



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PENGUJIAN DAN VALIDASI MODEL
FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN PENDEKATAN
*SINGLE DIODE DAN DOUBLE DIODE***

**AULIA PERDANA SARI
NRP.2415105014**

**Dosen Pembimbing
Dr. Imam Abadi, ST. MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - TF141581

***TESTING AND VALIDATION OF
PHOTOVOLTAIC MODELS USING SINGLE
DIODE AND DOUBLE DIODE***

**AULIA PERDANA SARI
NRP.2415105014**

Supervisors
Dr. Imam Abadi, ST. MT.

***DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017***

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aulia Perdana Sari

NRP : 2415105014

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul "PENGUJIAN DAN VALIDASI MODEL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN PENDEKATAN *SINGLE DIODE* DAN *DOUBLE DIODE*" adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, Juli 2017

Yang membuat pernyataan,



Aulia Perdana Sari

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENGUJIAN DAN VALIDASI MODEL
FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN PENDEKATAN
SINGLE DIODE DAN DOUBLE DIODE**

TUGAS AKHIR

Oleh :

Aulia Perdana Sari

NRP : 2415105014

Surabaya, Juli 2017

Mengetahui / Menyetujui

Pembimbing



Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

NIP. 19761006 199903 1 002

Ketua Departemen Teknik Fisika



Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENGUJIAN DAN VALIDASI MODEL
FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN PENDEKATAN
SINGLE DIODE DAN DOUBLE DIODE**

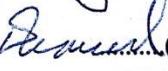
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Aulia Perdana Sari
NRP. 2415105014

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. .....(Pembimbing)
2. Hendra Cordova, S.T., M.T. .....(Ketua Tim Penguji)
3. Ir. Ya'umar, M.T. .....(Penguji 1)
4. Ir. Tutug Dhanardono, M.T. .....(Penguji 2)

SURABAYA
Juli, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGUJIAN DAN VALIDASI MODEL FOTOVOLTAIK MENGUNAKAN PENDEKATAN *SINGLE DIODE* DAN *DOUBLE DIODE*

Nama Mahasiswa : Aulia Perdana Sari
NRP : 2415105014
Program Studi : S1 LJ-Teknik Fisika
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Imam Abadi, ST, MT

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang dilewati garis khatulistiwa. Intensitas cahaya matahari yang tinggi pada setiap harinya sehingga Indonesia memiliki potensi yang sangat besar dalam hal pemanfaatan sumber energi terbarukan. Hal tersebut dapat dimanfaatkan untuk membangun sebuah PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik khususnya di daerah terpencil. Modul fotovoltaik dalam mengkonversi energi memiliki peran utama sehingga fotovoltaik harus memiliki model yang baik. Penelitian ini melakukan pemodelan fotovoltaik menggunakan pendekatan *single dioda* dan *double dioda*. Dalam melakukan pemodelan fotovoltaik terdapat parameter-parameter yang harus diketahui. Mendapatkan nilai parameter dilakukan dengan simulasi oleh Matlab. Validasi dilakukan dengan menggunakan metode *math numerical*. Pengujian dilakukan dengan pengambilan data secara langsung dan kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi. Dari hasil pengujian simulasi didapatkan rata-rata eror dari daya puncak tertinggi kurva karakteristik pada *single dioda* sebesar 7,26%, dan *double dioda* sebesar 4,504%. Pada hasil pengujian didapatkan hasil bahwa pendekatan dengan *double dioda* lebih memiliki persen error yang kecil.

Kata kunci : Energi terbarukan, Modul Fotovoltaik, *Single Dioda, Double Dioda*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**TESTING AND VALIDATION OF PHOTOVOLTAIC
MODELS USING SINGLE DIODE AND DOUBLE DIODE**

Name : Aulia Perdana Sari
NRP : 2415105014
Study of Program : S1 LJ-Engineering Physics
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : Dr. Imam Abadi, ST, MT

Abstract

Indonesia is a country that passed by the equator line. High intensity of the sunlight in everyday made Indonesia has enormous potential in terms of utilization of renewable energy sources. It can be used to build a PLTS (Solar Power Station) to fulfill the needs of electrical energy especially in remote areas, photovoltaic modules in converting energy has a major role so that photovoltaic must have a fit model. This research performs photovoltaic modeling using single diode and double diode approaches. In doing photovoltaic modeling there are some parameters that must be known first. Getting parameter values done simulated by Matlab. Validation is done by using numerical math method. Testing is done by taking the data directly and then compared with the simulation result. From the simulation test results the average error of the highest peak power characteristic curve on single diode equal to 7,26%, and double diode equal to 4,504%. In the test results showed that the approach with a double diode has a smaller percentage of error.

Key word : Renewable energy, Modules Photovoltaic, Single Diode, Double Diode

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT atas berkah, rahmat, petunjuk, karunia, dan ridlo-Nya penulis mampu untuk melaksanakan dan menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul : **Pengujian Dan Validasi Model Fotovoltaik Menggunakan Pendekatan *Single Diode Dan Double Diode***

Selama pengerjaan tugas akhir ini penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Keluarga tercinta Ibu Nanik Rukmawati, Bapak Sajuri, Adik Faishal, atas doa, dorongan semangat, dukungan dan kasih sayang yang telah diberikan selama ini.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS.
3. Bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan motivasi, bimbingan dan arahan dengan sabar dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir.Purwadi Agus Darwito, MSc . selaku dosen wali yang telah memberikan dukungan dan bimbingan selama penulis menempuh studi bangku kuliah.
5. Teman-teman seperjuangan dari awal kuliah sampai tugas akhir Lintas Jalur Teknik Fisika angkatan 2015 yang selalu memberikan motivasi, keceriaan, kebahagiaan, kekonyolan.
6. Teman-teman Kos Cendrawasih (Mbak Susi, Mbak Fresi, Mbak Yeni, Mbak Jo) yang telah memberi semangat dalam suka dan duka selama menempuh kuliah sampai tugas akhir ini.
7. Teman-teman seperjuangan TA (lufi dan nadia) yang selalu memberi semangat, keceriaan, dan kebaikan hati selama pengerjaan.
8. Teman-teman asisten Laboratorium Pengukuran Fisis, mas Ahmadi, mas Adit atas ilmunya selama pengerjaan Tugas Akhir.

9. Andre Ridho S. yang selalu mendukung, memberi semangat, selalu ada disetiap membutuhkan bantuan, dan kasih sayang yang telah diberikan.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Sistematika Laporan	4
BAB II DASAR TEORI	7
2.1 Fotovoltaik	7
2.2 Tipe Fotovoltaik	9
2.3 Susunan Fotovoltaik	11
2.4 Pemodelan Modul Fotovoltaik.....	12
2.5 Karakteristik Fotovoltaik	15
2.6 Metode Newton Raphson	16
2.7 Perhitungan R_s , I_{ph} , I_d Menggunakan Metode Math Numerik	18
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Metode Penelitian.....	22
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Hasil Pemodelan Fotovoltaik.....	39
4.2 Validasi Parameter pada Simulasi.....	49
4.3 Pengujian Hasil Simulasi	53
BAB V PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	7
Gambar 2.2 Ilustrasi <i>p-n junction</i> pada sel fotovoltaik	9
Gambar 2.3 Sel Fotovoltaik <i>Monocrystal Silicon</i>	10
Gambar 2.5 Susunan fotovoltaik	11
Gambar 2.6 Rangkaian elektrik <i>single</i> dioda	12
Gambar 2.7 Rangkaian elektrik <i>double</i> dioda	14
Gambar 2.8 Karakteristik Sel Fotovoltaik Terhadap Perbedaan Radiasi	15
Gambar 2.9 Karakteristik Sel Fotovoltaik Terhadap Perbedaan Suhu	16
Gambar 2.10 Persamaan Garis Non-Linear dengan Metode Newton Raphson	17
Gambar 2.11 Karakteristik Kurva I(V)	20
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Pelaksanaan Tugas Akhir	21
Gambar 3. 2 Rangkaian Listrik dengan <i>Single</i> Dioda	24
Gambar 3. 3 Rangkaian Listrik Dengan Dua dioda	29
Gambar 3. 4 Simulasi Pada Matlab	36
Gambar 3. 5 Rangkaian sensor arus tegangan	38
Gambar 3. 6 Pengujian fotovoltaik secara eksperimental	38
Gambar 4. 1 Hasil Simulasi karakteristik I(V) Fotovoltaik dengan pendekatan <i>single</i> dioda	41
Gambar 4. 2 Hasil Simulasi Karakteristik P(V) Fotovoltaik dengan pendekatan <i>single</i> dioda	42
Gambar 4. 3 Variasi kenaikan suhu terhadap karakteristik I(V), pada radiasi 1000 W/m ²	43
Gambar 4. 4 Variasi kenaikan radiasi terhadap karakteristik I(V), pada suhu 25°C	44
Gambar 4. 5 Hasil Simulasi Karakteristik I(V) Fotovoltaik dengan pendekatan <i>double</i> dioda	47
Gambar 4. 6 Hasil Simulasi Karakteristik P(V) Fotovoltaik dengan pendekatan <i>double</i> dioda	48
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Karakteristik I(V) Antara Simulasi pendekatan <i>single</i> dioda dan <i>Math Numerical</i>	50

Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Karakteristik P(V) Antara Simulasi pendekatan <i>single</i> dioda dan <i>Math Numerical</i>	51
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Karakteristik I(V) Antara Simulasi pendekatan <i>double</i> dioda dan <i>Math Numerical</i>	52
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Karakteristik P(V) Antara Simulasi pendekatan <i>double</i> dioda dan <i>Math Numerical</i>	53
Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi <i>Single</i> Dioda pada Jam 9 Pagi	54
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi <i>Double</i> Dioda pada Jam 9 Pagi	55
Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi <i>Single</i> Dioda pada Jam 12 Siang	56
Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi <i>Double</i> Dioda pada Jam 12 Siang	57
Gambar 4. 15 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi <i>Single</i> Dioda pada Jam 15 Sore	58
Gambar 4. 16 Grafik Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi <i>Double</i> Dioda pada Jam 15 Sore	59

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Modul Fotovoltaik Tipe TN-20M.....	23
Tabel 3. 2 <i>Ideality Factor</i>	27
Tabel 3. 3 Nilai <i>Eg0, α, β</i>	28
Tabel 3. 4 <i>Ideality Factor</i>	33
Tabel 3. 5 Nilai <i>Eg0, α, β</i>	34
Tabel 4. 1 Hasil Parameter pada kondisi STC (Suhu 25°C dan Radiasi 1000 W/m ²)	40
Tabel 4. 2 Hasil Perbandingan Simulasi Dan Datasheet	43
Tabel 4. 3 Hasil Parameter pada kondisi STC (Suhu 25°C dan Radiasi 1000 W/m ²)	45
Tabel 4. 4 Hasil Perbandingan Simulasi Dan Datasheet	49
Tabel 4. 5 Validasi Hasil Simulasi Pendekatan <i>Single Dioda</i>	50
Tabel 4. 6 Validasi Hasil Simulasi Pendekatan <i>Double Dioda</i> ..	51
Tabel 4. 7 Hasil Nilai Error pada Simulasi <i>Single Dioda</i> dan Pengujian.....	60
Tabel 4. 8 Hasil nilai error pada simulasi <i>double dioda</i> dan Pengujian.....	61

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penelitian yang dilakukan yaitu mengenai energi terbarukan yang bersumber dari matahari. Matahari memiliki potensi yang besar bagi kebutuhan manusia. Energi matahari didapat dari panas yang merambat ke permukaan bumi. Penelitian yang telah ada menyatakan bahwa dengan mengubah intensitas matahari yang dikonversi dengan solar sel dapat menghasilkan energi listrik yang dapat berguna untuk manusia. Sumber energi terbarukan bersumber dari matahari dapat mensuplai energi surya yang diterima dari matahari ke permukaan bumi mencapai 3×10^{24} joule pertahun. Jumlah energi sebesar itu setara dengan 10.000 kali konsumsi energi di dunia. Cahaya matahari yang sangat melimpah di seluruh kepulauan Indonesia hampir sepanjang tahun merupakan sumber energi yang sangat potensial untuk dijadikan sebagai sumber energi listrik. (Yuliananda, Sarya, & Hastijanti, 2015)

Indonesia merupakan negara yang dilewati garis khatulistiwa merupakan negara beriklim tropis yang hanya memiliki dua musim yaitu musim kemarau dan musim hujan. Intensitas cahaya matahari yang tinggi pada setiap harinya sehingga Indonesia memiliki potensi yang sangat besar dalam hal pemanfaatan sumber energi terbarukan. Data yang telah disebutkan paparan matahari di wilayah sebelah barat terpapar energi surya sekitar 4,5 kWh/m²/hari dengan deviasi bulanan sebesar 10%. Wilayah sebelah timur memiliki paparan energi surya hingga 5,1 kWh/m²/hari dengan deviasi bulanan sekitar 9% (Veldhuis & Reinders, 2015). Hal tersebut dapat dimanfaatkan untuk membangun sebuah PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik khususnya di daerah terpencil.

Membangun sebuah PLTS dibutuhkan modul fotovoltaik sebagai komponen utama untuk mengkonversi cahaya matahari

menjadi sumber listrik. PLTS terdapat kendala yaitu efisiensi konversi modul fotovoltaik yang masih minim sehingga dibutuhkan area yang cukup luas untuk mencakupi daya yang diinginkan. Konfigurasi modul fotovoltaik diusahakan agar selalu mengeluarkan daya yang optimum agar efisiensinya tidak semakin berkurang (Tito, 2012). Oleh karena pentingnya modul fotovoltaik dalam hal tersebut sehingga fotovoltaik harus memiliki model yang baik dan akurat.

Modul fotovoltaik adalah peralatan yang mengubah cahaya menjadi listrik. Pemodelan fotovoltaik memerlukan pengambilan data cuaca yaitu radiasi dan suhu sebagai variabel *input* dan *output* berupa arus, tegangan dan daya (Habbati & Ramdani, 2014). Karakteristik dari sebuah sel fotovoltaik dinyatakan dengan kurva arus – tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V). Penelitian oleh (Mboumboue & Njomo, 2013) sebelumnya telah melakukan pemodelan pada sel fotovoltaik dengan menggunakan pendekatan *single diode* dan *double diode* yang dilanjutkan dengan melakukan pemodelan pada modul fotovoltaik dan *array model* fotovoltaik, penelitian ini terdapat kekurangan yaitu hanya melakukan pemodelan dengan *single diode*. Penelitian oleh (Habbati & Ramdani, 2014) dalam melakukan pemodelan pada sel fotovoltaik didapatkan hasil daya yang paling baik yaitu dengan $R_s = 0,45 \text{ Ohm}$, $R_p = 310,0248 \text{ Ohm}$. Pada penelitian (Vivek, S.C, & Yashwant, 2015) melakukan pemodelan pada sel fotovoltaik *single diode* dan *double diode* pada tipe fotovoltaik BP Solarex MSX-120 dari penelitian didapat bahwa dengan pendekatan *double diode* mendapatkan hasil keluaran grafik I-V dan P-V yang akurat.

