondisi tunak *duty cycle* D adalah pada nilai 0,4. Sedangkan ketika V_{PVref}

diubah menjadi 300 V, nilai D kembali berubah menjadi 0,25. Berdasarkan persamaan (3.18), dengan memasukan nilai $V_{PV}=V_{PVref}=240$ dan $V_C=400$, maka diperoleh nilai $D=0,4$, dan dengan memasukan nilai nilai $V_{PV}=V_{PVref}=300$, maka diperoleh nilai $D=0,25$. Hal ini membuktikan bahwa sistem kendali pada Boost Converter ini telah memberikan sinyal kendali yang sesuai sehingga keluaran dari sistem ini, V_{PV} juga telah sesuai dengan V_{PVref} .

Pada Gambar 3.29 terlihat bahwa kurva D dimulai dari 0. Berdasarkan persamaan (3.18), maka nilai V_{PV} seharusnya 400 V. Ketika kemudian nilai D semakin bertambah hingga mencapai kondisi tunaknya, maka karena hubungan antara D dan V_{PV} berbanding terbalik maka menyebabkan nilai V_{PV} akan berkurang dari 400 V menuju kondisi tunaknya, yaitu 240 V. Hal ini menjelaskan daerah transien dari grafik gambar 3.28 yang dimulai dari $V_{PV} = 400$ V.



Gambar 3.29. Grafik D(t) Simulasi Boost Converter dengan Pengendali PI

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Sistem MPPT dengan rangkaian Boost Converter telah dirancang pada Bab 3. Model sel surya juga telah dibangun agar sistem MPPT ini dapat diujicoba. Algoritma ICM sebagai algoritma MPPT yang digunakan juga telah dibuat dan disimulasikan. Rangkaian Boost Converter sebagai basis dari sistem MPPT ini telah dimodelkan dan model persamaan ruang keadaan dari sistem ini telah diperoleh. Blok pengendali PI dan blok pembuat sinyal PWM juga telah dibangun pada bab 3. Pembahasan selanjutnya adalah analisis dan simulasi dari sistem yang telah dirancang dan dibangun pada Bab 3.

4.1 Analisis Kestabilan Sistem

Sebelum melihat bagaimana performa dari sistem MPPT yang telah dirancang, kestabilan sistem dianalisis terlebih dahulu. Kestabilan sistem MPPT yang telah dirancang dapat dilihat melalui analisis pada fungsi alih sistem MPPT ini. Sistem MPPT ini terdiri atas rangkaian Boost Converter, Pengendali PI, algoritma MPPT, dan Pembuat Sinyal PWM. Algoritma MPPT hanya memberikan nilai referensi tegangan sel surya. Sedangkan pembuat sinyal PWM menghasilkan sinyal PWM berdasarkan nilai *duty cycle* D . Karena kedua blok hanya memiliki hubungan yang linear antara masukan dan keluarannya, maka dapat dikatakan bahwa fungsi alih dari kedua blok ini adalah konstanta 1.

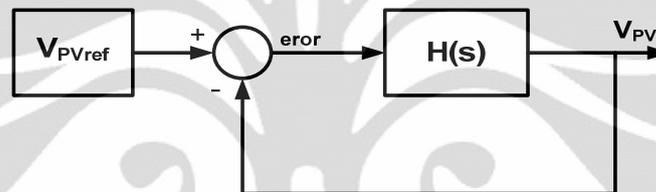
Sementara itu, persamaan fungsi alih rangkaian Boost Converter $G(s)$ telah diperoleh pada persamaan (3.21). Analisis fungsi alih sistem ini akan dilakukan pada saat sistem berada pada kondisi pengukuran standar, yaitu suhu sel surya 298 K, dan *irradiance* 1000W/m^2 dengan titik kerja sel surya pada titik kerja optimalnya yaitu pada $V_{PV} = 261,0$ Volt dan $I_{PV} = 3,17$ Ampere. Dengan memasukkan nilai-nilai parameter dan juga nilai-nilai tiap variabel tetap pada rangkaian Boost Converter seperti yang tertera pada tabel 3.2, maka fungsi alih dari Boost Converter dapat diperoleh, yaitu:

$$G(s) = \frac{400,6s + 1,554 \times 10^8}{6,204 \times 10^{-7}s^3 + 0,2421s^2 + 548,3s + 3,887 \times 10^5} \quad (4.1)$$

Sedangkan fungsi alih dari pengendali PI pada sistem MPPT ini, $G_{PI}(s)$, telah diperoleh berdasarkan persamaan (3.24). Maka fungsi alih sistem MPPT secara keseluruhan dapat dinyatakan sebagai $H(s)$ sesuai dengan persamaan (4.2) dan (4.3).

$$H(s) = G_{PI}(s).G(s) \quad (4.2)$$

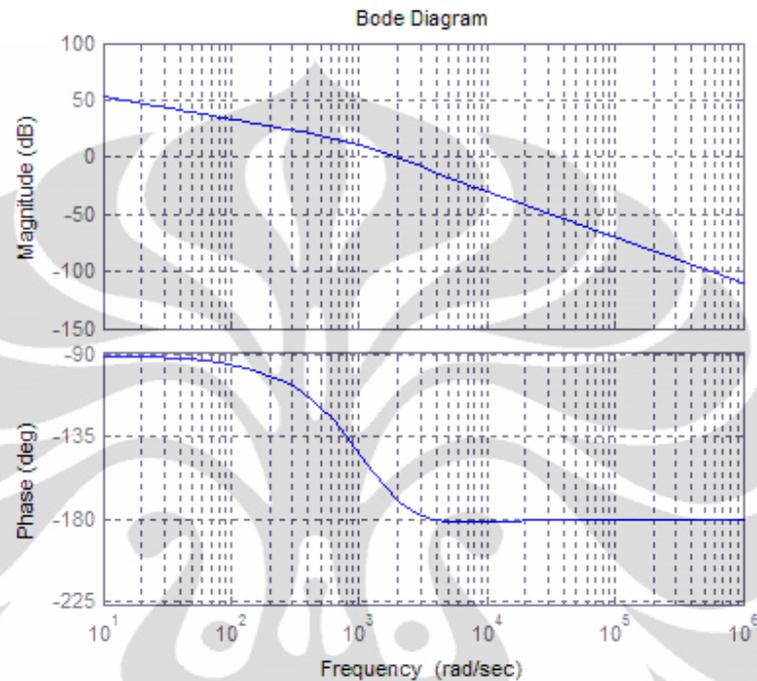
$$H(s) = \frac{7,05 \times 10^{-4}s^2 + 83,83s + 2,1 \times 10^5}{2,43 \times 10^{-10}s^4 + 2,88 \times 10^{-7}s^3 + 0,065s^2 + 45,59s} \quad (4.3)$$



Gambar 4.1. Diagram Blok Lingkaran Tertutup Sistem MPPT

Dengan memperoleh $H(s)$ sebagai fungsi alih sistem ini, maka kestabilan sistem dapat dianalisis melalui Diagram Bode dari $H(s)$. Gambar 4.2 menunjukkan diagram bode dari $H(s)$. Berdasarkan diagram bode yang terbentuk, terlihat bahwa pada saat fasa berada pada -180° , nilai magnitude dari sistem adalah $-12,7$ dB, maka *Gain Margin* sistem adalah sebesar $12,7$ dB. Hal ini menunjukkan bahwa sistem MPPT ini stabil, karena pada saat fasa -180° , besar magnitudenya kurang dari 1. Telah disebutkan pada bagian 2.4 bahwa batas kestabilan sistem adalah pada saat magnitude bernilai 1, fasa bernilai -180° . Dengan GM sebesar $12,7$ dB, maka pergeseran Gain yang masih dapat diberikan harus lebih kecil dari pada $4,315$. Jika penguatan yang diberikan lebih dari nilai tersebut maka sistem akan menjadi tidak stabil. Sementara itu, pada saat magnitude 0 dB, nilai fasa adalah -170° , maka *Phase Margin* sistem adalah sebesar 10° . Maka fasa juga masih dapat digeser sebesar 10° sebelum sistem

menjadi tidak stabil. Nilai GM dan PM ini relatif kecil sehingga sistem ini dapat dikatakan berada dekat dengan titik kritis kestabilan.



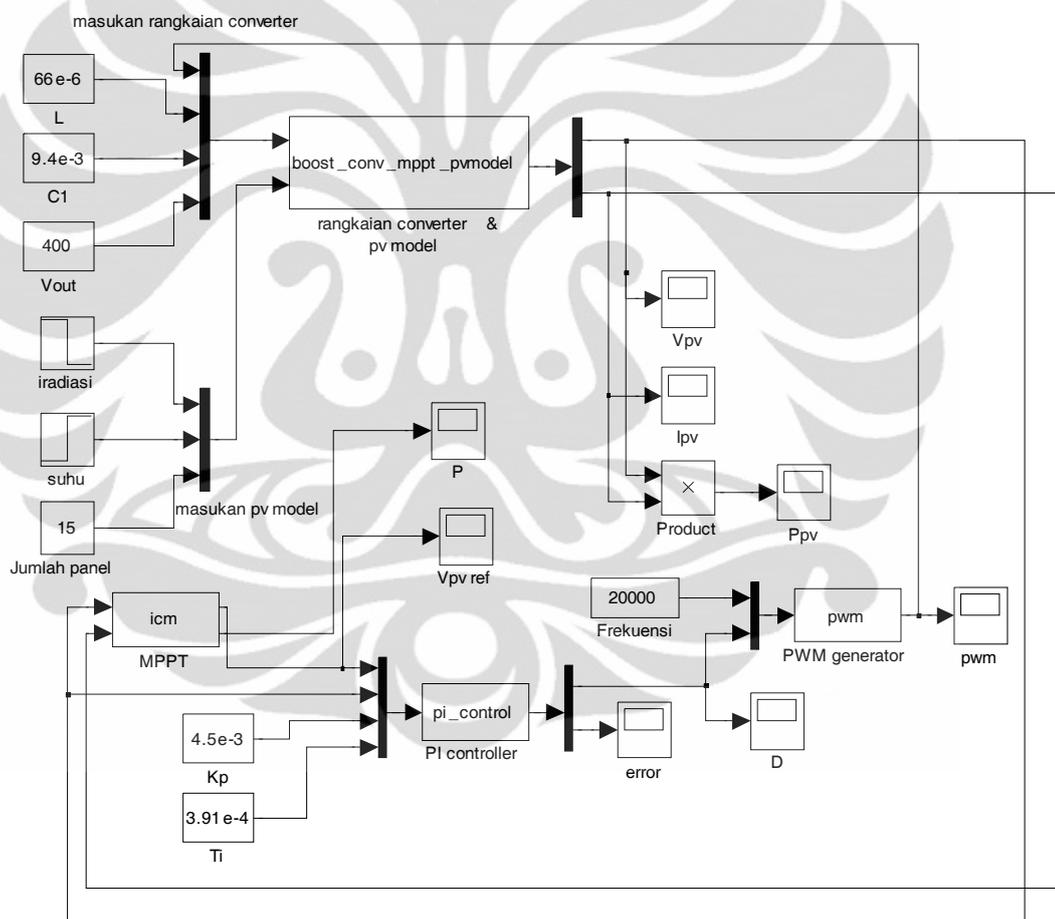
Gambar 4.2. Diagram Bode Fungsi Alih Sistem MPPT $H(s)$

4.2 Diagram Blok Simulasi Sistem MPPT

Sistem MPPT yang telah dirancang kemudian akan disimulasikan pada MATLAB/Simulink. Untuk melakukan simulasi ini, masing-masing blok yang telah dibangun, seperti yang telah dijelaskan pada bab 3, digabungkan. Gambar 4.3 menunjukkan diagram blok dari simulasi sistem pada MATLAB/Simulink.

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terdapat 4 blok pada sistem ini, yaitu blok rangkaian Boost Converter dan model sel surya, blok algoritma ICM, blok pengendali PI, dan blok pembuat sinyal PWM. Blok Boost Converter dan model sel surya digabungkan menjadi 1 blok program C-Mex. Oleh karena itu, masukan dari blok rangkaian boost converter dan model sel surya terbagi 2, yaitu masukan untuk rangkaian Boost Converter dan masukan untuk model sel surya. Masukan

untuk rangkaian Boost Converter sebenarnya hanya 1 yaitu sinyal PWM, Namun dalam blok ini, komponen-komponen rangkaian dan nilai tegangan keluaran Boost Converter yang konstan juga dijadikan masukan agar mudah mengubah-ubah nilainya jika diperlukan. Sementara itu, masukan untuk model sel surya sama seperti yang telah dijelaskan pada bagian 3.2 yaitu kondisi lingkungan berupa nilai *irradiance* dan suhu sel surya, serta jumlah sel surya yang akan dihubungkan seri. Keluaran dari blok ini adalah tegangan sel surya V_{PV} dan arus sel surya I_{PV} .



Gambar 4.3. Diagram Blok Simulasi Sistem MPPT

Untuk blok algoritma ICM, seperti yang telah dijelaskan pada bagian 3.3, masukannya adalah nilai arus dan tegangan sel surya dan keluarannya adalah

nilai tegangan referensi V_{PVref} . Pada blok pengendali PI, V_{PV} yang merupakan keluaran dari blok rangkaian boost converter dan model sel surya serta V_{PVref} yang merupakan keluaran dari blok algoritma ICM dijadikan sebagai masukan dari blok tersebut. Masukan lain dari blok ini adalah nilai konstanta pengendali yaitu K_p dan T_I . Keluaran dari blok ini adalah nilai *duty cycle* D . Nilai *duty cycle* ini masuk ke blok pembuat sinyal PWM. Masukan lain dari blok ini adalah frekuensi dari sinyal PWM itu sendiri. Frekuensi ini dapat disetel sesuai dengan kebutuhan. Dengan adanya kedua masukan tersebut, sinyal PWM yang diinginkan dapat diproduksi oleh blok ini untuk kemudian menjadi masukan pada blok rangkaian Boost Converter.

