



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS MANAJEMEN ENERGI PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA SURYA PADA GREEN BASE TRANSCEIVER  
STATION DENGAN MATLAB/SIMULINK**

**TESIS**

**EVA MAGDALENA SILALAH  
0806477270**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2010**

**PERPUSTAKAAN PUSAT  
UNIVERSITAS INDONESIA**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS MANAJEMEN ENERGI PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA SURYA PADA GREEN BASE TRANSCEIVER  
STATION DENGAN MATLAB/SIMULINK**

**TESIS**

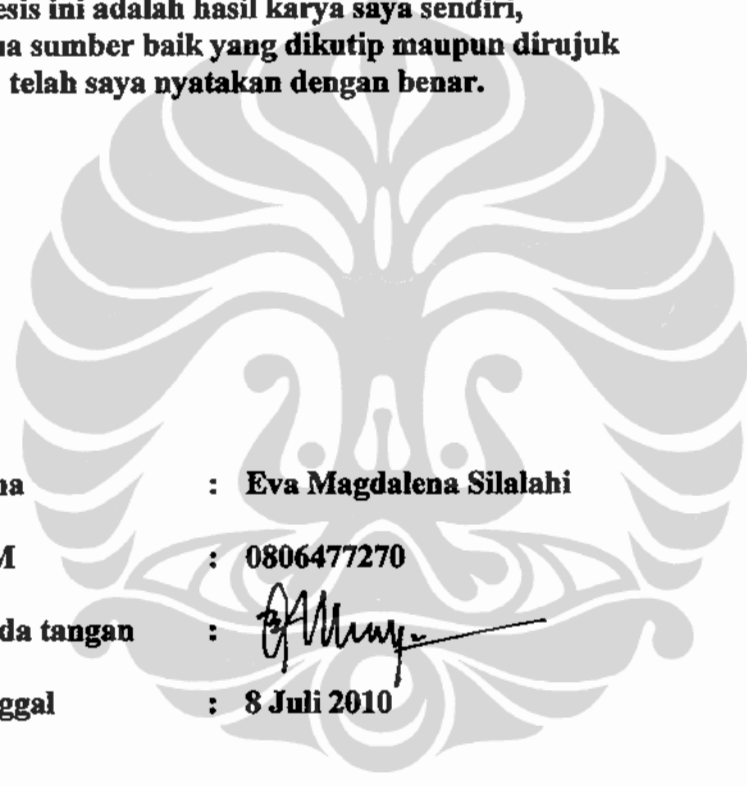
**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister  
Bidang Ilmu Teknik Program Studi Teknik Elektro**

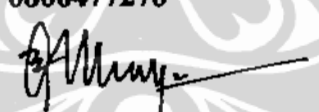
**EVA MAGDALENA SILALAH  
0806477270**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



**Nama : Eva Magdalena Silalahi**  
**NPM : 0806477270**  
**Tanda tangan : **  
**Tanggal : 8 Juli 2010**

## LEMBAR PENGESAHAN

Seminar ini diajukan oleh :

Nama : Eva Magdalena Silalahi  
NPM : 0806477270  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Seminar : Studi Simulasi Modul Sel Surya Pada Green Base Transceiver Station

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing Eko Adhi Setiawan, ST, MT

()

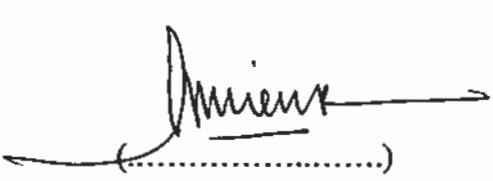
Penguji : Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo, I.P.M.

()

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T.

()

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, M.T.

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juni 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini merupakan salah satu syarat untuk dapat memperoleh gelar Magister Bidang Ilmu Teknik Program Studi Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1). Bapak Dr.-Ing. Eko Adhi Setiawan, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama, yang telah memberikan kesempatan, arahan, waktu, dan pikirannya untuk membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini;
- (2). Pimpinan PT. Excelcomindo Pratama Tbk. telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (3). Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (4). Teman-teman mahasiswa S2 Teknik Tenaga Listrik Angkatan 2008 yang banyak membantu dan memberikan dukungan moral.