Pemodelan fotovoltaik terdapat parameter-parameter yang harus diketahui. Jumlah parameter yang tidak diketahui meningkat ketika rangkaian dengan model yang dipilih jauh dari bentuk ideal. Kebanyakan dari datasheet tidak memberikan informasi yang cukup tentang parameter yang tergantung pada kondisi cuaca (radiasi dan suhu). Jadi, ada beberapa asumsi sehubungan dengan sifat fisik dari perilaku sel yang diperlukan

untuk membangun model fotovoltaiik. Karakteristik $I(V)$ merupakan persamaan non linear dengan beberapa parameter yang harus diketahui dan dihitung secara akurat yaitu resistensi seri, resistensi *parallel*, *photocurrent* (I_{ph}), arus saturasi (I_0) dan faktor idealistis (A) (Habbati & Ramdani, 2014). Model yang dipilih yaitu pendekatan model *single diode* dan *double diode* secara analitik menggunakan metode persamaan matematika dan dilakukan validasi yang merupakan metode untuk mengetahui ketepatan dari simulasi yang dibuat dalam mengukur keluaran dari fotovoltaiik dengan melakukan perbandingan menggunakan persamaan *numerical*, selain itu juga dilakukan pengujian yang merupakan proses yang bertujuan untuk memastikan apakah sistem bekerja dengan baik dan mencari kesalahan yang mungkin terjadi pada sistem (Anonim, 2013). Oleh karena itu pada penelitian ini melakukan pemodelan pada fotovoltaiik dengan tipe TN-20M dan dilakukan suatu pengujian secara *real time* untuk mengetahui model yang mendekati secara akurat.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang diangkat dalam Tugas Akhir ini yaitu :

1. Bagaimana menentukan nilai parameter-parameter dari sebuah modul fotovoltaiik yang digunakan untuk melakukan pemodelan berdasarkan topologi *current circuit* model *single diode* dan *double diode* ?
2. Bagaimana melakukan validasi model melalui pengujian fotovoltaiik secara langsung ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Modul fotovoltaiik yang digunakan untuk pengujian secara *real time* dengan tipe TN-20M.
2. Model yang dikembangkan merupakan multi input dan multi output (MIMO).
3. Melakukan pemodelan modul fotovoltaiik dengan menggunakan *software Matlab*.

4. Pengujian yang dilakukan meliputi penentuan karakteristik sel fotovoltaik yang dinyatakan dengan kurva arus-tegangan (I-V).
5. Beberapa data parameter yang digunakan untuk pemodelan didapatkan dari spesifikasi PV tipe TN-20M.
6. Tipe PV TN-20 M menggunakan bahan silikon monocrystal.

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan pemodelan modul fotovoltaik secara analitik melalui pendekatan *single diode* dan *double diode*.
2. Melakukan pengujian dan validasi model fotovoltaik melalui uji fotovoltaik secara langsung.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini disusun secara sistematis, tersusun beberapa bab sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan serta sistematika laporan dari tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab tinjauan pustaka ini berisi dasar teori yang terkait dengan tugas akhir tentang model fotovoltaik dengan menggunakan pendekatan *single diode* dan *double diode*. Pada bab ini terdiri dari dasar teori tentang fotovoltaik, modul fotovoltaik, pemodelan *single diode* dan *double diode* dan karakteristik fotovoltaik.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian yang dimulai pengambilan data pengukuran, pemodelan fotovoltaik dengan pendekatan

single diode dan *double diode*, simulasi, pengujian dan validasi.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil simulasi model fotovoltaik dengan software Matlab, analisa hasil kurva $I(V)$ dan $P(V)$ yang menjadi keluaran dari model fotovoltaik. Hasil respon keluaran nilai R_s terhadap kurva $I(V)$ dan $P(V)$.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil pemodelan fotovoltaik dan saran peneliti.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Fotovoltaik

Sel fotovoltaik merupakan semikonduktor yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik tanpa menggunakan bahan bakar dan alat mekanis. Sel fotovoltaik terbuat dari *silicon (Si)*, *gallium arsenide (GaAs)*, *copper indium diselenide (CIS)*, *cadmium telluride (CdTe)* dan sebagian kecil material lainnya. Beda potensial tegangan pada sel fotovoltaik menyebabkan elektron bergerak. Elektron yang bergerak inilah yang disebut sebagai arus listrik (Nugraha & Abadi, 2016).

Fotovoltaik dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama cocok digunakan apabila listrik sedang mati atau tidak tersedia seperti diwilayah terpencil yang memiliki akses yang sulit untuk dijangkau oleh listrik dari pembangkit pln, selain itu dapat dimanfaatkan untuk satelit pengorbit bumi, kalkulator genggam, dll. Umumnya modul fotovoltaik ini digunakan sebagai sumber listrik dari energi surya sebagai pengganti sumber listrik dari bahan bahan bakar fosil yang dapat mengeluarkan daya ratusan watt hingga mega watt. Penerapan modul fotovoltaik yang sekarang terus dikembangkan menjadi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)
Sumber : (Perdana, 2012)

2.1.1 Efek Fotovoltaik

Sistem fotovoltaik bekerja dengan prinsip efek fotovoltaik. Efek fotovoltaik pertama kali ditemukan oleh Henri Becquerel pada tahun 1839. Efek ini adalah peristiwa dimana suatu sel fotovoltaik dapat menyerap energi cahaya dan merubahnya menjadi energi listrik yang menyebabkan munculnya voltase akibat kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat diletakkan di bawah energi matahari (Goetzberger & Hoffman, 2005).

Energi atau radiasi cahaya yang didalamnya terdapat foton-foton yang memiliki tingkat energi yang berbeda-beda akan dibiaskan, diserap atau diteruskan ketika mengenai sel fotovoltaik. Foton yang dimiliki energi surya ini yang akan memicu timbulnya energi listrik. (Handini, 2008)

2.1.2 Mekanisme Konversi Energi

Pada dasarnya mekanisme konversi energi cahaya terjadi akibat adanya perpindahan elektron bebas didalam suatu atom. Konduktifitas elektron atau kemampuan transfer elektron dari suatu material terletak pada banyaknya elektron valensi dari suatu material. (Handini, 2008)

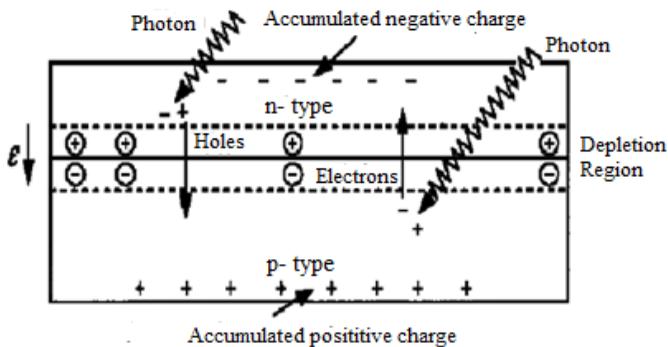
Sel fotovoltaik pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghasil elektron bebas. Material semikonduktor adalah suatu padatan (solid) dan seperti logam, konduktifitas elektriknya juga ditentukan oleh elektron valensinya (Goetzberger & Hoffman, 2005). Namun berbeda dengan logam yang konduktifitasnya menurun dengan kenaikan temperatur, material semikonduktor konduktifitasnya akan meningkat secara *significant*. Mekanisme kerja fotovoltaik dijelaskan secara singkat seperti berikut (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008):

- a. Foton dalam cahaya matahari mengenai panel solar dan diserap oleh bahan semikonduktor, seperti silicon
- b. Elektron (muatan negatif) dilepaskan dari atomnya memungkinkan elektron-elektron ini untuk mengalir melalui material untuk memproduksi listrik. Muatan positif terbentuk (seperti gelembung) disebut *hole* dan

mengalir ke arah yang berlawanan dengan elektron didalam silikon fotovoltaik yang akan menghasilkan energi listrik internal.

- c. Kemudian elektron akan bergerak menjauhi sisi negatif sedangkan *hole* bergerak menjauhi sisi positif. Kemudian fotovoltaik dihubungkan dengan sebuah beban lampu maka akan tercipta sebuah arus listrik. (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008)

Secara ilustrasi mekanisme konversi energi fotovoltaik dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Ilustrasi *p-n junction* pada sel fotovoltaik
Sumber : (Mboumboue & Njomo, 2013)

2.2 Tipe Fotovoltaik

Fotovoltaik disusun oleh material sel semikonduktor yang memiliki jenis bahan material sel yang memiliki bermacam-macam jenis. Dari jenis material yang digunakan, semakin lama semakin murah dalam harga dan semakin efektif dan efisien dalam penyerapan energi radiasi cahaya matahari. Selain itu perkembangan sel fotovoltaik juga berpengaruh pada estetika luar bangunan yang terus memiliki bentuk dasar dan warna sel yang beragam. Berikut merupakan jenis material sel fotovoltaik (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008) :

- *Monocrystalline Silicone*

Tipe ini merupakan tipe sel fotovoltaik yang paling efektif dan efisiensi menyerap energi dari radiasi sinar matahari yaitu sebesar 15%. Terbuat dari silikon dengan satu struktur kristal yang kontinu. *Monocrystal silicon* merupakan sel fotovoltaik yang paling mahal dari segi harga karena pembuatannya yang masih rumit (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008). Bentuk dari fotovoltaik *monocrystal silicon* dapat dilihat pada Gambar 2.3 .



Gambar 2.3 Sel Fotovoltaik *Monocrystal Silicon*

Sumber : (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008)

- *Polycrystal Silicone*

Merupakan tipe sel yang cukup efisien dalam menyerap energi radiasi sinar matahari yaitu sekitar 12%. Terbuat dari berbagai macam serat kristal silikon seperti lembaran silikon, *stainless steel*, keramik dan kaca. Biaya untuk memproduksi *polycrystalline silicon* lebih murah daripada *monocrystal silicon* (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008). Bentuk dari fotovoltaik *polycrystal silicone* dapat dilihat pada Gambar 2.4 .

- *Thin Film*

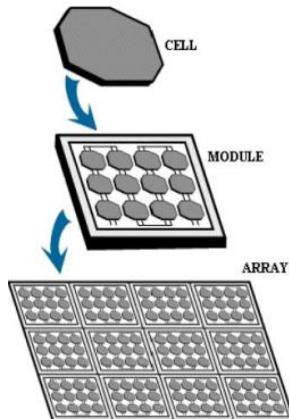
Merupakan tipe sel fotovoltaik yang paling tipis sehingga mudah untuk dibentuk-bentuk. Memiliki efisiensi yang rendah sekitar 5-6%. Merupakan sel yang terbuat dari silikon dengan struktur lapisan kristal yang tipis sehingga sel yang dihasilkan lebih tipis daripada jenis sel yang lain. Sel yang

termasuk jenis *thin film* antara lain : *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), *copper indium diselenide* (CIS), *gallium arsenide* (GaAs), *titanium dioxide gratzel cell* (TiO₂) (Rizal & Handjarinto M.Sc, 2008).

2.3 Susunan Fotovoltaik

Sistem fotovoltaik tersusun dari modul yang didalamnya terdapat banyak sel fotovoltaik tersusun secara seri dan parallel. Daya yang diproduksi dari *single diode* kurang terpenuhi untuk digunakan secara komersial, sehingga modul dihubungkan menjadi *array* untuk dapat mensuplai beban.

Modul dapat juga dihubungkan secara seri untuk mendapatkan peningkatan voltase atau parallel untuk mendapatkan penurunan arus (Mboumboue & Njomo, 2013). Untuk lebih jelasnya perbedaan antara sel, modul dan array dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.4 Susunan fotovoltaik

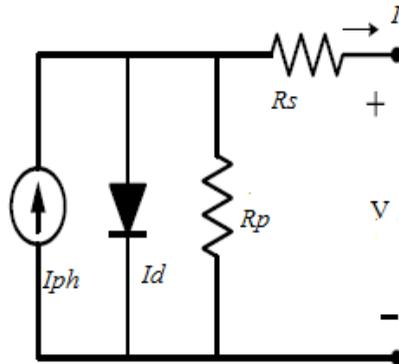
Sumber : (Mboumboue & Njomo, 2013)

2.4 Pemodelan Modul Fotovoltaik

Penelitian ini membahas mengenai pemodelan fotovoltaik menggunakan pendekatan *single diode* dan *double diode*.

2.4.1 Pemodelan dengan pendekatan *single diode*

Persamaan eksponensial untuk memodelkan sel fotovoltaik diturunkan dari hukum fisika untuk *pn junction* dan secara umum diterima sebagai representasi karakteristik sel ditunjukkan oleh persamaan 2.1 (Nema, Nema, & Agnihotri, 2010). Persamaan 2.1 dapat digambarkan pemodelan sel fotovoltaik menggunakan pendekatan persamaan *electrical circuit*. Sebuah sel fotovoltaik idealnya menggunakan satu diode yang memiliki input berupa radiasi dan keluaran berupa volt. Rangkaian elektrik pengganti dengan *single diode* dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.5 Rangkaian elektrik *single diode*

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I R_s}{\frac{n k T}{q}}} - 1 \right) - \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Dengan :

I : Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)

I_{ph} : *Photocurrent*

I_0 : *Arus reverse saturation* dari dioda (A)

Q : Muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

T	: Temperatur dalam Kelvin
V	: Tegangan dioda (V)
K	: Konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
n	: Faktor idealitas dari dioda
R _s	: Tahanan seri dari dioda
R _p	: Tahanan shunt dari diode

Pada Gambar 2.6 merupakan rangkaian elektrik *single* dioda. Hubungan tegangan dan arus pada persamaan 2.1 didapat dari persamaan 2.2 s.d persamaan 2.6 .

$$I = I_{ph} - I_s - I_{sh} \quad (2.2)$$

$$I_{ph} = [I_{scr} + Ki(T - T_r)] \frac{S}{S_r} \quad (2.3)$$

$$I_s = I_o \left[\exp \left(\frac{v}{\frac{nkT}{q}} \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$I_o = I_{o,r} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

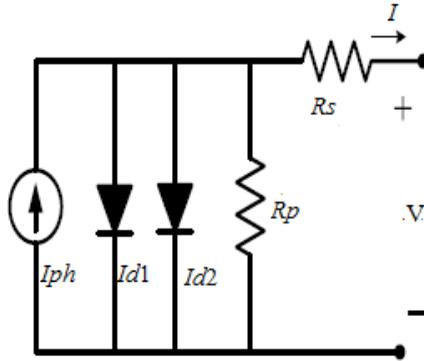
Dengan :

I	: Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)
I_{ph}	: <i>Photocurent</i>
I_{scr}	: <i>Short circuit current at reference temperature</i>
Ki	: Koefisien <i>cell's short-circuit current temperature</i> (A/K)
T	: Temperatur (K)
T_r	: Temperatur <i>reference</i> dalam Kelvin (25)
S	: Radiasi solar sel (W/m^2)
S_r	: <i>Reference Solar Radiation</i> ($1000 W/m^2$)
I_s	: <i>Diode current</i> (A)
V	: Volt (volt)

2.4.2 Pemodelan dengan Pendekatan *Double Dioda*

Pada model double diode ini menggunakan dua diode yang disusun secara parallel. Model double diode merupakan

kombinasi dari single diode. Elektrik sirkuit pada double diode dapat dilihat pada Gambar 2.7 .



Gambar 2.6 Rangkaian elektrik *double diode*

Pada Gambar 2.7 adalah model *double diode* dalam bentuk elektrikal sirkuit. Hubungan antara tegangan dan arus yang keluar dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (2.7)$$

$$I_{ph} = [I_{scr} + Ki(T - T_r)] \frac{S}{S_r} \quad (2.8)$$

$$I_{d1} = I_{o1} \left[\exp \left(\frac{V_d}{\frac{n_1 K T}{q}} \right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

$$I_{d2} = I_{o2} \left[\exp \left(\frac{V_d}{\frac{n_2 K T}{q}} \right) - 1 \right] \quad (2.10)$$

$$I_{o1} = I_{o2} = I_{o,r} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_g}{nk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.11)$$

$$I_{sh} = \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

Sehingga didapatkan

$$I = I_{ph} - I_{o1} \left(e^{\frac{v}{n_1 s v_T}} - 1 \right) - I_{o2} \left(e^{\frac{v}{n_2 s v_T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (2.13)$$

Pada *double diode* ini perhitungan agak sedikit kompleks dikarenakan terdapat dua parameter yaitu I_{o1} dan I_{o2} yang

masih belum diketahui , namun masih bisa dicari dengan menggunakan asumsi.