Seperti yang dapat dilihat pada diagram blok simulasi pada gambar 4.3, nilai-nilai variabel tetap yang telah diperoleh pada bab 3 digunakan. Nilai komponen rangkaian Boost Converter telah diperoleh pada bagian 3.5.1, konstanta K_p dan T_I yang digunakan adalah hasil penalaan pada bagian 3.6.1, dan frekuensi sinyal PWM yang digunakan adalah 20 kHz. Tabel 4.1 menunjukkan nilai dari semua variabel tetap yang digunakan pada sistem MPPT ini.

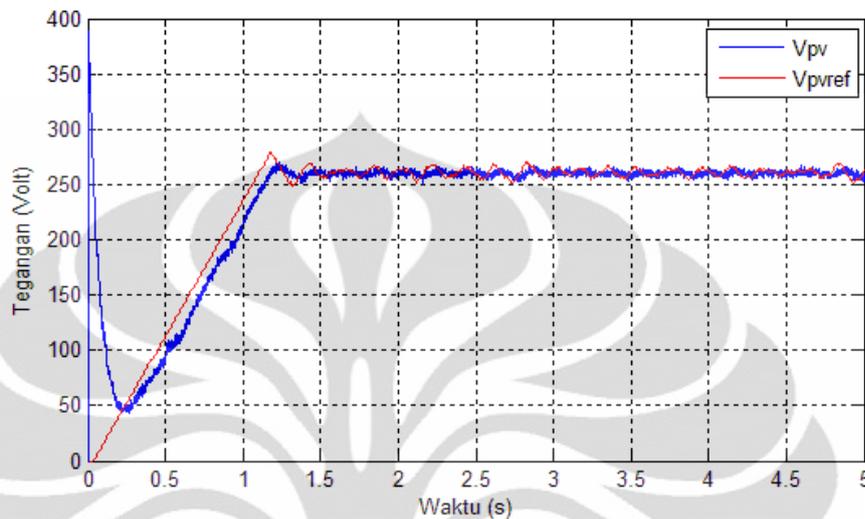
Tabel 4.1 Tabel Nilai Parameter Sistem MPPT

NO	Variabel	Nilai
1	C_1	9,4 mF
2	L	66 μ H
3	Frekuensi PWM	20 kHz
4	ΔV algoritma ICM	0,5 V
5	K_p	$4,5 \times 10^{-3}$
6	T_I	$3,91 \times 10^{-4}$
7	τ_{LPF}	3×10^{-6}

4.3 Simulasi Sistem MPPT pada Kondisi Lingkungan Tetap

Gambar 4.3 menunjukkan diagram blok simulasi dari sistem MPPT yang dibangun. Dengan demikian sistem MPPT ini dapat diujicoba dengan menjalankan simulasi pada MATLAB/Simulink. Pada bagian ini akan dilihat

bagaimana kerja sistem MPPT bila disimulasikan pada kondisi pengukuran standar, yaitu pada kondisi *irradiance* 1000 W/m^2 dan suhu sel surya 298 K .

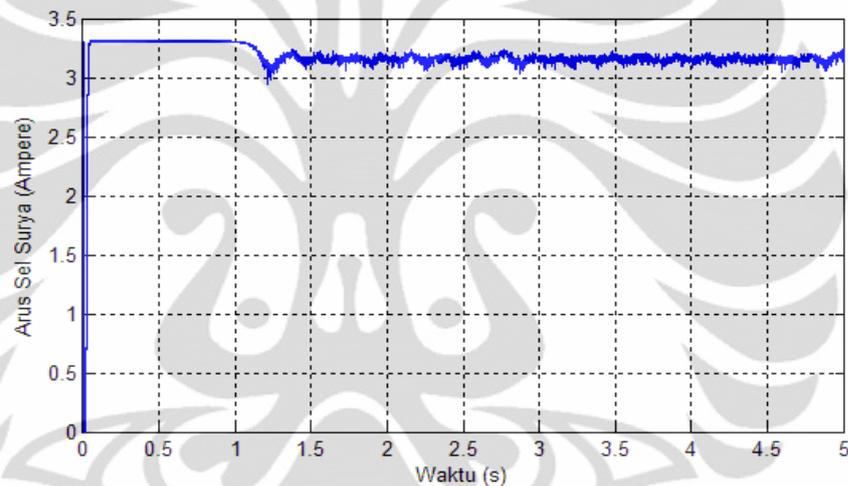


Gambar 4.4. $V_{PV}(t)$ pada Kondisi Pengukuran Standar

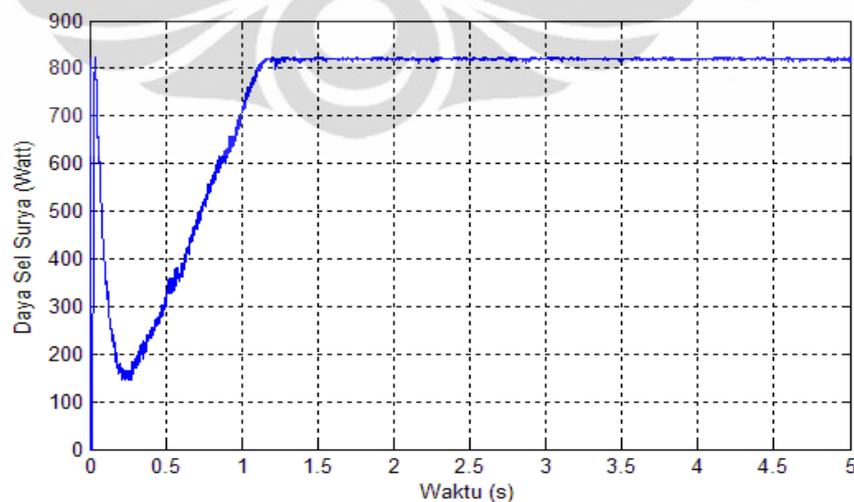
Gambar 4.4 menunjukkan grafik tegangan sel surya. Ada 2 grafik pada gambar ini, yaitu grafik berwarna merah yang merupakan grafik tegangan sel surya referensi yang dikeluarkan oleh algoritma ICM (V_{PVref}) dan grafik berwarna biru yang merupakan grafik tegangan sel surya keluaran sistem (V_{PV}). Dari grafik ini terlihat bahwa tegangan sel surya (V_{PV}) yang dihasilkan oleh sel surya mengikuti nilai tegangan referensi yang dihasilkan oleh algoritma ICM. Nilai V_{PV} keluaran sistem ini pada awalnya berubah-ubah semakin bertambah mengikuti nilai V_{PVref} hingga sampai pada suatu titik ketika algoritma ICM telah menemukan titik kerja optimal dari sel surya. Pada titik tersebut karena V_{PVref} beresilasi di sekitar titik tersebut, maka V_{PV} ikut beresilasi disekitar titik kerja optimal tersebut. Nilai V_{PV} yang terus berusaha mengikuti nilai V_{PVref} adalah karena adanya sistem kendali dengan pengendali PI pada sistem MPPT ini. Titik kerja optimal yang ditemukan oleh algoritma ICM adalah pada $V_{PVref} = 261,97$ Volt. Nilai ini diperoleh dari perhitungan nilai rata-rata $V_{PVref}(t)$ pada waktu $1,5 < t < 5$, waktu ketika V_{PVref} sudah beresilasi. Nilai rata-rata $V_{PV}(t)$ pada waktu tersebut adalah pada $V_{PV} = 261,05$ Volt. Jika dibandingkan dengan nilai titik

kerja optimal sel surya pada kondisi pengukuran standar yang dapat dilihat pada kurva IV pada gambar 3.7, yaitu pada 261,0 Volt, terlihat bahwa sistem MPPT telah berhasil mencari titik kerja optimal dan membuat sel surya bekerja pada titik kerja optimal tersebut.

Pada kurva $V_{PV}(t)$, terlihat bahwa respon transien awal sistem adalah turun pada awalnya, kemudian naik. Penurunan kurva terjadi karena alasan yang sama seperti pada Gambar 3.28. Setelah mencapai titik terbawah, V_{PV} kemudian mulai mengikuti V_{PVref} sehingga naik kembali hingga mencapai titik kerja optimalnya.



Gambar 4.5. $I_{PV}(t)$ pada Kondisi Pengukuran Standar



Gambar 4.6. $P_{PV}(t)$ pada Kondisi Pengukuran Standar

Gambar 4.5 dan gambar 4.6 juga merupakan hasil simulasi yang telah dilakukan. Gambar 4.5 adalah kurva arus sel surya sebagai fungsi waktu sedangkan gambar 4.6 adalah kurva daya sel surya. Dari kurva $I_{PV}(t)$ terlihat bahwa pada masa pencarian titik kerja optimal yang ditunjukkan pada grafik tegangan sel surya bertambah terus, arus sel surya juga berubah sesuai dengan pergerakan kurva karakteristik IV sel surya. Pada saat telah mencapai titik jatuh (*knee*) dari kurva yang terbentuk, dimana titik kerja optimal telah ditemukan, kemudian arus sel surya yang keluar berosilasi di sekitar nilai tersebut. Titik tengah dari arus sel surya yang berosilasi adalah pada 3,166 Ampere.

Dengan bekerja pada titik kerja tegangan dan arus tersebut, sel surya mampu menghasilkan daya 826,43 Watt. Nilai ini merupakan nilai kondisi tunak dari kurva $P_{PV}(t)$. Jika dibandingkan dengan daya maksimum yang mampu dihasilkan oleh sel surya secara teoritis, yaitu 827,2 Watt, maka terlihat bahwa daya yang dihasilkan oleh sel surya ini mendekati nilai maksimum secara teoritis yang dapat dicapai sel surya. Hal ini membuktikan bahwa sistem MPPT ini telah berhasil mencari titik daya maksimum.

Namun masih terdapat deviasi antara daya maksimum yang berhasil dicapai oleh sel surya dan daya maksimum sebenarnya yang mampu dicapai sel surya, yaitu sebesar 0,77 Watt, atau dapat dikatakan eror sebesar 0,093%. Nilai ini cukup kecil dan disebabkan karena nilai P_{PV} hasil simulasi merupakan nilai rata-rata data $P_{PV}(t)$. Karena P_{PV} berosilasi, maka data P_{PV} memiliki penyebaran di sekitar nilai rata-rata tersebut. Pembulatan yang dilakukan pada perhitungan juga dapat membuat munculnya eror tersebut.

Pada grafik $V(t)$, $I(t)$, dan $P(t)$ terlihat bahwa terjadi osilasi ketika sistem MPPT sudah menemukan titik kerja optimal. Selain itu, terlihat juga bahwa sistem MPPT memerlukan waktu untuk dapat membuat sel surya bekerja di titik kerja optimalnya. Kedua hal ini berkaitan dengan kualitas sistem MPPT dan akan dibahas pada bagian 4.5.

4.4 Simulasi Sistem pada Kondisi Lingkungan yang Berubah

Pada bagian ini, sistem MPPT akan disimulasikan pada kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Adanya algoritma ICM seharusnya mampu membuat sistem MPPT mampu mencari titik kerja optimal yang baru ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan. Agar mampu melakukan analisa mendalam dan melihat bagaimana performa dari sistem MPPT ini, maka akan dilakukan 3 simulasi yang berbeda. Pada simulasi yang pertama, kondisi *irradiance* akan diubah-ubah sedangkan suhu sel surya dijaga konstan. Pada simulasi yang kedua, kondisi suhu sel surya akan diubah-ubah sedangkan *irradiance* dijaga konstan. Dan pada simulasi yang ketiga, kedua parameter akan diubah-ubah nilainya pada saat bersamaan. Rentang variasi suhu yang digunakan adalah pada 25-37 °C atau 298-310 K yang merupakan rentang suhu udara pada daerah tropis. Sedangkan rentang variasi *irradiance* yang digunakan adalah antara 500-1000 W/m².

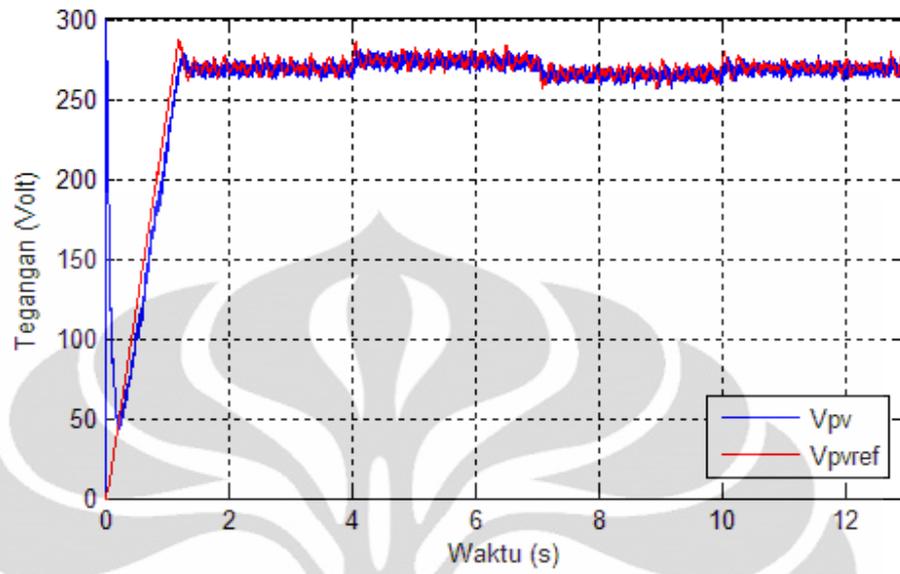
4.4.1 Perubahan *Irradiance*

Pada simulasi ini, nilai *irradiance* akan berubah-ubah, baik meningkat maupun menurun. Tabel 4.2 menunjukkan penyetelan perubahan kondisi cahaya pada simulasi yang akan dilakukan.

