

**SIMULATOR ALGORITMA
PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL
SURYA PADA RANGKAIAN MODUL SURYA**

TESIS

Oleh

WIBENG DIPUTRA
06 06 00 3695



**TESIS INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI MAGISTER TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
PROGRAM PASCASARJANA BIDANG ILMU TEKNIK
UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis dengan judul :

SIMULATOR ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA PADA RANGKAIAN MODUL SURYA

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Kekhususan Aplikasi Mikroprosesor Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tesis yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 7 Januari 2008

Wibeng Diputra

NPM 0606003695

PENGESAHAN

Tesis dengan judul :

SIMULATOR ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA PADA RANGKAIAN MODUL SURYA

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Magister Teknik pada Kekhususan Aplikasi Mikroprosesor Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Tesis ini telah diujikan pada sidang ujian tesis pada tanggal 3 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai tesis pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 7 Januari 2008

Dosen Pembimbing

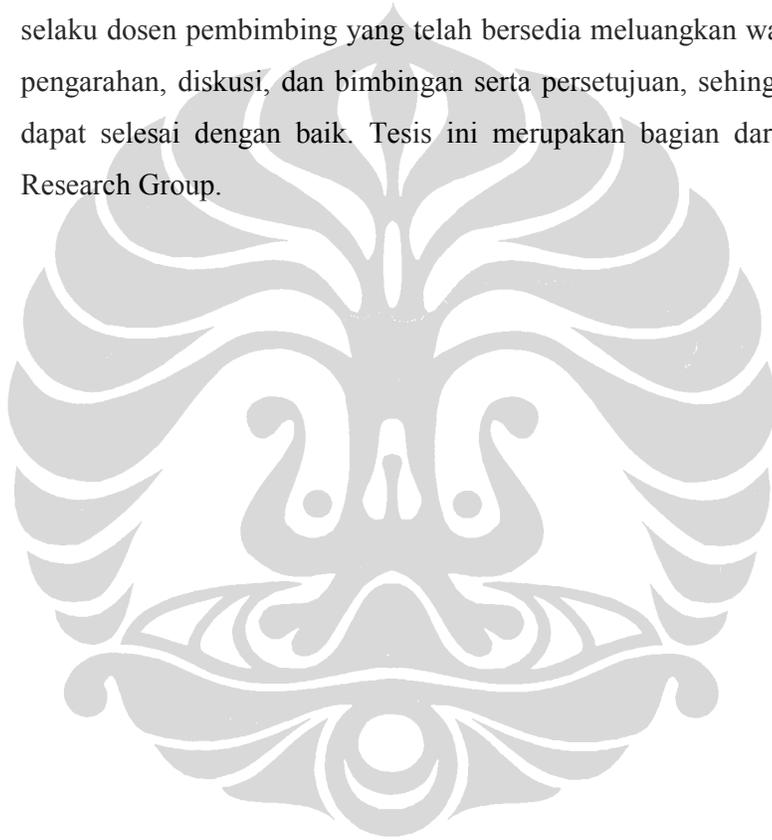
Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati, MT
NIP 131595837

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Prof. Dr. Ir. Nji Raden Poespawati, MT

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan, sehingga laporan tesis ini dapat selesai dengan baik. Tesis ini merupakan bagian dari Photonic Devices Research Group.



Wibeng Diputra
NPM 06 06 00 3695
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. N.R.Poespawati, MT

SIMULATOR ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA PADA RANGKAIAN MODUL SURYA

ABSTRAK

Berkurangnya ketersediaan energi fosil menyebabkan dunia mulai beralih ke penggunaan energi alternatif. Salah satu energi alternatif tersebut adalah energi surya melalui pemanfaatan sel surya. Sel surya menjadi pilihan karena ramah lingkungan, biaya produksi yang semakin menurun seiring dengan peningkatan jumlah produksi dan efisien sel surya yang cenderung naik.

Salah satu hal yang dapat mengurangi keluaran daya adalah kerusakan modul surya pada sistem. Hasil simulasi PSpice menunjukkan bahwa penurunan daya sistem tidak linear terhadap jumlah modul yang rusak.

Saat ini telah ada berbagai metode pendeteksi kerusakan modul surya, contohnya adalah pengukuran arus pada *bypass diode*, pemasangan LED pada *bypass diode*, atau melalui pengukuran temperatur. Penelitian ini menggunakan metode analisis kurva karakteristik daya rangkaian modul surya untuk mendeteksi adanya kerusakan dengan hanya menggunakan parameter arus dan tegangan. Umumnya sistem energi surya telah memiliki sensor arus dan tegangan, sehingga tidak diperlukan tambahan sensor untuk pendeteksian kerusakan modul menggunakan metode analisis kurva ini.

Berdasarkan kurva karakteristik rangkaian modul surya hasil simulasi Pspice yang memiliki sebuah atau lebih modul surya yang rusak, didapati bahwa kurva tersebut memiliki "jenjang / *ladder*", yang tidak dimiliki oleh kurva normal. Simulasi algoritma yang dibuat pada VB6.0 bekerja dengan cara menggambar kurva karakteristik sistem berdasarkan fungsi *irradiance* dan suhu modul, kemudian memeriksa indikasi "jenjang" kurva ini.

Pengujian pada simulasi menunjukkan bahwa algoritma pendeteksi kerusakan modul surya telah dapat mendeteksi kerusakan modul surya. Untuk pengujian berdasarkan data hasil pengukuran pada rangkaian seri dua modul surya dan pada rangkaian seri tiga modul surya dari Suntech STP005S diperlukan sedikit modifikasi pada algoritma. Hal ini disebabkan kontur "jenjang" pada kurva yang tidak horisontal sempurna. Toleransi kemiringan kurva untuk pengujian berdasarkan hasil pengukuran ini adalah sebesar 0,7 mA. Dengan toleransi ini, algoritma berhasil membedakan sistem yang normal dengan sistem yang memiliki kerusakan modul surya berdasarkan parameter arus dan tegangan.

Kata Kunci : Modul surya, PSpice, VB6.0, algoritma deteksi, jenjang/ladder

Wibeng Diputra
NPM 06 06 00 3695
Electrical Engineering Department

Counsellor
Prof. Dr. Ir. N.R.Poespawati, MT

SIMULATOR ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA PADA RANGKAIAN MODUL SURYA

ABSTRACT

Alternative energy has change the use of fossil energy in the world. One of the alternative energy which starts to be widely used was solar energy through the implementation of solar cell. Solar cell become a potential choice since its production's cost tend to go lower along with mass production, improvement on its efficiency, and also because this energy was environmental friendly.

One of matter which can lessen energy output is a broken or passive solar module in a system. Result from PSpice show that energy's degradation in a system doesn't linear to the amount of passive solar module.

Those are several methods to detect failure on solar module, example: current probe on bypass diode, using LED on bypass diode, or using temperature detection. This research contributes a method that could detect failure on solar module using power curve analysis. Generally, solar system had already has current and voltage sensor, so there are no need to add extra sensor to implement this curve analysis method.

Refer from Pspice simulation result of a string module power curve which has one passive module or more, known that the curve has "ladder" that a normal curve doesn't has it. Simulation of detection algorithm on VB6.0 works by drawing characteristic curve and by checking curve's difference as parameter detection.

Simulation in VB6.0 showed that detection algorithm had success to detect passive solar module. In order to detect failure on solar module based on measurement data from two series string solar module and three series of STP005S string solar module, detection algorithm need a modification. This is because the horizontal line of the "ladder" didn't perfectly horizontal. With 0,7 mA toleration, algorithm has succeed to detect passive solar module.

Keywords : Solar module, Pspice, VB6.0, detection algorithm, ladder

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|---------|
| PERNYATAAN KEASLIAN TESIS | ii |
| PERSETUJUAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACK | vi |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | x |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR SINGKATAN | xiv |
| DAFTAR SIMBOL | xv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xvii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 LATAR BELAKANG | 1 |
| 1.2 RUMUSAN MASALAH | 2 |
| 1.3 TUJUAN PENELITIAN | 2 |
| 1.4 BATASAN MASALAH | 2 |
| 1.5 METODOLOGI PENELITIAN | 3 |
| 1.5.1 Analisa Permasalahan Dan Kebutuhan | 4 |
| 1.5.2 Kajian Literatur | 4 |
| 1.5.3 Simulasi Rangkaian Modul Surya | 4 |
| 1.5.4 Pengujian Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya | 5 |
| 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN | 5 |
| BAB II SEL SURYA | 6 |
| 2.1 PRINSIP KERJA SEL SURYA | 6 |
| 2.2 KARAKTERISTIK SEL SURYA | 8 |
| 2.2.1 Kurva V-I Sel Surya | 8 |
| 2.2.2 Arus Hubung Singkat (I_{sc}) Pada Sel Surya | 9 |
| 2.2.3 Tegangan Hubung Terbuka (V_{oc}) Pada Sel Surya | 9 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.2.4 | Pengaruh <i>Irradiance</i> Terhadap Sel Surya | 10 |
| 2.2.5 | Pengaruh Suhu Terhadap Sel Surya | 11 |
| 2.2.6 | <i>Maximum Power Point (MPP)</i> | 12 |
| 2.2.7 | Efisiensi Sel Surya | 13 |
| 2.3 | PEMODELAN SEL SURYA | 14 |
| 2.4 | RANGKAIAN MODUL SURYA | 16 |
| 2.4.1 | Koneksi Antar Modul Surya | 16 |
| 2.4.2 | " <i>Hot Spot</i> " | 17 |
| 2.4.3 | Perbedaan Daya Antar Sel Pada Rangkaian Paralel Sel Surya | 18 |
| 2.4.4 | Perbedaan Daya Antar Sel Pada Rangkaian Seri Sel Surya | 19 |
| 2.5 | KERUSAKAN MODUL SURYA | 20 |
| BAB III | ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA | 22 |
| 3.1 | PENGAMBARAN KURVA KARAKTERISTIK MODUL SURYA | 23 |
| 3.1.1 | Penggambaran Karakteristik Modul Surya Pada PSpice | 23 |
| 3.1.2 | Penggambaran Karakteristik Modul Surya Pada VB6.0 | 24 |
| 3.2 | SIMULASI KERUSAKAN MODUL SURYA | 25 |
| 3.3 | RANCANGAN ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA | 26 |
| 3.3.1 | Rancangan Algoritma Untuk Kondisi Ideal | 27 |
| 3.3.2 | Rancangan Algoritma Untuk Kondisi Non-ideal | 28 |
| 3.4 | CARA PENGUJIAN | 30 |
| BAB IV | UJI COBA DAN ANALISA | 31 |
| 4.1 | PENGUJIAN HASIL SIMULASI MODUL SURYA | 31 |
| 4.1.1 | Modul Surya Solarex MSX-60 | 32 |
| 4.1.2 | Modul Surya Schott Solar ASE-50-ETF | 33 |
| 4.1.3 | Modul Surya Suntech STP005S | 35 |
| 4.2 | SIMULASI DAN ANALISA KERUSAKAN MODUL SURYA | 38 |
| 4.2.1 | Analisa Pada Rangkaian Dua Modul Surya Seri Dan Dua Modul Surya Paralel | 38 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.2.2 | Analisa Pada Rangkaian Tiga Modul Surya Seri Dan Tiga Modul Surya Paralel | 40 |
| 4.3 | ALGORITMA PENGGAMBAR KURVA KARAKTERISTIK MODUL SURYA | 41 |
| 4.3.1 | Perancangan Algoritma Penggambar Kurva | 41 |
| 4.3.2 | Pengujian Algoritma Penggambar Kurva | 44 |
| 4.3.2.1 | Uji Coba Algoritma Penggambar Karakteristik Pada Rangkaian Tiga Modul Surya Seri | 45 |
| 4.3.2.2 | Uji Coba Algoritma Penggambar Karakteristik Pada Rangkaian Tiga Modul Surya Paralel | 47 |
| 4.3.2.3 | Uji Coba Algoritma Penggambar Karakteristik Pada Rangkaian Modul Surya Dua Seri Dan Dua Paralel | 49 |
| 4.3 | PENGUJIAN ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA SECARA SIMULASI | 52 |
| 4.4.1 | Pengujian Algoritma Pendeteksi Pada Solarex MSX-60 | 52 |
| 4.4.2 | Pengujian Algoritma Pendeteksi Pada ASE-50-ETF | 54 |
| 4.4.3 | Pengujian Algoritma Pendeteksi Pada Suntech STP005S | 55 |
| 4.4 | PENGUJIAN ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA BERDASARKAN HASIL PENGUKURAN | 57 |
| 4.5.1 | Pengujian Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya Pada Rangkaian Seri Dua Modul Surya | 57 |
| 4.5.1.1 | Rangkaian Seri Dua Modul Surya Normal | 58 |
| 4.5.1.2 | Rangkaian Seri Dua Modul Surya Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul | 59 |
| 4.5.2 | Pengujian Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya Pada Rangkaian Seri Tiga Modul Surya | 61 |
| 4.5.2.1 | Rangkaian Seri Tiga Modul Surya Normal | 62 |
| 4.5.2.2 | Rangkaian Seri Tiga Modul Surya Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul | 63 |
| | BAB V KESIMPULAN | 66 |
| | DAFTAR ACUAN | 67 |
| | DAFTAR PUSTAKA | 69 |
| | LAMPIRAN | 71 |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|---|---------|
| Gambar 2.1 <i>PN junction</i> | 7 |
| Gambar 2.2 Karakteristik dioda pada kondisi gelap dan teriluminasi | 7 |
| Gambar 2.3 Kurva karakteristik sel surya | 9 |
| Gambar 2.4 Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan <i>irradiance</i> | 11 |
| Gambar 2.5 Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan suhu | 11 |
| Gambar 2.6 Kurva V-I dan kurva daya sel surya | 12 |
| Gambar 2.7 Kurva daya modul surya 75 W pada MPP | 12 |
| Gambar 2.8 Proses pemodelan | 14 |
| Gambar 2.9 <i>Equivalent circuit</i> model sel surya satu dioda | 15 |
| Gambar 2.10 Kurva V-I untuk N sel seri dan M sel paralel | 17 |
| Gambar 2.11 Satu modul pasif dalam modul surya | 17 |
| Gambar 2.12 Pemasangan <i>bypass diode</i> pada rangkaian modul surya | 17 |
| Gambar 2.13 Keluaran daya dengan dan tanpa <i>bypass diode</i> | 18 |
| Gambar 2.14 Kombinasi arus pada dua modul paralel yang tidak identik | 19 |
| Gambar 2.15 Metode menentukan Voc pada rangkaian dua modul surya paralel | 19 |
| Gambar 2.16 Kombinasi Voc pada dua modul surya seri yang tidak identik | 20 |
| Gambar 2.17 Metode menentukan Isc pada rangkaian dua modul surya seri | 20 |
| Gambar 2.18 Kurva modul surya yang beberapa selnya tidak menghasilkan daya | 21 |
| Gambar 3.1 Alur metode pembuatan simulator | 22 |
| Gambar 3.2 Model PSpice Untuk Modul Surya | 24 |
| Gambar 3.3 Pergeseran nilai MPP akibat perbedaan daya antar modul | 26 |
| Gambar 3.4 Diagram blok sistem energi surya konvensional | 26 |
| Gambar 3.5 Keterangan variabel algoritma | 27 |
| Gambar 3.6 Diagram alir algoritma pendeteksi | 28 |
| Gambar 3.7 Model untuk mengukur karakteristik modul surya | 30 |
| Gambar 4.1 Hasil simulasi Solarex MSX-60 (a) <i>Datasheet</i> (b) Simulasi PSpice (c) Simulasi VB 6.0 | 32 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 4.2 | Hasil simulasi ASE-50-ETF (a) <i>Datasheet</i> (b) Simulasi PSpice (c) Simulasi VB 6.0 | 34 |
| Gambar 4.3 | Hasil simulasi ASE-50-ETF (a) <i>Datasheet</i> (b) Simulasi PSpice (c) Simulasi VB 6.0 | 36 |
| Gambar 4.4 | (a) Susunan rangkaian modul surya 2X2 (b) Kurva karakteristik pada kondisi normal (c) Kurva karakteristik dengan kerusakan modul | 38 |
| Gambar 4.5 | Kurva dioda pada rangkaian modul surya | 39 |
| Gambar 4.6 | (a) Susunan rangkaian modul surya 3X3 (b) Kurva karakteristik pada kondisi normal (c) Kurva karakteristik dengan kerusakan modul | 40 |
| Gambar 4.7 | Kurva rangkaian modul surya 3x3 dengan kerusakan pada modul kesatu | 41 |
| Gambar 4.8 | Penjelasan jenjang pada kurva dengan kerusakan pada modul kesatu | 42 |
| Gambar 4.9 | Alur algoritma penggambar kurva karakteristik | 43 |
| Gambar 4.10 | Rangkaian modul surya dengan <i>irradiance</i> yang terurut | 43 |
| Gambar 4.11 | Kedudukan Isc dan Voc pada kurva | 44 |
| Gambar 4.12 | (a) Susunan modul surya (b1) Simulasi normal PSpice (b2) Simulasi normal VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali pada PSpice (d2) Sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali pada VB6.0 | 45 |
| Gambar 4.13 | (a) Susunan modul surya (b1) Simulasi normal PSpice (b2) Simulasi normal VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 | 47 |
| Gambar 4.14 | (a) Susunan modul surya (b1) Modul normal dengan PSpice (b2) Modul normal dengan VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Beda daya pada modul satu dan dua dengan PSpice (d2) Beda daya pada modul satu dan dua dengan VB6.0 (e1) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan PSpice (e2) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan VB6.0 (f1) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan PSpice (f2) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan VB6.0 | 49 |
| Gambar 4.15 | Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Solarex MSX-60 | 53 |

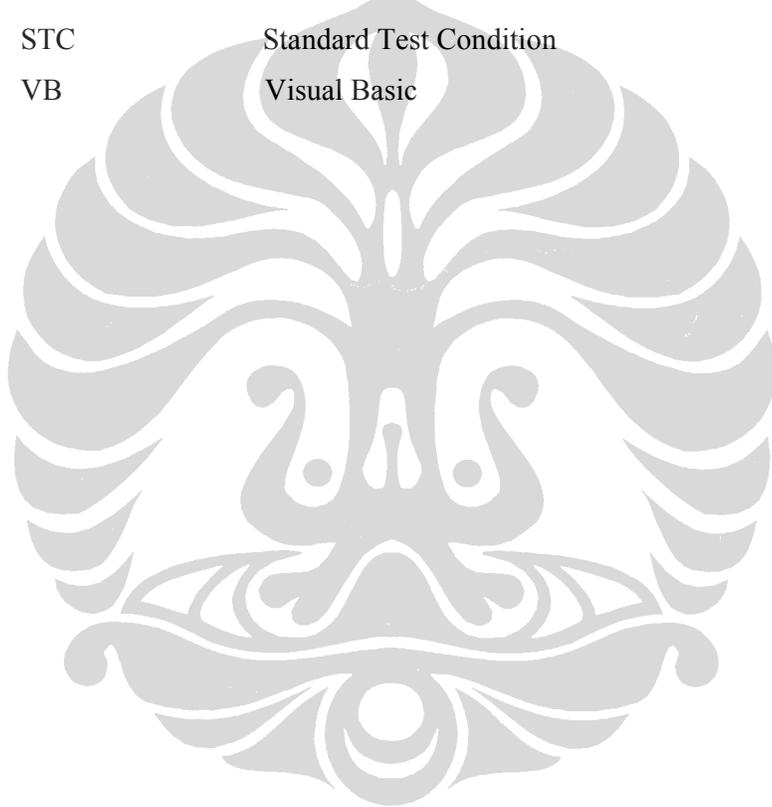
| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 4.16 | Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Solarex MSX-60 dengan kerusakan pada salah satu modulnya | 53 |
| Gambar 4.17 | Simulasi pengujian algoritma deteksi pada ASE-50-ETF | 54 |
| Gambar 4.18 | Simulasi pengujian algoritma deteksi pada ASE-50-ETF dengan kerusakan modul | 55 |
| Gambar 4.19 | Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Suntech STP005S | 56 |
| Gambar 4.20 | Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Suntech STP005S dengan kerusakan modul | 56 |
| Gambar 4.21 | Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri dua modul surya pada kondisi normal | 58 |
| Gambar 4.22 | Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri dua modul surya normal | 59 |
| Gambar 4.23 | Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri dua modul surya pada kondisi dengan kerusakan pada salah satu modul surya | 60 |
| Gambar 4.24 | Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri dua modul surya dengan kerusakan pada salah satu modul | 61 |
| Gambar 4.25 | Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri tiga modul surya pada kondisi normal | 62 |
| Gambar 4.26 | Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri tiga modul surya normal | 63 |
| Gambar 4.27 | Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri tiga modul surya pada kondisi dengan kerusakan pada salah satu modul surya | 64 |
| Gambar 4.28 | Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri tiga modul surya dengan kerusakan pada salah satu modul | 65 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|---|---------|
| Tabel 2.1 Perbandingan Metode <i>Maximum Power Point Tracking</i> | 13 |
| Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Solarex MSX-60 Terhadap <i>Datasheet</i> | 33 |
| Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi ASE-50-ETF Terhadap <i>Datasheet</i> | 35 |
| Tabel 4.3 Perbandingan hasil simulasi STP005S pada <i>irradiance</i> 1000 W/m ² | 37 |
| Tabel 4.4 Perbandingan hasil simulasi STP005S pada <i>irradiance</i> 800 W/m ² | 37 |
| Tabel 4.5 Perbandingan hasil simulasi STP005S pada <i>irradiance</i> 600 W/m ² | 37 |
| Tabel 4.6 <i>Irradiance</i> untuk simulasi rangkaian modul 2x2 | 39 |
| Tabel 4.7 <i>Irradiance</i> untuk simulasi rangkaian modul 3x3 | 41 |
| Tabel 4.8 Nilai <i>irradiance</i> untuk rangkaian tiga modul surya seri | 45 |
| Tabel 4.9 Nilai <i>irradiance</i> untuk rangkaian tiga modul surya paralel | 47 |
| Tabel 4.10 Nilai <i>irradiance</i> untuk rangkaian modul surya dua seri dan dua paralel | 49 |
| Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Normal | 58 |
| Tabel 4.12 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Normal | 59 |
| Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul Surya | 60 |
| Tabel 4.14 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul | 60 |
| Tabel 4.15 Hasil Pengukuran Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Normal | 62 |
| Tabel 4.16 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Normal | 62 |
| Tabel 4.17 Hasil Pengukuran Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Modul Surya | 63 |
| Tabel 4.18 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul | 64 |

DAFTAR SINGKATAN

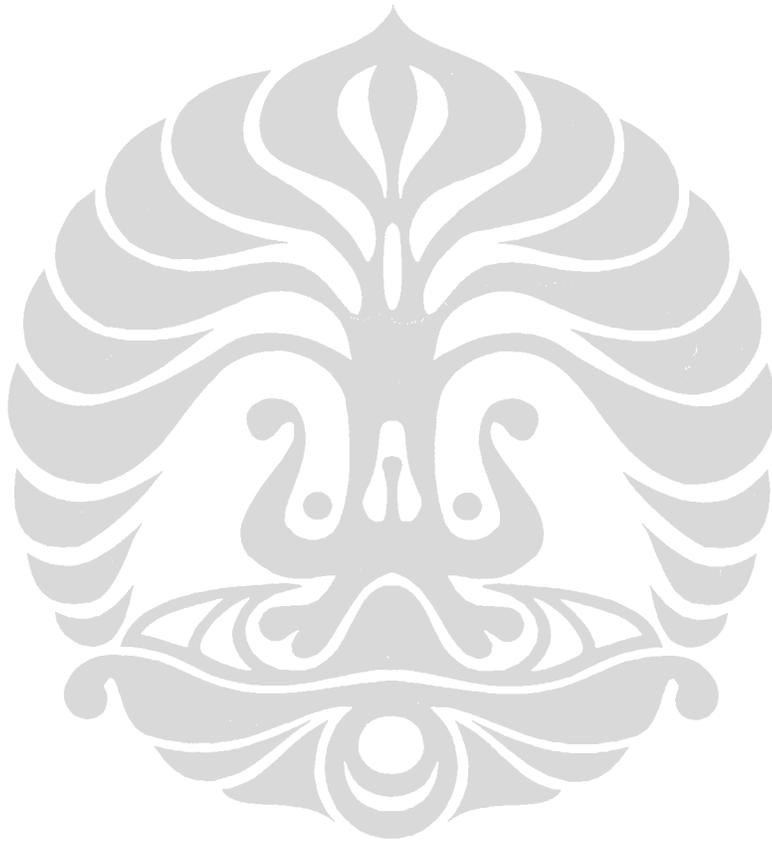
| | |
|--------|--|
| AM | Air Mass |
| MPP | Maximum Power Point |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| Pspice | Personal (Computer) Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| STC | Standard Test Condition |
| VB | Visual Basic |



DAFTAR SIMBOL

| Simbol | Keterangan | Dimensi |
|-----------------------------------|--|--------------------------|
| A | Luas area sel atau modul surya | m ² |
| λ | Panjang gelombang | m |
| c | Kecepatan cahaya | m/s |
| E | Energi | Joule |
| η | Efisiensi | - |
| f | Frekuensi | Hz |
| FF | <i>Fill Factor</i> | - |
| G | <i>Irradiance</i> | W/m ² |
| G _(nom) | <i>Irradiance pada Standard Test Condition</i> | W/m ² |
| h | Konstanta Planck | Js |
| I | Arus pada terminal sel atau modul surya | A |
| I _{λ} | <i>Spectral irradiance</i> | W/m ² μ m |
| I _L | Arus yang dihasilkan oleh cahaya | A |
| I _{L(T1)} | Arus yang dihasilkan cahaya pada T1 | A |
| I _m | Arus pada saat MPP | A |
| I _o | Arus saturasi dioda | A |
| I _{o(T1)} | Arus saturasi dioda pada saat T1 | A |
| I _{sc} | Arus hubung singkat | A |
| I _{sc(T1)} | Arus hubung singkat pada T1 | A |
| J _L | Arus yang dihasilkan cahaya per satuan luas | A/m ² |
| J _o | Arus saturasi dioda per satuan luas | A/m ² |
| J _{sc} | Arus hubung singkat per satuan luas | A/m ² |
| k | Konstanta Boltzmann | J/K |
| n | Diode quality factor | - |
| q | Muatan elektron | C |
| R _s | Resistensi seri | Ω |
| T | Temperatur ambien | K |
| V | Tegangan terminal sel atau modul surya | V |

| | | |
|----------|-------------------------|---|
| V_m | Tegangan pada saat MPP | V |
| V_g | Tegangan band gap | V |
| V_{oc} | Tegangan hubung terbuka | V |



DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|--|---------|
| Lampiran 1 <i>Datasheet</i> Solarex MSX-60 | 72 |
| Lampiran 2 <i>Datasheet</i> Schott Solar ASE-50-ETF | 76 |
| Lampiran 3 <i>Datasheet</i> Swissco Solar STP005S-12/Db | 78 |
| Lampiran 4 Pengukuran Rangkaian Modul Surya | 80 |



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Berkurangnya ketersediaan energi fosil menyebabkan dunia mulai beralih ke penggunaan energi alternatif. Diantara energi alternatif yang mulai diaplikasikan, salah satunya adalah energi surya melalui pemanfaatan sel surya. Sel surya menjadi pilihan karena biaya produksi yang semakin menurun seiring dengan peningkatan jumlah produksi dan karena efisien sel yang cenderung naik. Selain itu, energi ini ramah lingkungan dengan sumber energi sinar matahari yang mudah didapat.

Salah satu kendala dalam pemanfaatan sel surya adalah ketersediaan dayanya. Hal ini disebabkan oleh rendahnya efisiensi, sehingga sel surya memerlukan luasan area untuk mencukupi kebutuhan daya. Oleh sebab itu, rancangan sistem energi surya selalu mengusahakan agar daya keluaran dapat optimum.