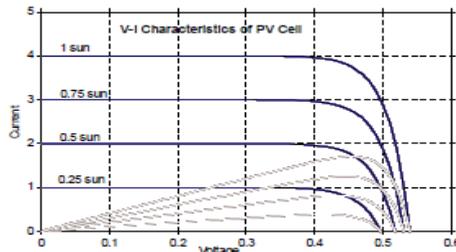
Dengan :

- I : Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)
- I_{ph} : Photocurrent
- I_{scr} : Short circuit current at reference temperature
- K_i : Koefisien cell's short-circuit current temperature (A/K)
- T : Temperatur (K)
- T_r : Temperatur reference dalam Kelvin (25)
- S : Radiasi solar sel (W/m^2)
- S_r : Reference Solar Radiation ($1000 W/m^2$)
- I_{d1} : Diode current pertama (A)
- I_{d2} : Diode current kedua (A)
- V : Tegangan (volt)

2.5 Karakteristik Fotovoltaik

Keluaran dari sel fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, yaitu radiasi matahari dan suhu sel. Dari persamaan 2.1 arus dibangkitkan oleh foton, I_{ph} yang berhubungan dengan radiasi matahari seperti dapat dilihat pada persamaan 2.3.

Dilihat pada persamaan 2.3 pada suhu konstan, arus yang dibangkitkan oleh foton secara langsung proporsional terhadap radiasi matahari. (Tito, 2012) Pengaruh radiasi matahari pada kurva karakteristik V-I dapat dilihat pada Gambar 2.8.

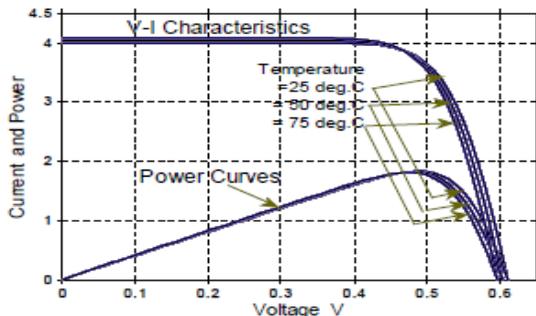


Gambar 2. 7 Karakteristik Sel Fotovoltaik Terhadap Perbedaan Radiasi

Sumber : (Nema, Nema, & Agnihotri, 2010)

Gambar 2.8, radiasi matahari 1 *sun* artinya sebesar 1000 W/m², 0,75 *sun* sebesar 750 W/m², 0,5 *sun* sebesar 500 W/m² dst. Jika radiasi matahari yang jatuh ke fotovoltaik berkurang, maka I dan V juga berkurang tetapi perubahan V tidak terlalu signifikan dari pada I (Tito, 2012).

Selain radiasi, suhu juga berpengaruh terhadap karakteristik fotovoltaik. Suhu sel dapat mempengaruhi arus hubungan singkat I_{sc} , seperti yang dapat dilihat pada persamaan 2.4 dan persamaan 2.5, merubah arus saturasi dioda dalam sel fotovoltaik. Pengaruh Pengaruh suhu pada kurva karakteristik V-I dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2. 8 Karakteristik Sel Fotovoltaik Terhadap Perbedaan Suhu

Sumber : (Nema, Nema, & Agnihotri, 2010)

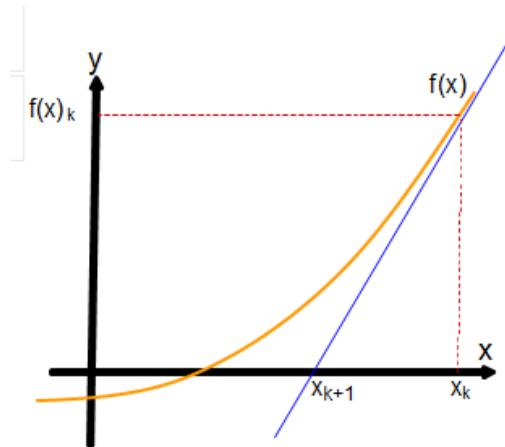
Dapat dilihat pada Gambar 2.8 jelas arus saturasi dari dioda sel fotovoltaik bergantung pada suhu, arus saturasi meningkat seiring peningkatan suhu sel. Selain itu juga menunjukkan pengaruh suhu sel terhadap karakteristik V-I, peningkatan arus akan memperkecil tegangan rangkaian terbuka, V_{oc} (Tito, 2012).

2.6 Metode Newton Raphson

Metode Newton Raphson digunakan untuk menyelesaikan persamaan non-linier. Metode newton raphson dapat digunakan untuk satu persamaan atau lebih dengan variabel yang tidak diketahui satu atau beberapa variabel. Prinsip utama pada metode ini yaitu :

- Metode newton raphson ini melakukan pendekatan terhadap kurva $f(x)$ dengan garis singgung (gradien) pada suatu titik nilai awal
- Nilai taksiran selanjutnya adalah titik potong antara garis singgung (gradien) kurva dengan sumbu x .

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.10 yang dapat dilihat sebagai berikut



Gambar 2. 9 Persamaan Garis Non-Linear dengan Metode Newton Raphson

Gambar 2.9 dapat diketahui persamaan yang digunakan untuk melakukan iterasi dengan menggunakan metode newton raphson. Persamaan tersebut dijelaskan pada persamaan 2.14. Titik pendekatan dapat dituliskan pada persamaan 2.14

$$m(\text{slope}) = f'(x_k)$$

$$f'(x_k) = \frac{y}{x}$$

$$= \frac{f(x_k)}{x_k - x_{k+1}} \quad (2.14)$$

Secara umum diperoleh model iterasi yang dapat dilihat pada persamaan 2.15

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (2.15)$$

2.7 Perhitungan Rs, Iph, Id Menggunakan Metode Math Numerik

Metode lain yang digunakan dalam penelitian ini yaitu terdapat pada penelitian sebelumnya dengan referensi dari jurnal yang berjudul *Internal Series Resistance Determinated of Only One IV-Curve Under Illumination*. Jurnal ini membahas mengenai parameter yang harus dihitung untuk mengetahui karakteristik V(I) dari fotovoltaiik.

Parameter yang ditentukan pada jurnal ini sebanyak empat parameter yaitu Rs (Resistansi Seri) , Iph (*Photocurrent*), Io (*Diode current*) dan Vt. Untuk mengukur empat parameter tersebut diperlukan parameter terukur yaitu Isc, Voc, Ipmax, Vpmax, dengan penambahan kemiringan M pada tegangan rangkaian terbuka harus dipertimbangkan. Dengan memiliki persamaan sebagai berikut :

$$M = \frac{dV}{dI} (I = 0) \quad (2.16)$$

M merupakan kemiringan (*slope*) pada tegangan *open circuit*. Nilai dari M digunakan untuk menghitung 4 parameter yaitu *Iph*, Io, Vt, dan Rs.

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} (k_1 \frac{I_{pmax}V_{pmax}}{I_{sc}V_{oc}} + k_2 \frac{V_{pmax}}{V_{oc}} + k_3 \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} + k_4) \quad (2.17)$$

k sebagai nilai konstanta. Nilai k bukan didapat dari konstanta empiris melainkan diturunkan dengan menggunakan metode matematika numerik yang terlepas dari sifat materialnya .

Memiliki nilai masing-masing k sebagai berikut:

$$k_1 : -5,411$$

$$\begin{aligned} k_2 & : 6,450 \\ k_3 & : 3,417 \\ k_4 & : -4,422 \end{aligned}$$

Dengan :

k_1 : Koefisien sensitivitas dari keluaran daya maksimum I, V dengan I_{sc} , V_{oc} .

k_2 : Koefisien sensitivitas dari keluaran daya maksimum V dengan V_{oc} yang dilakukan dengan turunan menggunakan matematika numerik.

k_3 : Koefisien sensitivitas dari keluaran daya daya maksimum I dengan I_{sc} .

k_4 : Koefisien sensitivitaas dari keluaran daya fotovoltaik.

Masing-masing nilai k diatas digunakan sebagai konstanta untuk dimasukkan kedalam persamaan 2.17. Setelah mengetahui nilai dari *slope* (M) , maka untuk mendapatkan nilai dari 4 parameter yang salah satunya yaitu R_s maka persamaan yang digunakan yaitu 2.18 .

$$R_s = -M \frac{I_{sc}}{I_{pmax}} + \frac{V_{pmax}}{I_{pmax}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{pmax}}\right) \quad (2.18)$$

Untuk mengetahui nilai V_t pada persamaan 2.19

$$V_t = -(M + R_s)I_{sc} \quad (2.19)$$

Untuk mengetahui nilai I_o

$$I_o = I_{sc} e^{\frac{-V_{oc}}{V_t}} \quad (2.20)$$

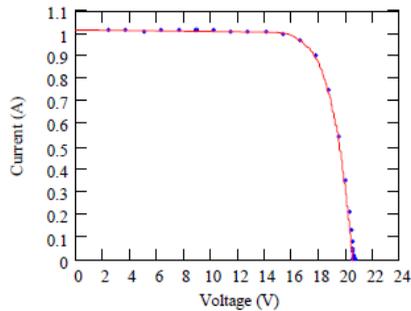
Untuk mengetahui nilai I_{ph}

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (2.21)$$

Contoh yang terdapat pada jurnal untuk menghitung kualiatas efektif karakteristik fotovoltaik dengan perbandingan nilai terukur menggunakan tipe monokristal modul fotovoltaik BP585F.

Isc : 1,015 A
Voc : 20,508 A
Ipmax : 0,951 A
Vpmax : 17,002 V
M : -1,535 V/A
Rs : 0,431 Ω
Vt : 1,12 V
Io : $1,142 \times 10^{-8}$ A
Iph : 1,015 A

Nilai parameter diatas didapatkan dari pengukuran dibaawah iluminasi dengan satu kurva IV sebagai keluaran dari fotovoltaik. Berikut kurva yang diperoleh yang dapat dilihat pada gambar 2.11.

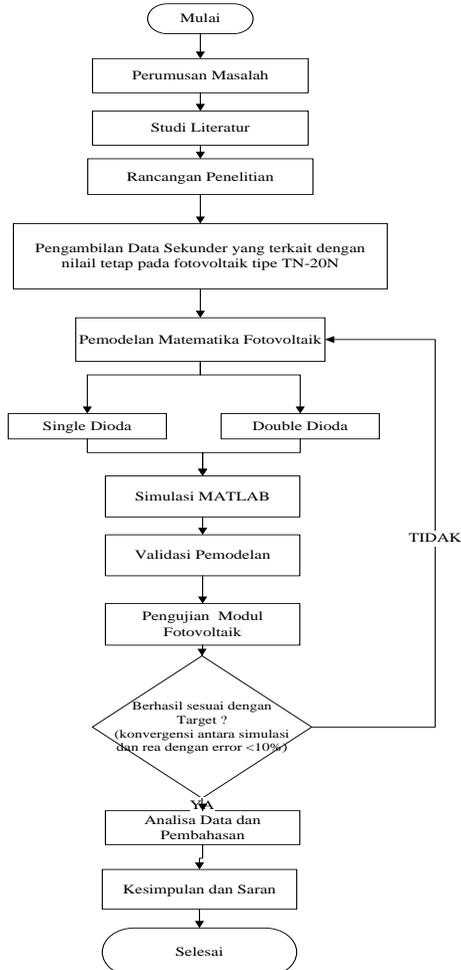


Gambar 2.10 Karakteristik Kurva I(V)
Sumber : (Goetzbecker & Hoffman, 2005)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini yang dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu :



Gambar 3. 1 Flowchart Pelaksanaan Tugas Akhir

Dari *flowchart* pada Gambar 3.1 merupakan metode penelitian yang didalamnya terdapat tahap-tahap dalam pengerjaan tugas akhir. Dimulai dengan perumusan masalah yang diangkat menjadi permasalahan pada tugas akhir ini yaitu besarnya nilai parameter-parameter dari sebuah modul fotovoltaik yang digunakan untuk melakukan pemodelan berdasarkan topologi *current circuit* model *single diode* dan *double diode*, selain itu juga melakukan validasi model melalui uji eksperimental. Tahap berikutnya studi literatur dalam tahap ini yang dilakukan adalah memahami teori-teori yang digunakan yaitu : tentang modul fotovoltaik, pemodelan matematika dari pendekatan *single diode* dan *double diode*, dan karakteristik kurva I(V) dan P(V) terhadap pengaruh suhu dan radiasi. Tahap ketiga yaitu melakukan pengambilan data sekunder dari spesifikasi modul fotovoltaik tipe TN-20M. Kemudian melakukan pemodelan dengan metode analitik menggunakan prinsip hukum kirchoff untuk mendapatkan nilai keluaran arus dan parameter seperti I_{ph} , I_s , R_s , dan R_p . Kemudian setelah didapatkan nilai parameter yang digunakan untuk melakukan pemodelan, dilakukan simulasi pada simulink Matlab untuk mengetahui hasil respon karakteristik kurva I(V) dan P(V). Setelah itu dilakukan validasi dengan melakukan pengujian secara real time dan dilakukan perbandingan sampai mendekati hasil yang konvergen. Setelah itu dilakukan analisa data dan pembahasan mengenai hasil yang didapat. Tahap terakhir yaitu penarikan kesimpulan dari hasil penelitian yang didapatkan.

3.2 Metode Penelitian

- **Perumusan Masalah**

Perumusan masalah dilakukan dengan mengidentifikasi permasalahan yang berkaitan dengan topik penelitian yang diangkat yaitu :

1. Berapa besar parameter-parameter dari sebuah modul fotovoltaik yang digunakan untuk melakukan pemodelan berdasarkan topologi *current circuit* model *single diode* dan *double diode* ?

2. Bagaimana melakukan validasi model melalui uji pengujian fotovoltaiik secara langsung?

- **Studi Literatur**

Studi literature merupakan pegkajian dan pemahaman mengenai Fotovoltaiik dan melakukan pemodelan secara analitik modul fotovoltaiik, kemudian pemahaman tentang karakteristik kurva I(V) dan P(V) yang merupakan hasil keluaran dari modul fotovoltaiik.

- **Pengambilan data**

Pada tahap i didapatkan nilai pada masing-masing variabel, dari data sekunder spesifikasi modul fotovltaiik tipe TN-20M. Data spesifikasi alat dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi Modul Fotovoltaiik Tipe TN-20M

Variabel fotovoltaiik	Nilai
Maximum power at at STC (Pmp)	20 W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	17,2 V
Optimum Operating Current (Imp)	1,16 A
Open circuit voltage (Voc)	21,5 V
Short Circuit Current (Isc)	1,25 A
Nominal Operating cell temperature	45 ± 2°C
Temperature coefficient of Pm (%)	-0,47/ °C
Temperature coefficient of Voc (%)	-0,36/ °C
Temperature coefficient of Isc (%)	0,05%/K
Operating temperature	-40°C to 85°C
Maximum system voltage	1000 V DC
Power Tolerance	± 5%
Surface maximum load capacity	1/1600

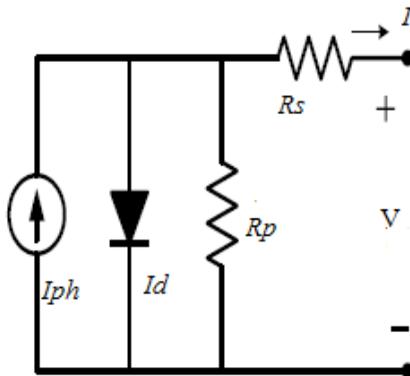
Dari data pada Tabel 3.1 digunakan untuk menghitung parameter-parameter dalam pemodelan modul fotovoltaiik dengan pendekatan *single diode* dan *double diode*.