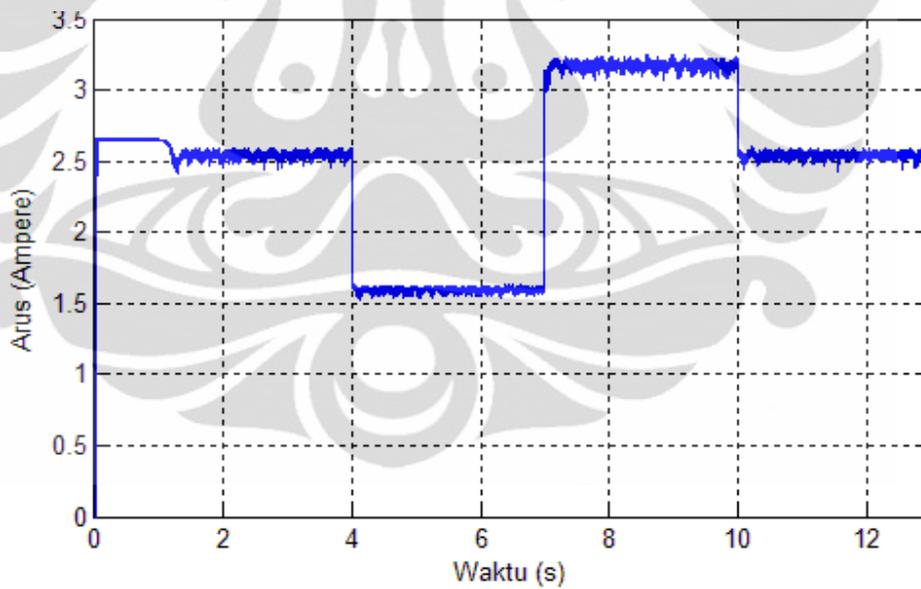
Tabel 4.2. Variasi Kondisi *Irradiance*

NO	Waktu Simulasi (s)	<i>Irradiance</i> (W/m ²)
1	$0 \leq t < 4$	800
2	$4 \leq t < 7$	500
3	$7 \leq t < 10$	1000
4	$10 \leq t < 13$	800

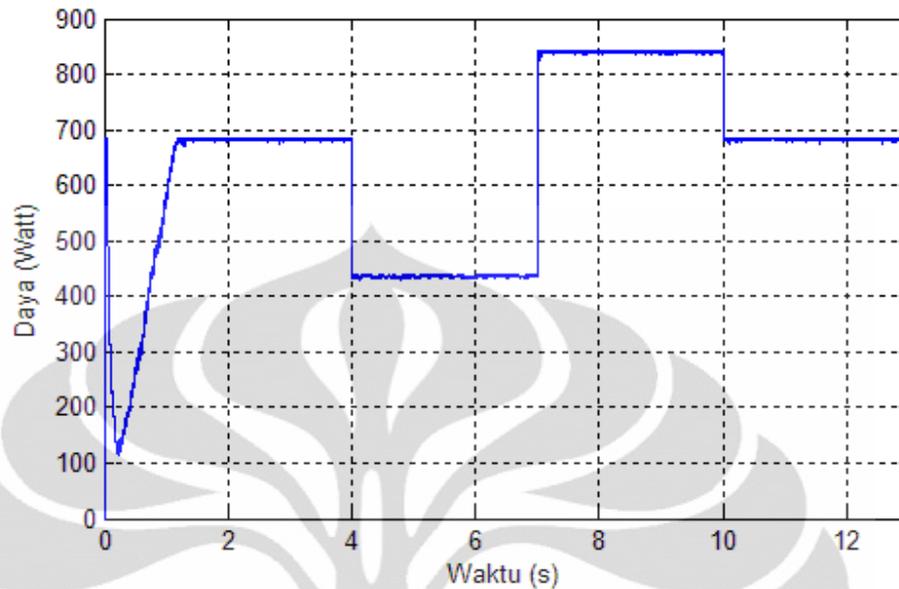
Untuk menghasilkan nilai *irradiance* yang berubah-ubah seperti pada tabel 4.2 di atas, maka blok *signal builder* yang terdapat pada MATLAB/Simulink digunakan. Sementara itu, suhu sel surya dijaga konstan pada suhu 30°C atau 303K.



Gambar 4.7. $V_{PV}(t)$ pada Simulasi *Irradiance* Bervariasi



Gambar 4.8. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi *Irradiance* Bervariasi



Gambar 4.9. $P_{PV}(t)$ pada Simulasi *Irradiance* Bervariasi

Hasil dari simulasi ini merujuk pada gambar 4.7, 4.8, dan 4.9. Gambar 4.7 menunjukkan grafik tegangan fungsi waktu. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian 4.4.1 bahwa dengan adanya sistem MPPT, V_{PV} akan beresilasi di sekitar titik kerja optimal. Dari grafik ini terlihat bahwa pada suatu nilai *irradiance*, V_{PVref} hasil perhitungan algoritma ICM akan beresilasi disekitar titik kerja optimalnya dan kemudian ketika terjadi perubahan *irradiance*, V_{PVref} akan beresilasi di titik kerja yang lain yang merupakan titik kerja optimal yang baru. Kemudian hal ini mengakibatkan nilai V_{PV} juga ikut berubah karena V_{PV} akan mengikuti nilai V_{PVref} . Maka dapat dilihat bahwa dengan adanya perubahan *irradiance*, sistem MPPT akan membuat sel surya bekerja pada titik kerja yang baru, yaitu titik kerja optimal hasil perhitungan algoritma ICM. Nilai rata-rata V_{PV} pada tiap kondisi *irradiance* berdasarkan simulasi telah dihitung dan dapat dilihat pada tabel 4.3. Nilai-nilai V_{PV} tersebut dapat dianggap sebagai titik kerja optimal pada tiap kondisi *irradiance* yang berhasil ditemukan oleh sistem MPPT.

Dari grafik gambar 4.7, dapat juga dilihat bagaimana hubungan antara perubahan *irradiance* terhadap perubahan titik kerja V_{PV} optimal. Dapat dilihat bahwa pada saat terjadi penurunan kondisi *irradiance*, sebagai contoh pada saat $t = 4s$ *irradiance* menurun dari 800 W/m^2 menjadi 500 W/m^2 , sistem MPPT membuat sel surya bekerja pada titik kerja V_{PV} yang lebih besar ($273,56 \text{ V}$) daripada titik kerja V_{PV} sebelumnya ($269,1 \text{ V}$). Sebaliknya, pada saat terjadi kenaikan nilai *irradiance*, sebagai contoh pada saat $t = 7s$ *irradiance* meningkat dari 500 W/m^2 menjadi 1000 W/m^2 , sistem MPPT membuat sel surya bekerja pada titik kerja V_{PV} yang lebih rendah daripada titik kerja V_{PV} sebelumnya. Dari sini dapat ditarik kesimpulan bahwa peningkatan *irradiance* ketika suhu sel surya konstan akan menyebabkan titik kerja optimal V_{PV} lebih rendah daripada V_{PV} optimal sebelumnya, dan sebaliknya, ketika *irradiance* menurun, maka titik kerja optimal V_{PV} menjadi lebih tinggi daripada V_{PV} optimal sebelumnya.

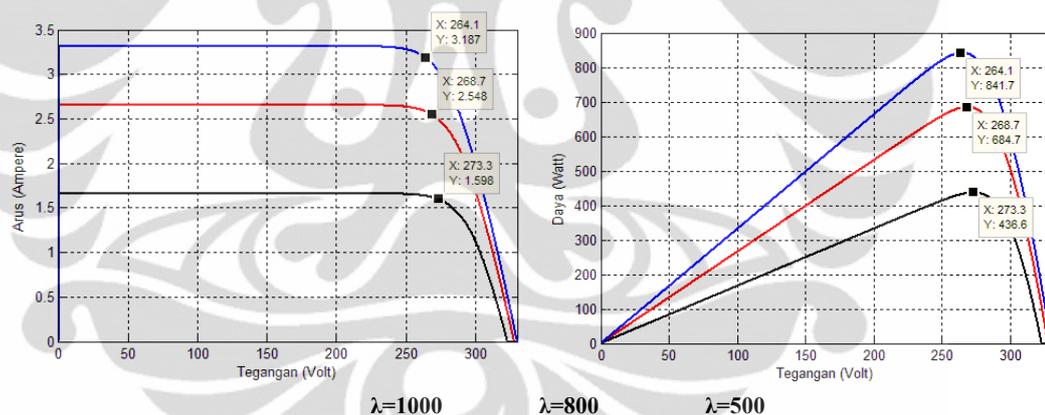
Gambar 4.8 menunjukkan kurva arus sel surya sebagai fungsi waktu. Dari gambar ini terlihat bahwa *irradiance* sangat mempengaruhi arus sel surya. Hal ini terlihat dari perubahan I_{PV} yang cukup besar ketika terjadi perubahan *irradiance*. Hubungan antara I_{PV} dan perubahan *irradiance* sebanding, yaitu ketika *irradiance* meningkat, maka I_{PV} akan meningkat, dan ketika *irradiance* menurun, maka I_{PV} juga akan menurun. Perubahan V_{PV} tentu juga mempengaruhi I_{PV} , tetapi melihat perubahan V_{PV} dari grafik 4.7, V_{PV} mengalami perubahan yang tidak cukup besar. V_{PV} justru menyebabkan adanya osilasi pada I_{PV} . Karena V_{PV} berosilasi, maka I_{PV} akan ikut berosilasi. Osilasi I_{PV} berada pada titik kerja I_{PV} . Nilai rata-rata I_{PV} pada tiap kondisi *irradiance* telah dihitung dan tertera pada tabel 4.3.

Dengan bekerja pada titik kerja V_{PV} dan I_{PV} seperti pada grafik 4.7 dan 4.8, maka daya yang dihasilkan oleh sel surya adalah seperti pada gambar 4.9. Pada grafik tersebut terlihat karena terjadi perubahan I_{PV} dan V_{PV} pada setiap perubahan kondisi *irradiance*, maka daya yang dihasilkan pun

berubah-ubah. Nilai daya rata-rata pada tiap kondisi *irradiance* juga telah dihitung dan dapat dilihat pada tabel 4.9.

Pada grafik daya gambar 4.9 juga dapat dilihat bahwa perubahan *irradiance* memiliki hubungan yang sebanding dengan perubahan daya sel surya. Peningkatan *irradiance* akan meningkatkan daya yang dapat dihasilkan oleh sel surya, dan penurunan *irradiance* akan menurunkan daya yang dapat dihasilkan oleh sel surya.

Untuk membuktikan bahwa setiap nilai V_{PV} , I_{PV} , dan P_{PV} pada masing-masing kondisi lingkungan merupakan nilai optimal dari sel surya, maka dapat dibandingkan melalui kurva I-V dan P-V pada tiap kondisi lingkungan. Gambar 4.10 menunjukkan kurva I-V dan kurva P-V pada ketiga kondisi simulasi. Kurva ini diperoleh dengan menjalankan simulasi seperti pada bagian 3.2.1.



Gambar 4.10. Kurva I-V dan P-V pada *Irradiance* yang Bervariasi

Tabel 4.3. Pengolahan Data Simulasi *Irradiance* Bervariasi

λ (W/m^2)	Teoritis			Simulasi			Error (%)		
	$V_{PV}(V)$	$I_{PV}(A)$	$P_{PV}(W)$	$V_{PV}(V)$	$I_{PV}(A)$	$P_{PV}(W)$	V_{PV}	I_{PV}	P_{PV}
800	268,7	2,55	684,7	269,1	2,54	683,9	0,15	0,39	0,12
500	273,3	1,60	436,6	273,56	1,597	436,31	0,09	0,19	0,07
1000	264,1	3,19	841,7	265,07	3,17	841,12	0,37	0,63	0,07
Rata-Rata							0,20	0,40	0,09

Tabel 4.3 menunjukkan perbandingan antara data teoritis yang diperoleh dari kurva karakteristik sel surya KC50T pada masing-masing kondisi *irradiance* dengan data yang telah diperoleh dari hasil simulasi. Berdasarkan tabel 4.3, terlihat bahwa hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan data teoritis. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sistem MPPT ini telah mampu menemukan titik kerja optimal sel surya ketika terjadi perubahan *irradiance* dengan benar. Error yang terjadi cukup kecil, dapat dilihat bahwa error yang dimiliki pada tiap data di bawah 1%, dengan error rata-rata $V_{PV} = 0,20\%$, $I_{PV} = 0,40\%$, dan $P_{PV} = 0,09\%$. Pembahasan mengenai error akan dilakukan di akhir bagian 4.4.

4.4.2 Perubahan Suhu Sel Surya

Pada simulasi kedua, *irradiance* dijaga konstan pada nilai 800 W/m^2 dan suhu sel surya diubah-ubah berdasarkan tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4. Variasi Kondisi Suhu Sel Surya

NO	Waktu Simulasi (s)	Suhu Sel Surya (K)
1	$0 \leq t < 4$	303
2	$4 \leq t < 7$	298
3	$7 \leq t < 10$	310
4	$10 \leq t < 13$	303

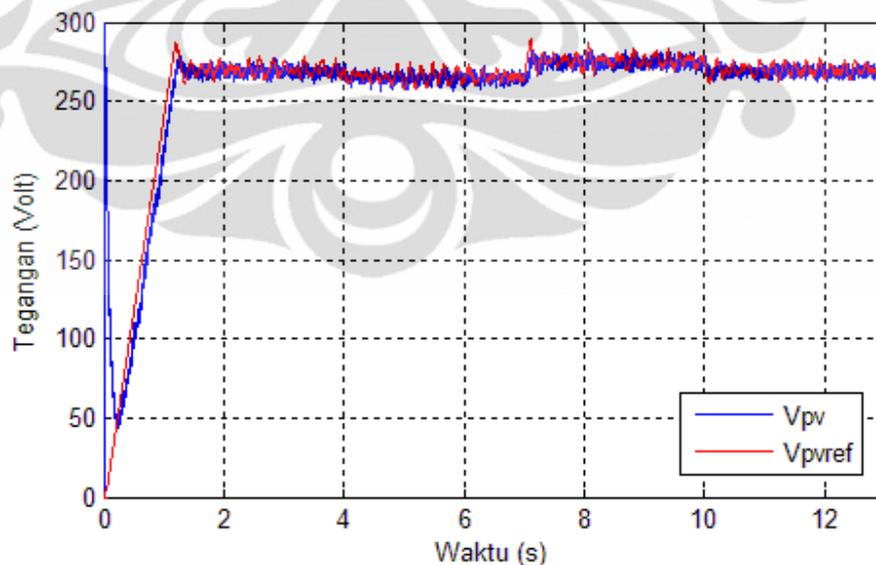
Hasil simulasi yang telah dilakukan ditunjukkan pada gambar 4.11, 4.12, dan 4.13. Pada grafik $V(t)$ yang terbentuk, yaitu pada gambar 4.11 terlihat bahwa perubahan kondisi suhu sel surya juga direspon oleh sistem MPPT. Ketika suhu sel surya berubah, sistem MPPT kemudian mencari titik kerja optimal yang baru dan membuat sel surya bekerja pada titik kerja optimal tersebut. Nilai rata-rata dari V_{PV} pada tiap kondisi suhu sel surya telah dihitung dan dapat dilihat pada tabel 4.5.