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

Depok, 8 Juli 2010

Penulis

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

---

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

Nama : Eva Magdalena Silalahi  
NPM : 0806477270  
Program Studi : Teknik Tenaga Listrik  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tesis

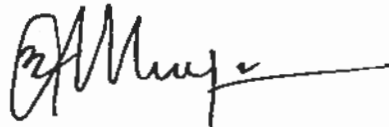
demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Analisis Manajemen Energi Pembangkit  
Listrik Tenaga Surya Pada Green Base Transceiver Station  
dengan Matlab/Simulink**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 8 Juli 2010  
Yang menyatakan



(Eva Magdalena Silalahi)

## ABSTRAK

Nama : Eva Magdalena Silalahi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Manajemen Energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya  
Pada Green Base Transceiver Station dengan Matlab/Simulink

PLTS dapat dimanfaatkan sebagai catu daya listrik BTS hijau. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS cenderung tidak kontinyu, berubah-ubah setiap waktu bergantung pada kondisi cuaca sekitarnya padahal BTS memerlukan sistem catu daya listrik yang kontinyu dan andal selama 24 jam sehari. Oleh karena itu, perlu dilakukan pembagian kontribusi energi diantara PLTS dan baterai sebagai media penyimpanan energi untuk memasok kebutuhan energi BTS. Kontribusi energi ini diatur dengan algoritma manajemen energi yang disimulasikan menggunakan MATLAB/SIMULINK dalam kondisi cuaca cerah dan cuaca berawan/hujan dalam siklus 24 jam.

Hasil simulasi dalam kondisi cuaca cerah, diperoleh kontribusi energi PLTS 54,06 kWh atau 49,688% dan kontribusi energi pengosongan baterai 54,74 kWh atau 50,30%, dari total kebutuhan energi listrik BTS. Dalam kondisi cuaca hujan, diperoleh kontribusi energi PLTS 14,73 kWh atau 13,54% dan kontribusi energi pengosongan baterai 98,645 kWh atau 90,67% dari total kebutuhan energi listrik BTS.

Sedangkan nilai SOC baterai tidak pernah turun dibawah 25% dalam dua kondisi tersebut, sehingga dapat diprediksikan bahwa ketersediaan energi baterai dapat memenuhi kebutuhan energi BTS selama dua hari berturut-turut (dalam kondisi cuaca hujan) secara mandiri.

Kata kunci:

PLTS, baterai, simulasi, kondisi cuaca, SOC, algoritma manajemen energi.

## ABSTRACT

Name : Eva Magdalena Silalahi  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : Analysis of Energy Management of Photovoltaic Systems at Green Base Transceiver Station with Matlab/Simulink

Photovoltaic systems can be used as electrical power supply for green BTS. Electrical energy produced by photovoltaic system has an trend of discontinue, timely variation depends on environment weather conditions, but BTS need a reliably and continuously power supply in 24 hours a day. In such conditions, needed an energy contribution sharing between photovoltaic system and battery as an energy storage for supplying of BTS energy demands. The energy contributions regulated by an energy management algorithms that are simulated by MATLAB/SIMULINK in a sunny day dan a cloudy day conditions at 24 hours cycles.

The simulation result in a sunny day condition, showing that an energy photovoltaic system contribution 54,06 kWh or 49,688% dan a contribution of discharging energy battery 54,74 kWh or 50,30% to supply all BTS energy demands. For the simulation results in a cloudy day condition, showing that an energy photovoltaic system contribution 14,73 kWh or 13,54% and a contribution of discharging energy battery 98,645 kWh or 90,67% to supply all BTS energy demands.

In both simulation conditions, SOC never dropped under 25%, so it can be predicted that the avalaibility of battery energi can meets all BTS energy demands for two consecutive cloudy days in stand-alone state.