- **Pemodelan Modul Fotovoltaik**

Dalam pemodelan modul fotovoltaik ini menggunakan pendekatan *single diode* dan *double diode*. Dengan menggunakan prinsip hukum kirchoff didapatkan keluaran arus dari modul fotovoltaik. Hukum kirchoff ini berbunyi arus yang masuk dalam suatu titik percabangan dalam suatu rangkaian listrik sama dengan arus yang keluar dari titik percabangan tersebut.

a. Pemodelan Fotovoltaik Dengan Pendekatan *Single Dioda*

Pada pemodelan fotovoltaik *single dioda* menggunakan rangkaian listrik dengan satu dioda dan 2 buah tahanan yaitu R_s (Resistansi Seri) dan R_p (Resistansi *Shunt*).



Gambar 3. 2 Rangkaian Listrik dengan *Single Dioda*

Pada Gambar 3.2 dengan menerapkan hukum kirchoff akan diperoleh persamaan :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.1)$$

Dengan :

I_{ph} : Photocurrent (A)

I_d : Diode current (A)

I_{sh} : Arus pada *loop* resistansi R_s dan R_p (A)
 Sehingga dari persamaan 3.1 arus yang keluar dari modul fotovoltaik dapat dihitung dengan persamaan 3.2

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{\left(\frac{nKT}{q}\right)}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3.2)$$

Dengan :

- I : Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)
- I_{ph} : *Photocurrent* (A)
- I_0 : Arus *reverse saturation* dari dioda (A)
- q : Muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
- T : Temperatur dalam Kelvin
- V : Tegangan dioda (V)
- K : Konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- n : Faktor idealitas dari dioda
- R_s : Tahanan seri dari dioda
- R_p : Tahanan shunt dari dioda

Untuk mengetahui besarnya nilai masing-masing parameter pada persamaan 3.2 dilakukan perhitungan sebagai berikut :

• Perhitungan Parameter I_{ph}

Parameter I_{ph} atau *photocurrent* bergantung pada suhu dan radiasi. Dapat dihitung dengan persamaan 3.3 berikut ini (Mboumboue & Njomo, 2013).

$$I_{ph} = [I_{scr} + Ki(T - T_r)] \frac{S}{S_r} \quad (3.3)$$

Dengan :

- I : Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)
- I_{ph} : *Photocurrent*
- I_{scr} : *Short circuit current at reference temperature*
- Ki : Koefisien *cell's short-circuit current temperature* (A/K)
- T : Temperatur (K)

- T_r : Temperatur *reference* dalam Kelvin (25)
 S : Radiasi solar sel (W/m^2)
 S_r : *Reference Solar Radiation* (1000 W/m^2)

Nilai *photocurrent* dihitung saat keadaan STC dengan temperatur 25°C dan radiasi 1000 W/m^2 .

• Perhitungan Parameter I_d

Parameter I_d atau *diode current* ini memiliki ketergantungan pada suhu. Parameter I_d dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.4.

$$I_d = I_o \left[\exp \left(\frac{v}{\frac{nKT}{q}} \right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

I_o merupakan *saturation current* yang memiliki ketergantungan dengan suhu, untuk mendapatkan nilai I_o dapat dihitung dengan persamaan 3.5 .

$$I_o = I_{o,ref} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.5)$$

Dengan :

- $I_{o,ref}$: *Saturation* referensi
 E_g : *Bandgap energy* dari material semikonduktor *monocrystal*
 A : *Ideality factor*
 k : Konstanta Boltzman $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Nilai dari $I_{o,ref}$ dapat dihitung dengan persamaan 3.6

$$I_{o,ref} = I_{sc,ref} \exp \left(\frac{-V_{oc}}{\frac{Ns.A.K.T}{q}} \right) \quad (3.6)$$

Dengan :

I_{sc} : Short Circuit Current (I_{sc}).

N_s : Nilai dari sel yang tekoneksi secara seri sejumlah 36 sel.

Nilai A atau *ideality factor* dapat dilihat pada Tabel 3.2 yang disesuaikan dengan material penyusun modul fotovoltaik. Tabel 3.2 didapat dari referensi peneliti (Mboumboue & Njomo, 2013). Pada modul fotovoltaik tipe TN-20M ini menggunakan material penyusun *silicon-monocrystal*.

Tabel 3. 2 *Ideality Factor*

<i>Technology</i>	<i>Ideality Factor</i>
Si-mono	1,2
Si-Poly	1,3
a-Si-H	1,8
a-Si-H tanderm	3,3
a-Si-H triple	5
cdTe	1,5
CTs	1,5
AsGa	1,3

Nilai E_g merupakan *bandgap energy* yang dimiliki oleh material semikonduktor modul fotovoltaik dapat dicari dengan persamaan 3.7

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha x T^2}{T + \beta} \quad (3.7)$$

Masing-masing variabel E_{g0} , α , β dapat diketahui nilainya sesuai dengan material dari modul fotovoltaik tipe TN-20M yang berbahan silikon pada keadaan 25°C.. Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.3 (Mboumboue & Njomo, 2013).

Tabel 3. 3 Nilai E_{g0} , α , β

Material	$E_g(T=0K)$, eV	$\alpha \times 10^{-4}$, eV/K ²	β , K
Si	1,17	4,730	636
AsGa	1,52	5,405	204
InP	1,42	4,90	327

Setelah didapatkan nilai parameter I_o atau *saturation current* maka persamaan 3.5 disubstitusikan ke dalam persamaan 3.4 , sehingga didapatkan nilai I_d atau *diode current*.

• **Perhitungan nilai I (arus)**

Setelah didapat nilai pada masing-masing parameter yaitu I_{ph} , I_d , R_s dan R_p dilakukan perhitungan nilai I dengan memasukkan nilai parameter tersebut kedalam persamaan 3.12.

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (3.12)$$

Untuk mendapatkan nilai I tersebut dihitung dengan menggunakan metode newton raphson. Dengan I sebagai nilai fungsi I (x) sehingga pada persamaan 3.12 dirubah kedalam persamaan 3.13 .

$$I(x) = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V(x)+R_s I(x)}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V(x)+R_s I(x)}{R_p} \quad (3.13)$$

Pada metode newton raphson setelah mengetahui fungsi pada persamaan 3.13 maka dicari turunan dari fungsi tersebut. Hasil turunan persamaan 3.13 didapat pada persamaan 3.14.

$$I'(x) = -I_o \frac{R_s}{V_t a} \left[\exp\left(\frac{V(x)+R_s I(x)}{V_t a}\right) \right] - \frac{R_s}{R_p} \quad (3.14)$$

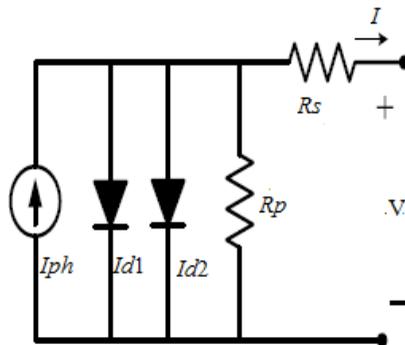
Sehingga dilakukan iterasi untuk mengetahui nilai dari arus dengan menggunakan persamaan 3.15

$$X_{n+1} = X_n - \frac{I(x)}{I'(x)} \quad (3.15)$$

Dimana X_n merupakan iterasi yang dimulai dari nilai nol kemudian bertambah sampai memiliki toleransi minimal arus sebesar 0,001.

b. Pemodelan Fotovoltaik Dengan Pendekatan *Double Diode*

Pada pemodelan fotovoltaik *double diode* menggunakan rangkaian listrik dengan dua dioda dan 2 buah tahanan yaitu R_s (Resistansi Seri) dan R_p (Resistansi *Shunt*). Bentuk dari rangkain listrik tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3



Gambar 3. 3 Rangkaian Listrik Dengan Dua dioda

Pada Gambar 3.3 dengan menerapkan hukum kirchoff akan diperoleh persamaan :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (3.16)$$

Dengan :

I_{ph} : Photocurrent (A)

I_{d1} : Diode 1 current (A)

I_{d2} : Diode 2 current (A)

I_{sh} : Arus pada loop resistansi R_s dan R_p (A)

Sehingga dari persamaan 3.16 arus yang keluar dari modul fotovoltaik dapat dihitung dengan persamaan 3.17

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{nKT}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3.17)$$

Dengan :

I : Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)

I_{ph} : *Photocurrent* (A)

I_{01} : Arus *reverse saturation* 1 dari dioda (A)

I_{02} : Arus *reverse saturation* 2 dari dioda (A)

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

T : Temperatur dalam Kelvin

V : Tegangan dioda (V)

K : Konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

n : Faktor idealitas dari dioda

R_s : Tahanan seri dari dioda

R_p : Tahanan shunt dari dioda

Untuk mengetahui besarnya nilai masing-masing parameter pada persamaan 3.17 dilakukan perhitungan sebagai berikut :

• Perhitungan Parameter I_{ph}

Parameter I_{ph} atau *photocurrent* bergantung pada suhu dan radiasi. Dapat dihitung dengan persamaan 3.18 berikut ini.

$$I_{ph} = [I_{scr} + Ki(T - T_r)] \frac{S}{S_r} \quad (3.18)$$

Dengan :

I : Arus yang keluar dari sel fotovoltaik (A)

I_{ph} : *Photocurrent*

I_{scr} : *Short circuit current at reference temperature*

- Ki : Koefisien *cell's short-circuit current temperature* (A/K)
 T : Temperatur (K)
 T_r : Temperatur *reference* dalam Kelvin (25)
 S : Radiasi solar sel (W/m^2)
 S_r : *Reference Solar Radiation* (1000 W/m^2)

Nilai *photocurrent* dihitung saat keadaan STC dengan temperatur 25°C dan radiasi 1000 W/m^2 .

• Perhitungan Parameter I_d

Pada pemodelan dengan menggunakan dua dioda parameter I_d memiliki 2 buah parameter yang harus diketahui yaitu I_{d1} dan I_{d2} . Parameter I_d ini memiliki ketergantungan pada suhu. Parameter I_{d1} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.19.

$$I_{d1} = I_{o1} \left[\exp\left(\frac{v}{\frac{nkT}{q}}\right) - 1 \right] \quad (3.19)$$

I_{o1} merupakan *saturation current* yang memiliki ketergantungan dengan suhu, untuk mendapatkan nilai I_{o1} dapat dihitung dengan persamaan 3.20 .

$$I_{o1} = I_{o,ref} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (3.20)$$

Dengan :

- $I_{o,ref}$: *Saturation* referensi
 E_g : *Bandgap energy* dari material semikonduktor *monocrystal*
 A : *Ideality factor*
 k : Konstanta Boltzman $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Nilai dari $I_{o,ref}$ dapat dihitung dengan persamaan 3.21

$$I_{o,ref} = I_{sc,ref} \exp\left(\frac{-V_{oc}}{\frac{N_s A K T}{q}}\right) \quad (3.21)$$

Dengan :

Isc : Short Circuit Current (Isc).

Ns : Nilai dari sel yang tekoneksi secara seri sejumlah 36 sel.

Kemudian untuk menghitung parameter I_{d2} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.22 .

$$I_{d2} = I_{o1} \left[\exp\left(\frac{v}{\frac{nKT}{q}}\right) - 1 \right] \quad (3.22)$$

I_{o2} merupakan *saturation current* pada dioda kedua yang memiliki ketergantungan dengan suhu, untuk mendapatkan nilai I_{o2} dapat dihitung dengan persamaan 3.20 .

$$I_{o2} = I_{o,ref} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (3.23)$$

Dengan :

$I_{o,ref}$: *Saturation* referensi

E_g : *Bandgap energy* dari material semikonduktor *monocrystal*

A : *Ideality factor*

k : Konstanta Boltzman $1,381 \times 10^{-23}$ J/K

Nilai dari $I_{o,ref}$ dapat dihitung dengan persamaan 3.24

$$I_{o,ref} = I_{sc,ref} \exp\left(\frac{-V_{oc}}{\frac{N_s A K T}{q}}\right) \quad (3.24)$$

Dengan :

Isc : Short Circuit Current (Isc).

Ns : Nilai dari sel yang tekoneksi secara seri sejumlah 36 sel.

Pada pemodelan dengan menggunakan dua dioda ini nilai A atau *ideality factor* diasumsikan memiliki nilai yang sama. Nilai A atau *ideality factor* dapat dilihat pada Tabel 3.4 yang disesuaikan dengan material penyusun modul fotovoltaik. Tabel 3.4 didapat dari referensi peneliti (Mboumboue & Njomo, 2013). Pada modul fotovoltaik tipe TN-20M ini menggunakan material penyusun *silicon-monocrystal*.

Tabel 3. 4 *Ideality Factor*

<i>Technology</i>	<i>Ideality Factor</i>
Si-mono	1,2
Si-Poly	1,3
a-Si-H	1,8
a-Si-H tanderm	3,3
a-Si-H triple	5
cdTe	1,5
CTs	1,5
AsGa	1,3

Nilai E_g merupakan *bandgap energy* yang dimiliki oleh material semikonduktor modul fotovoltaik dapat dicari dengan persamaan 3.7

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha x T^2}{T + \beta} \quad (3.25)$$

Masing-masing variabel E_{g0} , α , β dapat diketahui nilainya sesuai dengan material dari modul fotovoltaik tipe TN-20M yang berbahan silikon pada keadaan 25°C. Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.5 (Mboumboue & Njomo, 2013)

Tabel 3. 5 Nilai E_{g0} , α , β

Material	$E_g(T=0K)$, eV	$\alpha \times 10^{-4}$, eV/K ²	β , K
Si	1,17	4,730	636
AsGa	1,52	5,405	204
InP	1,42	4,90	327

Setelah didapatkan nilai parameter I_{o1} atau *saturation current* 1 maka persamaan 3.20 disubstitusikan ke dalam persamaan 3.19 dan nilai parameter I_{o2} atau *saturation current* 2 maka persamaan 3.23 disubstitusikan ke dalam persamaan 3.22, sehingga didapatkan nilai I_{d1} dan I_{d2} atau *diode current* pada dioda 1 dan *diode current* pada dioda 2.