Dari grafik yang terbentuk, terlihat bahwa ketika suhu sel surya menurun, maka V_{PV} optimal yang baru juga akan menurun dan sebaliknya

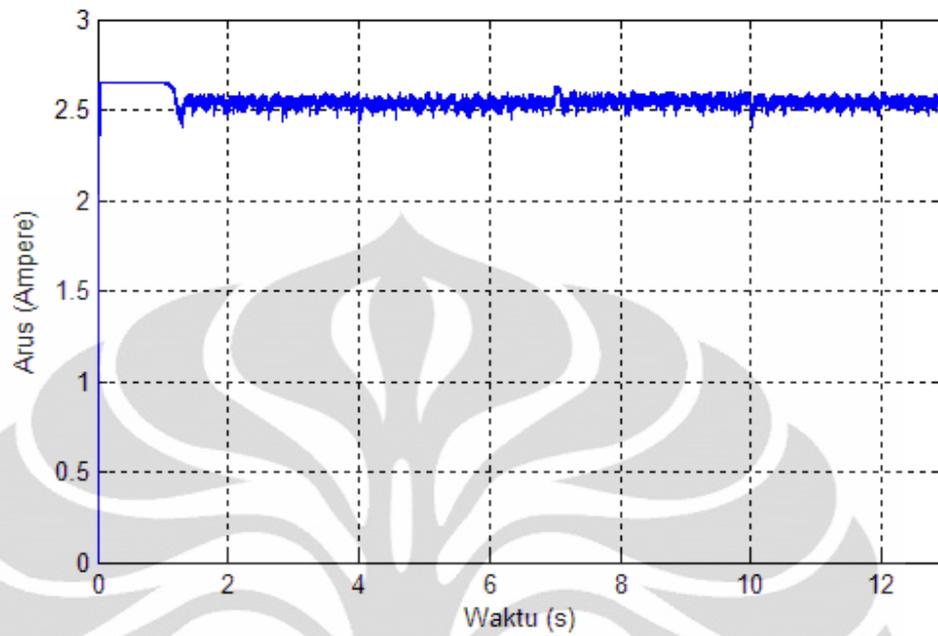
jika suhu sel surya meningkat, maka V_{PV} optimal yang baru akan mengalami peningkatan dibandingkan V_{PV} sebelumnya. Pada tabel 4.5 dapat dilihat perubahan V_{PV} yang terjadi ketika suhu sel surya meningkat dan menurun.

Gambar 4.12 menunjukkan grafik $I(t)$ yang terbentuk dari simulasi ini. Grafik $I(t)$ yang terbentuk terlihat konstan dan sedikit mengalami perubahan. Dengan demikian maka dapat disimpulkan bahwa perubahan suhu tidak memiliki pengaruh besar terhadap perubahan I_{PV} . Berdasarkan persamaan (2.2), terlihat bahwa pengaruh suhu T harus dikalikan suatu koefisien suhu terlebih dahulu. Berdasarkan data spesifikasi model surya pada tabel 3.1, memang koefisien suhu cukup kecil yaitu $1,33 \times 10^{-3}$. Nilai rata-rata I_{PV} pada tiap kondisi suhu sel surya dapat dilihat pada tabel 4.5.

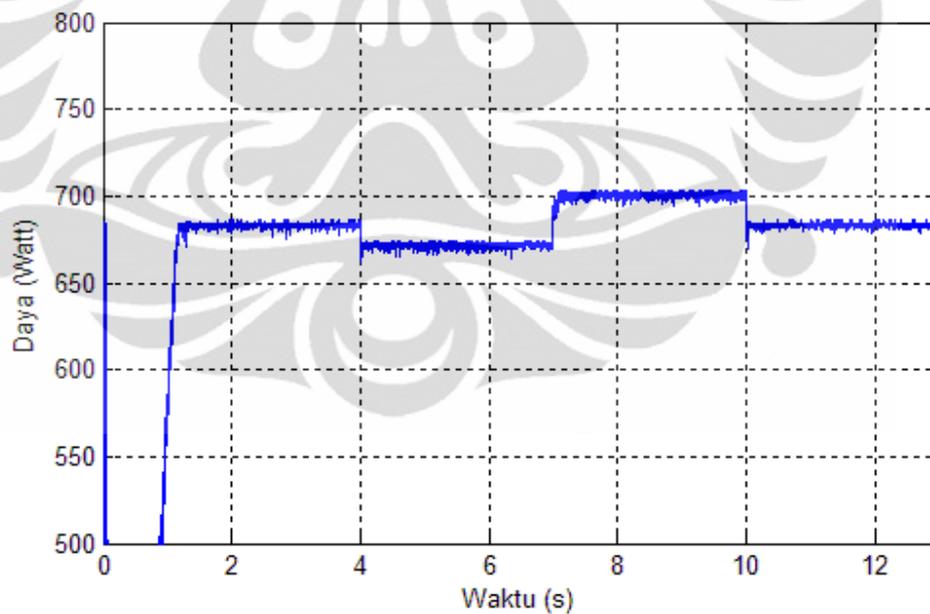
Daya yang dihasilkan ditampilkan pada gambar 4.13. Dari grafik ini terlihat bahwa perubahan daya sel surya memiliki hubungan yang sebanding dengan perubahan suhu sel surya. Nilai rata-rata P_{PV} pada tiap kondisi suhu sel surya dapat dilihat pada tabel 4.5.



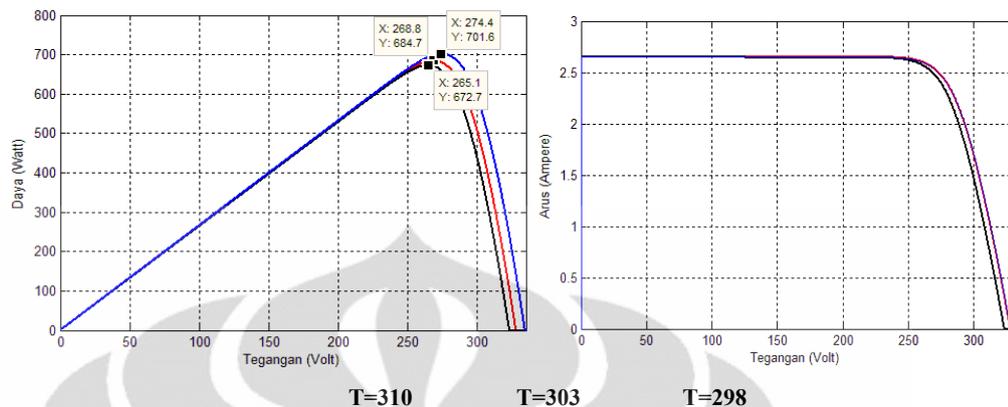
Gambar 4.11. $V_{PV}(t)$ pada Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi



Gambar 4.12. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi



Gambar 4.13. $P_{PV}(t)$ pada Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi



Gambar 4.14. Kurva I-V dan P-V pada Suhu Sel Surya yang Bervariasi

Tabel 4.5. Pengolahan Data Simulasi Suhu Sel Surya Bervariasi

T (K)	Teoritis			Simulasi			Error (%)		
	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)	V_{PV}	I_{PV}	P_{PV}
303	268,7	2,55	684,7	269,1	2,541	683,9	0,15	0,39	0,12
298	265,1	2,54	672,7	264,8	2,537	671,9	0,11	0,12	0,12
310	274,4	2,55	701,6	274,8	2,551	700,9	0,3	0,04	0,10
Rata-Rata							0,19	0,18	0,11

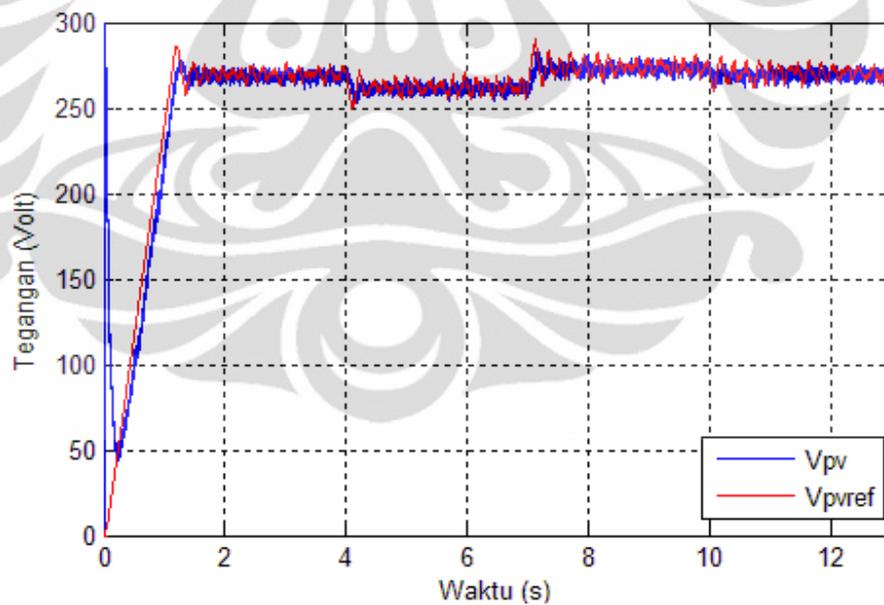
Gambar 4.14 menunjukkan kurva I-V dan P-V pada 3 kondisi yang digunakan untuk simulasi ini. Kedua kurva ini dibuat dengan simulasi seperti pada bagian 3.2.1 untuk memperoleh data teoritis dari V_{PV} optimal, I_{PV} optimal, dan P_{PV} maksimal yang dimiliki oleh sel surya pada ketiga kondisi simulasi. Perbandingan antara nilai teoritis dan simulasi dari ketiga variabel ini dapat dilihat pada tabel 4.5. Dari tabel 4.5 terlihat bahwa baik V_{PV} , I_{PV} , maupun P_{PV} hasil simulasi memiliki nilai rata-rata yang menyerupai nilai teoritisnya. Hal ini dapat dilihat dari error dari tiap data yang nilainya dibawah 0,5%. Bahkan eror rata-rata dari ketiga variabel pada simulasi ini dibawah 0,2%. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa sistem MPPT ini mampu merespon perubahan suhu sel surya dan mencari titik kerja optimal yang baru dari sel surya tersebut.

4.4.3 Perubahan *Irradiance* dan Suhu Sel Surya

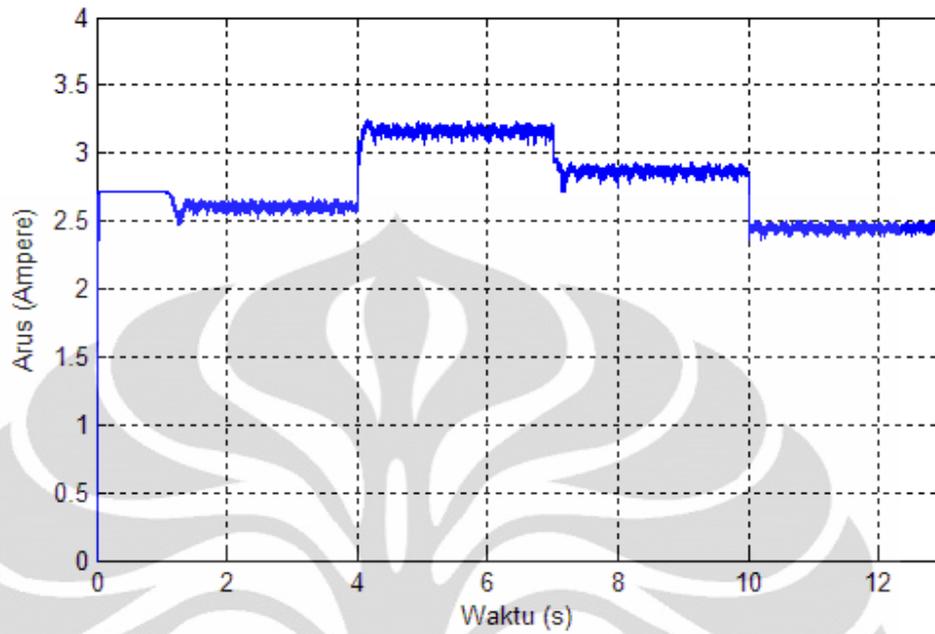
Pada kenyataannya, baik *irradiance* maupun suhu sel surya akan terus berubah-ubah sepanjang waktu. Oleh karena itu, pada simulasi ketiga ini, kedua parameter tersebut akan diubah-ubah. Tabel 4.6 menunjukkan nilai *irradiance* dan suhu sel surya selama simulasi berlangsung.