Sebuah sel surya memiliki keterbatasan untuk menyediakan daya keluaran. Pada aplikasinya, sel surya digabung secara seri atau paralel untuk membentuk sebuah modul surya. Modul-modul ini kemudian dirangkai membentuk sistem energi surya untuk menyediakan daya yang dibutuhkan. Susunan rangkaian modul surya didesain agar mempermudah antarmuka tegangan dan arus listrik dengan beban. Kontrol daya yang dilakukan pada sebuah pengontrol sistem energi surya secara garis besar memiliki dua fungsi, yaitu untuk membuat sistem tetap menghasilkan daya maksimum (*Maximum Power Point*) dan untuk pengantarmukaan dengan beban.

Ada kalanya modul surya dalam sistem mengalami kerusakan, sehingga mengurangi produksi daya. Penurunan daya akibat kerusakan modul surya ini perlu dideteksi agar kebutuhan daya pada beban tetap terpenuhi. Kerusakan modul yang dimaksud adalah apabila sebuah modul surya menghasilkan daya yang lebih rendah dibandingkan modul lain dalam rangkaian, atau apabila sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali.

Saat ini telah ada berbagai metode pendeteksi kerusakan modul surya, contohnya adalah pengukuran arus pada *bypass diode*, pemasangan LED pada *bypass diode*, atau melalui pengukuran temperatur. Penelitian ini menggunakan metode analisis kurva karakteristik daya rangkaian modul surya untuk mendeteksi adanya kerusakan dengan hanya menggunakan parameter arus dan tegangan. Umumnya sistem energi surya telah memiliki sensor arus dan tegangan, sehingga tidak diperlukan tambahan sensor untuk pendeteksian kerusakan modul menggunakan metode analisis kurva ini. Kontribusi tesis ini ditujukan untuk menganalisa efek kerusakan modul surya pada rangkaian modul surya dan untuk membuat algoritma pendeteksi adanya kerusakan modul surya pada rangkaian modul surya.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Sebuah sistem energi surya tersusun dari gabungan modul surya. Bila terdapat modul yang rusak, maka produksi energi pada sistem menjadi berkurang. Hal ini perlu dideteksi agar kebutuhan daya beban tetap terpenuhi. Oleh sebab itu, tesis ini ditujukan untuk menganalisis efek kerusakan modul surya dan untuk membuat algoritma pendeteksi adanya kerusakan modul surya pada rangkaian modul surya.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa efek kerusakan modul pada kurva karakteristik V-I sistem energi surya menggunakan program simulasi PSpice.
2. Membuat simulator algoritma pendeteksi kerusakan modul pada rangkaian modul surya.
3. Menguji algoritma pendeteksi berdasarkan data hasil pengukuran karakteristik rangkaian modul surya.

1.4 BATASAN MASALAH

Pola cuaca sangat mempengaruhi performansi sistem energi surya. Faktor eksternal yang dapat mempengaruhi karakteristik modul surya adalah kerapatan udara, kelembaban, kecepatan angin, dan sebagainya. Simulasi yang dilakukan

hanya mengkalkulasi faktor lingkungan yang memiliki kontribusi besar bagi karakteristik daya, yaitu suhu modul surya dan *irradiance* cahaya matahari.

Referensi yang sering dipakai untuk mensimulasikan karakteristik sel surya adalah pemodelan dengan dua dioda dan satu dioda. Namun, model dua dioda merupakan model yang kompleks dimana parameter yang diperlukan sulit untuk didapat, sehingga pemodelan pada pembahasan tesis ini menggunakan model satu dioda yang disederhanakan. Hal ini dikarenakan parameter yang dibutuhkan pada pemodelan satu dioda dapat dilihat dari *datasheet* modul surya.

Algoritma pendeteksi yang dirancang hanya mendeteksi kerusakan pada sistem yang memiliki rangkaian modul seri saja dan sistem yang memiliki rangkaian modul seri dan paralel. Pada sistem dengan rangkaian modul seri dan paralel, kerusakan tidak dapat dideteksi apabila terjadi kerusakan pada keseluruhan rangkaian seri atau pada keseluruhan rangkaian paralel. Hal ini disebabkan karena kontur kurva karakteristik V-I yang sama dengan kontur kurva normal.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam mengembangkan rancangan simulator ini digunakan model proses, yaitu *incremental model*. Model proses ini diperlukan untuk mengarahkan pengembangan sistem melalui kerangka kerja yang disusun dalam suatu aliran kerja. *Incremental model* menerapkan urutan linear dalam suatu cara yang bergiliran. Masing-masing urutan linear menghasilkan perangkat lunak tambahan (dalam hal ini berupa sub-program).

Algoritma pendeteksi memerlukan kurva data karakteristik rangkaian modul surya. Kurva ini disediakan oleh algoritma pembuat grafik karakteristik rangkaian modul surya dan algoritma pembuat grafik membutuhkan urutan sub-programnya sendiri. Sub-program pembuat grafik ini dihasilkan pada *increment* pertama. Program penggambar grafik dihasilkan pada *increment* kedua. Kemampuan untuk simulasi pendeteksi kerusakan modul dihasilkan pada *increment* ketiga dan *increment* terakhir adalah menguji algoritma menggunakan data hasil pengukuran karakteristik rangkaian modul surya.

Algoritma merupakan inti dari produk dan kebutuhan dasar yang diselesaikan terlebih dahulu pada *incremental model*. *Incremental model*

menyediakan kapabilitas untuk menyesuaikan dengan kebutuhan dan menyediakan *platform* bagi pengguna untuk melakukan evaluasi. Metodologi ini akan menguraikan tahapan-tahapan dalam pengembangan rancangan sistem.

1.5.1 Analisa Permasalahan Dan Kebutuhan

Tahapan pertama dalam pengembangan sistem adalah mendefinisikan cakupan. Pada penelitian ini, tema pendeteksian kerusakan modul surya perlu untuk diteliti karena suplai daya kepada beban dapat tidak tercukupi bila terdapat modul yang rusak. Kontrol daya untuk sistem konvensional hanya mencari daya maksimum, sehingga bila terjadi penurunan daya akibat kerusakan modul, maka pengontrol daya mencari daya maksimum dari karakteristik daya yang telah turun tadi. Akibatnya adalah berkurangnya perolehan daya secara permanen selama jangka waktu pemakaian modul. Hal ini dapat dihindari apabila kerusakan modul surya dapat dideteksi. Simulasi dan pengukuran dalam rancangan ini juga perlu untuk dibuat sebagai validasi algoritma.

1.5.2 Kajian Literatur

Tahapan selanjutnya adalah rancangan logis dengan kajian literatur. Rangkaian modul surya dapat disimulasikan menggunakan pemodelan rangkaian sirkuit analog. Persamaan matematis dari pemodelan dapat diacu dari kajian literatur. Parameter untuk pemodelan dan simulasi diambil dari informasi *datasheet* modul surya.

1.5.3 Simulasi Rangkaian Modul Surya

Langkah awal untuk dapat mensimulasikan algoritma pendeteksi kerusakan modul adalah terlebih dahulu menganalisa karakteristik V-I sistem untuk kondisi normal dan untuk kondisi dengan kerusakan modul menggunakan program PSpice 9.1. Hasil analisa ini akan menunjukkan perbedaan antara rangkaian modul surya yang normal dengan rangkaian modul surya yang mengalami kerusakan pada modulnya. Perbedaan ini yang nantinya akan dijadikan sebagai indikator bagi algoritma pendeteksi.

Langkah selanjutnya adalah hasil kurva karakteristik ini digunakan untuk merancang algoritma untuk VB6.0 yang dapat meniru kurva karakteristik yang

sama. Rancangan algoritma ini diperlukan sebab PSpice tidak dapat digunakan untuk mensimulasikan algoritma pendeteksi. Simulasi karakteristik V-I rangkaian modul surya membutuhkan analisis persamaan rangkaian yang rumit, sehingga untuk penyederhanaan pada pemrograman VB6.0, dibuat tersendiri algoritma penggambar kurva karakteristik. Algoritma ini kemudian dikodekan pada program VB6.0 dan hasil grafiknya dibandingkan dengan program PSpice 9.1 untuk validasi. Nilai tegangan dan arus pada kurva karakteristik VB6.0 kemudian digunakan sebagai variabel untuk algoritma pendeteksi.

Tahapan selanjutnya adalah merancang algoritma pendeteksi kerusakan modul surya. Kurva hasil simulasi PSpice pada berbagai rangkaian modul surya dapat dianalisa untuk mendapat kesimpulan tentang karakteristik V-I sistem pada kondisi dengan kerusakan modul. Kesimpulan ini kemudian digunakan untuk merancang algoritma pendeteksi dan akhirnya dibuat program simulasi pada VB6.0 untuk mensimulasikan jalannya algoritma pendeteksi ini.

1.5.4 Pengujian Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya

Bila simulasi telah berjalan dengan baik sesuai dengan referensi, maka tahapan selanjutnya adalah melakukan pengukuran pada rangkaian modul surya. Rangkaian modul surya yang diukur adalah rangkaian modul surya yang normal dan rangkaian modul surya yang memiliki kerusakan pada salah satu modulnya. Hasil pengukuran ini kemudian dimasukkan ke dalam program VB6.0 sebagai data yang akan dianalisa. Algoritma pendeteksi akan memeriksa data hasil pengukuran, apakah terdapat kerusakan atau tidak.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan tesis ini dibagi menjadi lima bab yang disusun berdasarkan sistematika sebagai berikut: BAB I berisi pendahuluan yang mencakup latar belakang, kontribusi, rumusan masalah, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan. BAB II difokuskan pada landasan teori, menceritakan prinsip kerja sel surya, karakteristik dan pemodelannya. BAB III menguraikan program yang dipakai, rancangan program dan algoritmanya. BAB IV membahas mengenai uji coba dan analisa. BAB V berisikan kesimpulan dari tesis.

BAB II SEL SURYA

2.1 PRINSIP KERJA SEL SURYA

Sel surya bekerja berdasarkan efek fotoelektrik pada material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Berdasarkan teori Maxwell tentang radiasi elektromagnet, cahaya dapat dianggap sebagai spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang berbeda. Pendekatan yang berbeda dijabarkan oleh Einstein bahwa efek fotoelektrik mengindikasikan cahaya merupakan partikel diskrit atau quanta energi. Dualitas cahaya sebagai partikel dan gelombang dirumuskan dengan persamaan :

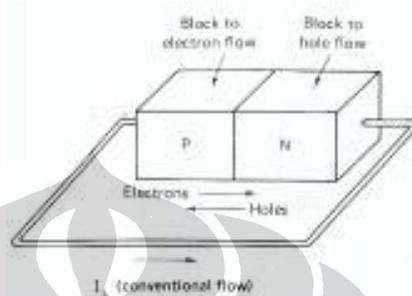
$$E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana cahaya pada frekuensi f atau panjang gelombang λ datang dalam bentuk paket-paket foton dengan energi sebesar E ; h adalah konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ Js) dan c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s). Sifat cahaya sebagai energi dalam paket-paket foton ini yang diterapkan pada sel surya.

Pada awalnya (1839) sifat fotoelektrik ditemukan pada larutan elektro kimia oleh Alexandre Edmond Becquerel, meskipun tidak ada penjelasan ilmiah untuk peristiwa itu. Tahun 1905, Albert Einstein mengamati efek ini pada lempengan metal. Namun pada perkembangannya, material yang dipakai adalah semikonduktor, terutama silikon. Material ini dapat bersifat insulator pada temperatur rendah, tetapi dapat bersifat sebagai konduktor bila tersedia energi.

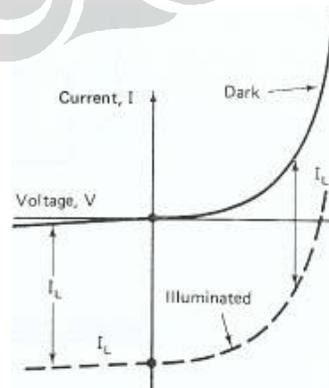
Prinsip kerja semikonduktor sebagai sel surya mirip dengan dioda sebagai *pn-junction* (Gambar 2.1). *PN-junction* adalah gabungan / lapisan semikonduktor jenis P dan N yang diperoleh dengan cara doping pada silikon murni. Pada semikonduktor jenis P, terbentuk *hole* (pembawa muatan listrik positif) yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan jumlah elektronnya, sehingga *hole* merupakan pembawa muatan mayoritas, sedangkan elektron merupakan pembawa muatan minoritas. Demikian pula sebaliknya dengan semikonduktor jenis N. Bila bagian P dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian N dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus dapat mengalir melewati *pn-junction*. Kondisi ini disebut sebagai panjar maju. Bila hal sebaliknya

dilakukan (panjar mundur), yaitu bagian N dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian P dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus tidak dapat mengalir melewati *pn-junction*. Akan tetapi, masih ada arus dalam ukuran sangat kecil yang masih dapat mengalir (dalam ukuran mikroamper) yang disebut dengan arus bocor.



Gambar 2.1 *PN junction*[1]

Ada dua hal yang menarik dalam kondisi panjar mundur tersebut, yaitu efek fotokonduktif dan *photovoltaic*. Fotokonduktif adalah gejala di mana apabila suhu dinaikkan, maka arus bocor pada panjar mundur juga meningkat. Kenaikan suhu yang dapat dianggap sebagai penambahan energi dapat juga diganti dengan cahaya sebagai salah satu bentuk energi. Penyerapan energi cahaya pada kondisi panjar mundur sehingga menghasilkan arus listrik pada *pn junction* ini disebut dengan efek *photovoltaic*. Penjelasan secara grafik dapat dilihat pada Gambar 2.2. Jadi, sel surya pada dasarnya adalah sebuah fotodiode yang dirancang dengan mengacu pada efek *photovoltaic* sedemikian rupa, sehingga dapat mengubah energi cahaya seefisien mungkin menjadi energi listrik.



Gambar 2.2 Karakteristik dioda pada kondisi gelap dan teriluminasi[1]

2.2 KARAKTERISTIK SEL SURYA

Sub-bab ini menerangkan parameter sel surya yang paling berpengaruh pada kurva daya, yaitu arus hubung singkat dan tegangan hubung terbuka untuk parameter internal, sedangkan parameter eksternalnya meliputi suhu dan *irradiance*. Daya maksimum dan efisiensi turut dimasukkan dalam pembahasan karena merupakan parameter yang umum digunakan untuk membandingkan sel surya.

2.2.1 Kurva V-I Sel Surya

Cahaya mengakibatkan kurva V-I dioda pada Gambar 2.2 turun dari kuadran pertama ke kuadran empat dimana daya dapat dihasilkan dari dioda melalui arus bocor pada kuadran empat. Dari grafik pada Gambar 2.2 dapat disimpulkan bahwa persamaan sel surya dapat diambil dari persamaan dioda, yaitu[2] :

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) - I_L \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan I = arus pada terminal sel surya (A)

I_0 = arus saturasi dioda (A)

I_L = arus yang dihasilkan oleh cahaya (A)

q = muatan elektron, $1,6 \times 10^{-19}$ C

V = tegangan terminal sel surya (V)

n = *diode quality factor* (nilainya antara 1-2)

k = konstanta Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

T = temperatur ambien (K)

Gambar kurva dari persamaan ini adalah Gambar 2.2 pada kuadran empat, yaitu sel surya pada keadaan teriluminasi. Umumnya *datasheet* dan laporan penelitian menampilkan kurva pada kuadran pertama (seperti pada Gambar 2.3) dengan arus panjar mundur yang dibalik untuk kemudahan pembacaan grafik, sehingga persamaan kurva menjadi[3] :

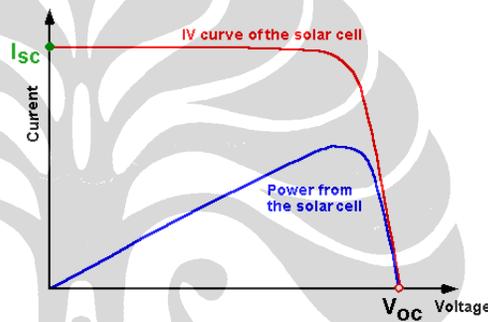
$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

2.2.2 Arus Hubung Singkat (Isc) Pada Sel Surya

Isc adalah arus yang mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol (Gambar 2.3). Pada kondisi ideal tanpa rugi daya, Isc sama dengan I_L . Isc bergantung linear terhadap *irradiance* dan dipengaruhi beberapa hal lain, yaitu luas area sel, spektrum cahaya dan parameter optik lain. Pengujian pada *Standard Test Condition* (STC), sel surya komersial memiliki Isc yang bervariasi antara 28mA/cm² sampai dengan 35mA/cm²[3]. Densitas Isc terhadap luas area sel (A) dirumuskan dengan persamaan[4] :

$$I_{sc} = A \cdot J_{sc} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_0 = A \cdot J_0 \dots\dots\dots (2.5)$$



Gambar 2.3 Kurva karakteristik sel surya[2]

2.2.3 Tegangan Hubung Terbuka (Voc) Pada Sel Surya

Voc adalah tegangan maksimum dari sel surya dan ini terjadi pada saat arus sel sama dengan nol, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Tegangan ini merupakan kondisi panjar maju pada *junction* sel surya. Persamaan[3] untuk menentukan Voc didapat dari Persamaan (2.3) untuk nilai $I = 0$:

$$I = 0 = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) - I_L$$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dari Persamaan (2.6), terlihat bahwa nilai Voc bergantung secara logaritmik terhadap rasio I_L / I_0 . Ini berarti pada temperatur konstan, Voc berskala logaritmik terhadap I_L dan karena I_L bergantung linear terhadap *irradiance*, maka Voc berskala logaritmik juga terhadap *irradiance*. Rumusan tersebut menyimpulkan bahwa *irradiance* lebih berpengaruh terhadap I_L daripada Voc.

Substitusi Persamaan (2.4) dan Persamaan (2.5) pada Persamaan (2.6) menghasilkan[2] :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_0} + 1 \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Persamaan ini mengindikasikan bahwa Voc tidak bergantung pada luas area sel.

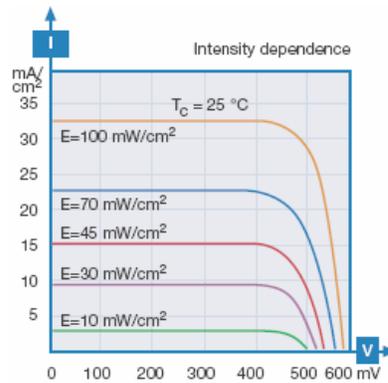
2.2.4 Pengaruh Irradiance Terhadap Sel Surya

Radiasi matahari yang diterima bumi terdistribusi pada beberapa *range* panjang gelombang, mulai dari 300 nm sampai dengan 4 mikron. Sebagian radiasi mengalami refleksi di atmosfer (*diffuse radiation*) dan sisanya dapat sampai ke permukaan bumi (*direct radiation*). Kedua radiasi ini yang dipakai untuk mengukur besaran radiasi yang diterima sel surya. Besaran – besaran penting untuk mengukurnya adalah[3] :

- *Spectral irradiance* I_λ - Daya yang diterima oleh satu unit area dalam bentuk differensial panjang gelombang $d\lambda$, satuan : $W/m^2 \mu m$.
- *Irradiance* - Integral dari *spectral irradiance* untuk keseluruhan panjang gelombang, satuan : W/m^2 .
- Radiansi - Integral waktu dari *irradiance* untuk jangka waktu tertentu. Oleh sebab itu, satuannya sama dengan satuan energi, yaitu J/m^2 – hari, J/m^2 – bulan atau J/m^2 – tahun.

Di antara ketiga besaran tersebut, yang akan digunakan dalam analisa adalah W/m^2 karena satuan ini yang biasa dipakai dalam *datasheet*, sedangkan besaran radiansi biasanya digunakan untuk menghitung estimasi daya keluaran pada instalasi sistem. *Irradiance* merupakan sumber energi bagi sel surya, sehingga keluarannya sangat bergantung oleh perubahan *irradiance*. Gambar 2.4 memberikan contoh perubahan *irradiance* terhadap kurva daya modul surya.

Dilihat dari Gambar 2.4, keluaran daya berbanding lurus dengan *irradiance*. Isc lebih terpengaruh oleh perubahan *irradiance* daripada Voc. Hal ini sesuai dengan penjelasan cahaya sebagai paket-paket foton. Pada saat *irradiance* tinggi, yaitu pada saat jumlah foton banyak, arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton.

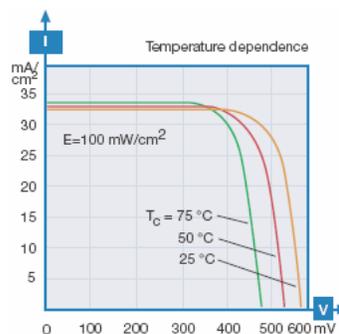


Gambar 2.4 Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan *irradiance*[4]

Pengujian modul surya pada *datasheet* umumnya dilakukan pada *Standard Test Condition* (STC), yaitu *Air Mass* (AM) 1,5; *irradiance* $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ dan temperatur 25°C . Dalam kondisi nyata, nilai *irradiance* tidak mencapai nilai tersebut, bergantung dari posisi lintang, posisi matahari dan kondisi cuaca. Nilai *irradiance* pada lokasi tertentu juga bervariasi dari bulan ke bulan.

2.2.5 Pengaruh Suhu Terhadap Sel Surya

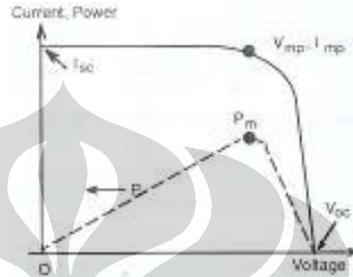
Irradiance bukanlah satu-satunya parameter eksternal yang memiliki pengaruh penting pada kurva V-I, ada juga pengaruh suhu. Suhu memiliki peranan penting untuk memprediksi karakteristik V-I. Komponen semikonduktor seperti dioda sensitif terhadap perubahan suhu, begitu pula dengan sel surya. Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa suhu berpengaruh banyak pada V_{oc} daripada terhadap I_{sc} , berkebalikan dengan pengaruh *irradiance*. Kenaikkan suhu mengurangi V_{oc} sel surya. Hal ini disebabkan peningkatan suhu menurunkan *band gap* semikonduktor.



Gambar 2.5 Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan suhu[4]

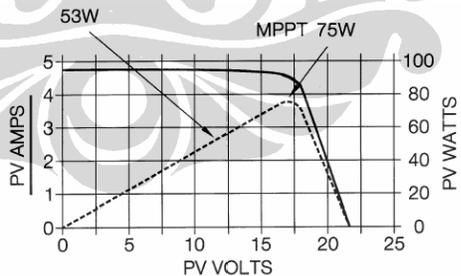
2.2.6 Maximum Power Point (MPP)

Hasil perkalian arus dan tegangan pada setiap titik kurva V-I (Gambar 2.6) menyatakan besar dayanya. Kurva daya pada saat sel surya bekerja berbentuk segitiga. Secara grafis, daya maksimum pada sel adalah puncak dari segitiga yang memiliki luas terbesar. Titik ini disebut dengan *maximum power point* (MPP), hasil dari $V_{mp} \times I_{mp}$.



Gambar 2.6 Kurva V-I dan kurva daya sel surya[5]

Bila modul surya bekerja pada tegangan 12 V, maka dilihat dari kurva daya (Gambar 2.7), daya keluaran adalah 53 W. Sedangkan apabila modul dapat bekerja pada tegangan 17 V, maka daya keluaran dapat mencapai 75 W (MPP). Sistem kontrol ini umumnya menggunakan *DC-DC converter* dan algoritma pencari MPP agar sistem dapat bekerja optimal. Pada sub-bab selanjutnya akan dilihat pergeseran nilai MPP ini pada rangkaian modul surya akibat kerusakan modul surya.



Gambar 2.7 Kurva daya modul surya 75 W pada MPP[6]

Hal yang perlu diperhatikan pada level aplikasi adalah sensor yang dipakai untuk mengkalkulasikan MPP. Sensor yang dipakai berkaitan dengan algoritma yang diterapkan pada sistem kontrol. Tabel 2.1 menjelaskan perbandingan algoritma dan sensor yang dipakai untuk algoritma tersebut.

Tabel 2.1 Perbandingan Metode *Maximum Power Point Tracking*[7]

| MPPT Technique | True MPPT? | Implementation Complexity | Sensed Parameters |
|-------------------------------------|------------|---------------------------|-------------------------|
| Hill-climbing/P&O | Yes | Low | Voltage, Current |
| IncCond | Yes | Medium | Voltage, Current |
| Fractional V_{oc} | No | Low | Voltage |
| Fractional I_{sc} | No | Medium | Current |
| Fuzzy Logic Control | Yes | High | Varies |
| Neural Network | Yes | High | Varies |
| RCC | Yes | Low | Voltage, Current |
| Current Sweep | Yes | High | Voltage, Current |
| DC Link Capacitor Droop Control | No | Low | Voltage |
| Load I or V Maximization | No | Low | Voltage, Current |
| dP/dV or dP/dI Feedback Control | Yes | Medium | Voltage, Current |
| Array Reconfiguration | No | High | Voltage, Current |
| Linear Current Control | No | Medium | Irradiance |
| I_{MPP} & V_{MPP} Computation | Yes | Medium | Irradiance, Temperature |
| State-based MPPT | Yes | High | Voltage, Current |
| OCC MPPT | No | Medium | Current |
| BFV | No | Low | None |
| LRCM | No | High | Voltage, Current |
| Slide Control | Yes | Medium | Voltage, Current |

Terlihat dari Tabel 2.1 bahwa sensor yang terbanyak dipakai adalah parameter arus dan tegangan. Oleh karena itu, untuk kemudahan implementasi, maka algoritma pendeteksi kerusakan modul surya pada rangkaian modul surya yang dirancang pada tesis ini menggunakan parameter nilai arus dan tegangan.

2.2.7 Efisiensi Sel Surya

Perbandingan performansi antara satu modul surya dengan modul surya lainnya umumnya dilihat dari efisiensinya. Banyaknya energi matahari dalam bentuk foton yang diserap sel surya menentukan efisiensinya. Efisiensi modul surya didefinisikan sebagai perbandingan daya keluaran dengan daya masukan. Daya masukan dihitung sebagai *irradiance* yang diterima oleh permukaan sel surya. Nilai efisiensi ini selalu dihitung pada kondisi standar (*irradiance* = 1000 W/m², AM 1,5 dan temperatur 25⁰C). Rumus umum efisiensi adalah[4] :

$$\eta = FF V_{oc} I_{sc} / G \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan FF adalah *fill factor*, yaitu parameter yang menyatakan seberapa jauh $I_{sc} * V_{oc}$ dari daya maksimal $V_m * I_m$ yang dihasilkan sel surya.

$$FF = V_m I_m / V_{oc} I_{sc} \dots\dots\dots (2.9)$$

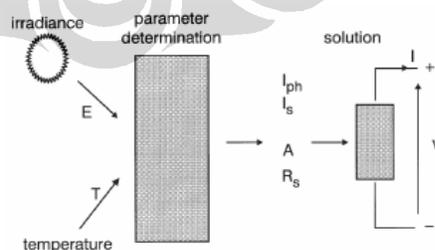
Modul surya komersial berbahan *crystalline* saat ini memiliki efisiensi 14-16 %. Pengaruh bahan adalah dominan dalam hal ini. Contohnya sel surya berbahan *polymer / organic* ($\eta = 4-5\%$), *amorphous silicon* ($\eta = 6\%$), *multijunction* ($\eta = 30\%$)[2].

2.3 PEMODELAN MODUL SURYA

Perancangan simulasi sistem pendeteksi kerusakan modul surya memerlukan pemodelan dan rumusan matematik modul surya. Kedua hal ini kemudian digunakan untuk menggambarkan grafik karakteristik modul surya pada kondisi normal dan pada kondisi dengan kerusakan modul.

Telah ada banyak *equivalent circuit* yang dapat dipakai untuk menggambarkan karakteristik sel surya. Namun, *equivalent circuit* tersebut memiliki parameter-parameter tersendiri yang dipakai untuk menyelesaikan persamaan matematisnya. Semakin lengkap sebuah *equivalent circuit*, maka karakteristik yang dihasilkan akan semakin menyamai kondisi nyata sel surya tetapi semakin banyak pula dan spesifik parameter serta konstanta yang diperlukan. Pada tesis ini, parameter yang diperlukan untuk simulasi diambil hanya dari *datasheet* modul surya yang disediakan oleh pabrik pembuat.