• Perhitungan Parameter Rs dan Rp

R_s merupakan resistansi seri dan R_p merupakan resistansi shunt yang rangkaianya dapat dilihat pada Gambar 3.2. Perhitungan R_s dan R_p dipilih dari iterasi yang dilakukan dengan memiliki syarat $P_{max,model} = P_{max,experiment}$. Dengan nilai toleransi error sebesar 10^{-5} , iterasi dimulai dari $R_s = 0$ kemudian bertambah 0,000001 dan berhenti sampai nilai error dari $P_{max, model}$ lebih dari toleransi. Ketika nilai dari R_s telah mencapai hasil yang konvergen untuk mendapatkan nilai R_p dihitung dengan menggunakan persamaan 3.11.

$$P_{max,m} = P_{max, experiment} \quad (3.26)$$

$$I, m \times V, m = P_{max, experiment} \quad (3.27)$$

$$V \left\{ I - I_o \left[\exp \left(\frac{q}{KT} \frac{V+R_s I}{aNs} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \right\} = P_{max, ex} \quad (3.28)$$

$$R_p = \frac{V(V+I R_s)}{\left\{ V I - V I o 1 \exp \left[\left(\frac{q}{KT} \frac{V+R_s I}{aNs} \right) \right] - V I o 2 \exp \left[\left(\frac{q}{KT} \frac{V+R_s I}{aNs} \right) \right] - P_{max, ex} \right\}} \quad (3.29)$$

- **Perhitungan nilai I (arus)**

Setelah didapat nilai pada masing-masing parameter yaitu Iph, Id, Rs dan Rp dilakukan perhitungan nilai I dengan memasukkan nilai parameter tersebut kedalam persamaan 3.30.

$$I = Iph - Io1 \left[\exp \left(\frac{V+Rsl}{V_t a} \right) - 1 \right] - Io2 \left[\exp \left(\frac{V+Rsl}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V+Rsl}{Rp} \quad (3.30)$$

Untuk mendapatkan nilai I tersebut dihitung dengan menggunakan metode newton raphson. Dengan I sebagai nilai fungsi I (x) sehingga pada persamaan 3.30 dirubah kedalam persamaan 3.31 .

$$I(x) = Iph - Io1 \left[\exp \left(\frac{V(x)+Rsl(x)}{V_t a} \right) - 1 \right] - Io2 \left[\exp \left(\frac{V(x)+Rsl(x)}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V(x)+Rsl(x)}{Rp} \quad (3.31)$$

Pada metode newton raphson setelah mengetahui fungsi pada persamaan 3.31 maka dicari turunan dari fungsi tersebut. Hasil turunan persamaan 3.31 didapat pada persamaan 3.32.

$$I'(x) = -Io1 \frac{Rs}{V_t a} \left[\exp \left(\frac{V(x)+Rsl(x)}{V_t a} \right) \right] - Io2 \frac{Rs}{V_t a} \left[\exp \left(\frac{V(x)+Rsl(x)}{V_t a} \right) \right] - \frac{Rs}{Rp} \quad (3.32)$$

Sehingga dilakukan iterasi untuk mengetahui nilai dari arus dengan menggunakan persamaan 3.33

$$X_{n+1} = Xn - \frac{I(x)}{I'(x)} \quad (3.33)$$

Dimana Xn merupakan iterasi yang dimulai dari nilai nol kemudian bertambah sampai memiliki toleransi minimal arus sebesar 0,001.

• Simulasi Pada Matlab

Setelah mengetahui perhitungan pada masing-masing parameter dilakukan simulasi pada matlab. Simulasi dilakukan dengan menggunakan simulink algoritma. Dilakukan dengan memasukkan persamaan yang telah didapat kedalam matlab sehingga matlab dapat mengolah hasil dan menampilkan grafik karakteristik dari fotovoltaiik.

Dalam melakukan simulasi antara *single* dioda dan *double* dioda diletakkan pada file yang terpisah. Untuk mempermudah melihat hasil dari masing-masing parameter pada *single* dioda dan *double* dioda. Berikut merupakan gambaran umum simulasi dengan menggunakan algoritma pada matlab dapat dilihat pada Gambar 3.4.

```

MATLAB R2016a
HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW
Single TopBottom Shrink Tabs to Fit None Left/ Right Expand Collapse Expand Collapse
Custom Alphabetize Left/ Right Bottom Expand All Collapse All
Highlight current line
Show line numbers Highlight Traceability
Enable datatips while editing
Current Folder: E:\KULIAH LU\ SEMESTER 4 \biomillah TA TW 116, pasti bisa! \5.Simulink\ TA 1 \ Simulasi Algoritma
Name: TA1.m
23
24 %inisialisasi awal nilai Re dan Rp
25 Re = 0;
26 Rp = Rp_min;
27 T = Tn;
28 G = Gn;
29 %T = 29.6
30 %G = 181.058
31
32 k = 1.3806503e-23; %Boltzmann [J/K]
33 q = 1.60217646e-19; %Electron charge [C]
34
35 Vtn = k * Tn / q;
36 Vc = k * T / q;
37
38 perror = Inf; %nilai perror
39 fi = 0; %iterasi dihitung mulai dari nol
40 a = 1; %inisialisasi nilai a

```

Gambar 3. 4 Simulasi Pada Matlab

• Validasi Pemodelan

Validasi dilakukan untuk mengetahui nilai dari hasil parameter yang digunakan pada simulasi telah memiliki hasil yang sesuai. Validasi yang dilakukan dengan membandingkan menggunakan

metode matematika numerik. Dengan memiliki persamaan sebagai berikut :

$$M = \frac{dV}{dI} (I = 0) \quad (3.34)$$

M merupakan kemiringan (*slope*) pada tegangan *open circuit*. Nilai dari M digunakan untuk menghitung 4 parameter yaitu I_{ph} , I_o , V_t , dan R_s .

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left(k_1 \frac{I_{pmax} V_{pmax}}{I_{sc} V_{oc}} + k_2 \frac{V_{pmax}}{V_{oc}} + k_3 \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} + k_4 \right) \quad (3.35)$$

Dengan k sebagai nilai konstanta. Nilai k bukan didapat dari konstanta empiris melainkan diturunkan dengan menggunakan metode matematika numerik yang terlepas dari sifat materialnya . Dengan memiliki nilai masing-masing k sebagai berikut:

$$k_1 : -5,411$$

$$k_2 : 6,450$$

$$k_3 : 3,417$$

$$k_4 : -4,422$$

Masing-masing nilai k diatas digunakan sebagai konstanta untuk dimasukkan kedalam persamaan 3.35. Setelah mengetahui nilai dari *slope* (M) , maka untuk mendapatkan nilai dari 4 parameter yang salah satunya yaitu R_s maka persamaan yang digunakan yaitu 3.36

$$R_s = -M \frac{I_{sc}}{I_{pmax}} + \frac{V_{pmax}}{I_{pmax}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{pmax}} \right) \quad (3.36)$$

Untuk mengetahui nilai V_t pada persamaan 3.37

$$V_t = -(M + R_s) I_{sc} \quad (3.37)$$

Untuk mengetahui nilai I_o

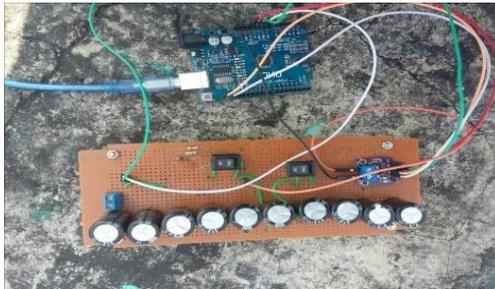
$$I_o = I_{sc} e^{\frac{-V_{oc}}{V_t}} \quad (3.38)$$

Untuk mengetahui nilai I_{ph}

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (3.39)$$

- **Pengujian Modul Fotovoltaik**

Setelah didapatkan hasil dari simulasi pada Matlab kemudian untuk pengujian fotovoltaik dilakukan pengambilan data voltase dan arus secara langsung. Pengujian dilakukan dengan menggunakan fotovoltaik tipe TN-20N dan menggunakan rangkaian sensor arus tegangan untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan fotovoltaik. Berikut merupakan rangkaian untuk melakukan pengukuran arus dan tegangan pada fotovolatik yang dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Rangkaian sensor arus tegangan

Selain pengukuran arus dan tegangan pada fotovoltaik, juga dilakukan pengambilan data suhu dan radiasi yang mengenai fotovoltaik. Dalam pegujian ini fotovoltaik diletakkan diam diatas tempat yang terkena sinar matahari agar menghasilkan keluaran data arus dan tegangan yang baik. Berikut merupakan pengujian fotovoltaik yang dilakukan secara langsung dapat dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3. 6 Pengujian fotovoltaik secara langsung

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil dari pemodelan fotovoltaiik yang dilakukan pada tipe fotovoltaiik TN-20M melalui simulasi Matlab dan dilakukan pengujian secara langsung. Dalam melakukan pemodelan fotovoltaiik ini menggunakan pendekatan *single* dioda dan *double* dioda. Analisa dilakukan antara simulasi dan pengujian langsung dengan memiliki hasil yang konvergen dan error yang kecil.

4.1 Hasil Pemodelan Fotovoltaiik

Pada hasil pemodelan fotovoltaiik ini menjelaskan nilai parameter yang didapat dari simulasi oleh Matlab. Hasil Masing-masing pendekatan akan dibahas pada subbab 4.1.1 dan subbab 4.2.1 .

4.1.1 Hasil Pemdelaan Fotovolataik dengan Pendekatan Single Dioda

Pendekatan dengan *single* dioda menggunakan satu dioda dan dua buah tahanan yaitu R_s dan R_p . Pemodelan ini menerapkan hukum kirchoff yang memiliki persamaan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.2. Untuk mengetahui karakteristik dari modul fotovoltaiik yang berupa grafik kurva $I(V)$ dan $P(V)$ maka dilakukan perhitungan untuk masing-masing parameter yaitu *photocurrent* (I_{ph}) , *Diode current* (I_d), Tahanan Seri (R_s) dan Tahanan *Shunt* atau paralel (R_p). Untuk mengetahui hasil dari masing-masing parameter tersebut dilakukan simulasi oleh Matlab. Dalam melakukan simulasi oleh Matlab untuk mengetahui karakteristik dari fotovoltaiik tersebut dilakukan pada keadaan *Standart Test Condition (STC)* dengan suhu $25^{\circ}C$ dan radiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 . Sehingga parameter-parameter diketahui hasilnya yang dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Nilai Parameter pada kondisi STC (Suhu 25°C dan Radiasi 1000 W/m²)

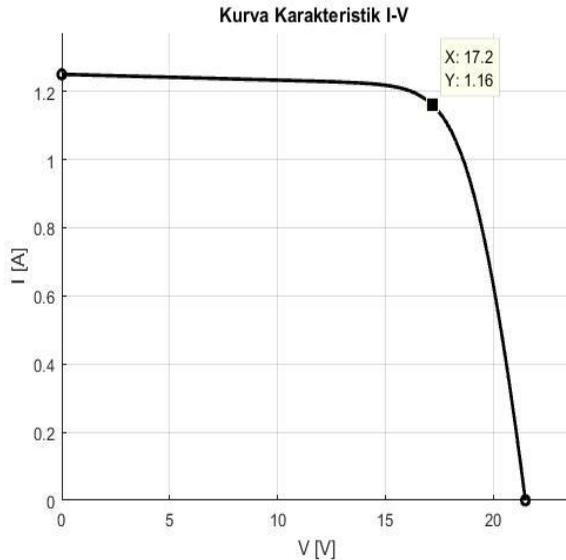
Parameter	Hasil
Photocurrent (I_{ph})	1,252622 A
Diode current (I_d)	4,74684 x 10 ⁻⁹ A
Tahanan Seri (Rs)	0,981 Ω
Tahanan Paralel (Rp)	904,404215 Ω

Fotovoltaik dengan model ideal hanya menggunakan satu dioda saja tanpa adanya suatu hambatan. Model tersebut tidak cukup untuk mewakili perilaku sel saat kondisi lingkungan mempengaruhinya, terutama pada tegangan rendah. Sehingga dilakukan perbaikan dengan menambahkan satu tahanan yaitu resistansi seri. Resistansi seri (Rs) ini banyak sekali digunakan untuk pemodelan yang dilakukan dengan simulasi pada fotovoltaik. Namun resistansi seri ini memiliki kekurangan saat mengalami variasi suhu. Sehingga tahanan diperluas dengan menambahkan tahanan paralel atau resistansi paralel (Rp) untuk memperbaiki kekurangan dari resistansi seri (Rs).

Nilai dari parameter Rs dan Rp tidak diketahui pada dataasheet fotovoltaik untuk mengetahui hasil dari parameter tersebut dilakukan perhitungan. Pada beberapa penelitian terdapat rumus matematika untuk mengetahui hasil tersebut namun hal tersebut dianggap tidak akurat karena untuk mendapatkan karakteristik fotovoltaik yang bagus tidak bisa dilakukan perhitungan nilai Rs dan Rp secara terpisah. Nilai tersebut dilakukan dengan cara iterasi. Iterasi ini berhenti jika nilai dari $P_{max,experiment} = P_{max,model}$, dengan batas nilai eror sebesar 10⁻⁵. Sehingga nilai dari masing-masing parameter dapat dilihat pada Tabel 4.1.

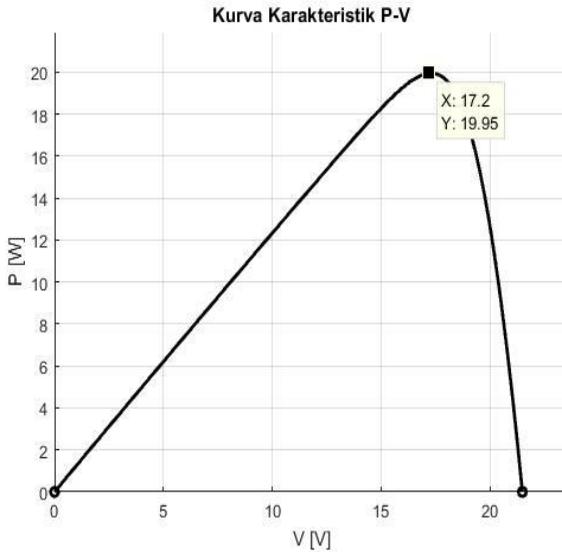
Dari hasil parameter tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik fotovoltaik yang dapat dilihat dari grafik kurva karakteristik I(V) dan P(V). Karakteristik fotovoltaik ini disimulasikan pada kondisi *Standar Test Condition* (STC) dengan suhu 25°C dan radiasi 1000 W/m². Hasil dari

karakteristik fotovoltaiik dengan pendekatan *single* dioda dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Hasil Simulasi karakteristik I(V) Fotovoltaiik dengan pendekatan *single* dioda

Pada Gambar 4.1 merupakan kurva karakteristik I(V) dengan pendekatan *single* dioda pada fotovoltaiik tipe TN-20M. Dari kurva tersebut didapatkan hasil bahwa nilai pada empat titik yaitu *current short circuit* (I_{sc}), *Optimum Operating Voltage* (V_{oc}), *Optimum Operating Current* (I_{mp}) dan *Voltage open circuit* (V_{oc}) pada model simulasi memiliki hasil nilai sama dengan datasheet yang ada pada fotovoltaiik tipe TN-20M.



Gambar 4. 2 Hasil Simulasi Karakteristik P(V) Fotovoltaik dengan pendekatan *single dioda*

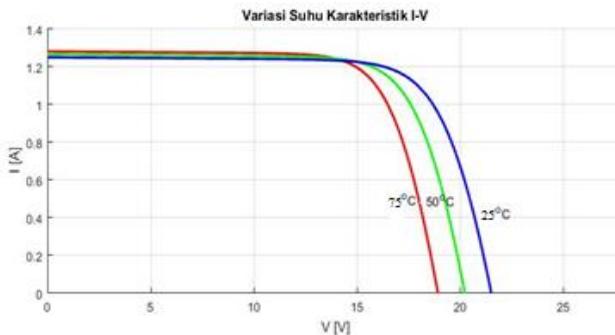
Pada Gambar 4.2 merupakan kurva karakteristik P(V) dengan pendekatan *single dioda* pada tipe fotovoltaik TN-20M. Dari kurva tersebut didapatkan hasil bahwa nilai pada titik *Power Maximum* (Wp) pada model simulasi memiliki nilai sama dengan datasheet yang ada pada fotovoltaik tipe TN-20M.