Tabel 4.6. Variasi Kondisi *Irradiance* dan Suhu Sel Surya

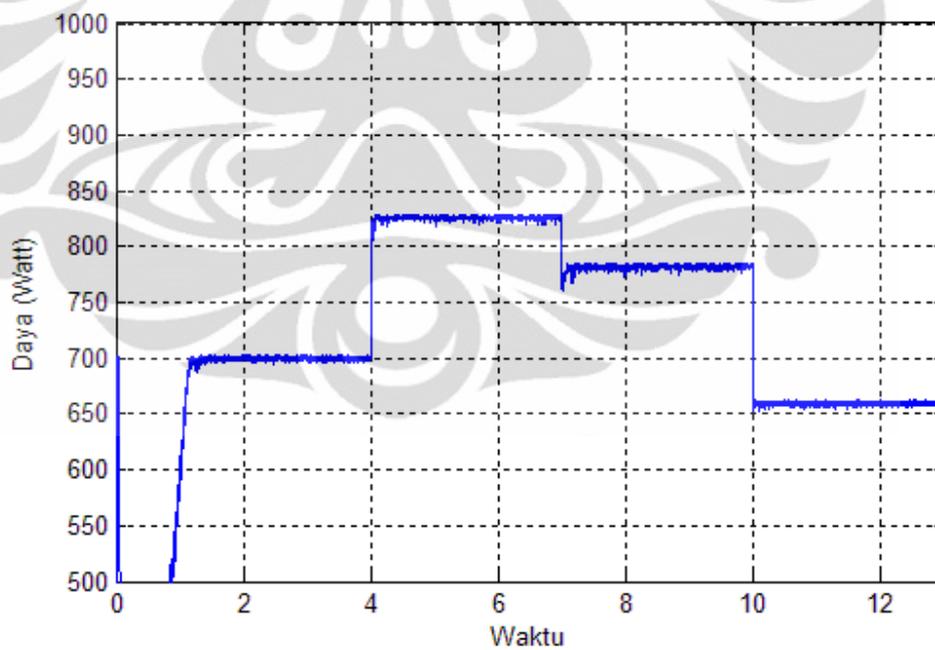
NO	Waktu Simulasi (s)	Suhu Sel Surya (K)	<i>Irradiance</i> (W/m ²)
1	$0 \leq t < 4$	303	820
2	$4 \leq t < 7$	298	1000
3	$7 \leq t < 10$	310	900
4	$10 \leq t < 13$	306	770



Gambar 4.15. $V_{PV}(t)$ pada Simulasi λ dan T Bervariasi



Gambar 4.16. $I_{PV}(t)$ pada Simulasi λ dan T Bervariasi



Gambar 4.17. $P_{PV}(t)$ pada Simulasi λ dan T Bervariasi

Berdasarkan grafik $V_{PV}(t)$ yang terbentuk pada gambar 4.15 terlihat bahwa sistem MPPT ini mampu merespon perubahan kedua parameter

kondisi lingkungan yang terjadi. Setiap terjadi perubahan kondisi lingkungan, maka sistem MPPT akan kembali mencari titik kerja baru dan membuat sel surya bekerja pada titik kerja tersebut. Ketika sudah menemukan titik kerja yang baru, maka V_{PV} akan beresilasi pada titik kerja tersebut. Gambar 4.16 dan gambar 4.17 menunjukkan grafik $I_{PV}(t)$ dan $P_{PV}(t)$ dari simulasi ini. Karena V_{PV} mengalami perubahan titik kerja, maka I_{PV} dan P_{PV} tentu akan berubah juga. Nilai rata-rata V_{PV} , I_{PV} , dan P_{PV} pada simulasi telah dihitung dan dapat dilihat pada tabel 4.7. Tabel 4.7 digunakan untuk memverifikasi apakah nilai yang diperoleh dari simulasi sudah sesuai dengan teoritis.

Tabel 4.7. Pengolahan Data Simulasi λ dan T Bervariasi

Kondisi		Teoritis			Simulasi			Error (%)		
$\lambda(W/m^2)$	T(K)	$V_{PV}(V)$	$I_{PV}(A)$	$P_{PV}(W)$	$V_{PV}(V)$	$I_{PV}(A)$	$P_{PV}(W)$	V_{PV}	I_{PV}	P_{PV}
820	303	268,7	2,61	700,7	268,4	2,606	700,1	0,11	0,15	0,09
1000	298	261,0	3,17	827,2	261,3	3,164	826,5	0,11	0,32	0,08
900	310	274,4	2,85	782,8	272,9	2,866	782,1	0,55	0,56	0,09
770	303	269,4	2,45	660,5	269,5	2,445	659,8	0,03	0,20	0,11
Rata-Rata								0,2	0,31	0,09

Data teoritis diperoleh dari kurva I-V dan P-V sel surya pada tiap kondisi lingkungan. Berdasarkan tabel 4.7 ini terlihat bahwa nilai rata-rata dari V_{PV} , I_{PV} , dan P_{PV} sudah sesuai dengan titik kerja optimal dari sel surya pada masing-masing kondisi lingkungan. Memang masih terdapat error, namun hasil perhitungan menunjukkan bahwa error tersebut cukup kecil. Seluruh error tiap data tidak ada yang berada di atas 1%, dan error rata-rata dari ketiga variabel pun yang paling besar adalah 0,31%. Nilai error ini masih dapat ditoleransi. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa sistem MPPT ini dapat memberikan nilai titik kerja optimal yang benar dan telah mampu membuat sel surya menghasilkan daya maksimalnya. Selain itu

sistem MPPT ini juga telah mampu merespon perubahan kondisi lingkungan, bahkan jika kedua parameter diubah nilainya secara bersamaan. Sistem MPPT ini tetap mampu mencari titik kerja sel surya optimal yang baru.

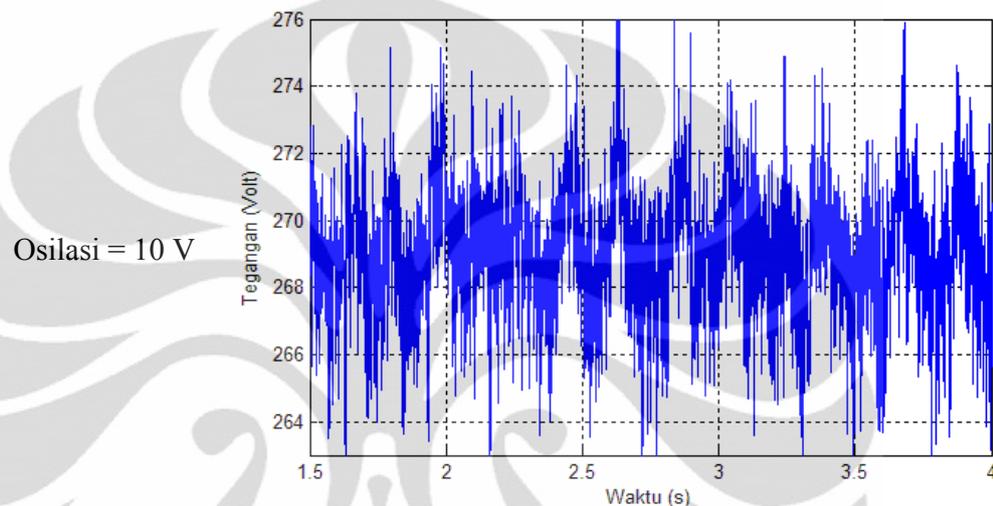
Simulasi dan analisis pada bagian 4.4.1 sampai 4.4.3 telah menunjukkan bahwa sistem MPPT telah mampu mencari titik kerja optimal jika terjadi perubahan kondisi lingkungan, baik jika parameter yang berubah hanya *irradiance* saja, suhu sel surya saja, dan kedua parameter berubah bersamaan. Pada simulasi-simulasi yang telah dilakukan, terlihat bahwa hasil perbandingan dengan data teoritis menunjukkan masih terdapat eror yang terhitung walaupun cukup kecil. Eror ini terjadi antara lain karena pembulatan hasil perhitungan dan adanya osilasi yang terjadi pada simulasi. Osilasi yang terjadi memang tidak dapat dihindari sehingga memungkinkan terjadinya eror karena adanya penyebaran data pada perhitungan, dibandingkan dengan nilai teoritis yang diperoleh dari satu data.

4.5 Kualitas Sistem MPPT

Sistem MPPT yang dibangun telah disimulasikan pada bagian 4.3 dan 4.4. Berdasarkan hasil simulasi pada bagian 4.3 dan 4.4 terlihat bahwa dengan adanya sistem MPPT, sel surya mampu bekerja pada titik kerja optimalnya dan mampu menghasilkan daya maksimum. Hasil simulasi juga menunjukkan bagaimana karakteristik tegangan sel surya dan arus sel surya yang dihasilkan jika terdapat sistem MPPT. Karakteristik keluaran dari sistem MPPT ini menentukan bagaimana kualitas dari sistem MPPT. Pada bagian 2.8 telah dijelaskan mengenai parameter-parameter yang dapat dijadikan penentu sebaik apa kualitas dari suatu sistem MPPT. Ada 3 parameter, yaitu parameter statik, parameter dinamik, dan parameter rasio daya.

Pada parameter statik, yang diukur adalah rasio osilasi yang terjadi pada tegangan sel surya ketika telah mencapai titik kerja optimalnya dengan titik kerja

V_{PV} optimal itu sendiri. Gambar 4.18 menunjukkan contoh pengukuran osilasi pada grafik V_{PV} . Pengukuran besarnya osilasi dilakukan dengan melihat osilasi pada grafik dan menentukan nilainya berdasarkan skala pada grafik. Pada pengukuran, nilai yang diambil adalah osilasi terbesar yang ada pada grafik tersebut.



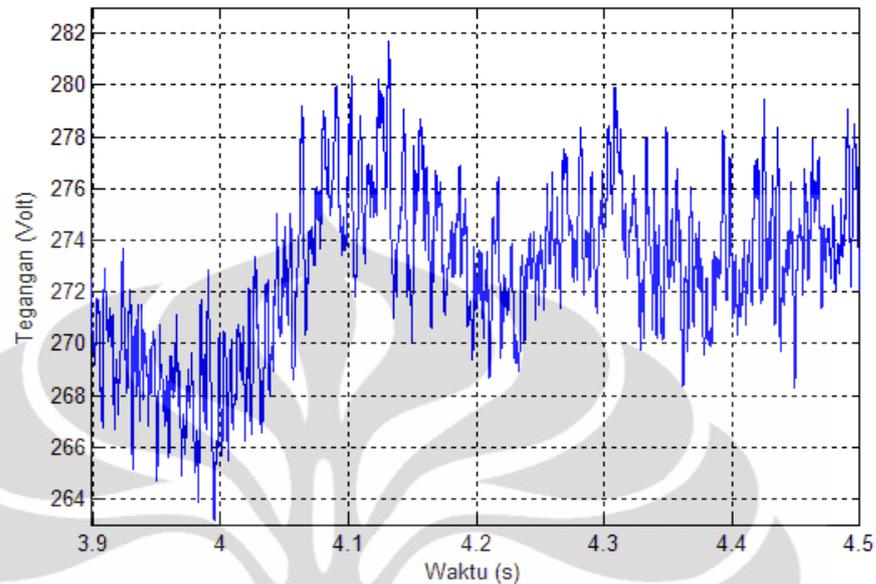
Gambar 4.18. Pengukuran Besaran Osilasi pada Grafik $V_{PV}(t)$

Tabel 4.8 menunjukkan nilai rasio osilasi dari sistem MPPT melalui pengukuran pada grafik $V_{PV}(t)$ pada setiap simulasi yang telah dilakukan pada bagian 4.3 dan 4.4. Perhitungan rasio osilasi dilakukan berdasarkan pada persamaan (2.38). Dari tabel 4.8 ini diketahui bahwa rasio osilasi yang dimiliki oleh sistem MPPT pada tiap simulasi sekitar 3% sampai 4%. Terlihat pada tabel bahwa rasio osilasi pada setiap simulasi hanya berkisar diantara nilai 3-4% tersebut. Hal ini menandakan bahwa rasio osilasi dari sistem MPPT sebenarnya konstan dan akan selalu berada direntang kisaran tersebut. Nilai rata-rata rasio osilasi dari seluruh data yang diperoleh adalah 3,21%. Nilai ini cukup rendah sehingga dapat dikatakan bahwa sistem MPPT ini memiliki kualitas parameter statis yang baik. Perhitungan nilai rasio osilasi ini tentu memiliki eror karena pengukuran besaran osilasi dilakukan melalui grafik. Grafik tersebut memiliki osilasi yang bervariasi sehingga pengukuran osilasi secara akurat sulit dilakukan.

Tabel 4.8. Rasio Osilasi Sistem MPPT pada Tiap Simulasi

Sub Bab	Waktu Simulasi (s)	Osilasi (V)	V_{PV} (V)	Rasio Osilasi (%)
4.3	$0 \leq t \leq 5$	10	261,05	3,83
4.4.1	$0 \leq t < 4$	8	269,1	2,97
	$4 \leq t < 7$	10	273,56	3,65
	$7 \leq t < 10$	7	265,07	2,64
	$10 \leq t < 13$	8	269,1	2,97
4.4.2	$0 \leq t < 4$	9	269,1	3,34
	$4 \leq t < 7$	8	264,8	3,02
	$7 \leq t < 10$	10	274,8	3,64
	$10 \leq t < 13$	8	269,1	2,97
4.4.3	$0 \leq t < 4$	8	268,4	3,02
	$4 \leq t < 7$	9	261,3	3,44
	$7 \leq t < 10$	9	272,9	3,30
	$10 \leq t < 13$	9	269,5	3,34
			Rata-Rata	3,21

Sementara itu, parameter dinamik mengukur seberapa cepat sistem MPPT mampu membuat sel surya bekerja di titik kerja optimal yang baru ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan. Hal ini dapat diukur berdasarkan grafik $V_{PV}(t)$ pada simulasi bagian 4.4. Gambar 4.19 menunjukkan contoh proses pengukuran waktu transien.