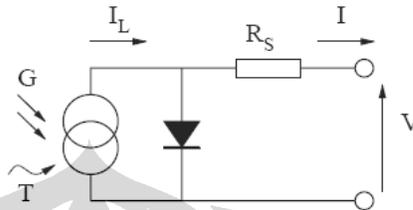
Pemodelan yang cocok untuk parameter dari *datasheet* adalah model dengan satu dioda. Proses pemodelan dapat dilihat pada Gambar 2.8 membutuhkan parameter dari *datasheet*, hanya nilai *diode quality factor* yang perlu dicari berdasarkan total *error* terkecil.



Gambar 2.8 Proses pemodelan[8]

Secara sederhana, sel surya adalah *pn-junction* yang keluarannya bergantung dari energi cahaya yang jatuh ke permukaan sel. Dalam hal ini, sel dimodelkan dengan komponen fotodiode dengan sumber arus. Pada kondisi nyata,

aliran arus ini mengalami hambatan di material semikonduktor dan resistansi pada kontak eksternal. Kondisi ini digabung menjadi total resistansi seri dan dimodelkan dengan sebuah resistor seri. Keseluruhan *equivalent circuit* untuk model satu dioda yang telah disederhanakan dari Gow & Manning dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Equivalent circuit* model sel surya satu dioda[9]

Rumusan matematis dari rangkaian tersebut dapat diambil dari persamaan umum dioda, yaitu[9] :

$$I = I_L - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Solusi persamaan ini menggunakan metode iterasi apabila nilai parameter telah diketahui. Parameter-parameter ini berbeda untuk tiap tipe sel dan akan bervariasi pada lingkungan eksternal (*irradiance* dan suhu). Pengaruh *irradiance* terhadap *photocurrent* adalah linear dan besarnya pada suhu T_1 dinyatakan dengan[9] :

$$I_{L(T_1)} = G * I_{SC(T_1,nom)} / G_{(nom)} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan $I_{L(T_1)}$ = arus yang dihasilkan cahaya pada suhu T_1 dan *irradiance* G

$I_{sc_T_1}$ = arus hubung singkat pada T_1

G = *irradiance* (*Suns*)

Arus yang dihasilkan pada *irradiance* konstan dengan memperhitungkan efek suhu pada *pn-junction* adalah[9] :

$$I_L = I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Konstanta K_0 dapat ditentukan dari I_{sc} vs T , yaitu[9] :

$$K_0 = (I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)}) / (T_2 - T_1) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Arus saturasi dioda pada saat panjar mundur dengan pengaruh suhu dirumuskan sebagai berikut[9]:

$$I_0 = I_{0(T_1)} * (T/T_1)^{3/n} * e^{-qV_g/nk*(1/T-1/T_1)} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I_{0(T_1)} = I_{SC(T_1)} / (e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} - 1) \dots\dots\dots (2.15)$$

Nilai resistansi seri didapat dari kemiringan kurva V-I. R_s terutama berpengaruh pada kemiringan kurva di $V = V_{oc}$. Bentuk kemiringan ini menentukan MPP. Nilai R_s dihitung menggunakan rumusan[9] :

$$R_s = -dV/dI_{V_{OC}} - 1/X_V \dots\dots\dots (2.16)$$

$$X_V = I_{0(T_1)} * q/nkT_1 * e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} \dots\dots\dots (2.17)$$

Persamaan (2.11) sampai Persamaan (2.17) digunakan untuk menyelesaikan Persamaan (2.10). Metode iterasi Newton-Raphson[8] diperlukan untuk memperoleh nilai I yang konvergen pada Persamaan (2.10) :

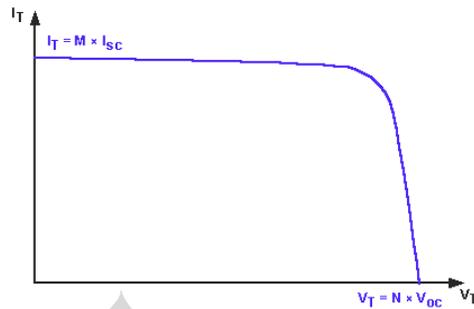
$$I_n = I_{n-1} - f(I_{n-1}) / f'(I_{n-1}) \dots\dots\dots (2.18)$$

2.4 RANGKAIAN MODUL SURYA

2.4.1 Koneksi Antar Modul Surya

Sebuah sel surya memiliki keterbatasan untuk menyuplai daya, sehingga pada aplikasi, sel surya jarang digunakan secara individual. Sel-sel yang identik umumnya dikoneksi secara seri untuk membuat sebuah modul. Alasan koneksi secara seri adalah maksimum tegangan yang dihasilkan sel surya hanya sekitar 600 mV[2]. Oleh sebab itu, dibutuhkan 36 sel seri untuk menghasilkan modul dengan tegangan nominal 12 V, sedangkan arus tetap sama dalam susunan seri tersebut, yaitu sekitar 30 mA/cm² pada irradianse 100 mW/cm²[3]. Modul ini kemudian dikoneksi untuk membentuk sebuah rangkaian modul surya yang mampu memenuhi kebutuhan daya bagi beban. Pengaruh koneksi seri paralel terhadap kurva V-I dapat dilihat pada Gambar 2.10. Pengaruh arus dan tegangan sel pada modul sama dengan pengaruh arus dan tegangan modul pada sistem, perbedaannya hanya pada skala. Persamaan umum interkoneksi sel maupun modul surya untuk susunan N seri dan M paralel adalah[2] :

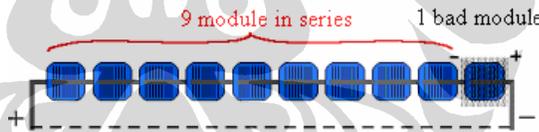
$$I_T = M \cdot I_L - M \cdot I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_T / N)}{nkT} \right] - 1 \right\} \dots\dots\dots (2.19)$$



Gambar 2.10 Kurva V-I untuk N seri dan M paralel[2]

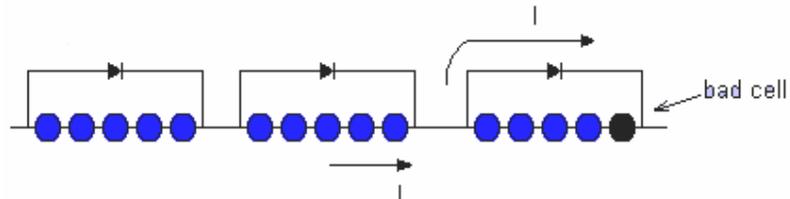
2.4.2 "Hot Spot"

Apabila satu atau lebih modul surya pada sistem mengalami kerusakan, maka modul pasif ini dapat menyerap daya yang dihasilkan oleh modul aktif. Gambar 2.11 menggambarkan sebuah rangkaian modul dengan sebuah modul pasif. Penyerapan daya oleh modul pasif terjadi di area yang kecil dari *pn-junction*. Akibatnya modul mengalami kenaikan suhu lokal (*hot spot*) yang akhirnya dapat merusak modul secara permanen.



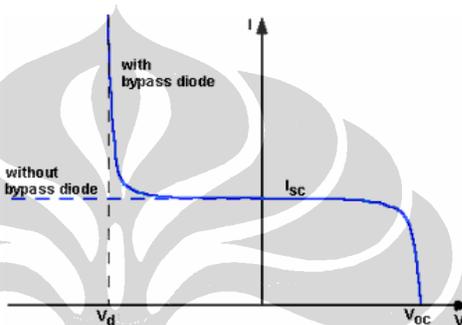
Gambar 2.11 Satu modul pasif dalam rangkaian[2]

Salah satu solusi untuk mengatasi masalah *hot spot* ini adalah dengan memasang *bypass diode* secara paralel pada rangkaian modul surya seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pemasangan *bypass diode* pada rangkaian modul surya[2]

Pada kondisi normal, setiap dioda bekerja pada kondisi panjar mundur dan setiap modul menghasilkan dayanya masing-masing. Pada saat sebuah modul rusak dan berperan menjadi resistif / panjar mundur terhadap modul yang lain, maka dioda akan aktif, sehingga arus dalam rangkaian mengalir melalui dioda dan tidak menyuplai ke modul surya pasif. Jadi, penambahan *bypass diode* ini berguna untuk melindungi modul surya dari masalah "hot spot" dan sekaligus mencegah pengurangan daya akibat modul surya pasif. Efeknya secara grafis dapat dilihat pada Gambar 2.13.

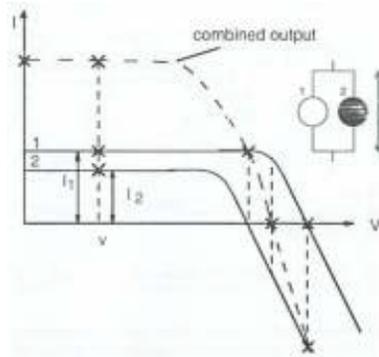


Gambar 2.13 Keluaran daya dengan dan tanpa *bypass diode*[2]

Tegangan panjar mundur pada modul tanpa *bypass diode* dapat terus meningkat. Peningkatan tegangan yang disertai dengan peningkatan suhu ini menimbulkan masalah *hot spot* yang dapat merusak modul. Tegangan panjar mundur modul dengan *bypass diode* tetap konstan. Pada saat *bypass diode* aktif, *bypass diode* mencegah kenaikan tegangan tetapi tetap mengijinkan arus mengalir melewati rangkaian.

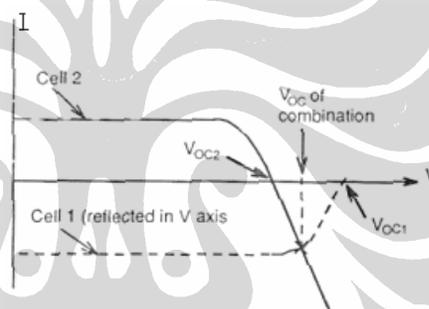
2.4.3 Perbedaan Daya Antar Modul Pada Rangkaian Paralel Modul Surya

Bila dua modul surya dirangkai secara paralel, maka sebuah modul yang tidak identik dapat menghasilkan daya yang lebih rendah. Akibat dari susunan seperti ini, kedua modul memiliki tegangan yang sama dengan arus total sebesar $I_1 + I_2$ berdasarkan hukum Kirchhoff. Kombinasi arus untuk rangkaian paralel ini dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Kombinasi arus pada dua modul paralel yang tidak identik[5]

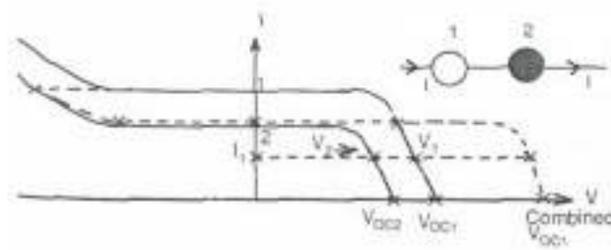
Cara yang mudah untuk mengkalkulasikan kombinasi Voc pada rangkaian dua modul paralel ditunjukkan pada Gambar 2.15. Salah satu kurva modul dibalik secara horisontal, sehingga titik pertemuan kedua kurva pada sumbu X adalah Voc yang baru[5].



Gambar 2.15 Metode menentukan Voc pada rangkaian dua modul surya paralel [5]

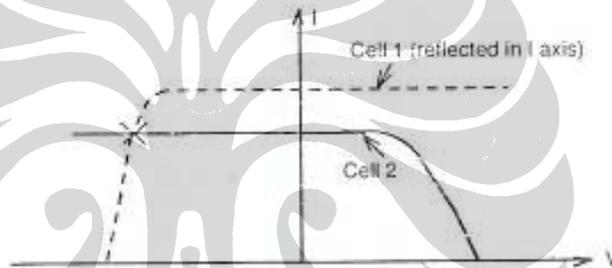
2.4.4 Perbedaan Daya Antar Modul Pada Rangkaian Seri Modul Surya

Bila dua modul surya dirangkai secara seri, maka sebuah modul yang tidak identik dapat menghasilkan daya yang lebih rendah. Akibat dari susunan seperti ini, kedua modul memiliki arus yang sama dengan tegangan total sebesar $V_{OC1} + V_{OC2}$ berdasarkan hukum Kirchoff. Kombinasi tegangan untuk rangkaian seri ini dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Kombinasi Voc pada dua modul surya seri yang tidak identik[5]

Cara yang mudah untuk mengkalkulasikan kombinasi Isc pada rangkaian dua modul seri ditunjukkan pada Gambar 2.17. Salah satu kurva modul dibalik secara vertikal, sehingga titik pertemuannya ($V_{OC1} + V_{OC2} = 0$) adalah Isc yang baru[5].



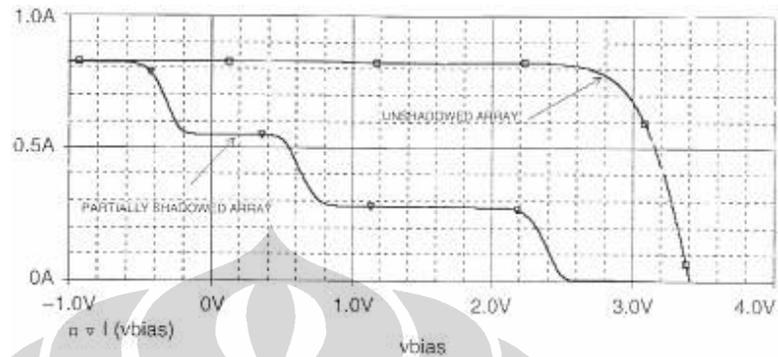
Gambar 2.17 Metode menentukan Isc pada rangkaian dua modul surya seri[5]

2.5 KERUSAKAN MODUL SURYA

Umumnya modul surya dilindungi oleh *bypass diode* untuk mencegah masalah "hot spot". Bila sebuah modul dalam rangkaian mengalami kerusakan, maka arus listrik dalam rangkaian tidak diserap oleh modul pasif, melainkan dilewatkan melalui *bypass diode*. Daya yang terdisipasi pada *bypass diode* ini dapat menyebabkan kurva karakteristik sistem memiliki "jenjang / ladder". Kurva pada Gambar 2.18 adalah kurva keluaran modul akibat adanya kerusakan sel surya pada modul.

Kurva ini didapat dari simulasi sebuah modul surya yang tersusun dari enam sel seri dan tiga sel paralel[3]. Modul ini disimulasikan dengan kondisi beberapa sel tidak menghasilkan daya sama sekali, sehingga dapat dianalogikan dengan kerusakan sel. Kontur grafik kurva pada rangkaian modul surya yang memiliki modul yang rusak sama dengan kontur grafik kurva pada modul surya

yang memiliki sel yang rusak[5], maka kontur grafik kurva pada rangkaian modul surya yang memiliki modul yang rusak akan memiliki jenjang pada kurva karakteristiknya.

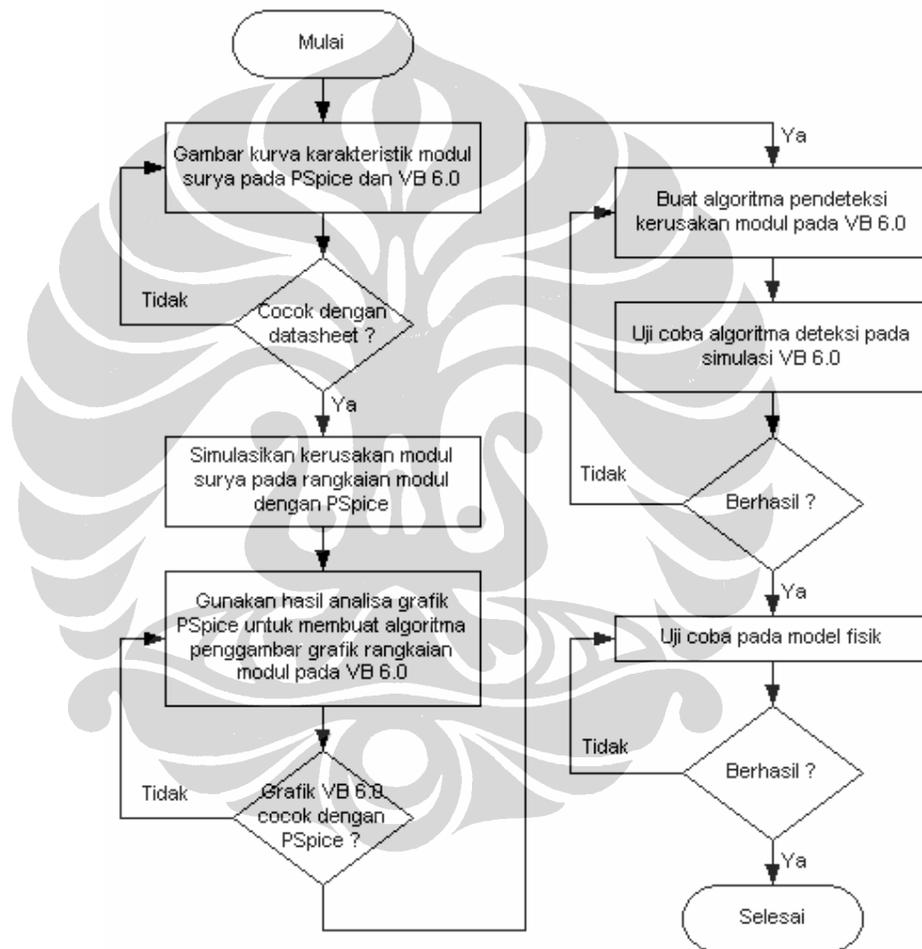


Gambar 2.18 Kurva modul surya yang beberapa selnya tidak menghasilkan daya[3]

BAB III

ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA

Bab ini menerangkan urutan langkah-langkah yang dilakukan untuk membuat simulator algoritma pendeteksi kerusakan modul surya. Urutan langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Alur metode pembuatan simulator

Masing-masing sub-bab berikut menerangkan tiap langkah alur metode pembuatan simulator. Modul surya yang disimulasikan adalah Solarex MSX-60, Schott Solar ASE-50-ETF, dan Suntech STP005S. Modul ini dipilih karena variabel yang dibutuhkan untuk simulasi diinformasikan jelas pada *datasheet*.

3.1 PENGAMBARAN KURVA KARAKTERISTIK MODUL SURYA

3.1.1 Penggambaran Karakteristik Modul Surya Pada PSpice

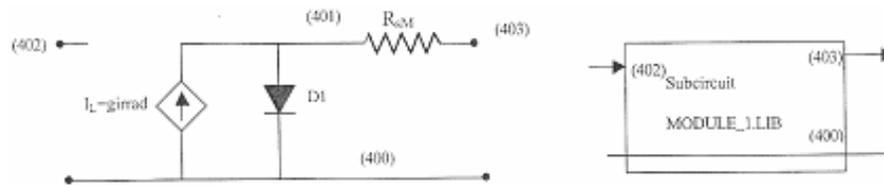
Langkah awal dalam penelitian adalah menggambarkan kurva karakteristik modul surya menggunakan pemodelan satu dioda pada program simulasi PSpice. Pemodelan satu dioda dipilih karena parameter untuk pemodelan ini hanya diambil dari *datasheet*.

PSpice dipilih sebagai program simulasi karena PSpice banyak digunakan sebagai standar dalam lingkungan akademik dan industri untuk mensimulasikan rangkaian analog, memeriksa desain rangkaian dan memprediksi karakteristiknya. PSpice adalah versi perangkat lunak SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) yang dioperasikan pada *personal computer*. Dalam kaitannya dengan sistem surya, Pspice telah digunakan untuk memodelkan sel surya, modul surya, baterai, *inverter* dan *converter*. Persyaratan minimum untuk instalasi PSpice 9.1 *student version* adalah [10] :

- Intel Pentium 90MHz atau prosesor lain yang setingkat
- Windows 95, Windows 98 atau Windows NT
- 16MB RAM (32MB direkomendasikan)
- 90MB *hard disk*

Simulasi modul surya pada penelitian ini dibatasi maksimal 20 modul dan setiap modul diasumsikan memiliki *bypass diode* untuk melindunginya dari masalah *hot spot*. Pembatasan jumlah modul berkaitan dengan tampilan program VB6.0 dan pengujian hasil dengan program PSpice 9.1 *student version*. Program PSpice 9.1 *student version* hanya dapat mensimulasikan rangkaian yang memiliki simpul maksimal 64, sedangkan sebuah modul surya dimodelkan menggunakan 3 simpul.

PSpice mensimulasikan modul surya dengan menganalogikannya sebagai rangkaian listrik analog. Sifat modul surya sebagai *pn junction* dianalogikan sebagai dioda. Kemampuannya untuk menghasilkan arus listrik dianalogikan sebagai sumber arus tak bebas karena nilainya bergantung dari *irradiance* matahari. Hambatan dalam modul surya dianalogikan sebagai resistansi seri. Gambar keseluruhan rangkaian dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Model PSpice Untuk Modul Surya[3]

Parameter untuk mensimulasikan modul surya yang diambil dari *datasheet* adalah :

- Daya maksimal
- Voc
- Isc
- Suhu
- Jumlah sel seri
- *Irradiance*

3.1.2 Penggambaran Karakteristik Modul Surya Pada VB6.0

Simulasi juga dilakukan pada VB6.0 karena program simulasi PSpice hanya dapat mensimulasikan rangkaian listrik analog, sedangkan simulator pendeteksian memerlukan simulasi algoritma. Simulasi algoritma pendeteksi ini tidak dapat dilakukan pada PSpice, sehingga diperlukan peralihan ke program simulator VB6.0. Program PSpice berguna sebagai validasi hasil program VB6.0.

Visual Basic (VB) adalah salah satu bahasa pemrograman komputer yang dikembangkan oleh Microsoft. Penelitian ini memilih program VB 6.0 karena mudah dalam pemrograman, cukup andal dalam hal perhitungan bilangan *floating* dan eksponensial. Selain itu, VB 6.0 memiliki kemudahan dalam hal antarmuka pengguna dengan pemrograman grafis. Persyaratan minimum untuk instalasi Visual Basic 6.0 *Learning Edition* adalah[11] :

- PC dengan prosesor 66 MHz
- Microsoft Windows 95 atau Windows NT version 4.0
- 16 MB RAM untuk Windows 95; 24 MB untuk Windows NT 4.0
- 52 MB untuk *typical installation* dan 65 MB untuk *maximum installation*

Simulasi karakteristik modul surya pada VB6.0 menggunakan pemodelan satu dioda. Pemodelan ini dipilih karena parameter yang dibutuhkan dapat diambil dari *datasheet* modul surya. Ringkasan rumusan (lihat Bab 2) untuk mensimulasikan kurva karakteristik modul surya adalah[9] :

$$I = I_L - I_0(e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$I_{L(T_1)} = G * I_{SC(T_1,nom)} / G_{(nom)} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$I_L = I_{L(T_1)}(1 + K_0(T - T_1)) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

$$K_0 = (I_{SC(T_2)} - I_{SC(T_1)}) / (T_2 - T_1) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

$$I_0 = I_{0(T_1)} * (T/T_1)^{3/n} * e^{-qV_g/nk*(1/T-1/T_1)} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I_{0(T_1)} = I_{SC(T_1)} / (e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} - 1) \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

$$R_s = -dV/dI_{V_{OC}} - 1/X_V \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$X_V = I_{0(T_1)} * q/nkT_1 * e^{qV_{OC(T_1)}/nkT_1} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Parameter untuk mensimulasikan modul surya yang diambil dari *datasheet* adalah :

- Voc pada T1 dan T2
- Isc pada T1 dan T2
- Suhu
- Jumlah sel seri
- Irradiance
- dV/dI

3.2 SIMULASI KERUSAKAN MODUL SURYA

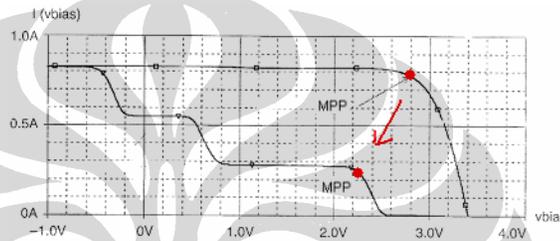
Setelah simulasi modul surya pada kedua program simulasi cocok dengan *datasheet*, maka simulasi dilanjutkan dengan mensimulasikan rangkaian modul surya. Rangkaian dapat berupa susunan modul surya secara seri, paralel, atau gabungan keduanya. Rangkaian yang akan disimulasikan pada PSpice adalah gabungan dari model pada Gambar 3.2. Masing-masing modul pada simulasi diasumsikan memiliki sebuah *bypass diode* untuk melindunginya dari masalah "hot spot".

Kerusakan modul surya pada simulasi dianalogikan dengan ketidakmampuan modul untuk menerima *irradiance* seperti pada modul normal. Kerusakan modul surya juga dianalogikan dengan ketidakmampuan modul untuk menghasilkan daya sama sekali (*irradiance* = 0).

Pada simulasi kerusakan modul dengan VB6.0, diperlukan algoritma tersendiri agar tidak perlu menghitung persamaan listrik analog seperti yang dilakukan pada PSpice. Algoritma ini akan dijelaskan pada Bab 4 karena memerlukan analisis dari hasil simulasi kerusakan pada PSpice.

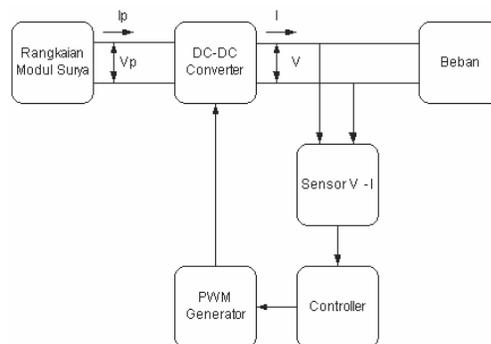
3.3 RANCANGAN ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA

Seperti yang telah dijelaskan pada teori sebelumnya bahwa *bypass diode* telah mengatasi masalah *hot spot*, tetapi kerusakan modul dapat mengurangi nilai MPP sistem secara keseluruhan. Gambar 3.3 adalah contoh modul dengan kondisi beberapa sel tidak menghasilkan daya sama sekali, sehingga dapat dianalogikan dengan kerusakan sel. Kontur grafik kurva pada rangkaian modul surya yang memiliki modul yang rusak sama dengan kontur grafik kurva pada modul surya yang memiliki sel yang rusak[5].



Gambar 3.3 Pergeseran nilai MPP akibat perbedaan daya antar sel[3]

Sistem konvensional yang umum digunakan pada aplikasi modul surya, ditampilkan pada Gambar 3.4. Tegangan dan arus kerja modul surya diatur nilainya menggunakan sebuah *controller*. *Controller* mengatur agar daya yang dapat diambil dari rangkaian modul adalah maksimal. Pengaturan daya ini dilakukan melalui *PWM (Pulse Width Modulation) Generator*. *PWM Generator* bekerja dengan memperbesar atau memperkecil lebar pulsa agar *dc-dc converter* dapat mengubah-ubah tegangan kerja rangkaian modul surya. Daya ini selain digunakan untuk mencukupi kebutuhan beban, juga diumpan balik (nilai arus dan tegangannya) ke *controller* untuk mengatur kembali nilai maksimum daya.



Gambar 3.4 Diagram blok sistem energi surya konvensional

Sumber daya yang telah ada pada sistem konvensional ini (*DC-DC converter*, *PWM generator*, *controller*, dan sensor V-I) dapat dimanfaatkan untuk mengaplikasikan pendeteksian kerusakan modul surya, sehingga algoritma yang dirancang harus memiliki spesifikasi berikut untuk dimungkinkan dalam aplikasi, yaitu algoritma hanya dapat mengatur nilai tegangan. Ini disebabkan karena kontrol sistem yang ada mengatur MPP menggunakan *DC-DC converter*. *Converter* ini menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk mengatur tegangan.