Dari hasil kurva karakteristik I(V) dan P(V) dapat dilihat hasil perbandingan simulasi dan datasheet fotovoltaik tipe TN-20M pada kondisi *Standar Test Condition* (STC) dengan suhu 25°C dan radiasi 1000 W/m². Hasil perbandingan nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 .

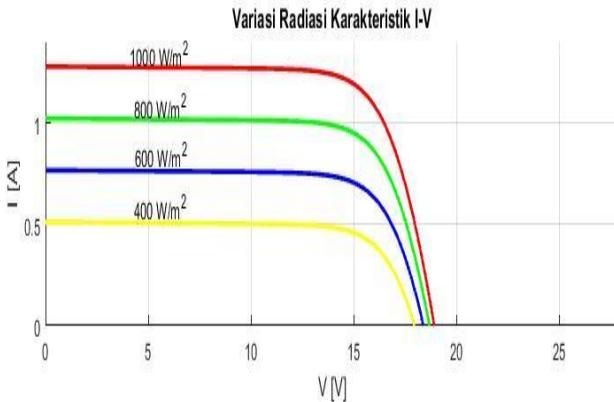
Tabel 4. 2 Hasil Perbandingan Simulasi Dan Datasheet

Parameter	Datasheet	Simulasi
Imp	1,16 A	1,16 A
Vmp	17,2 A	17,2 A
Pmax	20 W	19,95 W
Isc	1,25 A	1,25 A
Voc	21,5 A	21,5 A
Kv	-0,36/°C	-0,36/°C
Ki	0,05/K	0,05/K
Ns	36	36
Rs	-	1,251 Ω
Rp	-	584,83099 Ω
Iph	-	1,252622 A
Id	-	2,1299 x 10 ⁻¹⁰ A

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 hasil yang didapatkan pada kondisi STC dengan suhu 25°C dan radiasi 1000 W/m² antara simulasi dan datasheet fotovoltaik tipe TN-20M memiliki nilai yang sama. Dapat dikatakan bahwa simulasi memiliki model yang mirip dengan fotovoltaik aslinya. Pada simulasi diatas merupakan saat kondisi STC, untuk mengetahui pengaruh suhu dan pengaruh radiasi terhadap karakteristik I(V) dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4

**Gambar 4. 3** Variasi kenaikan suhu terhadap karakteristik I(V) , pada radiasi 1000 W/m²

Pada Gambar 4.3 dilakukan simulasi dengan meningkatkan suhu yang dimulai dari 25°C sampai 75°C . Dari hasil yang didapat bahwa setiap kenaikan suhu, arus yang keluar semakin tinggi namun tegangan semakin rendah, sehingga daya yang dikeluarkan juga meningkat. Hal tersebut memiliki pengaruh terhadap karakteristik dari sel fotovoltaik dan karakteristik I(V) yang dihasilkan. Selain pengaruh dari suhu juga terdapat pengaruh dari kenaikan radiasi. Pengaruh kenaikan dari radiasi dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Variasi kenaikan radiasi terhadap karakteristik I(V) , pada suhu 25°C

Pada Gambar 4.4 dilakukan simulasi dengan meningkatkan radiasi yang dimulai dari 400 W/m^2 sampai 1000 W/m^2 . Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari kenaikan radiasi pada sel fotovoltaik. Hasil yang didapat bahwa setiap penurunan radiasi, arus yang keluar semakin berkurang dan tegangan yang keluar juga berkurang namun tidak signifikan.

Dari hasil variasi kenaikan suhu dan radiasi masing-masing memiliki pengaruh terhadap karakteristik sel fotovoltaik

4.1.1 Hasil Pemodelan Fotovoltaik Dengan Pendekatan *Double Dioda*

Pendekatan dengan *double dioda* menggunakan dua dioda dan dua buah tahanan yaitu R_s dan R_p . Pemodelan ini menerapkan hukum kirchoff yang memiliki persamaan sebagaimana pada Persamaan 3.17. Untuk mengetahui karakteristik dari modul fotovoltaik yaitu berupa grafik kurva $I(V)$ dan $P(V)$ maka dilakukan perhitungan untuk masing-masing parameter yaitu *photocurrent* (I_{ph}), *Diode 1 current* (I_{d1}), *Diode 2 current* (I_{d2}), Tahanan Seri (R_s) dan Tahanan *Shunt* atau paralel (R_p). Pada pendekatan dengan *double dioda* ini *ideality factor* diasumsikan memiliki jenis dioda yang sama sehingga nilai (I_{d1}) sama dengan nilai (I_{d2}). Untuk mengetahui hasil dari masing-masing parameter tersebut dilakukan simulasi oleh Matlab. Dalam melakukan simulasi oleh Matlab untuk mengetahui karakteristik dari fotovoltaik tersebut dilakukan pada keadaan *Standart Test Condition* (STC) dengan suhu 25°C dan radiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 . Sehingga parameter-parameter diketahui hasilnya yang dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Nilai Parameter pada kondisi STC (Suhu 25°C dan Radiasi 1000 W/m^2)

Parameter	Hasil
<i>Photocurrent</i> (I_{ph})	1,250445 A
<i>Diode 1 current</i> (I_{d1})	$4,72416 \times 10^{-9}$ A
<i>Diode 2 current</i> (I_{d2}),	$4,72416 \times 10^{-9}$ A
Tahanan Seri (R_s)	0,265500 Ω
Tahanan Paralel (R_p)	746,173560 Ω

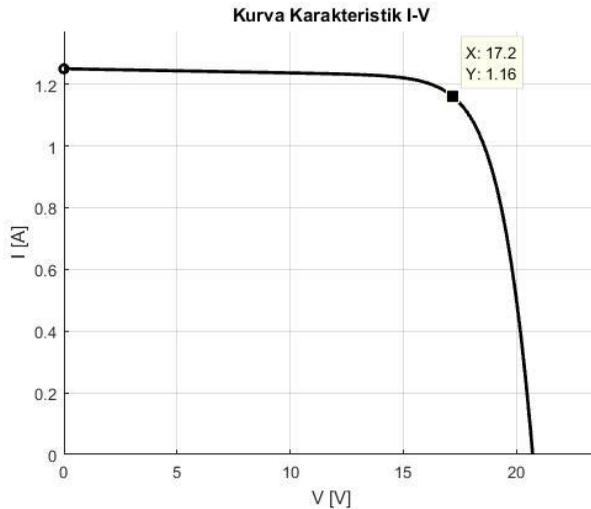
Model fotovoltaik dengan pendekatan *double dioda* secara teori memiliki keakuratan yang baik. Nilai perolehan model *double dioda* menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan *single dioda* dalam kondisi *Standar Test Condition* (STC).

Pada model *double* dioda ini dapat mencapai keakuratan yang baik namun terdapat parameter tambahan yaitu I_{d2} . Secara teori untuk mendapatkan nilai pada parameter I_{d2} sedikit mengalami kesulitan dikarenakan terdapat parameter yang tidak diketahui yaitu nilai *ideality factor* yang kedua. Dalam melakukan iterasi pun memerlukan komputasi yang lumayan lama. Secara teori nilai dari I_{d2} memiliki hasil yang 3-7 kali lipat lebih besar dari I_{d1} .

Namun dalam penelitian ini menggunakan asumsi bahwa nilai *ideality factor* kedua sama dengan *ideality factor* pertama, sehingga nilai I_{d1} sama dengan I_{d2} karena jenis yang digunakan merupakan material yang sama yaitu silikon monokristal.

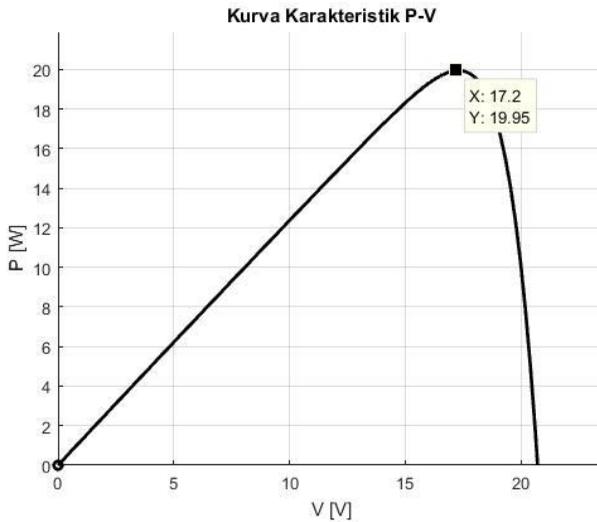
Untuk mencari nilai dari parameter R_s dan R_p secara metode sama dengan pendekatan *single* dioda. Nilai dari parameter R_s dan R_p tidak diketahui pada data sheet fotovoltaiik untuk mengetahui hasil dari parameter tersebut dilakukan perhitungan. Pada beberapa penelitian terdapat rumus matematika untuk mengetahui hasil tersebut namun hal tersebut dianggap tidak akurat karena untuk mendapatkan karakteristik fotovoltaiik yang bagus tidak bisa dilakukan perhitungan nilai R_s dan R_p secara terpisah. Nilai tersebut didapatkan dengan cara iterasi. Iterasi ini berhenti jika nilai dari $P_{max,experiment} = P_{max,model}$, dengan batas nilai eror sebesar 10^{-5} . Sehingga nilai dari masing-masing parameter dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Dari hasil parameter tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik fotovoltaiik yang dapat dilihat dari grafik kurva karakteristik $I(V)$ dan $P(V)$. Karakteristik fotovoltaiik ini disimulasikan pada kondisi *Standar Test Condition* (STC) dengan suhu $25^{\circ}C$ dan radiasi 1000 W/m^2 . Hasil dari karakteristik fotovoltaiik dengan pendekatan *double* dioda dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Hasil Simulasi Karakteristik I(V) Fotovoltaik dengan pendekatan *double dioda*

Pada Gambar 4.5 merupakan kurva karakteristik I(V) dengan pendekatan *double dioda* pada fotovoltaik tipe TN-20M. Kurva tersebut didapatkan hasil bahwa nilai pada empat titik yaitu *current short circuit* (I_{sc}), *Optimum Operating Voltage* (V_{oc}), *Optimum Operating Current* (I_{mp}) dan *Voltage open circuit* (V_{oc}) pada model simulasi memiliki hasil nilai sedikit lebih besar dengan datasheet yang ada pada fotovoltaik tipe TN-20M namun masih mendekati dan tidak berlebihan.



Gambar 4. 6 Hasil Simulasi Karakteristik P(V) Fotovoltaik dengan pendekatan *double* dioda

Pada Gambar 4.6 merupakan kurva karakteristik P(V) dengan pendekatan *double* dioda pada tipe fotovoltaik TN-20M. Dari kurva tersebut didapatkan hasil bahwa nilai pada titik *Power Maximum* (Wp) pada model simulasi memiliki nilai sama dengan datasheet yang ada pada fotovoltaik tipe TN-20M.

Dari hasil kurva karakteristik I(V) dan P(V) dapat dilihat hasil perbandingan simulasi dan datasheet fotovoltaik tipe TN-20M pada kondisi *Standar Test Condition* (STC) dengan suhu 25°C dan radiasi 1000 W/m². Hasil perbandingan nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4 .

Tabel 4. 4 Hasil Perbandingan Simulasi Dan Datasheet

Parameter	Datasheet	Simulasi
Imp	1,16 A	1,16 A
Vmp	17,2 A	17,2 A
Pmax	20 W	19,95 W
Isc	1,25 A	1,25 A
Voc	21,5 A	21,5 A
Kv	-0,36/°C	-0,36/°C
Ki	0,05/K	0,05/K
Ns	36	36
Rs	-	0,266 Ω
Rp	-	747,237 Ω
Iph	-	1,250445 A
Id ₁	-	4,72399 x 10 ⁻⁹ A
Id ₂	-	4,72399 x 10 ⁻⁹ A

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 hasil yang didapatkan pada kondisi STC dengan suhu 25°C dan radiasi 1000 W/m² antara simulasi dan datasheet fotovoltaik tipe TN-20M memiliki hasil yang sama. Sehingga dapat dikatakan bahwa simulasi memiliki model yang mirip dengan fotovoltaik aslinya.

4.2 Validasi Parameter pada Simulasi

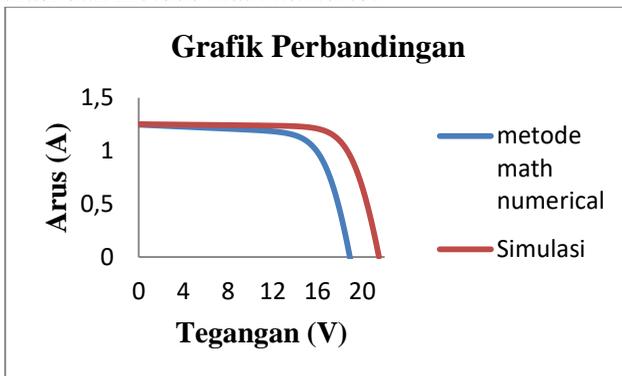
Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan besar *error* parameter yang didapat yang menggunakan metode *math numerical* dan simulasi. Pada metode *math numerical* yang terdapat pada penelitian sebelumnya dan telah teruji. Validasi ini digunakan pada pendekatan *single* dioda dan *double* dioda. Berikut merupakan hasil nilai dari masing-masing parameter dengan menggunakan pendekatan *single* dioda yang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

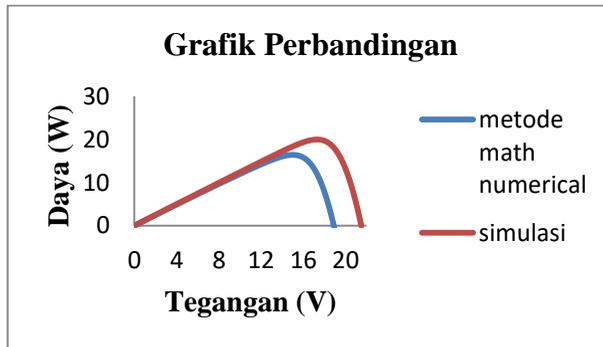
Tabel 4. 5 Validasi Hasil Simulasi Pendekatan *Single Dioda*

Parameter	Math Numerical	Simulasi	Error
Rs (Ω)	0,854	0,981	0,127
Id (A)	4,70187E-08	4,75E-09	$4,2 \times 10^{-8}$
Iph (A)	1,25	1,25136	0,00136

Error yang diperoleh pada masing-masing parameter Rs = 0,148, Io= 0,89 dan Iph = 0,00108, angka tersebut menjelaskan perbedaan nilai antara metode *math numerical* dan simulasi memiliki *error* yang kecil maka dianggap kondisi simulasi sudah mendekati dengan metode *math numerical* sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada variasi suhu dan radiasi yang sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Selain *error* yang diperoleh dapat juga dilihat hasil keluaran karakteristik I(V) dan P(V) antara metode *math numerical* dan simulasi. Hasil karakteristik I(V) keluaran pada simulasi yang didapat menunjukkan hasil yang mendekati namun masih memiliki hasil yang lebih besar dibanding metode *math numeric*. Berikut ini dapat dilihat grafik perbandingan antara simulasi dan metode *math numeric*.