Waktu transien = 0,3s

Gambar 4.19. Pengukuran Waktu Transien pada Grafik $V_{PV}(t)$

Tabel 4.9. Waktu Transien Sistem MPPT pada Tiap Simulasi

Sub Bab	Perubahan Kondisi	Waktu Transien (s)
4.4.1	$\lambda=800\text{W/m}^2$ ke $\lambda=500\text{W/m}^2$	0,25
	$\lambda=500\text{W/m}^2$ ke $\lambda=1000\text{W/m}^2$	0,25
	$\lambda=1000\text{W/m}^2$ ke $\lambda=800\text{W/m}^2$	0,3
4.4.2	$T=303\text{K}$ ke $T=298\text{K}$	0,2
	$T=298\text{K}$ ke $T=310\text{K}$	0,3
	$T=310\text{K}$ ke $T=303\text{K}$	0,3
4.4.3	$T=303\text{K}$ & $\lambda=800\text{W/m}^2$ ke $T=298\text{K}$ & $\lambda=1000\text{W/m}^2$	0,3
	$T=298\text{K}$ & $\lambda=1000\text{W/m}^2$ ke $T=310\text{K}$ & $\lambda=900\text{W/m}^2$	0,3
	$T=310\text{K}$ & $\lambda=900\text{W/m}^2$ ke $T=306\text{K}$ & $\lambda=770\text{W/m}^2$	0,25
Rata-Rata		0,27

Tabel 4.9 menunjukkan hasil pengukuran waktu transien V_{PV} ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan pada simulasi bagian 4.4. Terlihat bahwa waktu transien yang dibutuhkan pada semua simulasi hampir sama, dengan nilai rata-rata waktu transien yang dibutuhkan oleh sistem MPPT adalah 0,27s. Pengukuran waktu transien ini juga memiliki eror karena pengukuran dilakukan langsung melalui grafik sehingga memungkinkan kesalahan pembacaan pada skala, terutama pada skala yang sangat kecil.

Parameter kualitas Sistem MPPT yang ketiga adalah Rasio Daya. Telah dijelaskan bahwa rasio daya adalah perbandingan antara daya aktual hasil simulasi dengan nilai daya maksimal teoritis yang seharusnya dapat dihasilkan oleh sel surya. Tabel 4.10 menunjukkan nilai rasio daya tersebut pada simulasi yang telah dilakukan pada bagian 4.3 dan 4.4. Perhitungan rasio daya didasarkan pada persamaan (2.39).

Tabel 4.10. Rasio Daya Sistem MPPT pada Tiap Simulasi

Sub Bab	Waktu Simulasi (s)	P_{PV} (W)	P_{PV} teori (W)	Rasio Daya (%)
4.3	$0 \leq t \leq 5$	826,43	827,2	99,91
4.4.1	$0 \leq t < 4$	683,9	684,7	99,88
	$4 \leq t < 7$	436,31	436,6	99,93
	$7 \leq t < 10$	841,12	841,7	99,93
	$10 \leq t < 13$	683,9	684,7	99,88
4.4.2	$0 \leq t < 4$	683,9	684,7	99,88
	$4 \leq t < 7$	671,9	672,7	99,88
	$7 \leq t < 10$	700,9	701,6	99,90
	$10 \leq t < 13$	683,9	684,7	99,88
4.4.3	$0 \leq t < 4$	700,1	700,7	99,91
	$4 \leq t < 7$	826,5	827,2	99,92
	$7 \leq t < 10$	782,1	782,8	99,91
	$10 \leq t < 13$	659,8	660,5	99,89
Rata-Rata Rasio				99,90

Berdasarkan tabel 4.10 terlihat bahwa rasio daya sistem MPPT pada setiap simulasi adalah 99,88% ke atas. Rata-rata rasio daya sistem MPPT dari seluruh simulasi adalah 99,90%. Nilai ini cukup besar dan menandakan bahwa daya maksimum yang dicapai oleh sistem MPPT sudah tepat.

Kualitas dari sistem MPPT yang dibangun ini telah diketahui melalui ketiga parameter kualitas yang telah dibahas. Peningkatan kinerja dari sistem MPPT tentu sangat diperlukan agar sistem MPPT dapat bekerja lebih efisien dan daya yang dihasilkan lebih besar. Untuk melakukan perbaikan kualitas sistem MPPT ini, tentunya perlu diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas sistem MPPT ini.

Secara umum, osilasi yang muncul pada sistem MPPT adalah karena karakteristik dari Rangkaian Boost Converter yang merupakan rangkaian yang bekerja menggunakan prinsip *switching*. Karena adanya 2 kondisi pada rangkaian Boost Converter, yaitu pada saat *switch* on dan pada saat *switch* off, maka baik tegangan maupun arus pada Boost Converter akan berubah-ubah. Maka kemudian komponen L dan C yang digunakan pada Boost Converter akan turut mempengaruhi besarnya osilasi yang terjadi. Selain itu, algoritma ICM juga menghasilkan nilai V_{PVref} yang berosilasi di sekitar titik kerja optimal, sehingga algoritma ICM ini juga turut mempengaruhi osilasi pada keluaran sistem MPPT. Sementara itu, adanya waktu transien yang dibutuhkan sistem untuk mencari titik kerja yang baru disebabkan oleh algoritma ICM. Algoritma ICM mengubah nilai V_{PVref} sebesar ΔV sampai menemukan titik V_{PVref} yang sesuai dengan titik kerja optimal. Karena perubahan V_{PVref} setiap cupliknya adalah sebesar ΔV , maka tentu dibutuhkan waktu untuk mencapai titik kerja optimal yang tepat. Pada parameter rasio daya, nilai daya maksimum yang dapat dihasilkan sistem sangat bergantung pada kemampuan algoritma ICM dalam mencari titik kerja optimal dengan benar dan apakah ada atau tidak *losses* daya pada rangkaian MPPT.

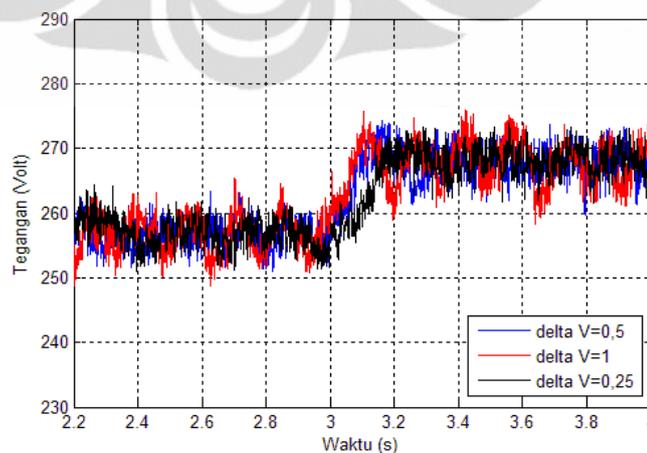
Maka, ada 2 faktor yang dapat mempengaruhi kualitas sistem MPPT yang telah dibangun dan disimulasikan, yaitu algoritma ICM yang digunakan sebagai algoritma MPPT, dan nilai komponen dari rangkaian Boost Converter.

Penjelasan lebih mendalam dari kedua faktor yang mempengaruhi kualitas MPPT akan diberikan pada bagian 4.5.1 dan 4.5.2.

4.5.1 Pengaruh Algoritma ICM

Algoritma ICM yang digunakan pada sistem MPPT tentu sangat berpengaruh pada kemampuan sistem MPPT tersebut karena algoritma ICM ini yang memberikan nilai referensi dari V_{PV} sel surya. Semakin baik algoritma ICM yang dibangun maka akan semakin baik kualitas sistem MPPT tersebut. Pada algoritma ICM ini, salah satu faktor yang mempengaruhi parameter statik dan dinamik adalah besarnya step perubahan V_{PVref} , atau ΔV . Pada simulasi untuk sistem MPPT yang dilakukan pada skripsi ini, nilai ΔV disetel pada nilai 0,5 Volt. Jadi penambahan nilai V_{PVref} pada setiap iterasi adalah sebesar 0,5 Volt.

Untuk melihat bagaimana pengaruh ΔV terhadap parameter kualitas MPPT, dilakukan 3 kali simulasi sistem MPPT dengan nilai ΔV yang berbeda-beda pada tiap simulasi, yaitu 0,5V, 0,25V, dan 1V. Pada simulasi yang dilakukan, parameter *irradiance* mengalami perubahan pada saat $t = 3s$ dari awalnya 1200 W/m^2 menjadi 600 W/m^2 , dengan suhu konstan pada 298 K. Gambar 4.20 menunjukkan grafik $V_{PV}(t)$ pada ketiga simulasi tersebut, sedangkan tabel 4.11 menyajikan data parameter kualitas sistem MPPT pada masing-masing ΔV .



Gambar 4.20. Grafik $V_{PV}(t)$ dengan 3 ΔV berbeda

Tabel 4.11. Perbandingan Parameter Kualitas MPPT pada 3 ΔV Berbeda

ΔV (V)	Rasio Osilasi (%)	Waktu Transien (s)	Rasio Daya (%)
0,25	3,05	0,4	99,85
0,5	3.43	0,3	99,87
1	4.58	0,1	99,81

Pada grafik $V_{PV}(t)$ gambar 4.11 terlihat bahwa pada saat kondisi lingkungan tetap, respon sistem MPPT dengan ΔV paling kecil yaitu 0,25 memiliki osilasi yang paling kecil juga, dan semakin besar nilai ΔV maka osilasi yang terjadi juga semakin besar. Perbandingan rasio osilasi ini juga dapat dilihat pada tabel 4.11. Dari tabel terlihat bahwa besarnya osilasi dipengaruhi oleh ΔV . Pada tabel terlihat bahwa jika ΔV semakin besar, rasio osilasi juga semakin besar yang artinya parameter statik dari sistem MPPT akan semakin buruk. Maka sebaliknya, jika ΔV semakin kecil, rasio osilasi juga semakin kecil sehingga parameter statik akan semakin baik.

Pada simulasi ini, parameter *irradiance* diubah nilainya pada saat $t = 3s$. Dari grafik terlihat bahwa sistem MPPT dengan $\Delta V = 1$ V yang paling cepat mencari titik kerja yang baru. Sedangkan sistem MPPT dengan $\Delta V = 0,25$ V adalah sistem MPPT yang paling lambat mencari titik kerja baru. Perbandingan waktu transien ini dapat dilihat pada tabel 4.11. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa ΔV mempengaruhi parameter dinamik. Berdasarkan simulasi diperoleh bahwa semakin besar ΔV maka akan semakin cepat sistem MPPT mampu mencari titik kerja baru atau semakin baik parameter dinamiknya, dan sebaliknya semakin kecil ΔV maka akan semakin buruk parameter dinamik dari sistem MPPT tersebut.

Sementara itu, mengacu pada tabel 4.11, rasio daya yang dimiliki oleh ketiga sistem MPPT dengan ΔV yang berbeda-beda menunjukkan nilai yang hampir sama. Mengacu pada tabel 4.11, tidak terlihat adanya

hubungan antara perubahan ΔV dengan perubahan rasio daya. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa ΔV tidak mempengaruhi kualitas rasio daya sistem MPPT.

\Terlihat bahwa ΔV mempengaruhi parameter statik dan dinamik dari sistem MPPT dan tidak mempengaruhi parameter rasio daya. Pengaruh yang diberikan pada parameter statik dan pada parameter dinamik berlawanan. Jika ΔV diperbesar, maka parameter statik akan menjadi lebih buruk sedangkan parameter dinamik menjadi lebih baik. Sebaliknya, jika ΔV diperkecil, maka parameter statik akan menjadi lebih baik sedangkan parameter dinamik menjadi lebih buruk. Oleh karena itu, dalam penentuan nilai ΔV harus mempertimbangkan kedua parameter ini. Tentunya dalam sistem MPPT, yang diinginkan adalah kedua parameter semakin baik. Karena perubahan ΔV memberikan efek yang berlawanan pada kedua parameter, maka perlu dicari nilai tengah agar kedua parameter tetap baik. Berdasarkan pembahasan ini, maka nilai ΔV yang digunakan pada sistem MPPT yang dirancang ini dapat dikatakan baik karena nilai ketiga parameter kualitas sistem MPPT baik.

4.5.2 Pengaruh Komponen Boost Converter

Komponen-komponen yang digunakan pada Boost Converter memberikan pengaruh pada keluaran dari Boost Converter. Pada bagian 2.3 telah dijelaskan bahwa besarnya *ripple* atau osilasi dari keluaran Boost Converter dipengaruhi oleh komponen kapasitor dari rangkaian. Juga telah dijelaskan bahwa ada nilai induktansi minimum pada induktor yang akan digunakan agar Boost Converter dapat bekerja di daerah kerja yang digunakan pada sistem MPPT ini. Perubahan nilai komponen-komponen yang digunakan pada Boost Converter dapat menyebabkan sistem MPPT memiliki keluaran yang berbeda.

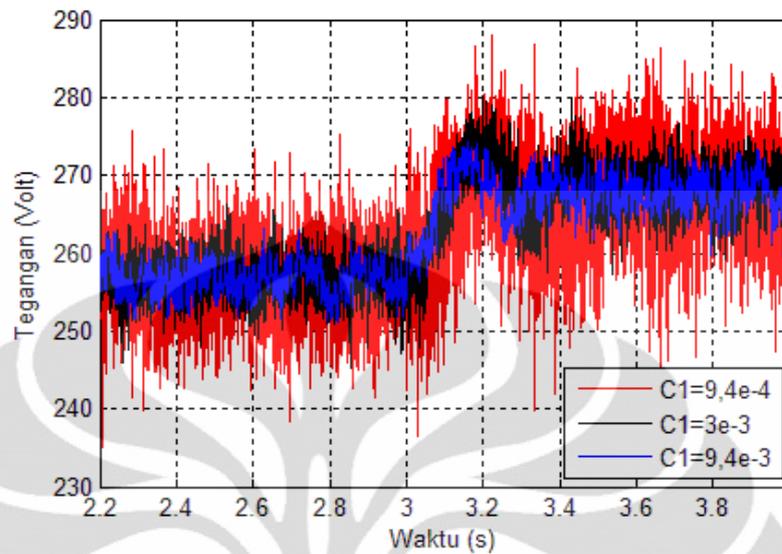
Analisa akan dilakukan melalui simulasi sistem MPPT dan fungsi alihnya dengan memvariasikan nilai komponen pada rangkaian Boost

Converter dan melihat bagaimana respon tegangan V_{PV} keluaran sistem. 2 buah komponen yang akan divariasikan adalah induktor L dan kapasitor C_1 . Simulasi yang dilakukan sama seperti pada bagian 4.5.1, dimana sistem MPPT akan mengalami perubahan kondisi *irradiance* pada saat $t=3s$, dari 1200 W/m^2 menjadi 600 W/m^2 . Hasil simulasi yang akan dianalisa adalah ketiga parameter kualitas sistem MPPT tersebut.