### Keywords :

Photovoltaic system, battery, simulation, weather conditions, SOC, energy management algorithm.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
<b>1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang dan Permasalahan .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Metode Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Pembahasan .....	3
<b>2 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Green BTS .....	5
2.2 Aplikasi PLTS pada BTS .....	6
2.3 Komponen Sistem .....	8
2.3.1 Dioda Sambungan p-n .....	8
2.3.2 Pemodelan Sel Surya .....	9
2.3.3 Modul Sel Surya .....	10
2.3.4 Model Sel Surya yang Lebih Akurat .....	13
2.3.5 Model Modul Sel Surya .....	14
2.3.6 Pencari Titik Daya Maksimum .....	18
2.3.7 Array Sel Surya .....	20
2.3.8 Baterai .....	21
2.3.9 Alat Pengatur .....	24
2.3.10 Konverter AS/AS .....	24
2.3.11 Kendali saklar .....	25
2.4 Prinsip Kerja PLTS .....	26
2.4.1 Keunggulan PLTS .....	26
2.4.2 Kelemahan PLTS .....	27

<b>3 STUDI IMPLEMENTASI PLTS PADA BTS</b> .....	<b>28</b>
3.1 Konfigurasi Sistem .....	28
3.2 Pengoperasian Sistem .....	28
3.3 Algoritma Manajemen Energi .....	29
3.4 Data Sistem .....	32
3.4.1 Letak Geografis BTS .....	32
3.4.2 Data Cuaca/Radiasi Surya .....	32
3.4.3 Data Beban BTS .....	34
3.4.4 Parameter dari Komponen Sistem PLTS .....	35
3.5 Menentukan Ukuran Baterai dan Modul Surya .....	37
3.5.1 Ukuran Baterai .....	37
3.5.2 Ukuran Modul Surya .....	38
3.6 Tahapan Simulasi .....	39
<b>4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS</b> .....	<b>40</b>
4.1 Skema Simulasi .....	40
4.2 Hasil Simulasi dan Analisis .....	40
4.2.1 Simulasi karakteristik modul sel surya .....	41
4.2.2 Simulasi sistem pada kondisi awal tanpa menggunakan algoritma manajemen energi .....	44
4.2.3 Simulasi sistem dengan menggunakan algoritma manajemen energi .....	46
4.3 Perbandingan Hasil Simulasi .....	49
4.3.1 Saat cuaca cerah .....	49
4.3.2 Saat cuaca berawan/hujan .....	51
<b>5 KESIMPULAN</b> .....	<b>53</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem PLTS dengan beban ABB dan beban AS .....	6
Gambar 2.2	Aplikasi PLTS Mandiri pada BTS .....	6
Gambar 2.3	Dioda sambungan p-n .....	8
Gambar 2.4	Sel surya sambungan p-n .....	10
Gambar 2.5	Kontak listrik sel surya dan arus konduksi .....	10
Gambar 2.6	Rangkaian ekuivalen sel surya sederhana .....	11
Gambar 2.7	Rangkaian hubung-singkat dan rangkaian terbuka sel surya .....	11
Gambar 2.8	Kurva arus-tegangan sel surya ideal pada suhu 25°C .....	13
Gambar 2.9	Rangkaian ekuivalen yang lebih akurat dari sel surya .....	14
Gambar 2.10	Rangkaian ekuivalen dengan dioda yang digabungkan dan $R_p \approx$ .....	15
Gambar 2.11	Pengaruh faktor idealitas dioda pada 1 kW/m <sup>2</sup> dan 25°C .....	16
Gambar 2.12	Pengaruh resistansi seri pada 1 kW/m <sup>2</sup> dan 25°C .....	17
Gambar 2.13	Kurva P-V modul sel surya pada 1 kW/m <sup>2</sup> dan 25°C .....	19
Gambar 2.14	Diagram alir algoritma P&O .....	19
Gambar 2.15	Modul sel surya yang dihubungkan N <sub>s</sub> seri dan N <sub>p</sub> paralel .....	21
Gambar 2.16	Model baterai .....	22
Gambar 3.1	Skema sistem dan arah aliran daya dalam sistem .....	28
Gambar 3.2	Skema sistem pada kondisi awal .....	29
Gambar 3.3	Algoritma manajemen energi .....	31
Gambar 3.4	Letak geografis Jakarta Selatan .....	32
Gambar 3.5	Radiasi horizontal global untuk Jakarta Selatan .....	32
Gambar 3.6	Grafik intensitas radiasi surya .....	34
Gambar 3.7	Profil beban harian BTS .....	35
Gambar 4.1	Kurva P-V dan kurva P-I modul sel surya hasil simulasi .....	41
Gambar 4.2	Kurva I-V modul sel surya hasil simulasi .....	42
Gambar 4.3	Profil daya dan arus array sel surya saat cuaca cerah .....	43
Gambar 4.4	Profil daya dan arus array sel surya saat cuaca berawan/hujan .....	44
Gambar 4.5	Profil daya pengosongan dan arus pada baterai .....	44
Gambar 4.6	Profil tegangan dan nilai SOC pada baterai .....	45
Gambar 4.7	Profil pengosongan daya dan arus pada baterai .....	45
Gambar 4.8	Profil tegangan dan nilai SOC baterai hasil simulasi saat cuaca hujan .....	46
Gambar 4.9	Profil arus baterai hasil simulasi saat cuaca cerah .....	47
Gambar 4.10	Fluktuasi tegangan dan nilai SOC baterai saat cuaca cerah .....	47
Gambar 4.11	Profil arus pengosongan baterai hasil simulasi saat cuaca hujan .....	48
Gambar 4.12	Perubahan tegangan dan nilai SOC baterai saat cuaca hujan .....	48
Gambar 4.13	Profil energi sistem hasil simulasi saat cuaca cerah .....	50
Gambar 4.14	Profil energi sistem hasil simulasi saat cuaca hujan .....	52