**Gambar 4. 7** Grafik Perbandingan Karakteristik I(V) Antara Simulasi pendekatan *single dioda* dan *Math Numerical*



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Karakteristik P(V) Antara Simulasi pendekatan *single dioda* dan *Math Numerical*

Dari gambar 4.7 dan gambar 4.8 dapat terlihat bahwa simulasi menghasilkan keluaran yang lebih tinggi, hal tersebut dikarenakan persamaan yang digunakan pada simulasi merupakan persamaan yang mendekati ideal sedangkan pada metode *math numerical* menggunakan persamaan yang berdasarkan dari turunan persamaan dan menggunakan sistem persamaan nonlinear. Dari keluaran karakteristik I(V) dan P(V) tersebut didapatkan hasil yaitu pada simulasi memiliki maksimum daya sebesar 19,95 watt yang terletak pada tegangan 17,45 volt dan arus 1,14567 ampere. Sedangkan pada metode *math numerical* memiliki maksimum daya sebesar 16,399 watt yang terletak pada tegangan 15,05 volt dan arus 1,0896 ampere.

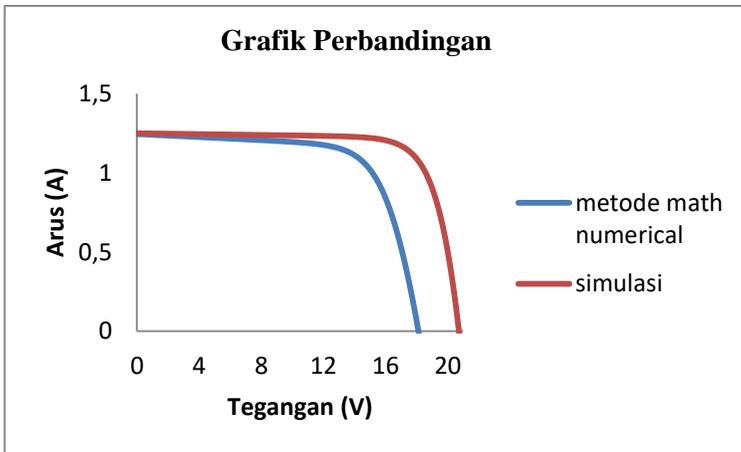
Selain pendekatan dengan *single dioda* dilakukan juga validasi parameter pada *double dioda*. Berikut merupakan hasil nilai dari masing-masing parameter dengan menggunakan pendekatan *single dioda* yang dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 Validasi Hasil Simulasi Pendekatan *Double Dioda*

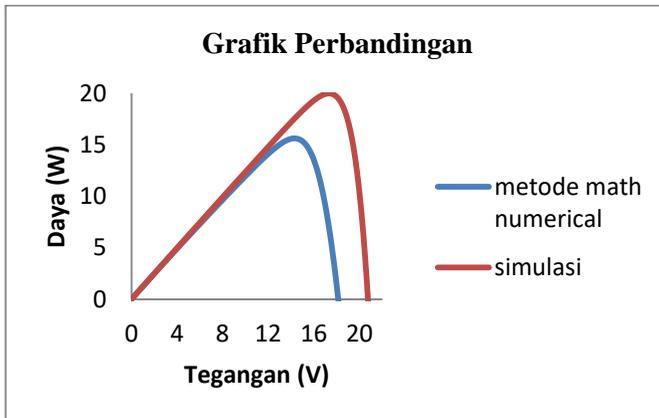
Parameter	<i>Math Numerical</i>	Simulasi	Error
R_s (Ω)	0,854	0,266	0,587
I_{d1} (A)	4,70187E-08	4,72399E-09	$4,2 \times 10^{-8}$
I_{d2} (A)	4,70187E-08	4,72399E-09	$4,2 \times 10^{-8}$
I_{ph} (A)	1,25	1,250445	0,00045

Pada pendekatan *double* dioda ini diasumsikan bahwa dioda yang digunakan yaitu sama dengan dioda yang pertama, sehingga nilai dari $I_{d1} = I_{d2}$. Dari hasil yang dapat dilihat pada Tabel 4.6, *error* yang diperoleh pada masing-masing parameter $R_s = 0,6879$, $I_{d1} = 0,8995$, $I_{d2} = 0,8995$ dan $I_{ph} = 0,000356$, angka tersebut menjelaskan perbedaan nilai antara metode *math numerical* dan simulasi memiliki *error* yang kecil maka dianggap kondisi simulasi sudah mendekati dengan metode *math numerical* sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada variasi suhu dan radiasi yang sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Selain *error* yang diperoleh dapat juga dilihat hasil keluaran karakteristik I(V) dan P(V) antara metode *math numerical* dan simulasi. Hasil karakteristik I(V) keluaran pada simulasi yang didapat menunjukkan hasil yang mendekati namun masih memiliki hasil yang lebih besar dibanding metode *math numeric*. Berikut ini dapat dilihat grafik perbandingan antara simulasi dan metode *math numeric*.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Karakteristik I(V) Antara Simulasi pendekatan *double* dioda dan *Math Numerical*



Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Karakteristik P(V) Antara Simulasi pendekatan *double dioda* dan *Math Numerical*

Dari gambar 4.9 dan gambar 4.10 dapat terlihat bahwa simulasi menghasilkan keluaran yang lebih tinggi, hal tersebut dikarenakan persamaan yang digunakan pada simulasi merupakan persamaan yang mendekati ideal sedangkan pada metode *math numerical* menggunakan persamaan yang berdasarkan dari turunan persamaan dan menggunakan sistem persamaan nonlinear. Dari keluaran karakteristik I(V) dan P(V) tersebut didapatkan hasil yaitu pada simulasi memiliki maksimum daya sebesar 19,95 watt yang terletak pada tegangan 17,45 volt dan arus 1,15 ampere. Sedangkan pada metode *math numerical* memiliki maksimum daya sebesar 15,399 watt yang terletak pada tegangan 14,19 volt dan arus 1,099 ampere.

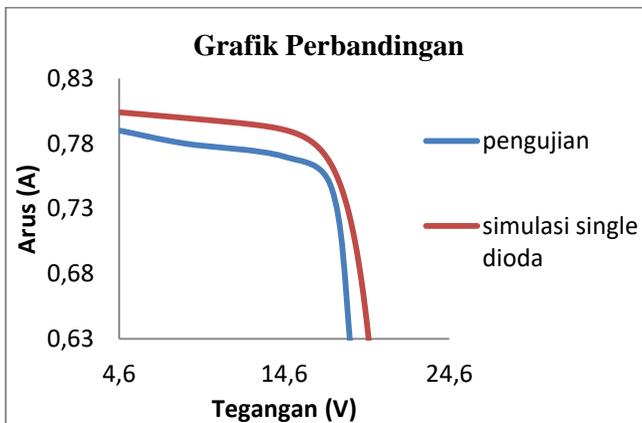
4.3 Pengujian Hasil Simulasi

Setelah pemodelan disumalasi oleh Matlab dan mendapatkan hasil keluaran karakteristik fotovoltaiik yang berupa kurva karakteristik I(V) . Selanjutnya yaitu pengujian yang dilakukan dengan mengambil data langsung keluaran dari fotovoltaiik yang berupa voltase dan arus dan masukan berupa suhu dan radiasi.

Pengujian dilakukan pada 3 situasi yaitu pagi , siang dan sore. Selain itu dilakukan juga pada kondisi cuaca yang cerah berawan. Pengujian dilakukan dengan cara mengambil data secara langsung

yaitu data suhu fotovoltaik dengan menggunakan alat ukur berupa *thermometer IR* kemudian radiasi matahari dengan menggunakan alat ukur *pyranometer* dan dengan menggunakan rangkaian sensor tegangan-arus beban berupa kapasitor. Kapasitor ini bertujuan untuk mengisi muatan dari nilai nol sampai dengan muatan kapasitor penuh atau sampai pembacaan berada pada keadaan stabil. Berikut ini merupakan hasil dari pengukuran langsung dan simulasi pada masing-masing pendekatan yaitu *single dioda* dan *double dioda*.

- Pengukuran saat cuaca cerah pada jam 09.00 WIB

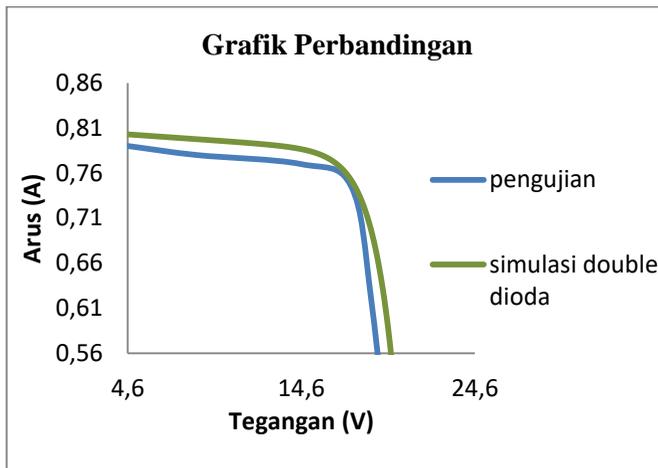


Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi *Single Dioda* pada Jam 09.00

Gambar 4.11 dilakukan pengambilan data pada jam 09.00 WIB dengan suhu fotovoltaik sebesar $45,8^{\circ}$ C dan radiasi matahari sebesar $640,6685 \text{ W/m}^2$, dapat dilihat bahwa hasil keluaran tegangan dan arus pada pengukuran langsung memiliki bentuk yang hampir mirip dengan hasil simulasi dan hasil yang didapat juga mendekati daripada hasil simulasi. Pada kurva tersebut didapat nilai daya tertinggi yaitu pada kurva pengujian pada $13,0217 \text{ watt}$ yang terletak pada tegangan $17,46 \text{ V}$ dan arus $0,7458 \text{ A}$, sedangkan pada simulasi *single dioda* memiliki daya tertinggi pada $13,47 \text{ watt}$ terdapat pada tegangan $18,29887 \text{ V}$

dan arus 0,736325 A. Grafik tersebut memiliki selisih yang dapat dihitung dari perbedaan daya maksimum antara hasil simulasi *single* dioda dan pengujian fotovoltaik. Hasil yang didapat selisih error daya maksimum pada Gambar 4.11 yaitu sebesar 3,417%.

Hal tersebut menunjukkan bahwa menurut referensi penelitian yang telah ada dengan error kurang dari sama dengan 10% menunjukkan bahwa simulasi tersebut memiliki hasil yang baik.



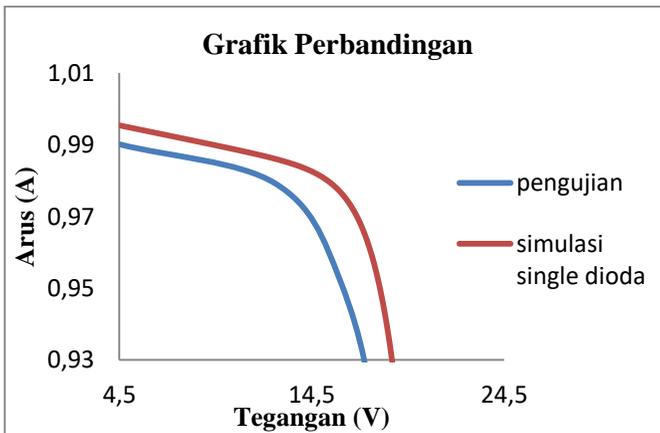
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi *Double* Dioda pada Jam 09.00

Gambar 4.12 dilakukan pengambilan data pada jam 9 pagi dengan suhu fotovoltaik sebesar $45,8^{\circ}$ C dan radiasi matahari sebesar $640,6685$ W/m², dapat dilihat bahwa hasil keluaran tegangan dan arus pada pengukuran langsung atau eksperimen memiliki bentuk yang mendekati dengan hasil simulasi .Simulasi dengan pendekatan *double* dioda ini memiliki hasil yang paling mendekati dibandingkan dengan *single* dioda. Pada kurva tersebut didapat nilai daya tertinggi yaitu pada kurva pengujian pada $13,0217$ watt terletak pada tegangan $17,46$ V dan arus $0,7458$ A, sedangkan pada simulasi *double* dioda memiliki daya tertinggi pada $13,19$ watt terdapat pada tegangan $17,901072$ V dan arus $0,7370663$ A. Grafik tersebut memiliki selisih yang

dapat dihitung dari perbedaan daya maksimum antara hasil simulasi *double* dioda dan pengujian fotovoltaiik. Hasil yang didapat selisih error daya maksimum pada Gambar 4.12 yaitu sebesar 1,325%.

Hal tersebut menunjukkan bahwa menurut referensi penelitian yang telah ada dengan error kurang dari sama dengan 10% menunjukkan bahwa simulasi tersebut memiliki hasil yang baik.

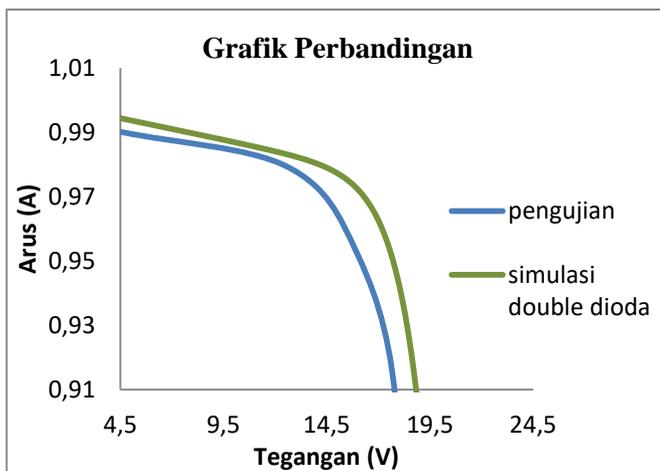
- Pengukuran saat cuaca cerah pada jam 12.00 WIB



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaiik dan Simulasi *Single Dioda* pada Jam 12.00 WIB

Pada Gambar 4.13 dilakukan pengambilan data pada jam 12.00 WIB dengan suhu fotovoltaiik sebesar 59°C dan radiasi matahari sebesar $786,9081\text{ W/m}^2$, dapat dilihat bahwa hasil keluaran tegangan dan arus pada pengukuran secara langsung, memiliki bentuk yang hampir mirip dengan hasil simulasi dan hasil yang didapat juga mendekati daripada hasil simulasi. Selain itu semakin tinggi radiasi matahari juga berpengaruh pada suhu fotovoltaiik yang juga semakin tinggi. Pada kurva tersebut didapat nilai daya tertinggi yaitu pada kurva pengujian pada $16,16\text{ watt}$ terletak pada tegangan $17,82\text{ V}$ dan arus $0,90723\text{ A}$, sedangkan

pada simulasi *single* dioda memiliki daya tertinggi pada 17,39 *watt* terdapat pada tegangan 18,8684 V dan arus 0,921766A. Grafik tersebut memiliki selisih yang dapat dihitung dari perbedaan daya maksimum antara hasil simulasi *single* dioda dan pengujian fotovoltaiik. Hasil yang didapat selisih error daya maksimum pada Gambar 4.13 yaitu sebesar 7,582%. Hal tersebut menunjukkan bahwa menurut referensi penelitian yang telah ada dengan error kurang dari sama dengan 10% menunjukkan bahwa simulasi tersebut memiliki hasil yang baik.