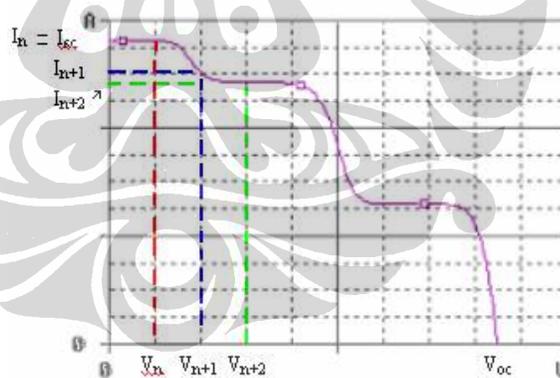
3.3.1 Rancangan Algoritma Untuk Kondisi Ideal

Referensi[5] pada Gambar 2.18 menunjukkan bahwa kurva rangkaian modul surya yang memiliki kerusakan modul memiliki "jenjang / ladder". Jenjang ini dapat dijadikan sebagai parameter indikasi yang dirumuskan dengan algoritma berikut :

If $(I_n - I_{n+1} = 0)$ and $(I_n > I_{sc})$ then

Terdapat kerusakan modul

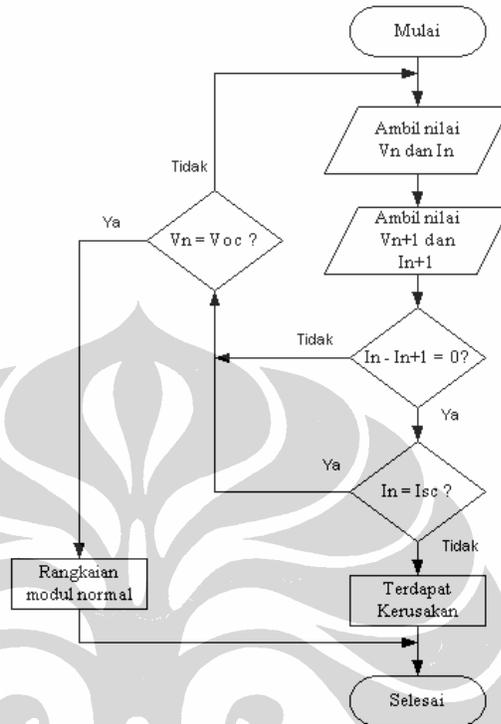
Keterangan variabel secara grafik dapat dilihat dari Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Keterangan variabel algoritma

Gambar 3.5 adalah simulasi rangkaian modul surya dengan kerusakan pada modulnya. Bila dilihat dari kurva grafik, maka setiap kurva hasil simulasi memiliki I_{sc} yang rata sampai V_n tertentu. Hal ini merupakan kondisi ideal karena diasumsikan sistem dapat mengukur dengan sangat presisi, semua modul diasumsikan identik, dan suhu serta *irradiance* dianggap tidak berubah selama

pendeteksian. Algoritma yang lebih mendetil untuk mendeteksi kerusakan pada kondisi ideal ini dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram alir algoritma pendeteksi

Algoritma bekerja dengan memeriksa tegangan rangkaian mulai dari nol sampai dengan Voc dan memeriksa arus dari Isc sampai dengan nol. Bila terdapat selisih arus ($I_n - I_{n+1}$) yang sama dengan nol dan I_n tidak sama dengan Isc, maka hal ini mengindikasikan adanya kerusakan pada modul surya.

3.3.2 Rancangan Algoritma Untuk Kondisi Non-ideal

Pada pendeteksian secara riil, maka pengukuran tegangan dan arus pada sistem dibatasi oleh keakuratan alat ukur. Modul surya pada rangkaian juga tidak mungkin semuanya identik. Selain itu, suhu dan *irradiance* dapat berubah ketika program sedang mendeteksi. Adanya toleransi untuk perbedaan ini mengharuskan modifikasi pada algoritma pendeteksi.

$I_n - I_{n-1}$ untuk kurva horisontal tidak selalu sama dengan 0, melainkan terdapat perbedaan dalam miliamper karena faktor yang disebutkan tadi. Toleransi perbedaan ini harus dapat diantisipasi algoritma agar program tidak mendeteksi perbedaan ini sebagai kerusakan modul surya. Potongan algoritma pendeteksi

yang telah dilengkapi dengan toleransi perbedaan pada kurva horisontal adalah sebagai berikut :

```
rusak = 0
next_step = 1
z = 0
flag = 0

Do While (z < Voc)

    Do While (arus(z) - arus(z + next_step) < delta_toleransi)
        z = z + next_step
    Loop

    Do While (arus(z) - arus(z + next_step) > delta_toleransi)
        z = z + next_step
    Loop

    If z <> Voc Then
        flag = 1
        rusak = rusak + 1
        z = z + next_step
    ElseIf z >= Voc And flag = 0 Then
        rusak = 0
    End If

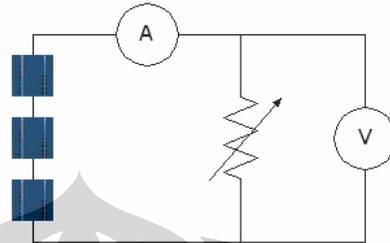
Loop

If rusak > 0 Then
    "Terdapat Kerusakan !!"
Else
    "Modul Normal !!"
End If
```

Algoritma ini pada prinsipnya mendeteksi adanya kerusakan modul dengan cara mencari dua kurva horisontal atau lebih karena kurva sistem yang normal hanya memiliki satu kurva horisontal. Pernyataan *Do While* yang pertama menyatakan bahwa program memeriksa nilai arus dari Isc sampai dengan nol dan tegangan dari nol sampai dengan Voc. Pernyataan *Do While* yang kedua menyatakan bahwa program memeriksa jumlah kurva horisontal. Pernyataan *Do While* yang ketiga menyatakan bahwa program memeriksa kemiringan kurva, diawali dari *knee* kurva. Kurva yang kemiringannya kurang dari *delta_toleransi* dianggap sebagai kurva horisontal dan kurva yang kemiringannya lebih dari *delta_toleransi* dianggap sebagai kemiringan kurva. *Delta_toleransi* ini yang mengantisipasi $I_n - I_{n-1}$ pada kurva horisontal yang tidak sama dengan nol.

3.4 CARA PENGUJIAN

Pengujian algoritma dilakukan pada simulasi. Pengujian juga dilakukan menggunakan data hasil pengukuran. Skematik rangkaian untuk mengumpulkan data rangkaian modul surya dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Skematik rangkaian untuk mengukur karakteristik modul surya

Skematik rangkaian pada Gambar 3.7 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus pada rangkaian modul surya. Sistem yang akan diukur adalah rangkaian dua modul surya seri dan rangkaian tiga modul surya seri. Kondisi yang akan diuji adalah kondisi normal dan kondisi dengan kerusakan sebuah modul surya pada rangkaian seri ini.

Sensor V dan I pada rangkaian digunakan untuk mengukur besaran tegangan dan arus. Besaran arus dan tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian modul diubah-ubah dengan mengatur resistor variabel. Hasil setiap penambahan tegangan dari 0 sampai dengan V_{oc} dan pengurangan arus dari I_{sc} sampai dengan 0, kemudian dicatat dan digambar pada program VB 6.0. Komputer akan menentukan apakah pada sistem terdapat kerusakan modul menggunakan algoritma pendeteksi berdasarkan nilai parameter V dan I ini.

BAB IV

UJI COBA DAN ANALISA

Tujuan akhir dari pengujian adalah untuk mengetahui, apakah algoritma pendeteksi berhasil atau tidak. Untuk mencapai tujuan tersebut, dilakukan tahapan sebagai berikut :

- 1) Pengujian hasil simulasi modul surya.

Simulasi modul surya dilakukan pada program PSpice dan VB6.0. Hasilnya dicocokkan terhadap *datasheet*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah pemodelan satu dioda dapat mewakili kurva karakteristik modul surya.

- 2) Simulasi dan analisa hasil simulasi kerusakan modul pada rangkaian modul surya.

Simulasi pada tahap ini menggunakan PSpice. Analisa ini untuk mendapatkan gambaran efek kerusakan terhadap kurva karakteristik. Hasil analisa ini diperlukan untuk membuat algoritma pembuat grafik efek kerusakan pada rangkaian modul surya. Algoritma ini nantinya akan digunakan pada VB6.0. Peralihan ke VB6.0 diperlukan karena PSpice tidak dapat digunakan untuk mensimulasikan algoritma pendeteksi.

- 3) Pengujian algoritma penggambar kurva karakteristik rangkaian modul surya.
- 4) Pengujian algoritma pendeteksi kerusakan modul surya secara simulasi.
- 5) Pengujian algoritma pendeteksi kerusakan modul surya berdasarkan data hasil pengukuran.

Masing-masing sub-bab berikut akan menjelaskan tiap-tiap langkah di atas.

4.1 PENGUJIAN HASIL SIMULASI MODUL SURYA

Modul surya yang diuji adalah modul surya Solarex MSX-60, Schott Solar ASE-50-ETF, dan Suntech STP005S. Modul ini dipilih karena variabel yang dibutuhkan untuk simulasi diinformasikan jelas pada *datasheet*. Modul ini disimulasikan berdasarkan fungsi suhu dan *irradiance* seperti yang tertera pada *datasheet* masing-masing. Modul surya disimulasikan menggunakan program

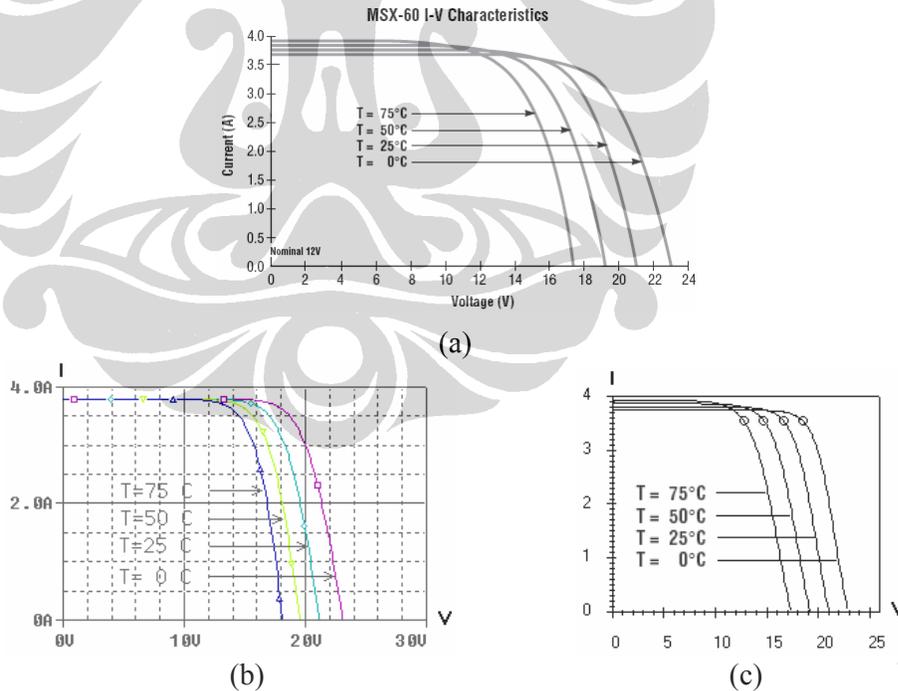
PSpice 9.1 *Student Version* dan program Visual Basic 6.0. Rumusan dan model yang digunakan dapat dilihat pada Bab 3. Sub-bab berikut menjelaskan hasil yang didapat untuk masing-masing modul surya.

4.1.1 Modul Surya Solarex MSX-60

Parameter dari *datasheet* untuk mensimulasikan modul surya Solarex MSX-60 adalah :

- Daya maksimum : 60 Watt
- Voc : 21,1 volt pada 25°C
- Voc : 17,05 volt pada 75°C
- Isc : 3,8 A pada 25°C
- Isc : 3,92 A pada 75°C
- dV/dI : 1,15
- n : 1,2 berdasarkan total *error* terkecil
- Jumlah sel seri : 36

Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan antara *datasheet* modul surya Solarex MSX-60, hasil simulasi PSpice 9.1, dan hasil simulasi pada VB6.0. Masing-masing grafik disimulasikan dengan mengacu pada *irradiance* dan suhu di *datasheet*, yaitu 1000 W/m^2 pada suhu 0 °C, 25 °C, 50 °C, 75 °C.



Gambar 4.1 Hasil simulasi Solarex MSX-60 (a) *Datasheet*[12] (lihat lampiran 1) (b) Simulasi PSpice (c) Simulasi VB 6.0

Kontur hasil simulasi menggunakan PSpice dan VB 6.0 pada Gambar 4.1 menyamai kurva *datasheet* Solarex MSX-60, sehingga disimpulkan bahwa karakteristik modul surya dapat disimulasikan dengan pemodelan satu dioda. Persamaan antara ketiga kurva dilihat kontur kurva, tetapi terdapat perbedaan pada kemiringan ketiga kurva. Perhitungan perbedaan kurva dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Solarex MSX-60 Terhadap *Datasheet*

| T (°C) | V (volt) | Datasheet | PSpice 9.1 | | VB6.0 | |
|-------------|-------------|-----------|------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|
| | | I (A) | I(A) | % beda terhadap datasheet | I(A) | % beda terhadap datasheet |
| 0 | 0-14 | 3,7 | 3,8 | 0,73 | 3,75 | 1,35 |
| | 16 | 3,6 | 3,8 | 5,56 | 3,75 | 4,17 |
| | 18 | 3,4 | 3,73 | 9,71 | 3,6 | 5,88 |
| | 20 | 2,8 | 3 | 7,14 | 3,1 | 10,71 |
| | 22 | 1,2 | 1,4 | 16,67 | 1,1 | 8,33 |
| 25 | 0-14 | 3,75 | 3,8 | 1,33 | 3,8 | 1,33 |
| | 16 | 3,5 | 3,7 | 5,71 | 3,5 | 0 |
| | 18 | 3 | 3,11 | 3,67 | 3,2 | 6,67 |
| | 20 | 1,4 | 1,5 | 7,14 | 1,2 | 14,29 |
| 50 | 0-12 | 3,8 | 3,8 | 0 | 3,9 | 2,63 |
| | 14 | 3,6 | 3,7 | 2,78 | 3,7 | 2,78 |
| | 16 | 3,2 | 3,4 | 6,25 | 3,5 | 9,38 |
| | 18 | 1,8 | 2 | 11,11 | 1,6 | 11,11 |
| 75 | 0-10 | 3,9 | 3,8 | 2,56 | 3,9 | 0 |
| | 12 | 3,9 | 3,8 | 2,56 | 3,7 | 5,13 |
| | 14 | 3,3 | 3,55 | 7,58 | 3,3 | 0 |
| | 16 | 2,2 | 2,9 | 31,82 | 1,5 | 31,82 |
| Rata-rata = | | | | 7,2 | | 6,8 |

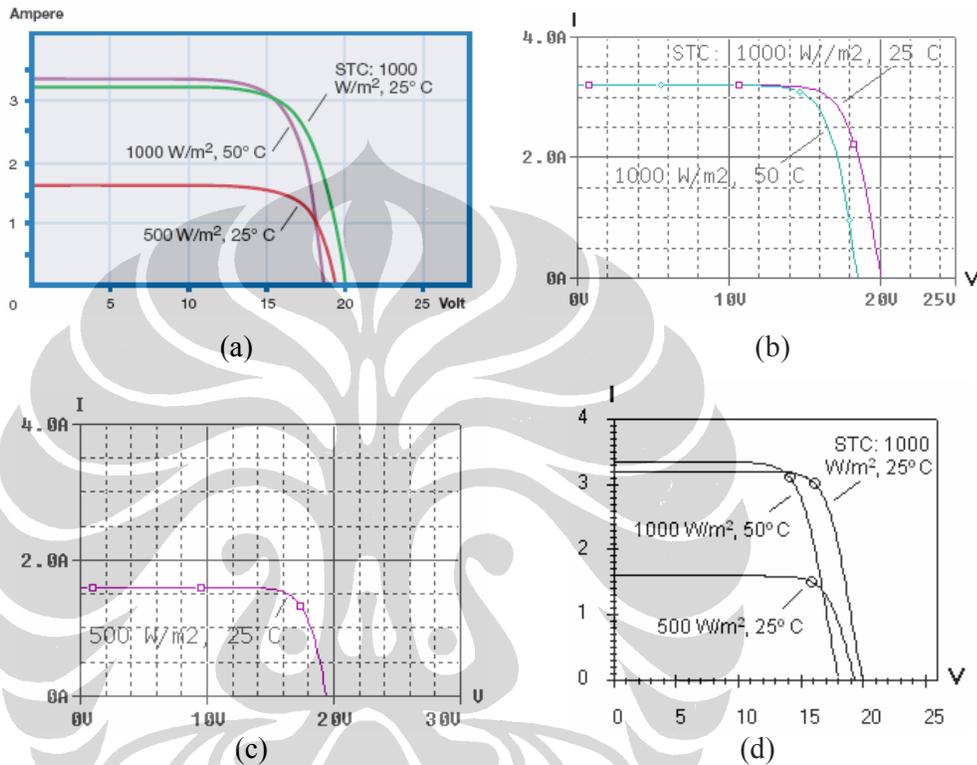
Rata-rata perbedaan kurva PSpice terhadap *datasheet* adalah 7,2%, sedangkan rata-rata perbedaan VB6.0 terhadap *datasheet* adalah 6,8%. Perbedaan ini disebabkan karena nilai *diode quality factor* yang tidak didapat dari *datasheet*. Nilai ini didapat dari perbandingan error terkecil terhadap *datasheet*.

4.1.2 Modul Surya Schott Solar ASE-50-ETF

Parameter dari *datasheet* untuk mensimulasikan modul surya Schott Solar ASE-50-ETF adalah :

- Daya maksimum : 50 Watt
- Voc : 20 volt pada 25°C
- Voc : 19,31 volt pada 50°C
- Isc : 3,2 A pada 25°C
- Isc : 3,34 A pada 50°C
- dV/dI : 1,2
- n : 1 berdasarkan total *error* terkecil
- Jumlah sel seri : 36

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan antara *datasheet* modul surya Schott Solar ASE-50-ETF, hasil simulasi PSpice 9.1, dan hasil simulasi pada VB6.0. Masing-masing grafik disimulasikan dengan mengacu pada *irradiance* dan suhu di *datasheet*, yaitu 1000 W/m^2 pada suhu 25°C dan 50°C .



Gambar 4.2 Hasil simulasi ASE-50-ETF (a) *Datasheet*[13] (lihat lampiran 2) (b) Simulasi PSpice pada irradiance 1000 W/m^2 (c) Simulasi PSpice pada irradiance 500 W/m^2 (d) Simulasi VB 6.0

Kontur hasil simulasi menggunakan PSpice dan VB 6.0 pada Gambar 4.2 menyamai kurva *datasheet* ASE-50-ETF, sehingga disimpulkan bahwa karakteristik modul surya dapat disimulasikan dengan pemodelan satu dioda. Persamaan antara ketiga kurva dilihat kontur kurva, tetapi terdapat perbedaan pada kemiringan ketiga kurva. Perhitungan perbedaan kurva dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi ASE-50-ETF Terhadap *Datasheet*

| T (°C) | V (volt) | Datasheet | PSpice 9.1 | | VB6.0 | |
|-------------|-------------|-----------|------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|
| | | I (A) | I(A) | % beda terhadap datasheet | I(A) | % beda terhadap datasheet |
| 25 | 0-12 | 3,2 | 3,2 | 0 | 3,2 | 0 |
| | 14 | 3,17 | 3,2 | 0,95 | 3,2 | 0,95 |
| | 16 | 3 | 3,09 | 3 | 3,1 | 3,33 |
| | 18 | 2,31 | 2,47 | 6,93 | 2,25 | 2,6 |
| | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0-12 | 3,3 | 3,2 | 3,03 | 3,3 | 0 |
| | 14 | 3,17 | 3,2 | 0,95 | 3 | 4,1 |
| | 16 | 2,83 | 2,82 | 0,35 | 2,3 | 18,73 |
| Rata-rata = | | | | 1,9 | | 3,71 |

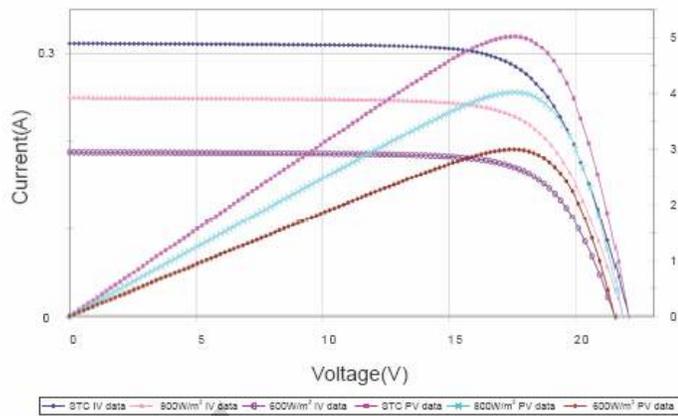
Rata-rata perbedaan kurva PSpice terhadap *datasheet* modul surya Schott Solar ASE-50-ETF adalah 1,9%, sedangkan rata-rata VB6.0 terhadap *datasheet* adalah 3,71%.

4.1.3 Modul Surya Suntech STP005S

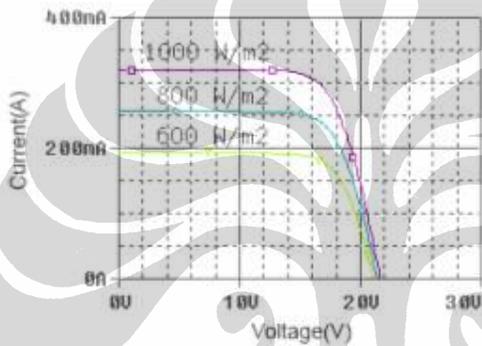
Parameter dari *datasheet* untuk mensimulasikan modul surya Suntech STP005S adalah :

- Daya maksimum : 5 Watt
- Voc : 21,6 volt pada 25°C
- Voc : 17,6 volt pada 75°C
- Isc : 0,32 A pada 25°C
- Isc : 0,35 A pada 75°C
- dV/dI : 1,2
- n : 1,3 berdasarkan total *error* terkecil
- Jumlah sel seri : 36

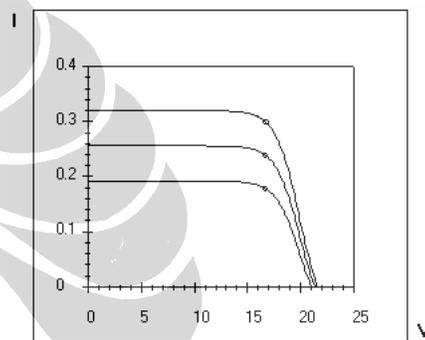
Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan antara *datasheet* modul surya Suntech STP005S, hasil simulasi PSpice 9.1, dan hasil simulasi pada VB6.0. Masing-masing grafik disimulasikan dengan mengacu pada *irradiance* dan suhu di *datasheet*, yaitu 600 W/m², 800 W/m², dan 1000 W/m² pada suhu 25°C.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3 Hasil simulasi STP005S (a) *Datasheet*[13] (lihat lampiran 3) (b) Simulasi PSpice (c) Simulasi VB 6.0

Kontur hasil simulasi menggunakan PSpice dan VB 6.0 pada Gambar 4.3 menyamai kurva *datasheet* Suntech STP005S, sehingga disimpulkan bahwa karakteristik modul surya dapat disimulasikan dengan pemodelan satu dioda. Persamaan antara ketiga kurva dilihat kontur kurva, tetapi terdapat perbedaan pada kemiringan ketiga kurva. Perhitungan perbedaan kurva dapat dilihat pada Tabel 4.3, Tabel 4.4, Tabel 4.5.

Tabel 4.3 Perbandingan hasil simulasi STP005S pada *irradiance* 1000 W/m²

| V (volt) | Datasheet | PSpice 9.1 | | VB6.0 | |
|-------------|-----------|------------|--------|-------|--------|
| | I (A) | I(A) | % beda | I(A) | % beda |
| 0-14 | 0,32 | 0,32 | 0 | 0,32 | 0 |
| 15 | 0,31 | 0,31 | 0 | 0,31 | 0 |
| 16 | 0,3 | 0,3 | 0 | 0,31 | 3,33 |
| 17 | 0,29 | 0,28 | 3,45 | 0,3 | 3,45 |
| 18 | 0,26 | 0,25 | 3,85 | 0,27 | 3,85 |
| 19 | 0,25 | 0,22 | 12 | 0,2 | 12 |
| 20 | 0,2 | 0,18 | 10 | 0,14 | 30 |
| 21 | 0,09 | 0,07 | 22,22 | 0,08 | 11,11 |
| Rata-rata = | | | 7,36 | | 9,11 |

Tabel 4.4 Perbandingan hasil simulasi STP005S pada *irradiance* 800 W/m²

| V (volt) | Datasheet | PSpice 9.1 | | VB6.0 | |
|-------------|-----------|------------|--------|-------|--------|
| | I (A) | I(A) | % beda | I(A) | % beda |
| 0-14 | 0,25 | 0,26 | 4 | 0,26 | 4 |
| 15 | 0,25 | 0,25 | 0 | 0,26 | 4 |
| 16 | 0,24 | 0,24 | 0 | 0,25 | 4,17 |
| 17 | 0,23 | 0,23 | 0 | 0,24 | 4,35 |
| 18 | 0,21 | 0,21 | 0 | 0,22 | 4,76 |
| 19 | 0,17 | 0,19 | 11,76 | 0,16 | 5,88 |
| 20 | 0,15 | 0,1 | 33,33 | 0,1 | 33,33 |
| 21 | 0,07 | 0,05 | 28,57 | 0,05 | 28,57 |
| Rata-rata = | | | 10,52 | | 12,15 |

Tabel 4.5 Perbandingan hasil simulasi STP005S pada *irradiance* 600 W/m²

| V (volt) | Datasheet | PSpice 9.1 | | VB6.0 | |
|-------------|-----------|------------|--------|-------|--------|
| | I (A) | I(A) | % beda | I(A) | % beda |
| 0-14 | 0,19 | 0,19 | 0 | 0,19 | 0 |
| 15 | 0,18 | 0,19 | 5,56 | 0,19 | 5,56 |
| 16 | 0,18 | 0,18 | 0 | 0,18 | 0 |
| 17 | 0,17 | 0,17 | 0 | 0,17 | 0 |
| 18 | 0,16 | 0,16 | 0 | 0,16 | 0 |
| 19 | 0,15 | 0,13 | 13,33 | 0,12 | 20 |
| 20 | 0,1 | 0,08 | 20 | 0,07 | 30 |
| 21 | 0,04 | 0,03 | 25 | 0,01 | 75 |
| Rata-rata = | | | 9,13 | | 18,65 |

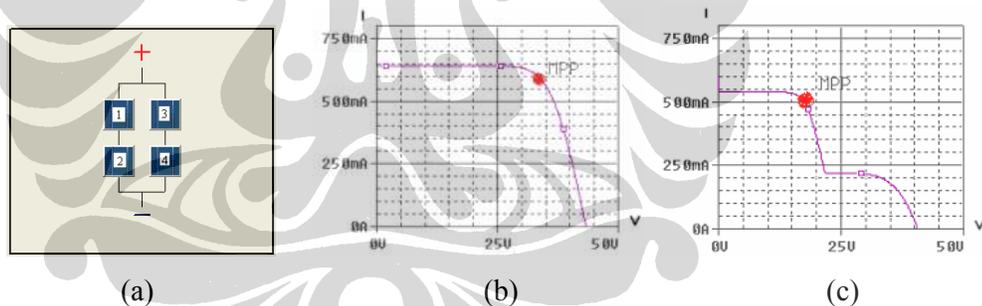
Rata-rata perbedaan kurva PSpice terhadap *datasheet* modul surya STP005S adalah 9%, sedangkan rata-rata perbedaan kurva VB6.0 terhadap *datasheet* modul surya STP005S adalah 13,3%.

4.2 SIMULASI DAN ANALISA KERUSAKAN MODUL SURYA

Sub-bab ini menunjukkan hasil simulasi PSpice untuk rangkaian modul dua seri & dua paralel dan rangkaian modul tiga seri & tiga paralel pada keadaan normal dan pada keadaan dengan kerusakan modul surya. Hasil dari simulasi PSpice ini digunakan untuk menganalisa efek kerusakan modul surya pada kurva karakteristiknya, sehingga hasilnya dapat disimpulkan untuk membuat algoritma penggambar kurva karakteristik. Perbedaan antara kurva normal dengan kurva yang memiliki kerusakan modul dapat dijadikan sebagai parameter bagi algoritma pendeteksi. Modul surya yang disimulasikan untuk kerusakan modul surya adalah Suntech STP005S karena modul ini yang akan diukur pada pengujian akhir.