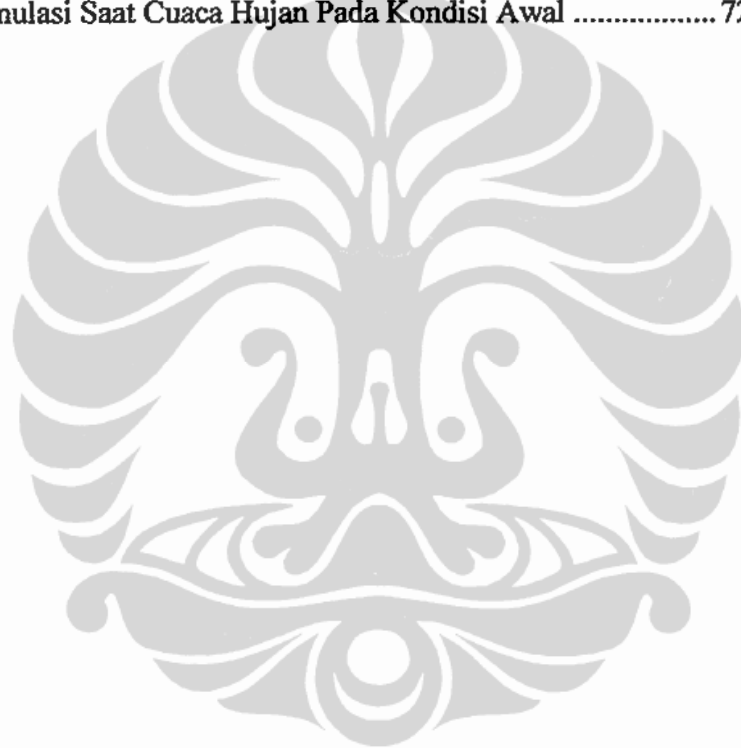
## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan diantara tegangan rangkaian terbuka baterai dan SOC ....	22
Tabel 3.1 Data radiasi surya harian dan <i>clearness index</i> .....	33
Tabel 3.2 Data radiasi surya dan temperatur udara pada 3 Januari 2010 .....	33
Tabel 3.3 Data radiasi surya dan temperatur udara pada 1 Januari 2010 .....	34
Tabel 3.4 Data daya BTS dalam 24 jam .....	35
Tabel 3.5 Nilai dari lembar data modul sel surya .....	36
Tabel 4.1 Hasil simulasi dalam kondisi cuaca cerah dan cuaca berawan/hujan..	49