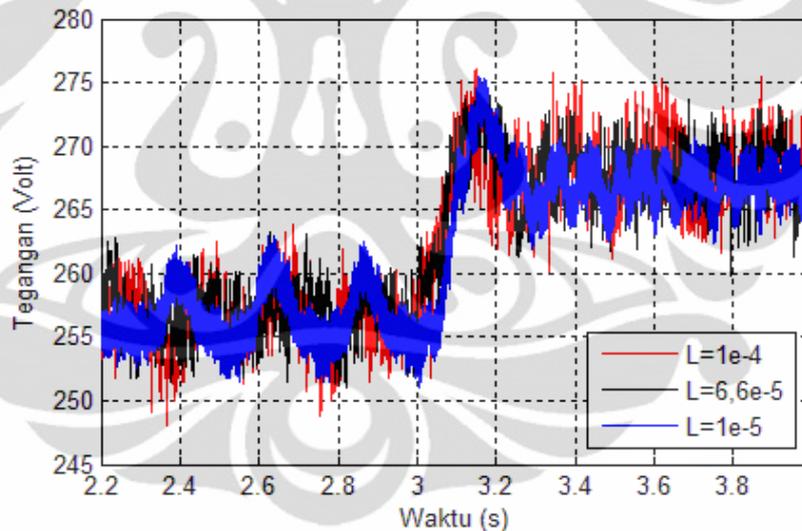
Tabel 4.12 menyajikan parameter-parameter kualitas pada masing-masing simulasi yang menggunakan nilai komponen Boost Converter yang bervariasi. Gambar 4.21 menunjukkan grafik $V_{PV}(t)$ untuk 3 simulasi pertama dimana nilai kapasitor C_1 yang bervariasi, sementara nilai induktor L konstan. Sementara itu, gambar 4.22 menunjukkan grafik $V_{PV}(t)$ untuk 3 simulasi yang menggunakan nilai induktor L bervariasi sedangkan nilai kapasitor konstan.

Tabel 4.12. Perbandingan Parameter Kualitas MPPT pada L dan C_1 Bervariasi

Simulasi	L (H)	C_1 (F)	Rasio Osilasi (%)	Waktu Transien (s)	Rasio Daya (%)
1	$6,6 \times 10^{-5}$	$9,4 \times 10^{-3}$	3,81	0,3	99,90
2	$6,6 \times 10^{-5}$	3×10^{-3}	4,76	0,4	99,84
3	$6,6 \times 10^{-5}$	$9,4 \times 10^{-4}$	8,19	0,5	99,55
4	$1,0 \times 10^{-4}$	$9,4 \times 10^{-3}$	4,38	0,3	99,98
5	$1,0 \times 10^{-5}$	$9,4 \times 10^{-3}$	3,61	0,3	99,89



Gambar 4.21. Grafik $V_{PV}(t)$ pada 3 Nilai C_1 yang Bervariasi



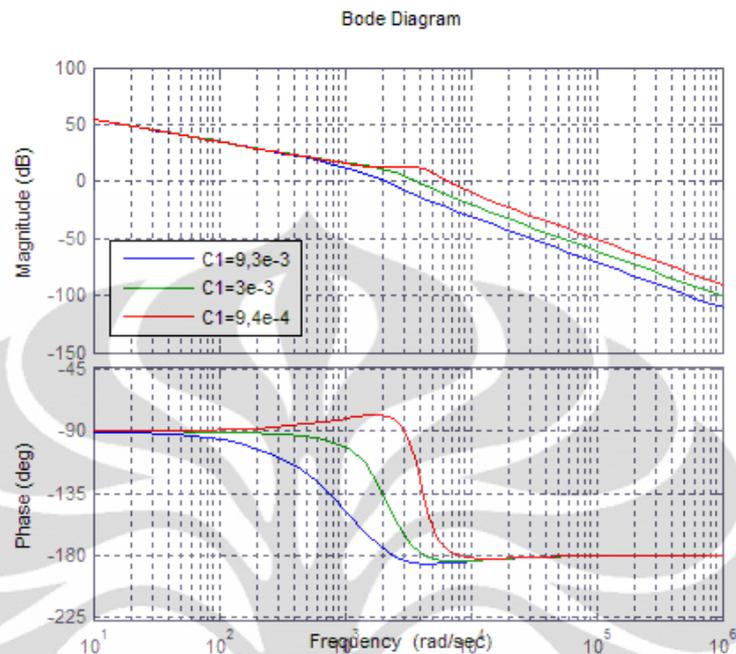
Gambar 4.22. Grafik $V_{PV}(t)$ pada 3 Nilai L yang Bervariasi

Berdasarkan data simulasi pada tabel 4.12 dan grafik gambar 4.21 terlihat bahwa semakin besar nilai C_1 maka akan menyebabkan rasio osilasi semakin kecil yang artinya parameter statik semakin baik. Selain itu, ternyata dengan peningkatan nilai kapasitansi C_1 akan menyebabkan parameter dinamik semakin baik. Sementara itu, melihat parameter rasio daya, terlihat bahwa semakin besar nilai C_1 , akan menyebabkan rasio

daya semakin baik. Berdasarkan penilaian parameter statik, dinamik, dan rasio daya maka dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai C_1 akan semakin baik kualitas sistem MPPT ini.

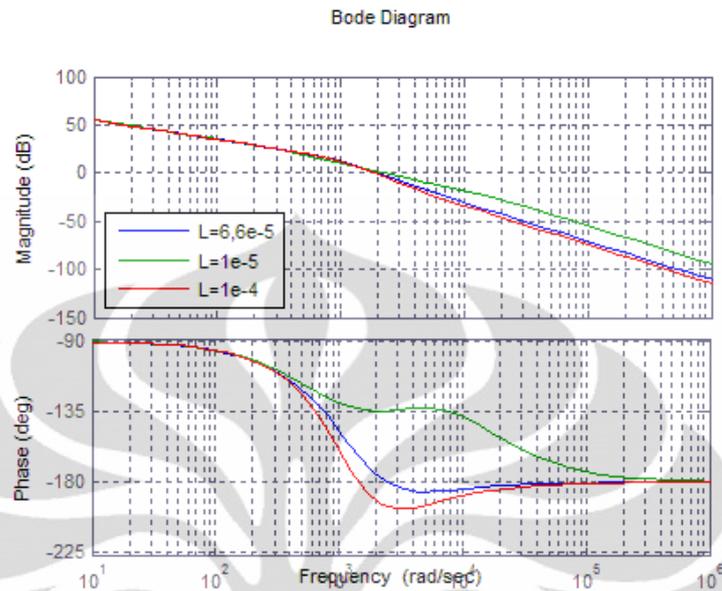
Sementara itu, induktor L memberi pengaruh hanya pada parameter statik. Terlihat dari data pada tabel 4.12 dan grafik pada gambar 4.22 bahwa semakin kecil nilai L maka semakin kecil rasio osilasi yang artinya semakin baik parameter statik sistem. Sementara itu, perubahan L juga menyebabkan waktu transien yang menjadi parameter dinamik mengalami perubahan yang sangat kecil dan sulit untuk melakukan pengukuran akuratnya. Namun dari grafik pada gambar 4.22 terlihat bahwa semakin besar nilai L , waktu transien yang dibutuhkan semakin kecil. Rasio daya dari sistem MPPT terlihat menurun ketika nilai L diperkecil. Dengan demikian semakin besar nilai L maka parameter rasio daya akan semakin baik. Pada grafik juga terlihat bahwa ketika nilai L semakin kecil, frekuensi osilasi yang terjadi semakin besar dan sebaliknya ketika nilai L semakin besar frekuensi osilasi respon semakin kecil.

Pengaruh C_1 dan L terhadap respon sistem MPPT juga dapat dilihat melalui diagram bode dari fungsi alih $H(s)$ yang merupakan fungsi alih sistem MPPT. Gambar 4.23 menunjukkan diagram bode dari $H(s)$ dengan nilai C_1 yang bervariasi, sedangkan gambar 4.24 menunjukkan diagram bode dari $H(s)$ dengan nilai L yang bervariasi.



Gambar 4.23. Diagram Bode $H(s)$ dengan C_1 yang bervariasi

Berdasarkan gambar 4.23, terlihat adanya perbedaan bentuk kurva magnitudo dan fasa pada MPPT yang memiliki C_1 berbeda-beda. Namun dari diagram ini terlihat bahwa nilai PM dan GM dari sistem tidak berubah, yaitu tetap pada $PM=10^\circ$ dan $GM=12,7$ dB. Yang bergeser adalah titik frekuensi pada saat penentuan PM (ω_{PM}) dan frekuensi pada saat penentuan GM (ω_{GM}). Semakin kecil nilai C_1 , maka ω_{PM} dan ω_{GM} semakin besar. Pergeseran ω_{PM} dan ω_{GM} ini menandakan bahwa ketika nilai C diubah, maka batasan kestabilan dari frekuensi sinyal berubah. Sebagai contoh bila C diperkecil, maka ω_{GM} akan bergeser ke kanan ke frekuensi yang lebih tinggi. Artinya akan ada rentang frekuensi, yaitu frekuensi yang lebih rendah daripada ω_{GM} yang baru dan lebih besar daripada ω_{GM} yang lama, berubah dari stabil menjadi tidak stabil.



Gambar 4.24. Diagram Bode $H(s)$ dengan L Bervariasi

Tabel 4.13. PM dan GM $H(s)$ pada L Bervariasi

L	PM	GM
$6,6 \times 10^{-5}$ H	10°	12,7 dB
1×10^{-5} H	50°	-
1×10^{-4} H	3°	4 dB

Perubahan L juga menyebabkan kurva magnitudo dan fasa dari diagram bode $H(s)$ berubah bentuk. Dari gambar juga terlihat bahwa PM dan GM sistem juga berubah. Tabel 4.13 menunjukkan nilai PM dan GM dari $H(s)$ untuk nilai L yang bervariasi. Berdasarkan data pada tabel 4.13 terlihat bahwa semakin kecil nilai L maka PM semakin besar. Artinya dari sisi PM, sistem semakin stabil jika L diperkecil. Hal yang sama juga berlaku pada GM, bahkan pada saat $L=1 \times 10^{-5}$ H, sistem tidak memiliki GM karena kurva fasa tidak pernah menyentuh titik -180° . Hal ini mengindikasikan bahwa sistem selalu stabil berapapun penguatan yang diberikan.

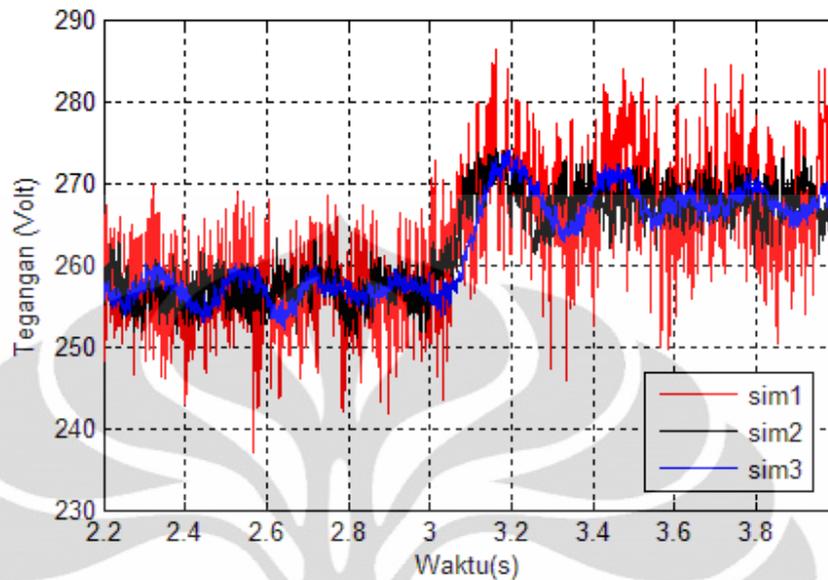
4.6 Pengaruh Model Sel Surya terhadap Keluaran Sistem MPPT

Pada simulasi sistem MPPT, digunakan suatu model sel surya yang telah dibangun pada bagian 3.2. Model sel surya ini memang telah mampu merepresentasikan sel surya KC50T. Walaupun demikian, model sel surya ini tetaplah bukan sel surya yang sesungguhnya. Dengan demikian model ini dapat memberikan pengaruh juga pada sistem MPPT yang dibangun karena sistem MPPT dijalankan pada model sel surya tersebut.

Pada model sel surya, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.2, terdapat 2 blok utama, yaitu blok model statik sel surya dan blok LPF. Blok model statik sel surya berisi persamaan matematis yang mendeskripsikan karakteristik sel surya. Persamaan karakteristik sel surya hanya memberikan persamaan matematis hubungan antara I_{PV} dan V_{PV} tetapi tidak akan mempengaruhi dinamika respon keluaran. Blok yang mempengaruhi dinamika respon keluaran adalah blok LPF. Parameter yang penting dari blok LPF ini adalah konstanta waktu τ . Untuk melihat bagaimana pengaruh τ terhadap simulasi sistem MPPT ini, maka dilakukan 4 simulasi dengan nilai τ pada model sel surya yang berbeda-beda. Hasil simulasi ini ditunjukkan pada tabel 4.14 dan gambar 4.25.