4.2.1 Analisa Pada Rangkaian Dua Modul Surya Seri Dan Dua Modul Surya Paralel

Gambar 4.4 memperlihatkan rangkaian empat modul surya STP005S yang tersusun secara dua seri dan dua paralel. Rangkaian modul surya ini disimulasikan pada kondisi normal dan pada kondisi terdapat kerusakan modul dengan menggunakan program simulasi PSpice 9.1.



Gambar 4.4 (a) Susunan rangkaian modul surya 2X2 (b) Kurva karakteristik pada kondisi normal (c) Kurva karakteristik dengan kerusakan modul

Kurva normal pada Gambar 4.4 (b) disimulasikan dengan *irradiance* $1000\text{W}/\text{m}^2$ tiap modul-nya sehingga tiap modul menghasilkan daya yang sama. Hasilnya adalah sistem yang memiliki MPP atau daya maksimum 20 Watt. Hasil simulasi sesuai dengan pembacaan *datasheet*, yaitu modul surya STP005S dapat menghasilkan MPP 5 Watt pada kondisi standar, sehingga empat modul surya menghasilkan 20 Watt. Gambar 4.4 (c) mensimulasikan modul yang sama tetapi dengan sebuah modul kurang teriluminasi, yaitu dengan *irradiance* $200\text{W}/\text{m}^2$ dan

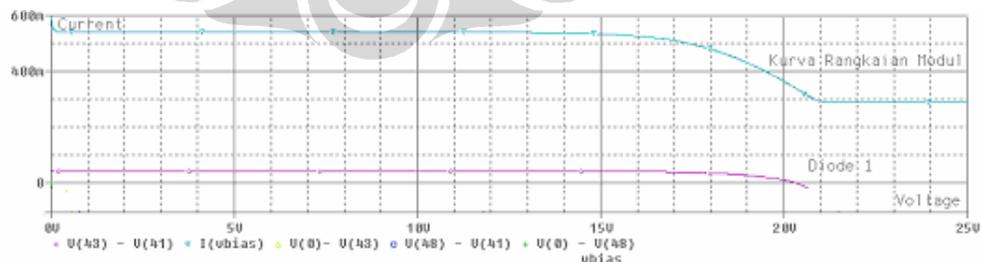
ke-tiga modul yang lain dengan *irradiance* 1000 W/m². Modul yang kurang teriluminasi ini dianggap sebagai modul yang memiliki sel yang rusak, sehingga tidak dapat menghasilkan daya seperti modul surya normal. Ringkasan dari variabel *irradiance* simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 *Irradiance* untuk simulasi rangkaian modul 2x2

| Modul | <i>Irradiance</i> (normal) W/m ² | <i>Irradiance</i> (terdapat kerusakan modul) W/m ² |
|------------|--|---|
| 1 | 1000 | 200 |
| 2 | 1000 | 1000 |
| 3 | 1000 | 1000 |
| 4 | 1000 | 1000 |
| MPP (watt) | 20 | 8,5 |

Hasil dari perbedaan *irradiance* ini adalah sebuah modul menghasilkan daya yang lebih rendah, sehingga MPP sistem secara keseluruhan turun menjadi 8,5 Watt. Penurunan daya modul tidak linear terhadap penurunan daya per-modulnya karena apabila sebuah modul rusak pada sistem dengan empat modul dan penurunannya linear, maka sistem seharusnya dapat menghasilkan minimal 15 Watt.

Terjadinya ”jenjang” pada kurva karakteristik rangkaian modul surya dapat dijelaskan sebagai berikut. Penjelasan mengambil contoh Gambar 4.4 (c), yaitu rangkaian modul surya yang terdiri dari rangkaian seri dua modul surya dan rangkaian paralel dua modul surya. Pada kondisi dengan kerusakan pada sebuah modulnya, maka *bypass diode* pada modul surya yang rusak akan aktif dan kurva dioda ini dapat dilihat pada Gambar 4.5.



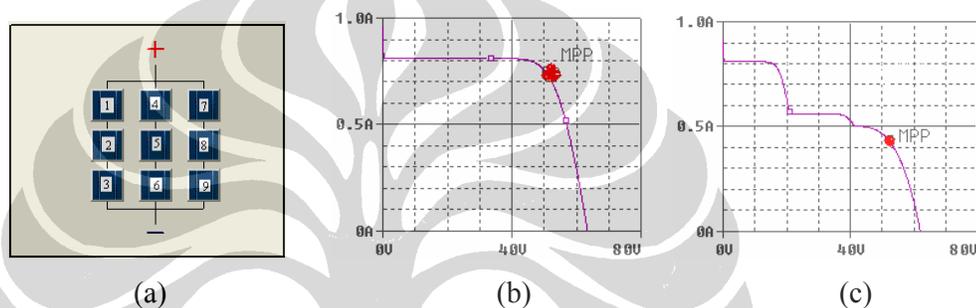
Gambar 4.5 Kurva dioda pada rangkaian modul surya

Gambar 4.5 menunjukkan kurva karakteristik rangkaian modul surya dengan *bypass diode*. Rangkaian ini disimulasikan dengan kondisi yang sama dengan Gambar 4.4 (c). Akibatnya adalah *bypass diode* pada modul kesatu

menjadi aktif (panjar maju). Arus pada kurva pada rangkaian modul surya menjadi berkurang sampai pada Voc dioda. Daya yang terdisipasi pada dioda ini yang menyebabkan kurva karakteristik sistem memiliki "jenjang / ladder".

4.2.2 Analisa Pada Rangkaian Tiga Modul Surya Seri Dan Tiga Modul Surya Paralel

Pada Gambar 4.6 ditunjukkan rangkaian modul yang terdiri dari tiga modul seri dan tiga modul paralel. Rangkaian ini juga disimulasikan pada kondisi normal dan pada kondisi dengan kerusakan pada satu dan dua modulnya.



Gambar 4.6 (a) Susunan rangkaian modul surya 3X3 (b) Kurva karakteristik pada kondisi normal (c) Kurva karakteristik dengan kerusakan modul

Simulasi sistem dengan *irradiance* 1000 W/m^2 tiap modul-nya pada Gambar 4.6 (b) menghasilkan daya yang sama untuk tiap modulnya, sehingga sistem memiliki MPP atau daya maksimum 45 Watt. Hasil simulasi sesuai dengan pembacaan *datasheet*, yaitu modul surya STP005S dapat menghasilkan MPP 5Watt pada kondisi standar, sehingga sembilan sel surya menghasilkan 45 Watt. Gambar 4.6 (c) menggambarkan untuk simulasi sistem yang sama, tetapi dengan dua modul kurang teriluminasi, yaitu dengan *irradiance* 800 W/m^2 dan *irradiance* 200 W/m^2 , sedangkan modul yang lain dengan *irradiance* 1000 W/m^2 . Perbedaan pada kedua modul seri ini menyebabkan kurva memiliki dua "ladder / jenjang". Ringkasan dari variabel *irradiance* yang digunakan dalam simulasi rangkaian modul surya ini dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 *Irradiance* untuk simulasi rangkaian modul 3x3

| Modul | <i>Irradiance</i> (normal) | <i>Irradiance</i> (terdapat kerusakan modul) |
|------------|----------------------------|--|
| | W/m ² | W/m ² |
| 1 | 1000 | 200 |
| 2 | 1000 | 800 |
| 3 | 1000 | 1000 |
| 4 | 1000 | 1000 |
| 5 | 1000 | 1000 |
| 6 | 1000 | 1000 |
| 7 | 1000 | 1000 |
| 8 | 1000 | 1000 |
| 9 | 1000 | 1000 |
| MPP (watt) | 45 | 24 |

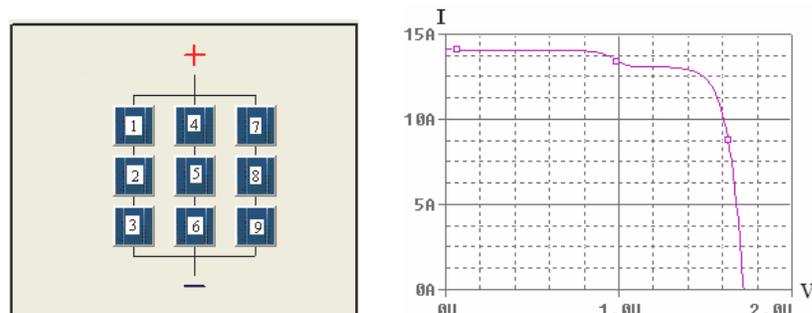
Hasil dari perbedaan *irradiance* ini adalah dua modul menghasilkan daya yang berbeda dan MPP sistem secara keseluruhan turun menjadi 24 Watt. Penurunan daya sistem untuk rangkaian ini juga tidak linear terhadap penurunan daya per-modul-nya.

4.3 ALGORITMA PENGGAMBAR KURVA KARAKTERISTIK MODUL SURYA

Algoritma ini diperlukan untuk menggambar kurva karakteristik rangkaian modul surya pada VB6.0 tanpa menghitung persamaan rangkaian analog yang rumit. Peralihan dari PSpice ke VB6.0 dilakukan karena PSpice tidak dapat mensimulasikan algoritma pendeteksi kerusakan modul surya.

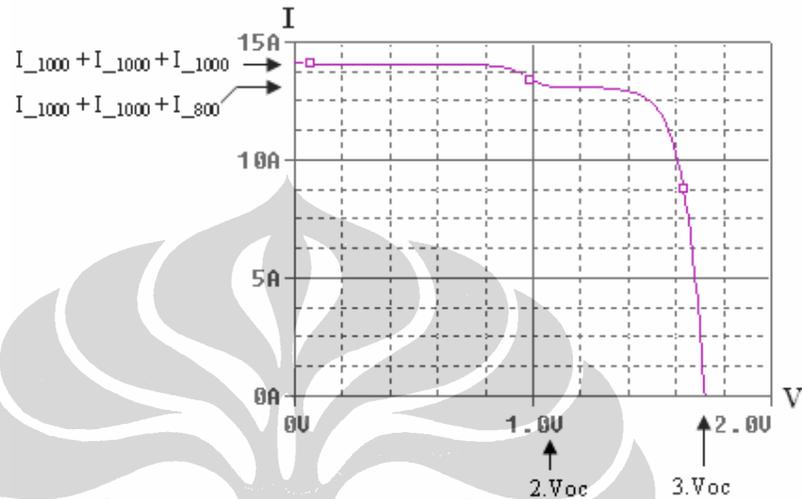
4.3.1 Perancangan Algoritma Penggambar Kurva

Gambar 4.7 menggambarkan kurva karakteristik modul surya 3x3 pada PSpice. Delapan modul menerima *irradiance* 1000 W/m², sedangkan sebuah modul hanya dapat menerima 800 W/m².



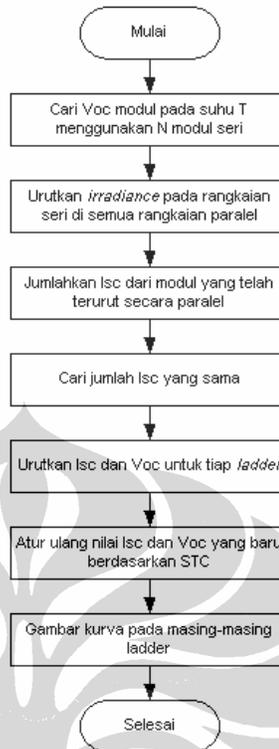
Gambar 4.7 Kurva rangkaian modul surya 3x3 dengan kerusakan pada modul kesatu

Modul yang disimulasikan adalah modul yang memiliki $I_{sc} = 4,6A$ pada irradiance 1000 W/m^2 , $I_{sc} = 3,6A$ pada irradiance 800 W/m^2 , dan $I_{sc} = 0,9A$ pada irradiance 200 W/m^2 . V_{oc} satu modulnya adalah 566 mV . Penjelasan jenjang pada kurva diperjelas variabelnya pada Gambar 4.8.



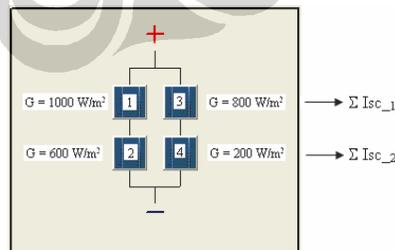
Gambar 4.8 Penjelasan jenjang pada kurva dengan kerusakan pada modul kesatu

I_{sc} merupakan penjumlahan arus secara paralel. Arus pada jenjang merupakan penjumlahan arus secara paralel dengan sebuah modul yang rusak ($irradiance = 800 \text{ W/m}^2$). V_{oc} rangkaian merupakan penjumlahan tegangan secara seri. Dari hasil analisa tersebut dan sifat karakteristik sel surya pada Bab 2, maka dapat dijadikan rumusan untuk algoritma penggambar kurva rangkaian modul surya, baik untuk kondisi normal, maupun dengan kondisi terdapat kerusakan modul surya. Kerusakan yang dimaksud dalam algoritma ini adalah modul surya menghasilkan daya yang lebih rendah dibandingkan modul lain dalam sistem atau pun modul tidak menghasilkan daya sama sekali. Urutan algoritma tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Alur algoritma penggambar kurva karakteristik

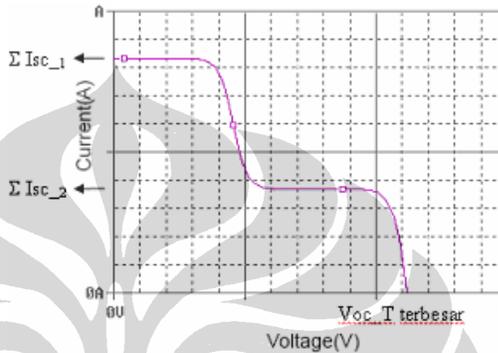
Langkah pertama adalah mencari Voc modul pada suhu T menggunakan N modul seri. Voc pada rangkaian dipengaruhi oleh banyaknya modul seri, sedangkan modul paralel tidak berpengaruh. Nilai Voc terutama dipengaruhi oleh suhu, bukan oleh *irradiance*. Selanjutnya *irradiance* diurutkan pada rangkaian seri di semua rangkaian paralel. Contoh untuk *irradiance* yang telah terurut ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Rangkaian modul surya dengan *irradiance* yang terurut

Setelah terurut, Isc dijumlahkan dari modul secara paralel, sehingga kedudukan Isc ini pada kurva seperti pada Gambar 4.11. Nilai Isc yang berbeda digunakan untuk membuat ”jenjang / ladder” pada kurva sehingga banyaknya

jenjang = M modul paralel - Σ (Isc yang sama). Contoh pada Gambar 4.11 adalah kurva yang memiliki dua "jenjang / ladder". Nilai Isc dan Voc untuk setiap jenjang kemudian diurutkan dan dihitung kembali berdasarkan kondisi standar (STC). Langkah terakhir adalah menggambar kurva pada masing-masing jenjang dengan batas sumbu y : Isc(1) sampai dengan Isc(jenjang) dan batas x: Voc(1) sampai dengan Voc(jenjang).



Gambar 4.11 Kedudukan Isc dan Voc pada kurva

4.3.2 Pengujian Algoritma Penggambar Kurva

Uji coba pada *form* VB 6.0 ini ditujukan untuk menguji algoritma penggambar karakteristik untuk sistem surya pada kondisi normal dan untuk sistem surya dengan kerusakan pada satu modulnya atau lebih. Uji coba dilakukan pada rangkaian tiga modul seri, rangkaian tiga modul paralel, dan rangkaian dengan dua modul seri dan dua modul paralel. Uji coba ini membandingkan hasil simulasi kurva karakteristik V-I sistem pada PSpice 9.1 dengan kurva karakteristik V-I sistem menggunakan algoritma penggambar kurva pada VB 6.0. Modul yang diuji adalah modul surya Swissco Solar STP005 karena modul ini yang akan diuji pada pengujian algoritma pendeteksi menggunakan data hasil pengukuran.

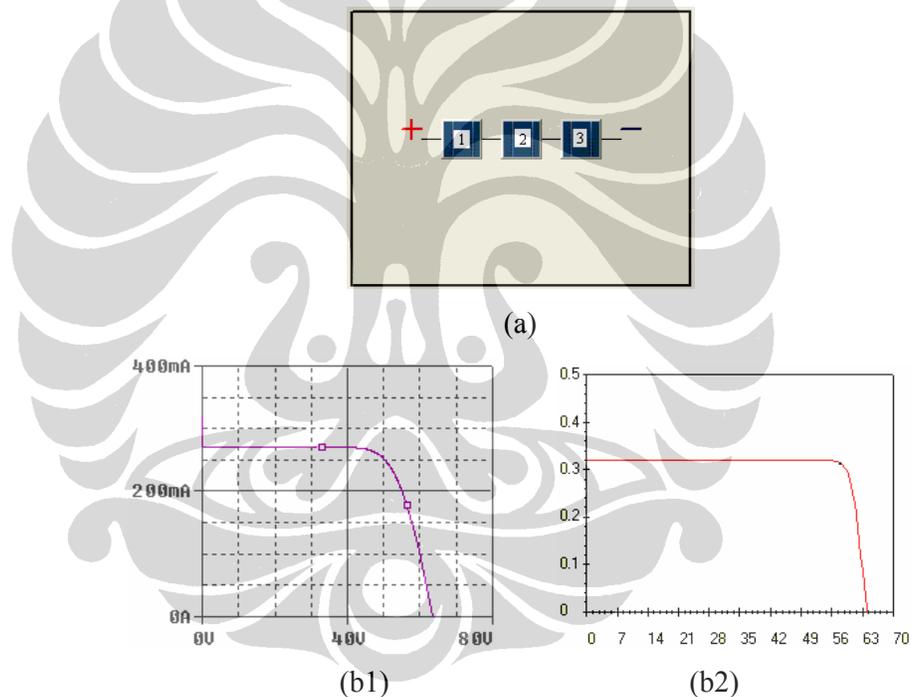
Kerusakan modul disimulasikan sebagai perbedaan *irradiance* karena sebuah modul yang rusak dapat dianalogikan sebagai modul yang menghasilkan daya kurang dari modul normal dan penurunan *irradiance* dapat menyebabkan penurunan daya pada modul. Pengguna dapat melihat perubahan bentuk grafik yang melibatkan nilai Isc dan Voc untuk variasi nilai *irradiance*.

4.3.2.1 Uji Coba Algoritma Penggambar Karakteristik Pada Rangkaian Tiga Modul Surya Seri

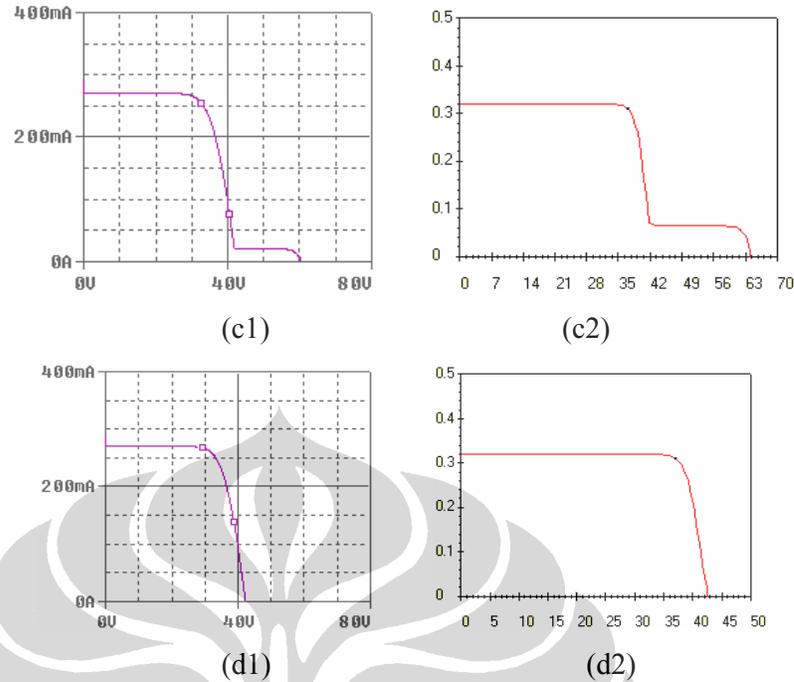
Gambar 4.12 menggambarkan penurunan nilai MPP akibat perbedaan *irradiance* pada tiga rangkaian modul surya yang disusun secara seri. Tabel 4.8 menampilkan nilai *irradiance* yang digunakan pada Gambar 4.12.

Tabel 4.8 Nilai *irradiance* untuk rangkaian tiga modul surya seri

| Modul | <i>Irradiance</i> untuk Gambar 4.6 (b) W/m ² | <i>Irradiance</i> untuk Gambar 4.6 (c) W/m ² | <i>Irradiance</i> untuk Gambar 4.6 (d) W/m ² |
|-------|--|--|--|
| 1 | 1000 | 200 | 0 |
| 2 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 3 | 1000 | 1000 | 1000 |



Gambar 4.12 (a) Susunan modul surya (b1) Simulasi normal PSpice (b2) Simulasi normal VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali pada PSpice (d2) Sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali pada VB6.0



Gambar 4.12 (a) Susunan modul surya (b1) Simulasi normal PSpice (b2) Simulasi normal VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali pada PSpice (d2) Sebuah modul tidak menghasilkan daya sama sekali pada VB6.0 (lanjutan)

Gambar 4.12 (a) menggambarkan susunan tiga modul surya yang tersusun secara seri. Gambar 4.12 (b1) pada PSpice dan Gambar 4.12 (b2) pada VB6.0 menggambarkan hasil simulasi pada kondisi normal, yaitu tiap modul teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 pada suhu 27°C . Gambar 4.12 (c1) pada PSpice dan Gambar 4.12 (c2) pada VB6.0 menggambarkan hasil simulasi pada kondisi dengan satu modul teriluminasi dengan *irradiance* 200 W/m^2 , sedangkan modul yang lain teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 pada suhu 27°C . Hasil pada Gambar 4.12 (d1) menggunakan PSpice dan Gambar 4.12 (d2) menggunakan VB6.0 menggambarkan hasil simulasi pada kondisi dengan satu modul tidak menghasilkan daya sama sekali, sedangkan modul yang lain tetap teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 pada suhu 27°C .

Setiap penurunan daya menyebabkan "jenjang / ladder" pada kurva karakteristik sistem, kecuali bila modul tidak teriluminasi sama sekali. Pada

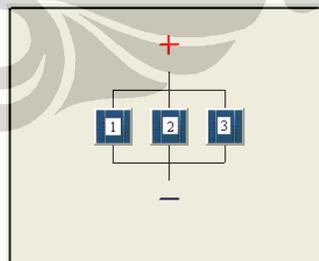
sistem dengan susunan modul seri dapat disimpulkan bahwa penurunan daya pada satu atau lebih modul surya menyebabkan jenjang / *ladder* pada kurva dan jenjang ini dapat digunakan sebagai indikasi terjadinya kerusakan modul surya. Apabila sebuah modul surya pada rangkaian tidak dapat menghasilkan daya sama sekali, maka kurva karakteristik tidak menghasilkan jenjang. Kontur kurva yang tidak memiliki jenjang (sama dengan kurva karakteristik normal) ini tidak dapat digunakan untuk mengindikasikan adanya kerusakan modul. Jenjang tidak dihasilkan pada sistem dengan modul yang tidak menghasilkan daya sama sekali karena modul tidak menghasilkan arus I_{sc} pada penjumlahan arus secara paralel.

4.3.2.2 Uji Coba Algoritma Penggambar Karakteristik Pada Rangkaian Tiga Modul Surya Paralel

Gambar 4.13 menggambarkan penurunan nilai MPP akibat perbedaan *irradiance* pada tiga rangkaian modul surya yang disusun secara paralel. Tabel 4.9 menampilkan nilai *irradiance* yang digunakan untuk melihat efek perbedaannya pada kurva.

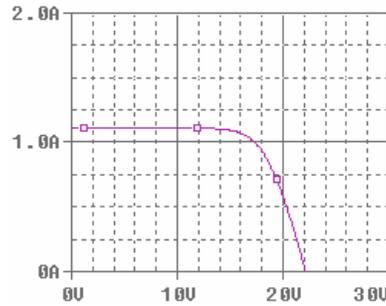
Tabel 4.9 Nilai *irradiance* untuk rangkaian tiga modul surya paralel

| Modul | <i>Irradiance</i> untuk Gambar 4.13 (b) W/m^2 | <i>Irradiance</i> untuk Gambar 4.13 (c) W/m^2 | <i>Irradiance</i> untuk Gambar 4.13 (d) W/m^2 |
|-------|---|---|---|
| 1 | 1000 | 200 | 0 |
| 2 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 3 | 1000 | 1000 | 1000 |

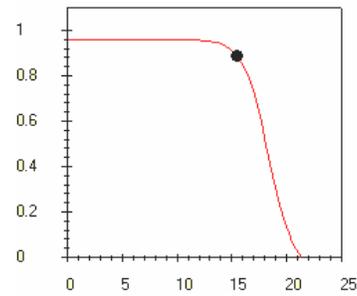


(a)

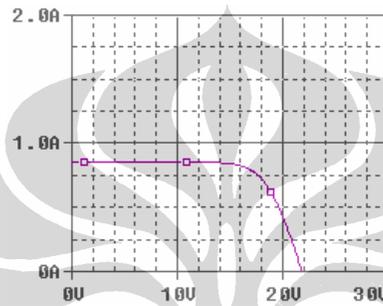
Gambar 4.13 (a) Susunan modul surya (b1) Simulasi normal PSpice (b2) Simulasi normal VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0



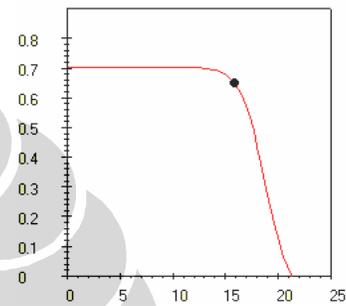
(b1)



(b2)



(c1)



(c2)

Gambar 4.13 (a) Susunan modul surya (b1) Simulasi normal PSpice (b2) Simulasi normal VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (lanjutan)

Gambar 4.13 (a) menggambarkan susunan tiga modul surya paralel. Gambar 4.13 (b1) pada PSpice dan Gambar 4.8 (b2) pada VB6.0 menggambarkan hasil simulasi pada kondisi normal, yaitu tiap modul teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C , sedangkan Gambar 4.13 (c1) pada PSpice dan Gambar 4.13 (c2) pada VB6.0 menggambarkan hasil simulasi pada kondisi dengan satu modul teriluminasi dengan *irradiance* 200 W/m^2 , sedangkan modul yang lain teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C .

Hasil simulasi pada sistem dengan tiga modul paralel memberikan kontur kurva yang sama dengan kurva normal. Apabila satu atau lebih modul kurang teriluminasi atau pun modul tidak teriluminasi sama sekali, kontur kurva tetap sama. Perbedaannya dengan kurva normal hanya terletak pada nilai I_{sc} , sedangkan nilai V_{oc} sistem tetap sama dengan V_{oc} satu modul (sesuai dengan hukum Kirchhoff). Algoritma pendeteksi yang mendeteksi menggunakan

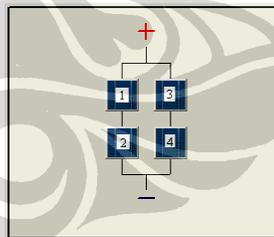
parameter tegangan dan arus tidak dapat diterapkan untuk kasus semua modul tersusun secara paralel seperti ini karena kontur kurjanya yang sama dengan kurva normal.

4.3.2.3 Uji Coba Algoritma Penggambar Karakteristik Pada Rangkaian Modul Surya Dua Seri Dan Dua Paralel

Gambar 4.14 menggambarkan susunan modul surya yang terdiri dari dua modul surya secara paralel dan dua modul surya secara seri. Rangkaian ini disimulasikan dengan kombinasi kerusakan modulnya, yaitu : sebuah modul rusak, modul 1 & 4 rusak, modul 1 & 2 rusak (modul seri), modul 1 & 3 rusak (modul paralel). Ringkasan *irradiance* yang dipakai pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.10.