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Listing Program Modul Sel Surya .....	56
Lampiran 2	Listing Program MPPT .....	58
Lampiran 3	Listing Program Kurva Modul Sel Surya .....	59
Lampiran 4	Diagram Blok Simulink .....	60
Lampiran 5	Hasil Simulasi Saat Cuaca Cerah Menggunakan Algoritma .....	69
Lampiran 6	Hasil Simulasi Saat Cuaca Hujan Menggunakan Algoritma .....	70
Lampiran 7	Hasil Simulasi Saat Cuaca Cerah Pada Kondisi Awal .....	71
Lampiran 8	Hasil Simulasi Saat Cuaca Hujan Pada Kondisi Awal .....	72



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang dan Permasalahan

Pada saat ini pertumbuhan pengguna telepon selular mengalami perkembangan yang pesat diikuti dengan pembangunan *Base Transceiver Station* (BTS) yang berguna untuk menghubungkan jaringan pengguna ponsel dengan jaringan yang lainnya. Namun, sayangnya BTS yang ada saat ini masih menggunakan listrik PLN, yang dituding dapat menyebabkan faktor krisis energi yang tengah terjadi terutama di wilayah perkotaan. Untuk mengatasi masalah tersebut, saat ini tengah dikembangkan 'Green BTS' yang menggunakan energi surya, yang dapat menghemat energi dan ramah lingkungan. Matahari yang merupakan salah satu solusi sebagai pengganti bahan bakar fosil diharapkan mampu digunakan untuk menyuplai energi untuk menggerakkan tenaga pada BTS. Nantinya sel surya yang menyerap sinar matahari dapat dipasangkan di menara BTS khususnya di wilayah perkotaan.

Sumber energi alternatif untuk mengoperasikan BTS disesuaikan dengan kondisi geografis setempat. Isu menipisnya sumber daya alam penghasil energi juga mendorong para operator selular untuk semakin giat menerapkan penggunaan teknologi dengan sumber energi alternatif. Sumber energi alternatif ini terutama sangat dibutuhkan untuk pengoperasian BTS, salah satu infrastruktur yang dikelola para operator jaringan dalam menyediakan layanannya.

Dalam studi ini, sistem yang dibahas terdiri dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai sebagai media penyimpanan energi, dan kebutuhan daya listrik BTS. Tujuan yang ingin dicapai adalah untuk menjamin pasokan energi listrik pada beban BTS melalui algoritma manajemen energi pada sisi suplai daya listrik sehingga diharapkan ketidakteraturan produksi energi listrik PLTS dapat dikelola melalui penggunaan baterai sebagai media penyimpanan energi PLTS yang berlebihan saat tidak tersedianya pasokan daya dari PLTS.

## 1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang dirumuskan pada penelitian ini adalah :

1. Terjadinya krisis energi listrik di wilayah perkotaan atau bila sumber listrik utama PLN padam padahal BTS memerlukan daya listrik yang terus-menerus selama 24 jam dalam menunjang operasionalnya.
2. Energi listrik yang dihasilkan PLTS cenderung berubah-ubah setiap saat tergantung pada kondisi cuaca sekitarnya.
3. Masalah ini diantisipasi melalui manajemen energi diantara PLTS dan baterai sebagai media penyimpanan energi dalam memasok kebutuhan energi BTS. Diharapkan nantinya PLTS dapat dipilih sebagai sumber pasokan utama ataupun sebagai pasokan cadangan daya listrik BTS di wilayah Jakarta.