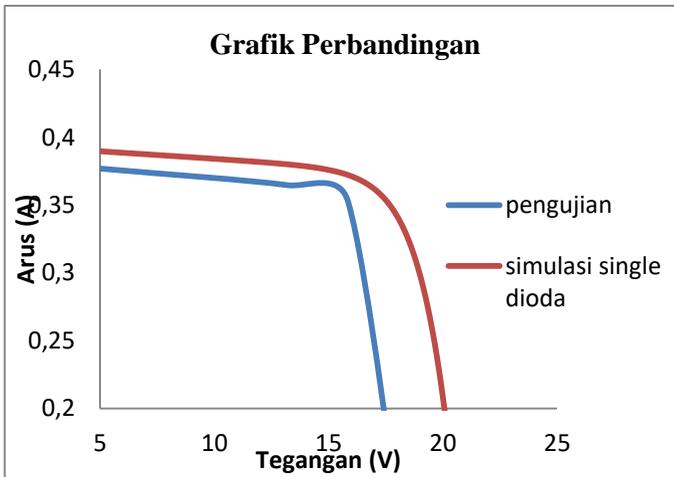


Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaiik dan Simulasi *Double* Dioda pada Jam 12.00 WIB

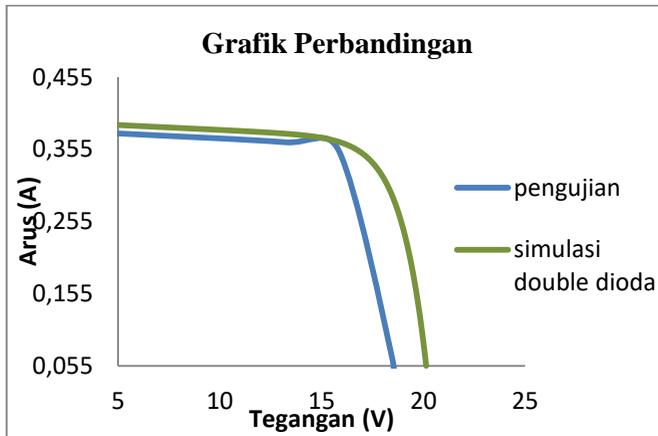
Pada Gambar 4.14 dilakukan pengambilan data pada jam 12 siang dengan suhu fotovoltaiik sebesar 59° C dan radiasi matahari sebesar 786,9081 W/m², dapat dilihat bahwa hasil keluaran tegangan dan arus pada pengukuran langsung memiliki bentuk yang hampir mendekati dengan hasil simulasi. Simulasi dengan pendekatan *double* dioda ini memiliki hasil yang paling mendekati dibandingkan dengan *single* dioda. Pada kurva tersebut didapat nilai puncak tertinggi yaitu pada kurva pengujian pada 16,16 *watt* terletak pada tegangan 17,82V dan arus 0,90723 A, sedangkan pada simulasi *double* dioda memiliki daya tertinggi

pada 17,13 watt terdapat tegangan 18,679716V dan arus 0,9174695A. Grafik tersebut memiliki selisih yang dapat dihitung dari perbedaan daya maksimum antara hasil simulasi *double*dioda dan pengujian fotovoltaik. Hasil yang didapat selisih error daya maksimum pada Gambar 4.14 yaitu sebesar 6,007%. Hal tersebut menunjukkan bahwa menurut referensi penelitian yang telah ada dengan error kurang dari sama dengan 10% menunjukkan bahwa simulasi tersebut memiliki hasil yang baik.

- Pengukuran saat cuaca cerah pada jam 15.00 WIB



Gambar 4. 15 Grafik Perbandingan Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi *Single* Dioda pada Jam 15.00 WIB



Gambar 4. 16 Grafik Pengujian Fotovoltaik dan Simulasi *Double Dioda* pada Jam 15.00 WIB

Pada gambar 4.15 dan gambar 4.16 dilakukan pengambilan data pada jam 15.00 WIB dengan suhu fotovoltaik sebesar $41,8^{\circ}\text{C}$ dan radiasi matahari sebesar $299,4429\text{ W/m}^2$, dapat dilihat pada simulasi dengan pendekatan *single dioda* bahwa hasil keluaran tegangan dan arus pada pengukuran langsung memiliki bentuk yang hampir mirip dengan hasil simulasi dan hasil yang didapat juga mendekati daripada hasil simulasi. Sedangkan pada pendekatan *double dioda* didapatkan bahwa kurva yang didapat memiliki hasil yang paling mendekati dengan pengujian secara langsung. Pada gambar 4.15 didapat nilai daya tertinggi yaitu pada kurva pengujian pada $5,590\text{ watt}$ terletak pada tegangan $15,85\text{V}$ dan arus $0,3527\text{A}$, sedangkan pada simulasi *single dioda* memiliki daya tertinggi pada $6,19$ yang terletak pada tegangan $17,51985\text{ V}$ dan arus $0,353321\text{A}$. Pada gambar 4.16 didapat nilai daya tertinggi yaitu pada kurva pengujian pada $5,590\text{ watt}$ terletak pada tegangan $15,85\text{V}$ dan arus $0,3527\text{A}$, sedangkan pada simulasi *double dioda* memiliki daya tertinggi pada $5,93\text{ watt}$ terletak pada tegangan $16,9151718\text{ V}$ dan arus $0,0672378\text{A}$.

Gambar 4.15 tersebut memiliki selisih yang dapat dihitung dari perbedaan daya maksimum antara hasil simulasi *single dioda* dan pengujian fotovoltaik. Hasil yang didapat selisih error daya

maksimum pada Gambar 4.15 yaitu sebesar 10,729%. Hal tersebut menunjukkan bahwa menurut referensi penelitian yang telah ada dengan error kurang dari sama dengan 10% menunjukkan bahwa simulasi tersebut memiliki hasil yang baik. Gambar 4.16 tersebut memiliki selisih yang dapat dihitung dari perbedaan daya maksimum antara hasil simulasi *double* dioda dan pengujian fotovoltaik. Hasil yang didapat selisih error daya maksimum pada Gambar 4.16 yaitu sebesar 6,18%. Hal tersebut menunjukkan bahwa menurut referensi penelitian yang telah ada dengan error kurang dari sama dengan 10% menunjukkan bahwa simulasi tersebut memiliki hasil yang baik.

Dari beberapa pengambilan data pengukuran didapatkan hasil nilai tegangan dan arus, dari hasil tersebut dapat dicari daya yang keluar pada masing-masing keadaan. Daya yang paling maksimum dicari untuk mengetahui error antara pengujian dan simulasi. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8.

Tabel 4.7 Hasil Nilai Error pada Simulasi *Single* Dioda dan Pengujian

Jam (WIB)	Radiasi (W/m ²)	Suhu (°C)	Daya Maksimal (watt)		Error %
			Pengujian	Simulasi	
09.00	640,669	45,8	13,0217	13,4737	3,471129
12.00	786,9081	59	16,16684	17,39266	7,58231
15.00	299,4429	41,8	5,590295	6,190132	10,72997

Tabel 4. 8 Hasil nilai eror pada simulasi *double dioda* dan Pengujian

Jam (WIB)	Radiasi (W/m ²)	Suhu (°C)	Daya Maksimal (<i>watt</i>)		Error %
			Pengujian	Simulasi	
09.00	640,669	45,8	13,0217	13,1943	1,32548
12.00	786,9081	59	16,16684	17,13807	6,007544
15.00	299,4429	41,8	5,590295	5,935835	6,181069

Dari hasil yang didapat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 bahwa daya maksimum pada pengujian fotovoltaik yang dilakukan dengan melakukan pengukuran secara langsung memiliki nilai yang kecil dibandingkan dengan simulasi, hal ini dikarenakan persamaan yang digunakan pada simulasi merupakan persamaan ideal dengan memiliki masukan berupa data-data spesifikasi fotovoltaik. Sedangkan modul fotovoltaik ketika dilakukan pengujian secara langsung memiliki hasil keluaran yang berkurang dikarenakan terdapat *loss* yang disebabkan oleh faktor-faktor eksternal maupun internal. Faktor eksternal yang mungkin terjadi yaitu alat ukur yang digunakan. Dalam pengujian secara langsung, menggunakan beberapa alat ukur yaitu *pyranometer* untuk mengukur radiasi matahari, *termometer IR* untuk mengukur suhu pada permukaan fotovoltaik dan rangkaian sensor arus-tegangan untuk mengukur tegangan-arus yang keluar dari fotovoltaik. Dalam melakukan suatu pengukuran dengan menggunakan alat ukur memungkinkan terjadinya adanya *noise* dari alat ukur tersebut dalam melakukan pembacaan, sehingga dapat mempengaruhi hasil pembacaan yang didapat. Hal tersebut dapat menjadi faktor yang menyebabkan terjadinya *loss* ketika melakukan pengujian secara langsung. Selain faktor eksternal yang terjadi juga terdapat faktor internal yang mempengaruhi yaitu seperti menurunnya performansi dari fotovoltaik yang disebabkan faktor dari suhu dan radiasi yang mengenai fotovoltaik. Selain itu faktor kondisi cuaca pada saat pengujian tersebut juga dapat mempengaruhi.

Tabel 4.7 dan 4.8 dapat dilihat bahwa persen error yang didapat pada masing-masing simulasi *single* dioda dan *double* dioda memiliki hasil error $\leq 10\%$ hal tersebut sesuai dengan referensi pada jurnal (Klein & Bockman, 2006), hal tersebut menunjukkan simulasi memiliki hasil yang baik. Selain hal tersebut juga dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 bahwa pendekatan *double* dioda memiliki persen error yang kecil dibandingkan dengan *single* dioda. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan dengan *double* dioda lebih mendekati dengan keadaan *real* dan memiliki keakuratan lebih baik dari pada pendekatan *single* dioda. Tidak hanya yang terlihat pada *error* yang terdapat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 saja, dari grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4.11 sampai dengan Gambar 4.16 perbandingan antara simulasi dengan pendekatan *double* dioda dan pengujian yang dilakukan pengukuran secara langsung, juga menunjukkan bahwa simulasi dengan pendekatan *double* dioda lebih mendekati dengan pengujian secara langsung.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengujian dan validasi model fotovoltaiik dengan pendekatan *single* dioda dan *double* dioda dapat diambil kesimpulan, yaitu :

- a. Nilai parameter pada masing-masing pendekatan didapatkan dari simulasi oleh Matlab. Parameter yang digunakan untuk melakukan pemodelan ada 4 parameter yaitu *Photocurrent* (I_{ph}), *Diode current* (I_d), Tahanan Seri (R_s) dan Tahanan Paralel (R_p). Masing-masing pendekatan parameter yang didapat *Single* Dioda memiliki *Photocurrent* (I_{ph}) sebesar 1,25136 A, *Diode current* (I_d) sebesar $4,74684 \times 10^{-9}$ A, Tahanan Seri (R_s) sebesar 0,981 Ω , Tahanan Paralel (R_p) sebesar 904,404215 Ω . *Double* Dioda *Photocurrent* (I_{ph}) sebesar 1,250445 A, *Diode 1 current* (I_{d1}) sebesar $4,72416 \times 10^{-9}$ A, *Diode 2 current* (I_{d2}) sebesar $4,72416 \times 10^{-9}$ A, Tahanan Seri (R_s) sebesar 0,26550 Ω , Tahanan Paralel (R_p) sebesar 746,173560 Ω . Nilai yang diperoleh menunjukkan bahwa pendekatan *double* dioda memiliki hasil parameter yang lebih kecil .
- b. Pengujian dilakukan dengan melakukan pengambilan data secara *real* pada fotovoltaiik dengan melakukan pengujian pada kondisi cuaca cerah berawan pada jam 9 pagi , jam 12 siang dan jam 15 sore. Dari hasil yang didapat hasil simulasi hampir memiliki grafik yang sama dengan kondisi *real* dan hasil dengan menggunakan pendekatan *double* dioda menunjukkan hasil yang lebih mendekati dengan kondisi *real* dan memiliki error yang kecil dibandingkan dengan menggunakan pendekatan *single* dioda.

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan pada penelitian selanjutnya adalah :

- a. Sebaiknya simulasi dilakukan dengan menggunakan blok pada *tollbox simulink* matlab atau dengan menggunakan *software* simulasi yang lain seperti *Labview* atau C++.
- b. Sebaiknya pengambilan data dilakukan dengan berbagai kondisi cuaca.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2013, April). Dipetik July 19, 2017, dari elib.unikom.ac.id:
http://elib.unikom.ac.id/files/disk1/440/jbptunikompp-gdl-ujanghandi-21990-5-unikom_u-v.pdf
- Goetzbecker, & Hoffman. (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer.
- Habbati, B., & Ramdani, Y. (2014). A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Juornal of astronomy and geophysucs*, 54.
- Handini, W. (2008). Performa Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna. *FT UI*.
- Klein, W. D., & Bockman, W. (2006). Improvment and Validation of a Model for Fotovoltaic Array performance. *Sciencedirect*, 85.
- Kunz, G., & Wagner, A. (2004). Internal Series Resistance Determinated of Only One IV-Curve Under Illumination. *European PV Solar Energy Conference, Paris*, 1-4.
- Mboumboue, E., & Njomo, D. (2013). Mathematical Modeling and Digital Simulation of PV Solar Panel using MATLAB Software. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 24.
- Nema, S., Nema, R., & Agnihotri, G. (2010). Matlab / simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification. *intentional journal of energy and enviromental*, 487-500.
- Nugraha, A. I., & Abadi, I. (2016). Implementasi Teknik Maximum Power Point Tracking (Mpppt) Pada Sistem Penjejak Matahari Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Anfis). *POMITS*.
- Perdana, P. N. (2012, 11 03). Dipetik 05 12, 2017, dari Jendela Den Ngabei:
www.jendeladenngabei.blogspot.co.id/2012/pembangkit-listrik-tenaga-surya-plts.html
- Rizal, M. F., & Handjarinto M.Sc, I. S. (2008). Penerapan Panel Fotovoltaik terintegrasi pada fasade dan atap. *FT UI*.

- Tito, B. (2012). Metode MPPT Baru untuk Sel Surya Berdasarkan Pengendali PI. *Universitas Indonesia*.
- Veldhuis, A., & Reinders, A. (2015). Reviewing the potential and cost-effectiveness of off-grid PV systems in Indonesia on a provincial level . Dalam *Renewable and Sustainable Energy Review* (hal. 757-769). Netherlands: University of Twente, Faculty of CTW, Department of Design, Production and Management,.
- Vivek, T., S.C, G., & Yashwant, S. (2015). Single Diode and Two Diode PV Cell Modeling Using MATLAB for Studying Characteristic of Solar Cell Under Varying Conditions. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)* , 67.
- Yuliananda, S., Sarya, G., & Hastijanti, R. R. (2015). Pengaruh Perubahan Intensitas Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Surya. 193.

BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis Aulia Perdana Sari yang dilahirkan di Kota Kediri pada tanggal 14 Agustus 1993 dari ayah bernama Sajuri dan ibu bernama Nanik Rukmawati. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Pada tahun 2006, penulis menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Semampir 1 Kediri. Pada tahun 2009 penulis menyelesaikan pendidikan tingkat menengah di SMPN 1 Kediri. Tahun 2012 berhasil menyelesaikan pendidikan tingkat menengah atas di SMAN 2 Kediri. Tahun 2015 penulis menyelesaikan pendidikan diploma di DIII-Metrologi dan Instrumentasi, Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tahun 2017 ini penulis menyelesaikan pendidikan sarjana di S1 Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil yaitu Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol dengan Tugas Akhir berjudul “PENGUJIAN DAN VALIDASI MODEL FOTOVOLTAIK MENGGUNAKAN PENDEKATAN *SINGLE DIODE* DAN *DOUBLE DIODE* “. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email auliaperdanasari@gmail.com.