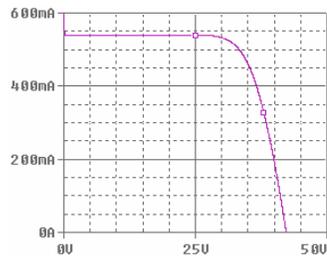
Tabel 4.10 Nilai *irradiance* untuk rangkaian modul surya dua seri dan dua paralel

| Modul | <i>Irradiance</i> (W/m ²) untuk Gambar 4.14 (b1)&(b2) | <i>Irradiance</i> (W/m ²) untuk Gambar 4.14 (c1)&(c2) | <i>Irradiance</i> (W/m ²) untuk Gambar 4.14 (d1)&(d2) | <i>Irradiance</i> (W/m ²) untuk Gambar 4.14 (e1)&(e2) | <i>Irradiance</i> (W/m ²) untuk Gambar 4.14 (f1)&(f2) |
|-------|---|---|---|---|---|
| 1 | 1000 | 200 | 200 | 0 | 0 |
| 2 | 1000 | 1000 | 1000 | 0 | 1000 |
| 3 | 1000 | 1000 | 800 | 1000 | 0 |
| 4 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |

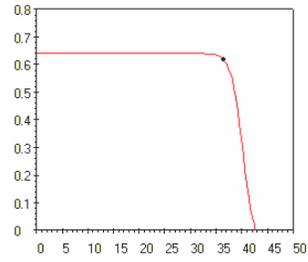


(a)

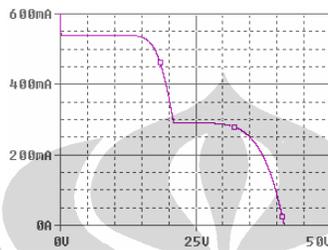
Gambar 4.14 (a) Susunan modul surya (b1) Modul normal dengan PSpice (b2) Modul normal dengan VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Beda daya pada modul satu dan dua dengan PSpice (d2) Beda daya pada modul satu dan dua dengan VB6.0 (e1) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan PSpice (e2) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan VB6.0 (f1) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan PSpice (f2) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan VB6.0



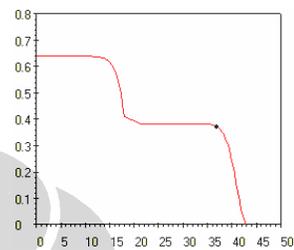
(b1)



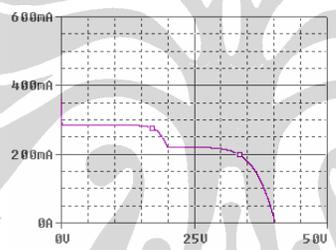
(b2)



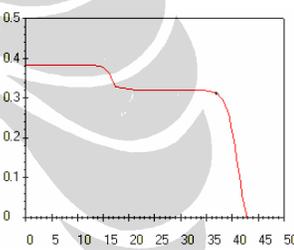
(c1)



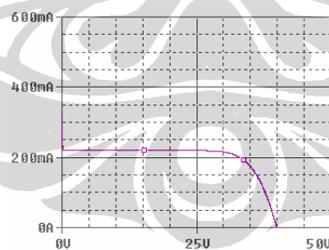
(c2)



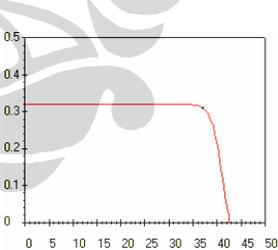
(d1)



(d2)

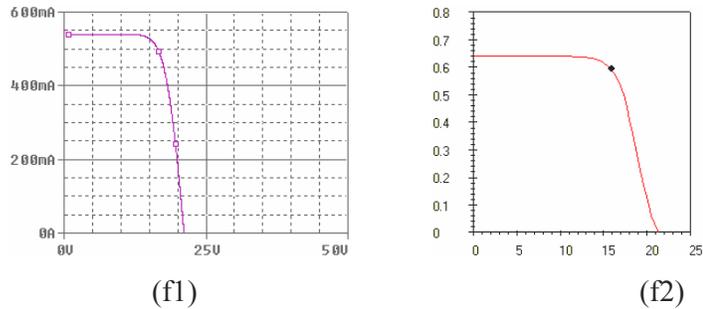


(e1)



(e2)

Gambar 4.14 (a) Susunan modul surya (b1) Modul normal dengan PSpice (b2) Modul normal dengan VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Beda daya pada modul satu dan dua dengan PSpice (d2) Beda daya pada modul satu dan dua dengan VB6.0 (e1) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan PSpice (e2) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan VB6.0 (f1) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan PSpice (f2) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan VB6.0 (lanjutan)



Gambar 4.14 (a) Susunan modul surya (b1) Modul normal dengan PSpice (b2) Modul normal dengan VB6.0 (c1) Beda daya pada modul satu dengan PSpice (c2) Beda daya pada modul satu dengan VB6.0 (d1) Beda daya pada modul satu dan dua dengan PSpice (d2) Beda daya pada modul satu dan dua dengan VB6.0 (e1) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan PSpice (e2) Beda daya pada satu rangkaian seri dengan VB6.0 (f1) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan PSpice (f2) Beda daya pada satu rangkaian paralel dengan VB6.0 (lanjutan)

Gambar 4.14 (b) menggambarkan hasil simulasi pada kondisi normal, yaitu tiap modul teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C . Gambar 4.14 (c) menggambarkan hasil simulasi pada kondisi dengan satu modul teriluminasi dengan *irradiance* 200 W/m^2 , sedangkan modul yang lain teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C . Gambar 4.14 (d) menggambarkan hasil simulasi pada kondisi dengan modul ke-satu teriluminasi dengan *irradiance* 800 W/m^2 dan modul ke-tiga teriluminasi dengan *irradiance* 200 W/m^2 , sedangkan modul yang lain teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C . Gambar 4.14 (e) menggambarkan hasil simulasi dengan satu rangkaian modul seri tidak teriluminasi sama sekali, yaitu modul ke-satu dan modul ke-dua, sedangkan modul yang lain teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C . Gambar 4.14 (f) menggambarkan hasil simulasi dengan satu rangkaian modul paralel tidak teriluminasi sama sekali, yaitu modul ke-satu dan modul ke-tiga, sedangkan modul yang lain teriluminasi dengan *irradiance* 1000 W/m^2 dengan suhu 27°C .

Hasil simulasi pada rangkaian modul dengan dua modul seri dan dua modul paralel dengan kondisi satu rangkaian seri atau satu rangkaian paralel tidak teriluminasi sama sekali memberikan kontur kurva yang sama dengan kurva

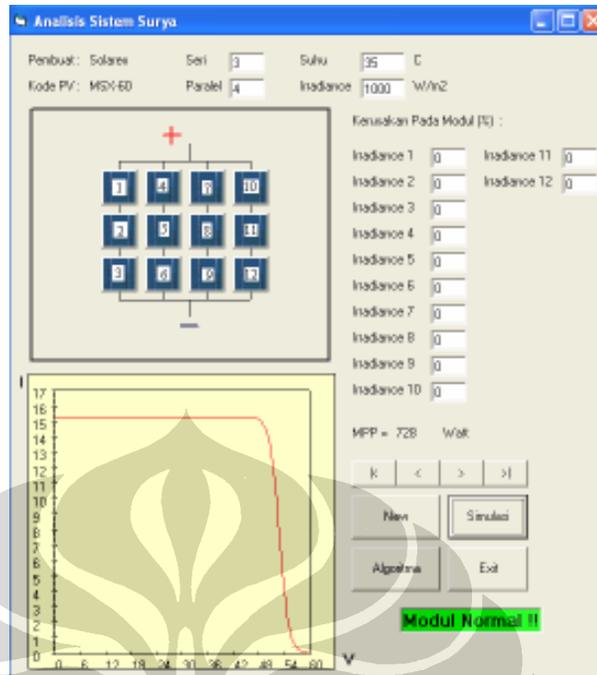
normal, sehingga algoritma tidak dapat diterapkan untuk kasus seperti ini. Hasil ini tetap sama untuk susunan modul dengan N modul seri dan M modul paralel.

Kesimpulan akhir dari hasil simulasi pada VB 6.0 adalah cukup menyamai kurva PSpice. Namun, terdapat perbedaan pada kemiringan kurva dan I_{sc} . Munculnya perbedaan kemiringan kurva dimulai dari *knee* kurva dan perbedaan nilai *knee* ini yang menyebabkan perbedaan kemiringan. Perbedaan ini berkisar antara satu sampai dengan lima volt bergantung dari jumlah modul pada susunan sistem. Hal ini disebabkan karena Pspice mensimulasikan modul berdasarkan analisis simpul rangkaian listrik analog, sedangkan program VB 6.0 mensimulasikan modul berdasarkan algoritma pergeseran kurva. Kurva I_{sc} yang berbeda disebabkan karena PSpice menghitung efek tegangan jatuh pada *bypass diode*, sedangkan VB 6.0 tidak menghitungnya. Secara grafis, kurva karakteristik VB 6.0 cukup baik untuk merepresentasikan karakteristik V-I modul untuk menguji algoritma deteksi.

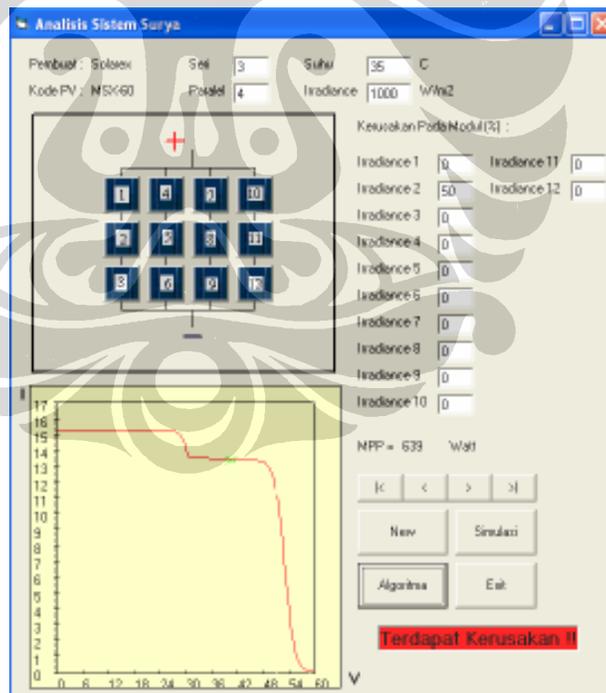
4.4 PENGUJIAN ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA SECARA SIMULASI

4.4.1 Pengujian Algoritma Pendeteksi Pada Solarex MSX-60

Sub-program algoritma pendeteksi kerusakan modul surya pada sistem energi surya direalisasikan dengan tombol "algoritma" pada *form* simulasi sistem. Tujuannya adalah untuk melihat jalannya algoritma pendeteksi pada *picture box* (kurva V-I). Pengujian dilakukan pada rangkaian modul 3x4 normal (*irradiance* 1000 W/m² tiap modul) dan rangkaian modul 3x4 dengan salah satu modul teriluminasi dengan *irradiance* 500 W/m², sedangkan modul lain dengan *irradiance* 1000 W/m². Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 memperlihatkan tampilan hasil akhir pengujian algoritma pada kondisi normal dan pada kondisi terdapat kerusakan modul surya.



Gambar 4.15 Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Solarex MSX-60

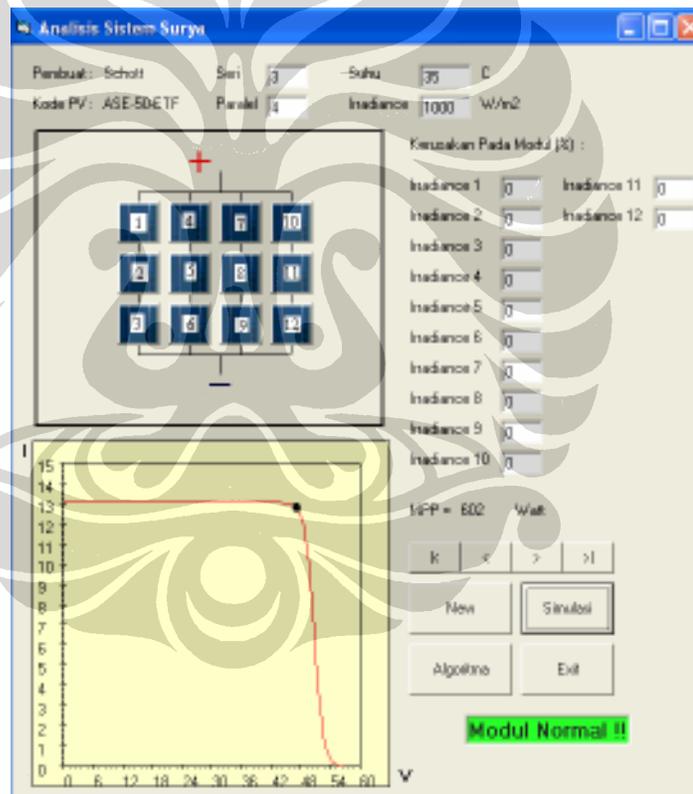


Gambar 4.16 Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Solarex MSX-60 dengan kerusakan pada salah satu modulnya

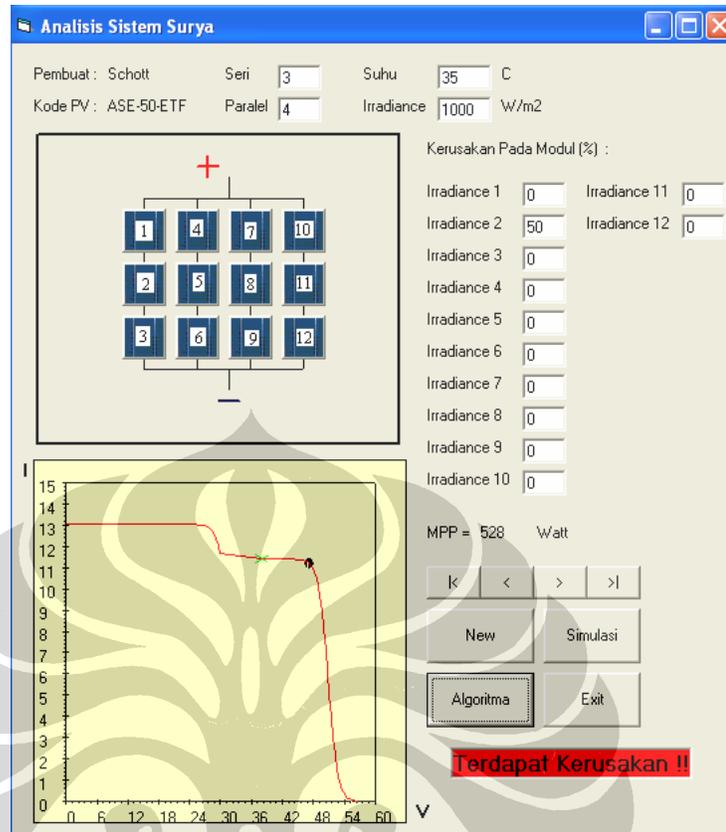
Algoritma berhasil membedakan kedua kurva, antara kurva normal dengan kurva yang memiliki kerusakan pada salah satu modulnya. Indikasi terjadinya kerusakan pada kurva ditandai dengan tanda silang hijau.

4.4.2 Pengujian Algoritma Pendeteksi Pada Schott Solar ASE-50-ETF

Pengujian dilakukan pada rangkaian modul 3x4 normal (*irradiance* 1000 W/m² tiap modul) dan rangkaian modul 3x4 dengan salah satu modul teriluminasi dengan *irradiance* 500 W/m², sedangkan modul lain dengan *irradiance* 1000 W/m². Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 memperlihatkan tampilan hasil akhir pengujian algoritma pada kondisi normal dan pada kondisi terdapat kerusakan modul surya.



Gambar 4.17 Simulasi pengujian algoritma deteksi pada ASE-50-ETF

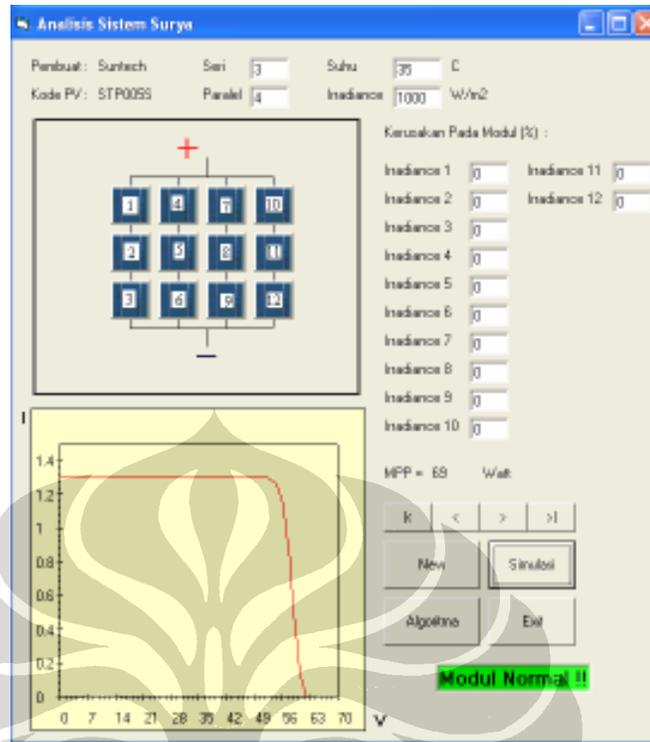


Gambar 4.18 Simulasi pengujian algoritma deteksi pada ASE-50-ETF dengan kerusakan modul

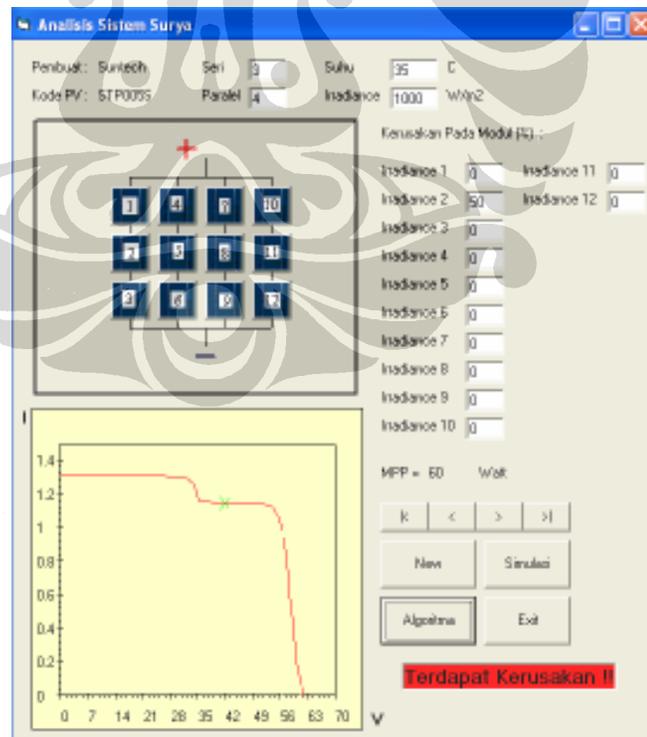
Algoritma berhasil membedakan kedua kurva, antara kurva normal dengan kurva yang memiliki kerusakan pada salah satu modulnya. Indikasi terjadinya kerusakan pada kurva ditandai dengan tanda silang hijau.

4.4.3 Pengujian Algoritma Pendeteksi Pada Suntech STP005S

Pengujian dilakukan pada rangkaian modul 3x4 normal (*irradiance* 1000 W/m² tiap modul) dan rangkaian modul 3x4 dengan salah satu modul teriluminasi dengan *irradiance* 500 W/m², sedangkan modul lain dengan *irradiance* 1000 W/m². Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 memperlihatkan tampilan hasil akhir pengujian algoritma pada kondisi normal dan pada kondisi terdapat kerusakan modul surya.



Gambar 4.19 Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Suntech STP005S



Gambar 4.20 Simulasi pengujian algoritma deteksi pada Suntech STP005S dengan kerusakan modul

Algoritma berhasil membedakan kedua kurva, antara kurva normal dengan kurva yang memiliki kerusakan pada salah satu modulnya. Indikasi terjadinya kerusakan pada kurva ditandai dengan tanda silang hijau.

4.5 PENGUJIAN ALGORITMA PENDETEKSI KERUSAKAN MODUL SURYA BERDASARKAN HASIL PENGUKURAN

Metode pengujian algoritma pendeteksi dilakukan pada rangkaian seri dua modul surya STP005S dan rangkaian seri tiga modul surya STP005S (lihat lampiran 4). Tujuan pengujian ini adalah untuk mendapatkan data tegangan dari nol sampai Voc dan data arus rangkaian dari Isc sampai dengan nol. Data ini menggambarkan kurva karakteristik sistem. Nilai tegangan dan arus diukur menggunakan voltmeter dan amperemeter, yang besarnya bergantung dari perubahan beban. Perubahan beban pada model diatur melalui sebuah resistor variabel. Model untuk pengukuran karakteristik rangkaian modul surya dapat dilihat pada Gambar 3.7.

Data yang didapat dari hasil pengukuran, kemudian digambar sebagai kurva di program VB6.0. Selanjutnya algoritma pendeteksi akan menentukan apakah terdapat kerusakan modul atau tidak berdasarkan parameter tegangan dan arus hasil pengukuran.

4.5.1 Pengujian Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya Pada Rangkaian Seri Dua Modul Surya

Pengujian algoritma dilakukan pada program VB6.0 dengan data tegangan dan arus yang didapat dari hasil pengukuran rangkaian seri dua modul surya. Algoritma diuji untuk kondisi normal dan untuk kondisi dengan kerusakan modul. Kerusakan modul dilakukan dengan menutup sebagian modul, sehingga sebagian sel dari modul surya tidak menghasilkan daya. Modul surya yang tertutup ini otomatis akan menghasilkan daya yang lebih rendah daripada modul surya normal. Perbedaan daya yang dihasilkan pada kedua modul akan mempengaruhi bentuk kurva daya.

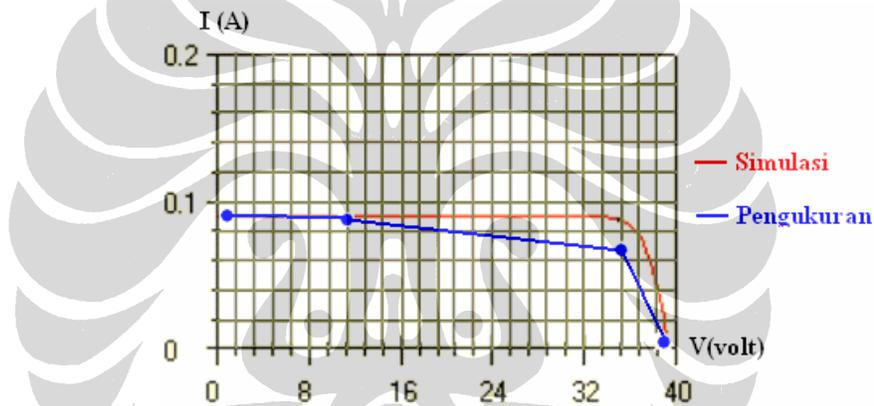
4.5.1.1 Rangkaian Seri Dua Modul Surya Normal

Hasil pengukuran karakteristik rangkaian dua modul surya pada kondisi normal tanpa kerusakan modul surya ditampilkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Normal

| V (volt) | I (mA) |
|----------|--------|
| 1 | 87 |
| 10 | 84,9 |
| 36 | 64,3 |
| 39 | 0,01 |

Perbandingan data dari Tabel 4.11 dengan hasil simulasi VB6.0 ditampilkan pada Gambar 4.21.



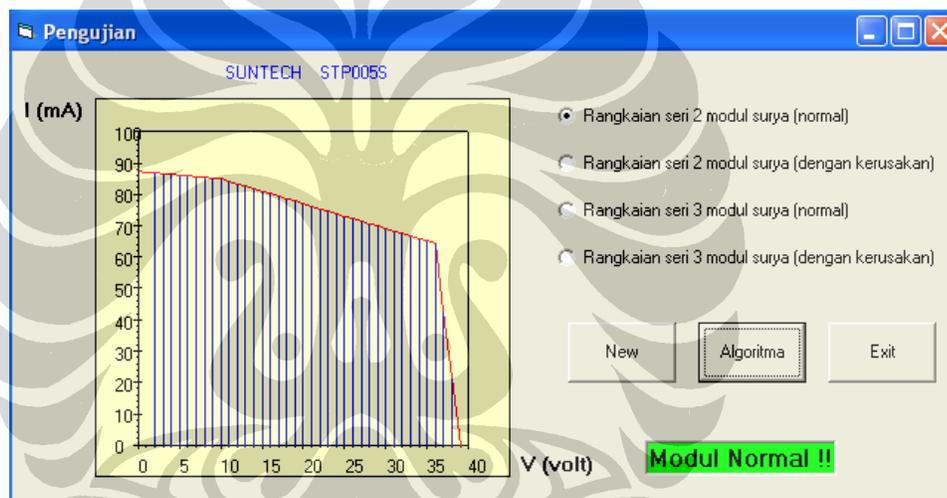
Gambar 4.21 Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri dua modul surya pada kondisi normal

Variabel *irradiance* dan suhu tidak diukur pada waktu pengukuran rangkaian modul surya, sehingga masukan data untuk VB6.0 dilakukan secara *trial and error* agar kurva memiliki V_{oc} dan I_{sc} yang cocok dengan Tabel 4.11. Program VB6.0 pada Gambar 4.21 disimulasikan dengan nilai *irradiance* 270W/m^2 dan nilai suhu 50°C . Berdasarkan Gambar 4.21, maka terlihat bahwa perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi terletak pada kemiringan kurva dan *knee* kurva. Perbedaan hasil simulasi terhadap hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Normal

| V (volt) | I simulasi (mA) | I pengukuran m(A) | % beda |
|-------------|-----------------|-------------------|--------|
| 1 | 87 | 87 | 0 |
| 10 | 87 | 84,9 | 2,41 |
| 36 | 85 | 64 | 24,35 |
| 39 | 0 | 0,01 | 0 |
| Rata-rata = | | | 6,69 |

Rata-rata perbedaan antara kedua kurva, dilihat dari Tabel 4.12 adalah sebesar 6,69%. Namun, kedua kurva masih memiliki kontur yang sama, sehingga algoritma deteksi tetap dapat digunakan. Hasil pengujian algoritma deteksi untuk data hasil pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri dua modul surya normal

Algoritma tidak mendeteksi adanya kerusakan modul dari parameter data hasil pengukuran. Hasil ini cocok dengan kondisi rangkaian modul pengujian, yaitu semua modul dalam rangkaian berfungsi dengan normal.

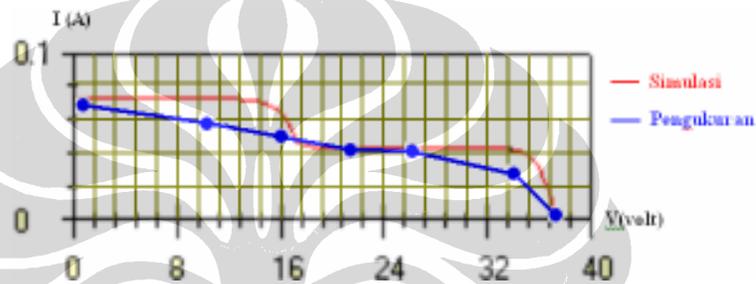
4.5.1.2 Rangkaian Seri Dua Modul Surya Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul

Hasil pengukuran karakteristik rangkaian dua modul surya pada kondisi dengan kerusakan pada salah satu modul surya ditampilkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul Surya

| V (volt) | I (mA) |
|----------|--------|
| 1 | 67,7 |
| 10 | 59,2 |
| 16 | 51,4 |
| 21 | 41,4 |
| 25 | 41,2 |
| 34 | 22,3 |
| 36 | 0,02 |

Perbandingan data dari Tabel 4.13 dengan hasil simulasi VB6.0 ditampilkan pada Gambar 4.23.