Tabel 4.14. Parameter Kualitas Sistem MPPT pada 3 variasi τ

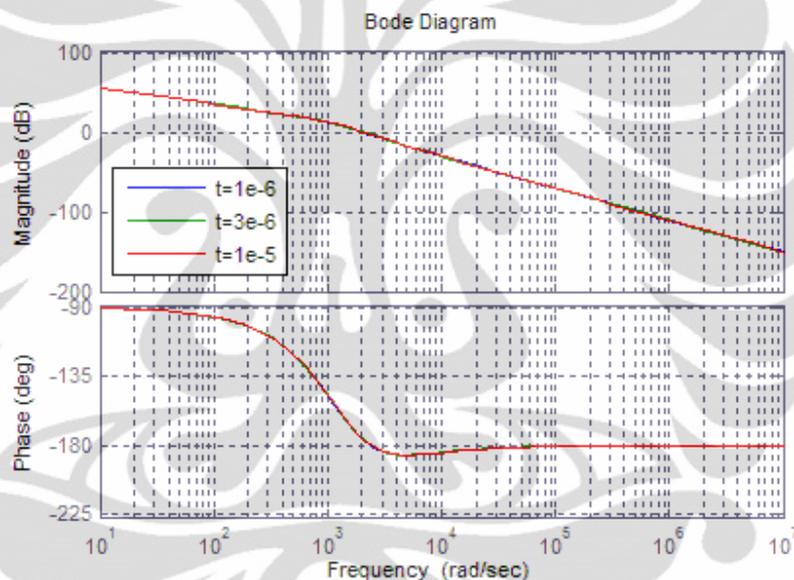
Simulasi	τ	Rasio Osilasi (%)	Waktu Transien (s)	Rasio Daya (%)
1	1×10^{-5}	9,47	-	99,43
2	3×10^{-6}	3,81	0,3	99,90
3	1×10^{-6}	2,1	0,4	99,89



Gambar 4.25. Grafik $V_{PV}(t)$ dengan τ bervariasi

Berdasarkan data hasil simulasi pada tabel 4.14 dan grafik 4.25 terlihat bahwa ternyata τ memang memiliki pengaruh terhadap respon dari sistem MPPT. Penggunaan nilai τ yang berbeda menyebabkan hasil respon keluaran yang berbeda juga. Dari tabel dan grafik terlihat bahwa semakin besar nilai τ maka osilasi yang terjadi semakin besar sehingga parameter statiknya semakin buruk. Parameter waktu transien diukur dari waktu yang dibutuhkan respon sebelum respon sistem tersebut memiliki osilasi yang konstan. Pada grafik terlihat bahwa karena osilasi pada respon simulasi 1 sangat besar sehingga penulis sulit mengukur nilai parameter dinamik ini. Melihat rasio daya yang dimiliki, terlihat bahwa rasio daya sistem tidak terpengaruh oleh perubahan nilai τ . Perbedaan rasio daya yang terjadi kemungkinan karena perhitungan daya hasil simulasi didasarkan dari nilai rata-rata data daya sel surya yang terukur. Adanya persebaran data daya dapat menyebabkan terjadinya penyimpangan hasil perhitungan.

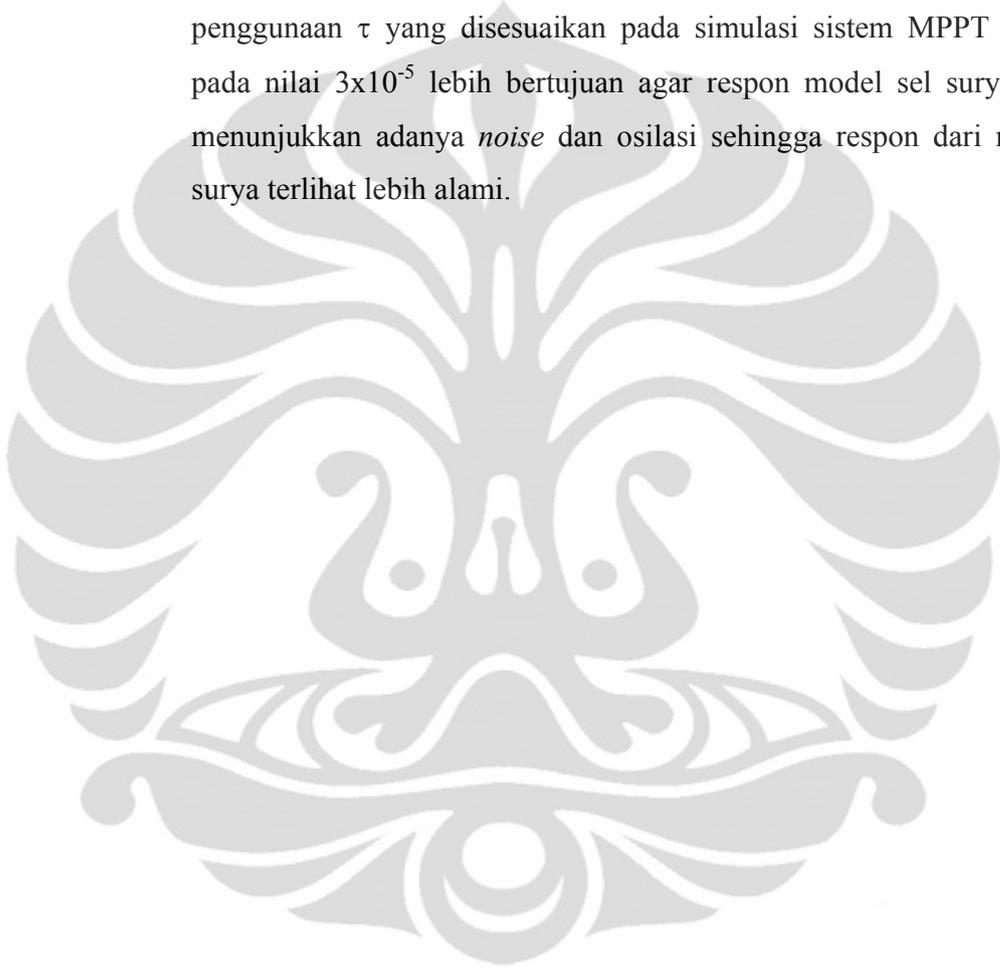
Untuk melihat pengaruh perubahan nilai τ pada kestabilan sistem, maka diagram bode untuk $H(s)$ dengan nilai τ yang bervariasi digambarkan. Gambar 4.26 menunjukkan diagram bode tersebut. Dari gambar 4.26 terlihat bahwa tidak terjadi perubahan pada kurva Bode. Artinya τ tidak mempengaruhi kestabilan sistem MPPT. Hal ini menunjukkan bahwa berapapun τ yang akan digunakan, sistem MPPT tetap dapat bekerja dan mencari titik kerja optimal dari model sel surya tersebut. Namun karena τ mempengaruhi besarnya osilasi, maka nilai τ tetap harus dipilih agar osilasi yang muncul tidak terlalu besar.



Gambar 4.26. Diagram Bode $H(s)$ dengan τ Bervariasi

Adanya LPF digunakan untuk memberikan respon dinamik pada model sel surya. Apabila nilai τ semakin besar maka respon transien dari model sel surya akan semakin lama. Sebaliknya semakin kecil nilai τ maka model sel surya akan semakin cepat memberikan respon atau dapat dikatakan semakin mendekati model statiknya yang nilainya akan langsung berubah ketika terjadi perubahan masukan karena didasarkan oleh persamaan matematis saja. Ternyata dengan simulasi melalui model

yang telah dirancang, τ turut mempengaruhi besarnya osilasi keluaran dari sistem MPPT. Agar τ , yang merupakan parameter dari model sel surya tidak memiliki pengaruh yang terlalu besar terhadap keluaran sistem MPPT, maka nilai τ yang digunakan sangat kecil. Pada akhirnya, penggunaan τ yang disesuaikan pada simulasi sistem MPPT ini, yaitu pada nilai 3×10^{-5} lebih bertujuan agar respon model sel surya mampu menunjukkan adanya *noise* dan osilasi sehingga respon dari model sel surya terlihat lebih alami.



BAB 5

KESIMPULAN

- Sistem MPPT yang dibangun merupakan sistem MPPT berbasis rangkaian Boost Converter sebagai rangkaian pengendali tegangan sel surya dan menggunakan algoritma *Incremental Conductance Method* sebagai algoritma MPPT.
- Blok model sel surya yang digunakan sebagai penunjang simulasi sistem MPPT juga telah dibangun. Sel surya yang menjadi acuan adalah sel surya Kyocera KC50T. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model sel surya ini mampu menghasilkan kurva karakteristik sel surya KC50T yang sesuai.
- Algoritma ICM yang digunakan pada sistem MPPT telah disimulasikan dan terbukti mampu mencari titik kerja optimal sel surya pada kondisi lingkungan yang bervariasi dan berubah-ubah.
- Nilai ΔV yang digunakan pada algoritma ICM ini adalah 0,5.
- Rangkaian Boost Converter dimodelkan melalui model *state-space averaging* dan model tersebut telah disimulasikan dan memberikan hasil yang sesuai.
- Komponen dari Boost Converter ini adalah sebagai berikut:
 - $L = 66 \mu\text{H}$
 - $C_1 = 9,4 \text{ mF}$
 - $C_2 = 47,4 \mu\text{F}$
- Pengendali PI yang digunakan memiliki nilai konstanta pengendali yaitu:
 - $K_P = 4,5 \times 10^{-3}$
 - $T_I = 3,91 \times 10^{-4}$
- Analisa kestabilan sistem MPPT melalui diagram bode fungsi alihnya menunjukkan bahwa sistem yang dibangun stabil, dengan $\text{GM} = 12,7 \text{ dB}$ dan $\text{PM} = 10^\circ$.
- Hasil simulasi sistem MPPT yang dibangun menunjukkan bahwa sistem MPPT yang dibangun telah mampu mencari titik kerja optimal sel surya dengan baik dan mampu membuat sel surya bekerja di sekitar titik kerja optimal tersebut.

- Sistem MPPT juga mampu merespon perubahan kondisi lingkungan yang terjadi dengan baik karena mampu mencari titik kerja optimal sel surya yang baru dan membuat sel surya bekerja dititik kerja yang baru tersebut.
- Kualitas dari sistem MPPT yang dibangun sudah cukup baik dengan mengacu pada parameter kualitas MPPT yaitu:
 - Rasio osilasi sistem MPPT adalah 3,21%,
 - waktu transien sistem MPPT adalah 0,27 s, dan
 - Rasio daya sistem MPPT adalah 99,90%.
- Pengaruh algoritma ICM pada kualitas MPPT adalah karena adanya parameter ΔV . Semakin besar ΔV , maka parameter statis semakin buruk namun parameter dinamis semakin baik, dan begitu juga sebaliknya.
- Komponen induktor dan kapasitor pada rangkaian Boost Converter juga memberikan pengaruh pada kualitas MPPT. Parameter statis MPPT akan semakin baik jika nilai C_1 diperbesar dan L diperkecil. Sedangkan parameter dinamis dan rasio daya akan semakin baik jika nilai C_1 dan L diperbesar.
- LPF pada model sel surya tidak mempengaruhi kestabilan sistem MPPT dan diberikan dengan agar terdapat dinamika pada respon model sel surya.

DAFTAR PUSTAKA

- Castaner, L., & Silvester, S. (2002). *Modelling Photovoltaic System using PSpice*. Barcelona: John Wiley & Sons, LTD.
- Ciancone, R., & Marlin, T. (1992). Tune controllers to meet plant objectives.
- Goetzberger, A., & Hoffman, V. (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Freiburg: Springer.
- Hart, D. W. (1997). *Introduction to Power Electronics*. Indiana: Prentice-Hall International, Inc.
- Jung, Y., So, J., Yu, G., & Choi, J. (2005). Improved Perturbation and Observation Method (IP&O) of MPPT Control for Photovoltaic Power System. *IEEE* .
- Kyocera KC50T Datasheet. (n.d.). Kyocera Corporation.
- Lin, L. K. (2009). *A Hybrid Wind/Solar Energy Converter*. SIM University.
- Liu, X., & Lopes, L. A. (2004). An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays. *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* .
- Luque, A., & Hegedus, S. (2003). Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (pp. 1-41). John Wiley & Sons, LTD.
- Nise, N. S. (2008). *Control System Engineering*. Pomona: John Wiley & Sons Pte Ltd.
- Schmid, J., & Schmidt, H. (2003). Power Conditioning for Photovoltaic Power Systems. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (pp. 863-903). John Wiley & Sons, LTD.
- Tsai, H.-L., Tu, C.-S., & Su, Y.-J. (2008). Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. *WCECS* .
- Wahid, A. (2007). *Identifikasi Pemodelan Empirik*. Depok: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.
- Wibowo, R. A. (2007, Agustus 22). *Energi Surya dari Masa ke Masa*. Retrieved Desember 10, 2010, from [energisurya.wordpress.com: http://energisurya.wordpress.com/2007/08/22/efisiensi-sel-surya-dari-masa-ke-masa/](http://energisurya.wordpress.com/2007/08/22/efisiensi-sel-surya-dari-masa-ke-masa/)
- Xiao, W., Dunford, W. G., Palmer, P. R., & Capel, A. (2007). Regulation of Photovoltaic Voltage. *IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 54* , 1365-1374.
- Yan, Z., Fei, L., Jinjun, Y., & Shanxu, D. (2008). Study on Realizing MPPT by Improved Incremental Conductance Method with Variable Step-size. *IEEE* .
- Yi, K., & Lu fa, Y. (2009). The Perturbation and Observation's method based on the P-V rate of curve. *IEEE* .