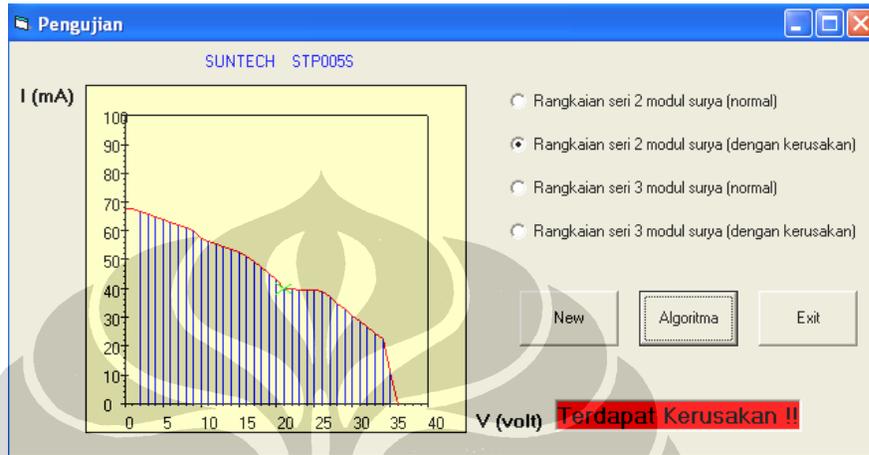
Gambar 4.23 Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri dua modul surya pada kondisi dengan kerusakan pada salah satu modul surya

Program VB6.0 pada Gambar 4.23 disimulasikan dengan nilai *irradiance* 210W/m² dan nilai suhu 65°C. Berdasarkan Gambar 4.23, maka terlihat bahwa perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi terletak pada kemiringan kurva dan *knee* kurva. Perbedaan ini dipengaruhi oleh akurasi alat ukur dan karena jumlah *bypass diode* yang tidak diketahui. Perbedaan hasil simulasi terhadap hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Dua Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul

| V (volt) | I simulasi (mA) | I pengukuran m(A) | % beda |
|-------------|-----------------|-------------------|--------|
| 1 | 68 | 67,7 | 0,44 |
| 10 | 68 | 59,2 | 1,18 |
| 16 | 62 | 51,4 | 17,1 |
| 21 | 42 | 41,4 | 1,43 |
| 25 | 42 | 41,2 | 1,9 |
| 34 | 40 | 27,3 | 31,75 |
| 36 | 0 | 0,02 | 0 |
| Rata-rata = | | | 7,69 |

Rata-rata perbedaan antara kedua kurva, dilihat dari Tabel 4.14 adalah sebesar 7,69%. Namun, kedua kurva masih memiliki kontur yang sama, sehingga algoritma deteksi tetap dapat digunakan. Hasil pengujian algoritma deteksi untuk data hasil pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri dua modul surya dengan kerusakan pada salah satu modul

Algoritma mendeteksi adanya kerusakan modul dari parameter data hasil pengukuran. Bagian awal dari indikasi kerusakan ditandai dengan tanda silang hijau, yaitu bagian yang landai dari kurva karakteristik sistem. Hasil ini cocok dengan kondisi rangkaian modul pengujian, yaitu hanya sebuah modul yang berfungsi normal dari rangkaian seri dua modul surya.

4.5.2 Pengujian Algoritma Pendeteksi Kerusakan Modul Surya Pada Rangkaian Seri Tiga Modul Surya

Pengujian algoritma dilakukan pada program VB6.0 dengan data tegangan dan arus yang didapat dari hasil pengukuran rangkaian seri tiga modul surya. Algoritma diuji untuk kondisi normal dan untuk kondisi dengan kerusakan modul pada salah satu modul surya. Kerusakan modul dilakukan dengan menutup sebagian modul kedua, sehingga sebagian sel dari modul surya ini tidak menghasilkan daya. Modul surya yang tertutup ini otomatis akan menghasilkan daya yang lebih rendah daripada modul surya normal. Perbedaan daya yang dihasilkan pada tiap modul akan mempengaruhi bentuk kurva daya.

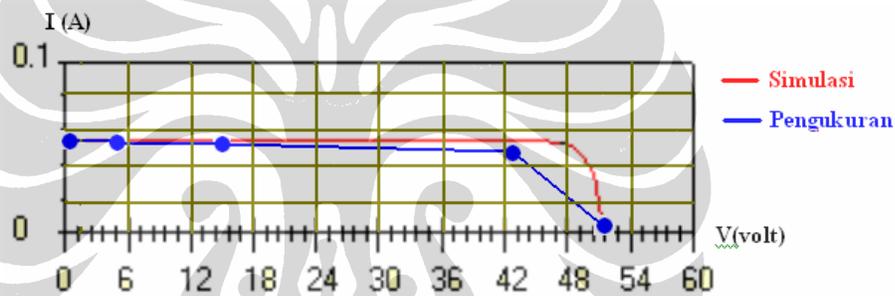
4.5.2.1 Rangkaian Seri Tiga Modul Surya Normal

Hasil pengukuran karakteristik rangkaian tiga modul surya pada kondisi normal tanpa kerusakan modul surya ditampilkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Hasil Pengukuran Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Normal

| V (volt) | I (mA) |
|----------|--------|
| 1 | 51 |
| 5 | 50,5 |
| 15 | 50,2 |
| 43 | 43,3 |
| 52 | 0,2 |

Perbandingan data dari Tabel 4.15 dengan hasil simulasi VB6.0 ditampilkan pada Gambar 4.25.



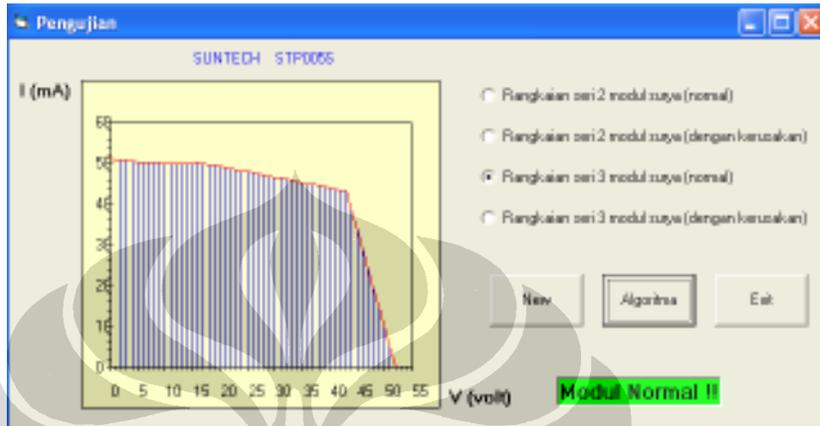
Gambar 4.25 Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri tiga modul surya pada kondisi normal

Program VB6.0 pada Gambar 4.25 disimulasikan dengan nilai *irradiance* 150W/m^2 dan nilai suhu 85°C . Berdasarkan Gambar 4.25, maka terlihat bahwa perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi terletak pada kemiringan kurva dan *knee* kurva. Perbedaan hasil simulasi terhadap hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Normal

| V (volt) | I simulasi (mA) | I pengukuran m(A) | % beda |
|-------------|-----------------|-------------------|--------|
| 1 | 51 | 51 | 0 |
| 5 | 51 | 50,5 | 0,98 |
| 15 | 51 | 50,2 | 1,57 |
| 43 | 51 | 43,3 | 15,1 |
| 52 | 0 | 0,2 | 0 |
| Rata-rata = | | | 3,53 |

Rata-rata perbedaan antara kedua kurva, dilihat dari Tabel 4.16 adalah sebesar 3,53%. Namun, kedua kurva masih memiliki kontur yang sama, sehingga algoritma deteksi tetap dapat digunakan. Hasil pengujian algoritma deteksi untuk data hasil pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri tiga modul surya normal

Algoritma tidak mendeteksi adanya kerusakan modul dari parameter data hasil pengukuran. Hasil ini cocok dengan kondisi rangkaian modul pengujian, yaitu semua modul dalam rangkaian berfungsi dengan normal.

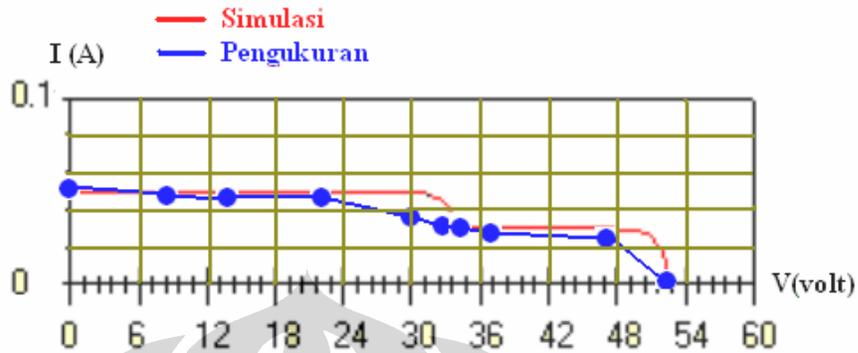
4.5.2.2 Rangkaian Seri Tiga Modul Surya Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul

Hasil pengukuran karakteristik rangkaian tiga modul surya pada kondisi dengan kerusakan modul surya ditampilkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Hasil Pengukuran Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Modul Surya

| V (volt) | I (mA) |
|----------|--------|
| 0 | 48 |
| 9 | 46 |
| 14 | 44,4 |
| 22 | 42,7 |
| 30 | 35,1 |
| 33 | 32,7 |
| 34 | 32,6 |
| 37 | 32,4 |
| 47 | 25,3 |
| 51 | 0,1 |

Perbandingan data dari Tabel 4.17 dengan hasil simulasi VB6.0 ditampilkan pada Gambar 4.27.



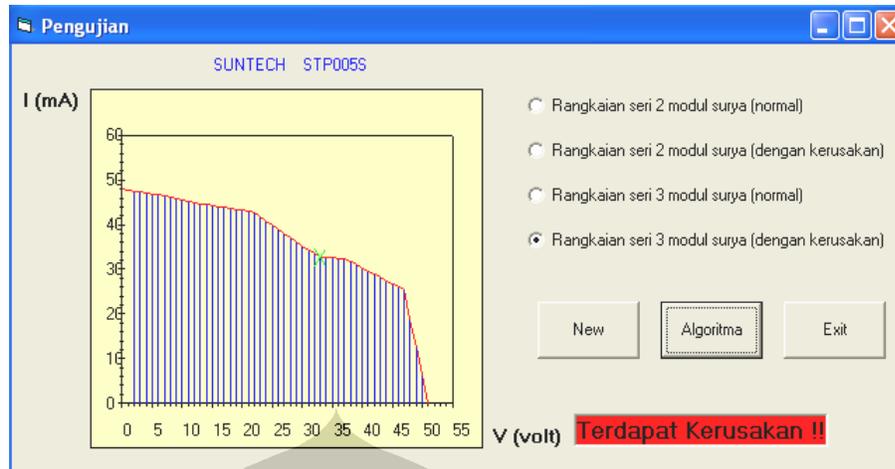
Gambar 4.27 Perbandingan hasil simulasi dengan hasil pengukuran untuk rangkaian seri tiga modul surya pada kondisi dengan kerusakan pada salah satu modul surya

Program VB6.0 pada Gambar 4.27 disimulasikan dengan nilai *irradiance* $140\text{W}/\text{m}^2$ dan nilai suhu 80°C . Berdasarkan Gambar 4.27, maka terlihat bahwa perbedaan antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi terletak pada kemiringan kurva dan *knee* kurva. Perbedaan hasil simulasi terhadap hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perbedaan Hasil Simulasi Terhadap Hasil Pengukuran Untuk Rangkaian Tiga Modul Surya Pada Kondisi Dengan Kerusakan Pada Salah Satu Modul

| V (volt) | I simulasi (mA) | I pengukuran m(A) | % beda |
|-------------|-----------------|-------------------|--------|
| 0 | 50 | 48 | 4 |
| 9 | 50 | 46 | 8 |
| 14 | 50 | 44,4 | 11,2 |
| 22 | 50 | 42,7 | 14,6 |
| 30 | 50 | 35,1 | 29,8 |
| 33 | 42 | 32,7 | 22,14 |
| 34 | 40 | 32,6 | 18,5 |
| 37 | 30 | 32,4 | 8 |
| 47 | 30 | 25,3 | 15,67 |
| 51 | 0 | 0,1 | 0 |
| Rata-rata = | | | 13,19 |

Rata-rata perbedaan antara kedua kurva, dilihat dari Tabel 4.18 adalah sebesar 13,19%. Namun, kedua kurva masih memiliki kontur yang sama, sehingga algoritma deteksi tetap dapat digunakan. Hasil pengujian algoritma deteksi untuk data hasil pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Hasil pengujian algoritma deteksi dengan data pengukuran dari rangkaian seri tiga modul surya dengan kerusakan pada salah satu modul

Algoritma mendeteksi adanya kerusakan modul dari parameter data hasil pengukuran. Bagian awal dari indikasi kerusakan ditandai dengan tanda silang hijau, yaitu bagian yang landai dari kurva karakteristik sistem. Hasil ini cocok dengan kondisi rangkaian modul pengujian, yaitu terdapat kerusakan pada modul kedua.

Pendeteksian kerusakan modul surya berdasarkan data hasil pengukuran memerlukan sedikit modifikasi pada algoritma. Modifikasi dilakukan pada bagian $I_n - I_{n+1} = 0$. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa bagian kurva horisontal memiliki I_n dan I_{n+1} yang datar sempurna, sehingga $I_n - I_{n+1} = 0$. Hasil pengukuran menunjukkan bagian horisontal kurva tidak datar sempurna, tetapi memiliki kemiringan yang perlu ditoleransi agar kemiringan ini tidak diidentifikasi sebagai kerusakan. Besarnya toleransi untuk pengujian pada modul surya STP005S adalah 0,7 mA.

BAB V KESIMPULAN

Dari hasil uji coba dan analisa didapat beberapa kesimpulan di bawah ini :

1. Hasil simulasi PSpice 9.1 menggambarkan bahwa kerusakan modul surya pada rangkaian modul surya seri dan paralel menyebabkan "jenjang / *ladder*" pada kurva karakteristik V-I. Hasil ini sama dengan kajian literatur[3,5]. "Jenjang / *ladder*" ini dapat dijadikan sebagai indikasi terjadinya kerusakan modul surya.
2. Dari simulasi didapatkan bahwa penurunan daya pada sistem energi surya akibat kerusakan modul surya tidak linear terhadap penurunan daya per-modulnya.
3. Simulasi algoritma pendeteksi kerusakan modul surya pada sistem energi surya telah dapat mendeteksi kerusakan modul surya dengan pengujian pada simulasi dan pengujian berdasarkan data hasil pengukuran pada rangkaian dua modul surya dan rangkaian tiga modul surya STP005S sesuai dengan spesifikasi berikut :
 - Mendeteksi kerusakan modul dengan parameter *ladder*.
 - Variabel yang diatur pada algoritma adalah tegangan.
4. Pengujian algoritma berdasarkan hasil pengukuran pada rangkaian dua modul surya dan rangkaian tiga modul surya STP005S memerlukan modifikasi pada algoritma, yaitu toleransi kemiringan pada kurva horisontal sebesar 0,7 mA.
5. Hasil simulasi rangkaian modul surya pada VB6.0 memiliki kontur kurva yang sama dengan data hasil pengukuran. Perbedaan antara keduanya terjadi pada *knee* kurva dan kemiringan kurva sebesar 3,53% sampai dengan 13,19%.

DAFTAR ACUAN

- [1] Martin A.Green, *SolarCells : Operating Principles, Technology and System Applications* (New South Wales: Prentice Hall, 1998), hal. 63
- [2] Christiana Honsberg, Stuart Bowden, *Photovoltaic: Devices, Systems, and Application PVCDROM 1.0* (University of New South Wales, 1998)
- [3] Luis Castaner, Santiago Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice* (West Sussex: John Wiley & Sons, 2002), hal.2, 50
- [4] EFG-Solar Cell. *Datasheet EFG12526*. Diakses 26 Oktober 2007 dari SCHOTT Solar.
www.schott.com/photovoltaic/english/download/efg_125x125_e_0706.pdf
- [5] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, *Applied Photovoltaics* (University of New South Wales), hal. 36, 38, 71-76
- [6] Richard A. Cullen. *What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work*. Diakses 15 September 2007 dari Blue Sky Energy, Inc.
www.blueskyenergyinc.com/pdf/Blue%20Sky_What%20is%20MPPT.pdf
- [7] Trishan Efram, Patrick L. Chapman (2005). "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". Diakses 29 Agustus 2007.
<http://energy.ece.uiuc.edu/chapman/papers/EC%202006%20in%20press.pdf>
- [8] J.A. Gow, C.D. Manning (1999). "Development of Photovoltaic Array Model For Use in Power-Electronics Simulation Studies". *IEE Proceedings-Electr. Power Appl., Vol. 146, No. 2.*, pp.193-200. Diakses 15 September 2007.
www.itee.uq.edu.au/~walkerg/publications/2000/pvmodel_00.pdf

[9] Geoff Walker. "Evaluating MPPT Converter Topologies Using A Matlab PV Model". *Dept. of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland*. Diakses 18 September 2007.

www.itee.uq.edu.au/~walkerg/publications/2000/pvmodel_00.pdf

[10] Wikipedia (2007). *PSpice*. Diakses 20 September 2007, dari Wikimedia Foundation.

<http://en.wikipedia.org/wiki/PSpice>

[11] Wikipedia (2007). *Visual Basic*. Diakses 20 September 2007, dari Wikimedia Foundation.

http://en.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic

[12] Photovoltaic Modules. *Datasheet MSX60*. Diakses 26 Oktober 2007 dari Alldatasheet.

www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/202236/ETC/MSX60.html

[13] Photovoltaic Modules. *Datasheet ASE-50-ETF*. Diakses 26 Oktober 2007 dari Schott Solar.

www.crestaaustralia.com.au/products/brochures/ase-50-etf-17_e.pdf

[14] Photovoltaic Modules. *Datasheet STP005s-12Db*. Diakses 15 November 2007 dari Suntech.

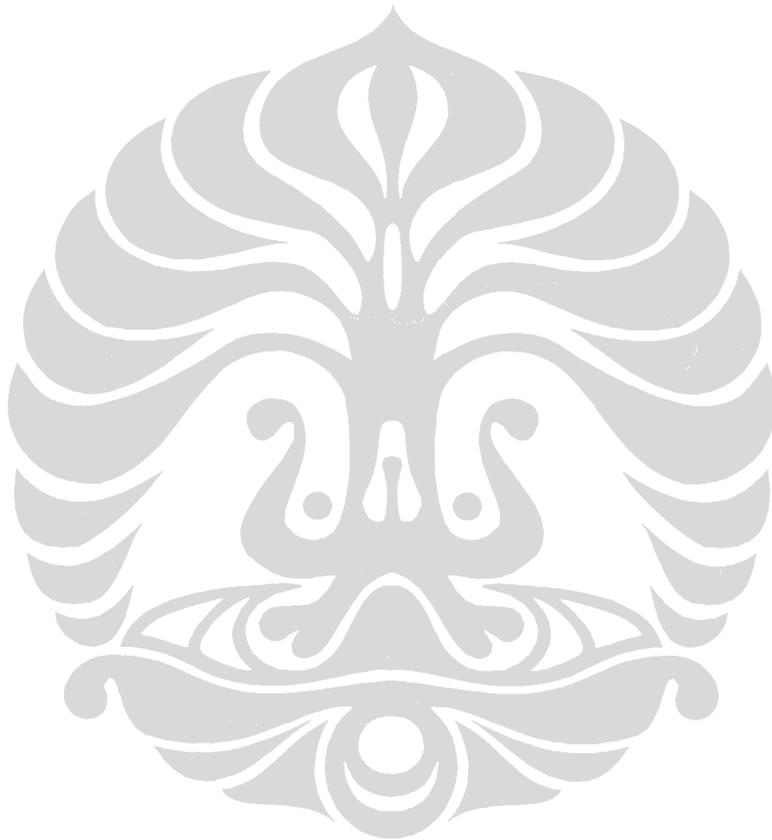
www.suntech-power.com/docs/STP005s-12Db.pdf

DAFTAR PUSTAKA

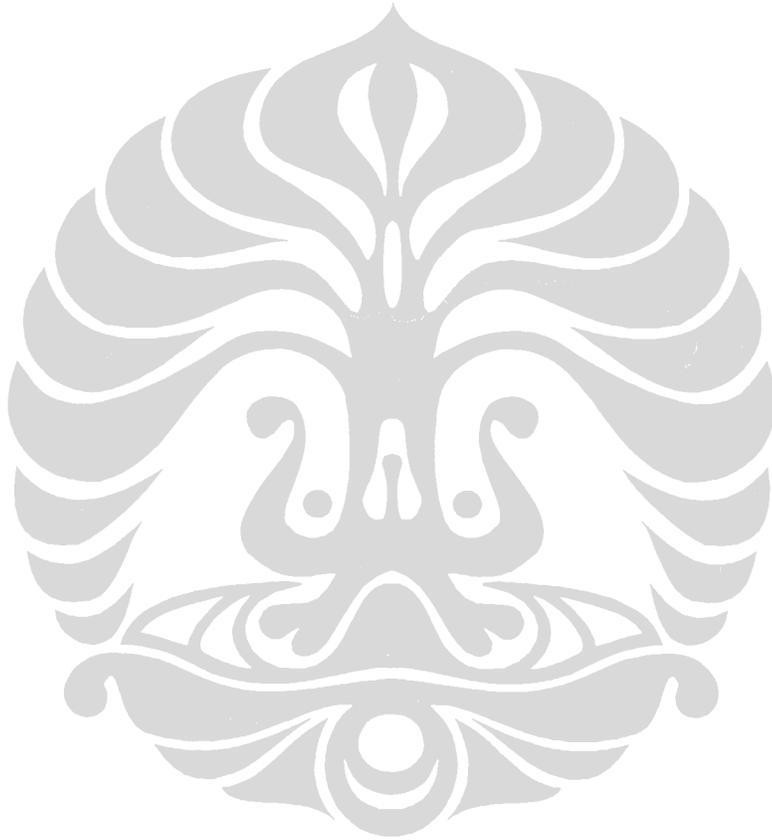
- C. Honsberg, S. Bowden, *Photovoltaic: Devices, Systems, and Application PVCDROM 1.0* (University of New South Wales, 1998)
- EFG-Solar Cell. *Datasheet EFG12526*. Diakses 26 Oktober 2007 dari SCHOTT Solar.
www.schott.com/photovoltaic/english/download/efg_125x125_e_0706.pdf
- Green, Martin A., *SolarCells : Operating Principles, Technology and System Applications* (New South Wales: Prentice Hall, 1998)
- J.A. Gow, C.D. Manning (1999). "Development of Photovoltaic Array Model For Use in Power-Electronics Simulation Studies". *IEE Proceedings-Electr. Power Appl.*, Vol. 146, No. 2., pp.193-200
- L. Castaner, S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice* (West Sussex: John Wiley & Sons, 2002)
- Nugroho, Adi. "Rancang Bangun Perangkat Lunak Simulator Modul Sel Surya (SMSS)." Tugas Akhir, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2006.
- Pressman, Roger S., *SOFTWARE ENGINEERING : A Practitioner's Approach – 6th ed.* (The McGraw-Hill Companies, 2005)
- S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, *Applied Photovoltaics* (University of New South Wales)
- T. Efram, P.L. Chapman (2005). "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". Diakses 29 Agustus 2007.
<http://energy.ece.uiuc.edu/chapman/papers/EC%202006%20in%20press.pdf>

Walker, Geoff. "Evaluating MPPT Converter Topologies Using A Matlab PV Model". *Dept. of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland*. Diakses 18 September 2007.

www.itee.uq.edu.au/~walkerg/publications/2000/pvmodel_00.pdf

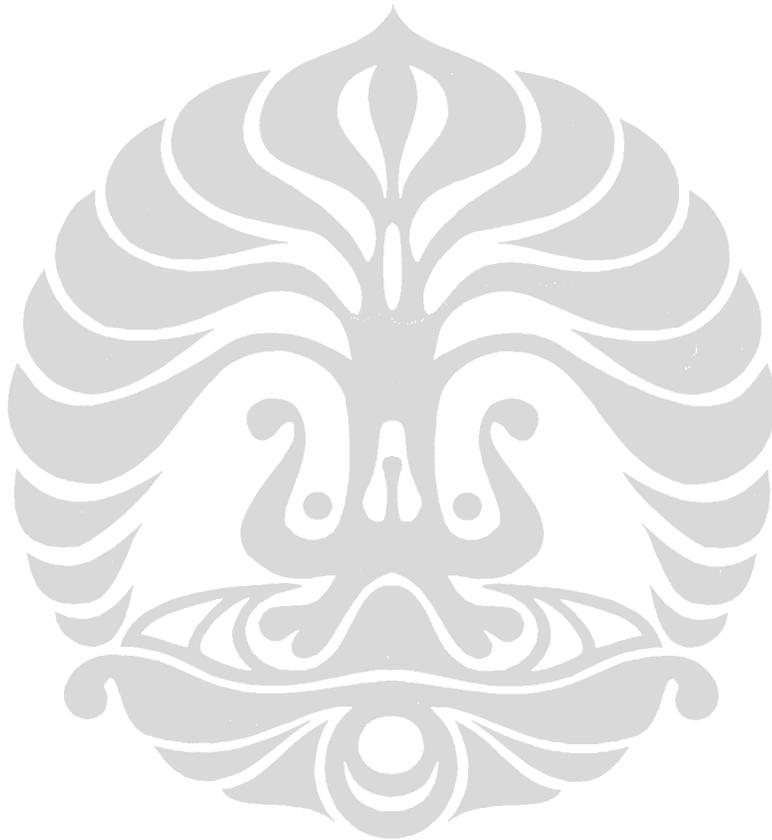


LAMPIRAN

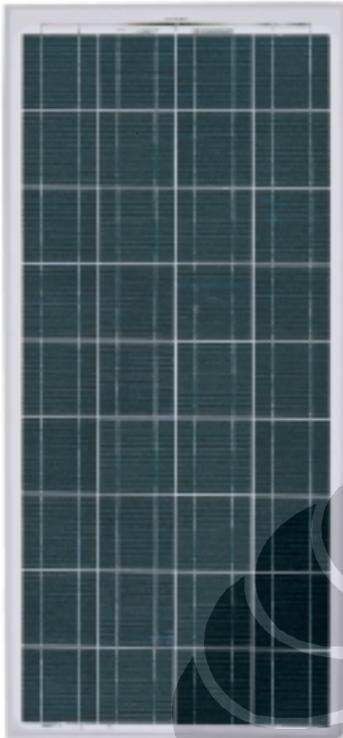


LAMPIRAN 1

Datasheet Solarex MSX-60



Solar module with EFG cells



- Narrow output tolerance
- Long-term stability
- Allround module
- EFG-Technology

ASE-50-ETF/17

Module type key:

E = EVA
T = Tedlar
F = framed

Narrow output tolerance: A very narrow module output selection permits serial connection with low connection losses.

Long-term stability: The module developed by SCHOTT Solar meets the latest technical standards. The use of state-of-the-art materials ensure long service life, even under extreme climatic conditions.

Allround module: The module is easy to handle, robust and suitable for a broad range of applications. Module dimensions of 975 mm x 452 mm provide for simple expansion of existing systems. The module is delivered with an anodized aluminum frame with four mounting holes on the outside of the frame.

EFG-Technology: The patented EFG-Technology employed by SCHOTT Solar provides for highly economical wafer-production and low raw-material consumption.

SCHOTT Solar produces high-performance modules in energy output classes 50 Wp and higher. High-quality crystalline EFG and MAIN cells ensure maximum energy yield. These modules have been awarded top ratings in a number of independent studies and surveys. Every module type is designed – from frame to connection box – for cost-effective system integration.

SCHOTT
solar

Technical Data

Electrical data

The electrical data apply to standard test conditions (STC):
Irradiance at the module level of 1.000 W/m² with spectrum AM 1.5 and a cell temperature of 25 °C.



| | | | |
|--------------------------------|------------------|--------|--------|
| Nominal power | P _{nom} | 50 Wp | 45 Wp |
| Voltage at maximum-power point | U _{mpp} | 17.2 V | 17.0 V |
| Current at maximum-power point | I _{mpp} | 2.9 A | 2.65 A |
| Open-circuit voltage | U _{oc} | 20 V | 20 V |
| Short-circuit current | I _{sc} | 3.2 A | 2.9 A |

All electrical data ± 10%.

Dimensions and weights

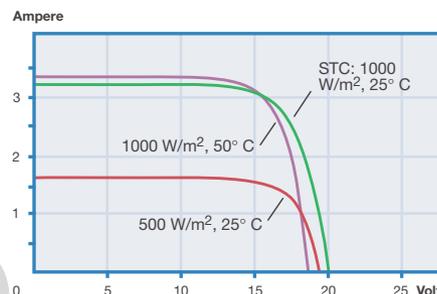


| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Dimensions (tolerances ± 2 mm) | 975 x 452 mm ² |
| Thickness with frame | 34.5 mm |
| Weight | approx. 6.1 kg |

Characteristic data



| | |
|------------------------|---|
| Solar cells per module | 36 |
| Type of solar cell | EFG solar cell (multi-crystalline, 10 x 10 cm ² , full-square) |
| Connection | Connection box with screw terminals and two bypass diodes |
| Cable Entry | Prepared for cable glands (M12) |



Current/voltage characteristics with dependence on irradiance and module-temperature.

Temperature coefficients



| | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------|
| Power | T _K (P _n) | - 0.47 % / °C |
| Open-circuit voltage | T _K (U _{oc}) | - 0.38 % / °C |
| Short-circuit current | T _K (I _{sc}) | + 0.10 % / °C |

Limits



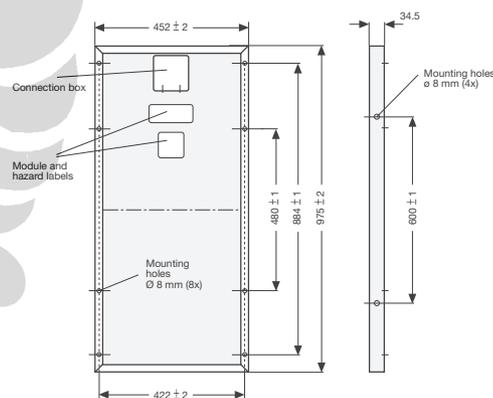
| | |
|------------------------------|---|
| Max. system voltage | 600 V _{DC} |
| Operating module temperature | - 40... + 90 °C |
| Max. load | 2400 N/m ² or 245 kg/m ² (IEC 61215) |

The right is reserved to make technical modifications.

Qualifications



The ASE-50-ETF/17 module complies with the requirements of IEC 61215 and the EWG guideline 89/392 (CE).



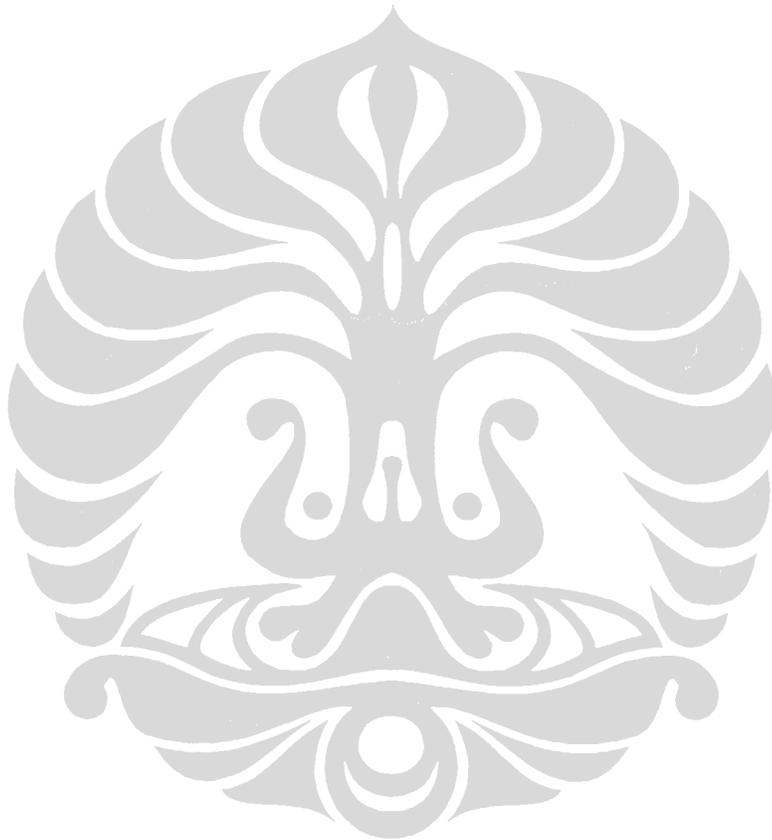
MANAGEMENT SYSTEM
Certified by DQS according to
DIN EN ISO 9001:2000 · Reg.-No. 2184
DIN EN ISO 14001:1996 · Reg.-No. 2184

SCHOTT Solar GmbH
Carl-Zeiss-Strasse 4
63755 Alzenau
Germany
Phone: +49(0) 60 23 / 91 - 05
Fax: +49(0) 60 23 / 91 - 17 00
E-Mail: solar.sales@schott.com
www.schott.com/solar



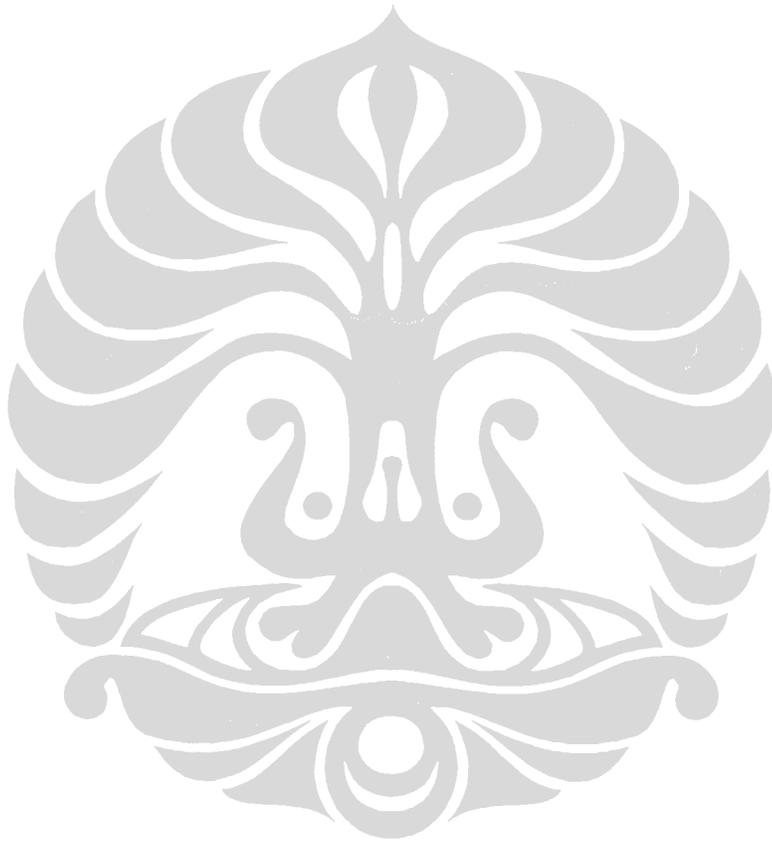
LAMPIRAN 1 (LANJUTAN)

Datasheet Solarex MSX-60



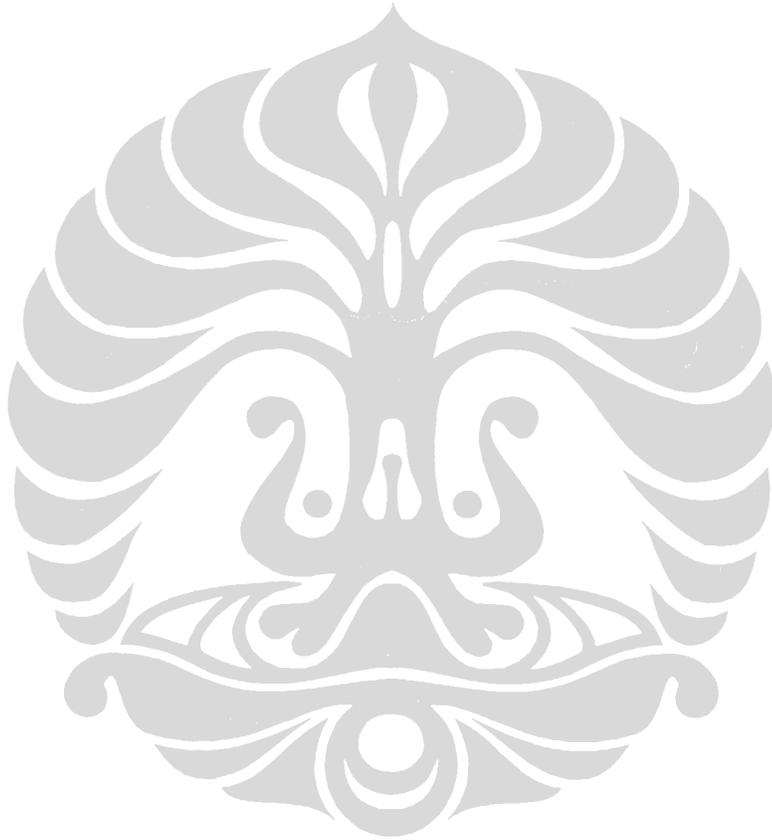
LAMPIRAN 1 (LANJUTAN)

Datasheet Solarex MSX-60



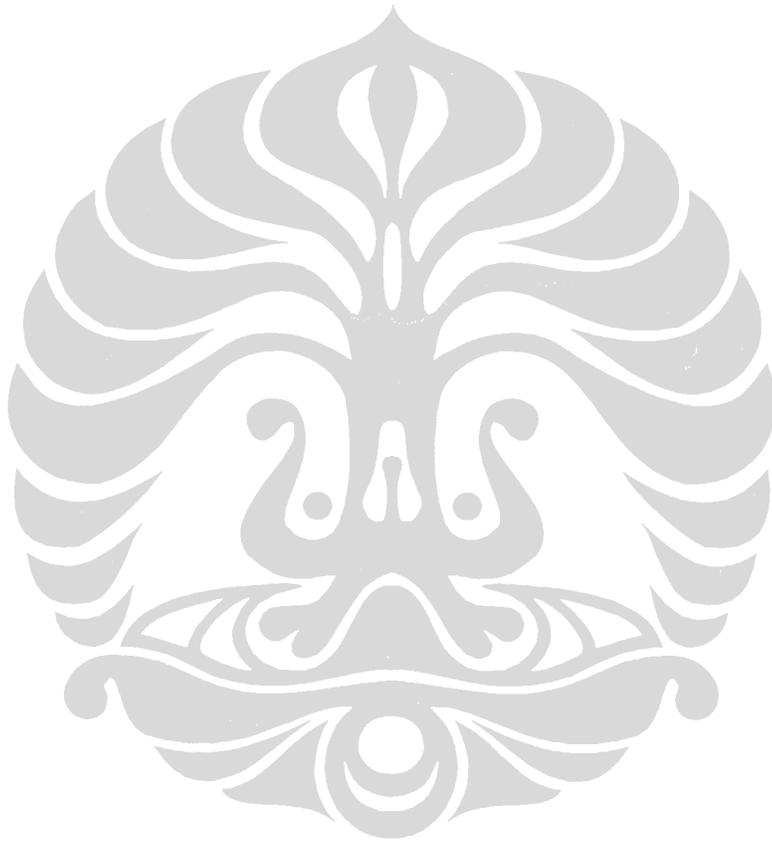
LAMPIRAN 1 (LANJUTAN)

Datasheet Solarex MSX-60



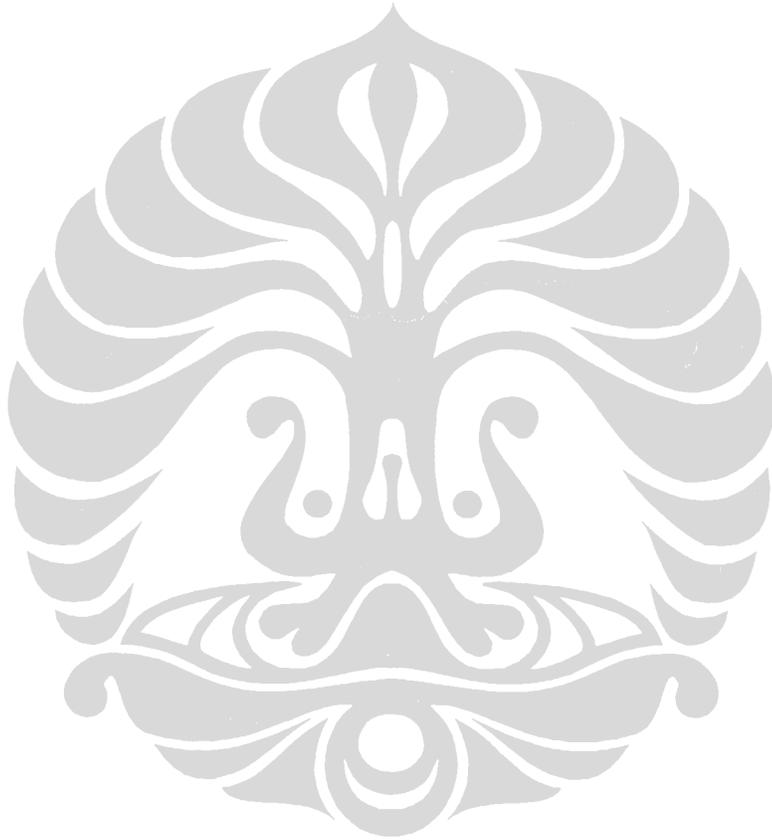
LAMPIRAN 2

Datasheet Schott Solar ASE-50-ETF

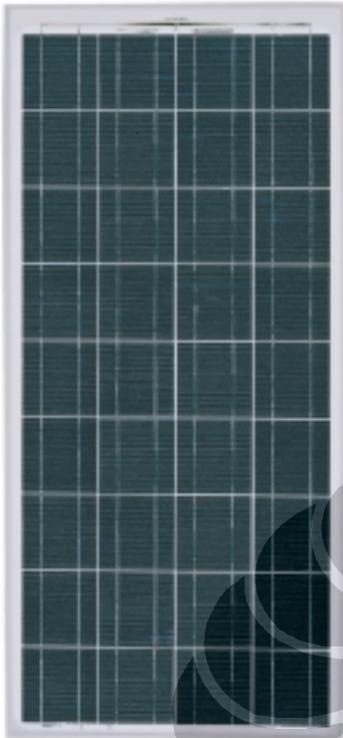


LAMPIRAN 2 (LANJUTAN)

Datasheet Schott Solar ASE-50-ETF



Solar module with EFG cells



- Narrow output tolerance
- Long-term stability
- Allround module
- EFG-Technology

ASE-50-ETF/17

Module type key:

E = EVA
T = Tedlar
F = framed

Narrow output tolerance: A very narrow module output selection permits serial connection with low connection losses.

Long-term stability: The module developed by SCHOTT Solar meets the latest technical standards. The use of state-of-the-art materials ensure long service life, even under extreme climatic conditions.

Allround module: The module is easy to handle, robust and suitable for a broad range of applications. Module dimensions of 975 mm x 452 mm provide for simple expansion of existing systems. The module is delivered with an anodized aluminum frame with four mounting holes on the outside of the frame.

EFG-Technology: The patented EFG-Technology employed by SCHOTT Solar provides for highly economical wafer-production and low raw-material consumption.

SCHOTT Solar produces high-performance modules in energy output classes 50 Wp and higher. High-quality crystalline EFG and MAIN cells ensure maximum energy yield. These modules have been awarded top ratings in a number of independent studies and surveys. Every module type is designed – from frame to connection box – for cost-effective system integration.

SCHOTT
solar

Technical Data

Electrical data

The electrical data apply to standard test conditions (STC):
Irradiance at the module level of 1.000 W/m² with spectrum AM 1.5 and a cell temperature of 25 °C.



| | | | |
|--------------------------------|------------------|--------|--------|
| Nominal power | P _{nom} | 50 Wp | 45 Wp |
| Voltage at maximum-power point | U _{mpp} | 17.2 V | 17.0 V |
| Current at maximum-power point | I _{mpp} | 2.9 A | 2.65 A |
| Open-circuit voltage | U _{oc} | 20 V | 20 V |
| Short-circuit current | I _{sc} | 3.2 A | 2.9 A |

All electrical data ± 10%.

Dimensions and weights

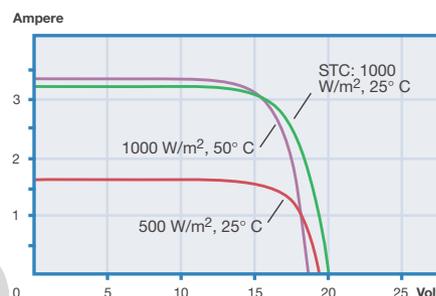


| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Dimensions (tolerances ± 2 mm) | 975 x 452 mm ² |
| Thickness with frame | 34.5 mm |
| Weight | approx. 6.1 kg |

Characteristic data



| | |
|------------------------|---|
| Solar cells per module | 36 |
| Type of solar cell | EFG solar cell (multi-crystalline, 10 x 10 cm ² , full-square) |
| Connection | Connection box with screw terminals and two bypass diodes |
| Cable Entry | Prepared for cable glands (M12) |



Current/voltage characteristics with dependence on irradiance and module-temperature.

Temperature coefficients



| | | |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------|
| Power | T _K (P _n) | - 0.47 % / °C |
| Open-circuit voltage | T _K (U _{oc}) | - 0.38 % / °C |
| Short-circuit current | T _K (I _{sc}) | + 0.10 % / °C |

Limits



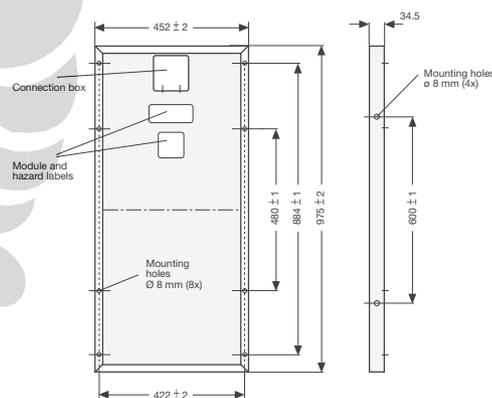
| | |
|------------------------------|---|
| Max. system voltage | 600 V _{DC} |
| Operating module temperature | - 40... + 90 °C |
| Max. load | 2400 N/m ² or 245 kg/m ² (IEC 61215) |

The right is reserved to make technical modifications.

Qualifications



The ASE-50-ETF/17 module complies with the requirements of IEC 61215 and the EWG guideline 89/392 (CE).



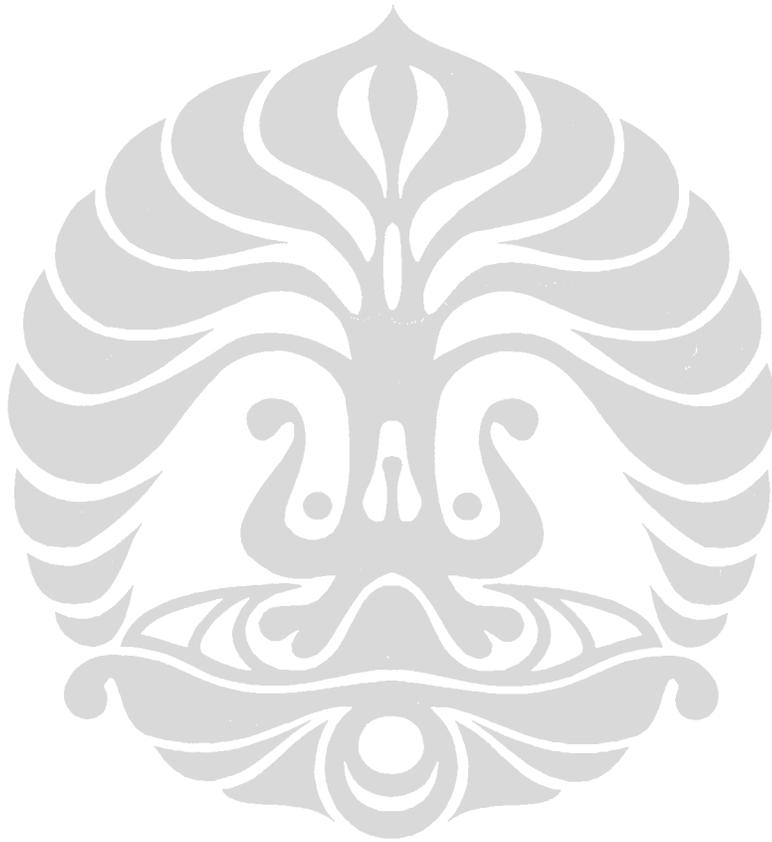
MANAGEMENT SYSTEM
Certified by DQS according to
DIN EN ISO 9001:2000 · Reg.-No. 2184
DIN EN ISO 14001:1996 · Reg.-No. 2184

SCHOTT Solar GmbH
Carl-Zeiss-Strasse 4
63755 Alzenau
Germany
Phone: +49(0) 60 23 / 91 - 05
Fax: +49(0) 60 23 / 91 - 17 00
E-Mail: solar.sales@schott.com
www.schott.com/solar



LAMPIRAN 3

Datasheet Swissco Solar STP005S-12/Db



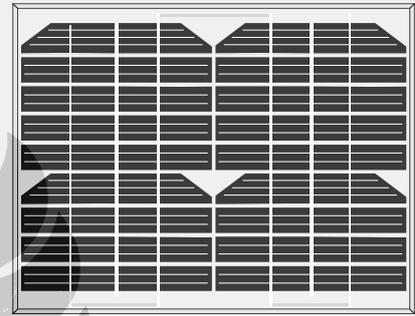
STP005S-12/Db

High Efficiency, High Quality PV Module

Suntech's STPDb features total efficiency of 7.6% Which delivers the maximum power output at peak hours. Ideal for off-grid and remote power systems. With a 25 year warranty, the module has high efficiency and long-lasting operating time even in a variety of rigorous conditions. Unique textured cell surface and bypass diode design is critical for the module to fully utilize and absorb sunlight and offer maximum usable power per square foot of solar array.

Features and benefits

- High efficiency
- Nominal 12 V DC for standard output
- Outstanding low-light performance
- High transparent low-iron, tempered glass
- Unique techniques give the panel following features: esthetic appearance, with stands high wind-pressure and snow load, and easy installation
- Unique technology ensure that problems of water freezing and warping do not occur
- Design to meet unique demand of customer
- 25 year module output warranty

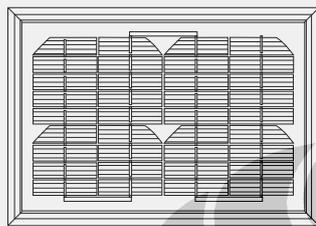


Electrical Characteristics

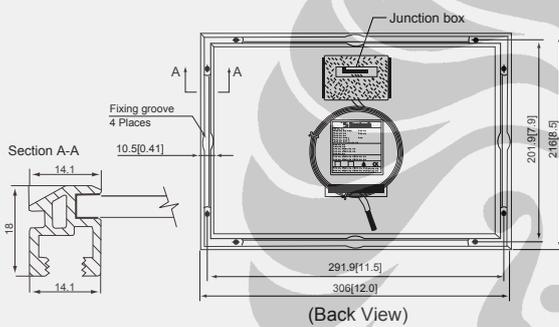
| Model | STP005S-12/Db |
|---------------------------------|----------------|
| Open-circuit voltage (Voc) | 21.6V |
| Optimum operating voltage (Vmp) | 17.4V |
| Short-circuit current (Isc) | 0.32A |
| Optimum operating current (Imp) | 0.29A |
| Maximum power at STC (Pmax) | 5Wp |
| Operating temperature | -40°C to +85°C |
| Maximum system voltage | 715V DC |

STC: Irradiance 1000W/m², Module temperature 25°C, AM=1.5

Module Diagram



(Front View)



(Back View)

Note: mm[inch]

Specifications

| | |
|------------------------------|---|
| Cell | Monocrystalline silicon solar cells 62.5mm×15.62mm |
| No. of cells and connections | 36(4×9) |
| Dimension of module | 216mm×306mm×18mm |
| Weight | 0.8kg |

Temperature Coefficients

| | |
|---|------------------|
| NOCT | 48°C±2°C |
| Short-circuit current temperature coefficient | (0.055±0.01) %/K |
| Open-circuit voltage temperature coefficient | -(78±10) mV/K |
| Peak power temperature coefficient | -(0.48±0.05) %/K |
| Power tolerance | ±10% |

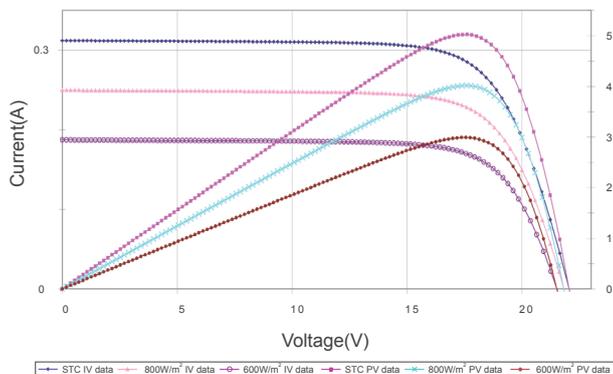
NOCT: Nominal Operating Cell Temperature
(the data is only for reference)

Output

| | |
|---------|-------------------|
| Cable | YUSHENG(18AWG×2C) |
| Lengths | 3000mm |

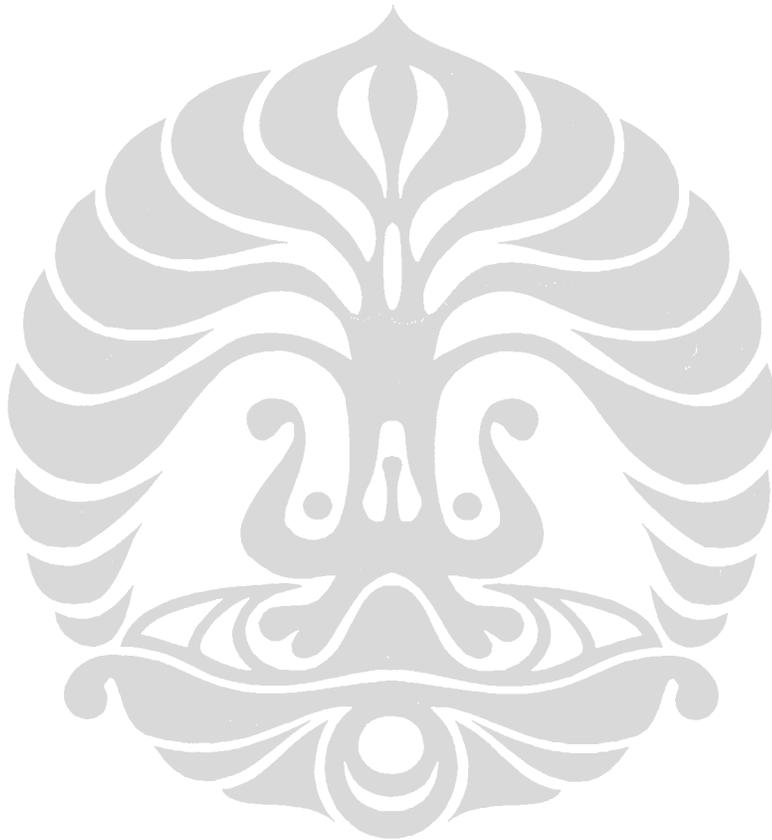
Characteristics

Module IV Graph 5W



LAMPIRAN 3 (LANJUTAN)

Datasheet Swissco Solar STP005S-12/Db



LAMPIRAN 4 PENGUKURAN RANGKAIAN MODUL SURYA