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan algoritma manajemen energi pada PLTS dan baterai untuk memenuhi kebutuhan energi listrik BTS dalam siklus 24 jam.
2. Berdasarkan algoritma tersebut dapat ditentukan, energi yang dibangkitkan oleh PLTS, persentase kontribusi energi PLTS dan energi baterai serta fluktuasi nilai *State of Charge* (SOC) baterai terkait ketersediaan energi baterai dalam memasok kebutuhan energi BTS.

## 1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, permasalahan dibatasi berdasarkan beberapa asumsi yang digunakan sebagai berikut :

1. Sistem yang ditinjau adalah PLTS mandiri dan baterai sebagai media penyimpanan energi untuk memasok kebutuhan daya listrik BTS dalam siklus 24 jam berdasarkan kondisi cuaca yang berbeda.
2. Data yang diperlukan antara lain:
  - a. Profil kebutuhan daya listrik BTS selama 24 jam;

- b. Data komponen PLTS dan baterai yang digunakan.
  - c. Intensitas radiasi surya dengan mempertimbangkan kondisi cuaca tertentu yaitu kondisi cuaca cerah dan kondisi cuaca berawan/hujan.
  - d. Suhu udara pada saat kondisi cuaca cerah dan cuaca berawan/hujan.
3. Simulasi dilakukan dalam skenario kondisi yang berbeda.

### 1.5 Metode Penelitian

Langkah-langkah utama yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah :

- a. Studi literatur untuk mempelajari karakteristik, persamaan-persamaan atau pemodelan dan teori penunjang yang diperlukan. Literatur diambil dari buku teks, jurnal dan katalog yang berkaitan dengan studi ini.
- b. Menentukan batasan-batasan masalah menggunakan persamaan-persamaan dengan menetapkan beberapa asumsi dan membuat algoritma manajemen energi yang akan digunakan dalam simulasi komputer.
- c. Mengumpulkan data-data sistem dengan studi literatur melalui pustaka, jurnal dan internet untuk mendapatkan data modul sel surya, baterai, dan data intensitas radiasi surya di Jakarta dan survei lapangan untuk memperoleh data kebutuhan daya listrik BTS.
- d. Berdasarkan data-data yang diperoleh, menentukan konfigurasi PLTS yang akan digunakan sebagai pemasok daya listrik BTS.
- e. Melakukan simulasi pada konfigurasi PLTS dan baterai berdasarkan algoritma manajemen energi menggunakan perangkat lunak MATLAB/SIMULINK. Simulasi akan dijalankan dalam kondisi skenario yang berbeda.
- f. Menganalisis hasil simulasi dan menarik kesimpulan dari analisis tersebut.

### 1.6 Sistematika Pembahasan

Pada bab satu dibahas tentang latar belakang penelitian, perumusan permasalahan, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika pembahasan; pada bab dua dibahas tentang konsep dasar yang



meliputi gambaran mengenai PLTS dan selanjutnya membahas deskripsi model matematis masing-masing komponen yang digunakan; pada bab tiga dijelaskan data dan parameter komponen yang akan digunakan, menentukan konfigurasi PLTS yang akan ditinjau, menentukan algoritma manajemen energi yang akan digunakan serta membuat program simulasinya; pada bab empat dibahas hasil simulasi berdasarkan kondisi skenario simulasi yang berbeda serta menganalisis hasil simulasi; dan bab lima kesimpulan.



## BAB II

### PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

#### 2.1 Green BTS

Isu menipisnya sumber daya alam penghasil energi rupanya juga mendorong para operator seluler untuk semakin giat menerapkan penggunaan teknologi dengan sumber energi alternatif. Sumber energi alternatif untuk mengoperasikan BTS disesuaikan dengan kondisi geografis setempat. Sumber energi alternatif ini terutama sangat dibutuhkan untuk pengoperasian BTS, salah satu infrastruktur yang dikelola para operator jaringan dalam menyediakan layanannya.

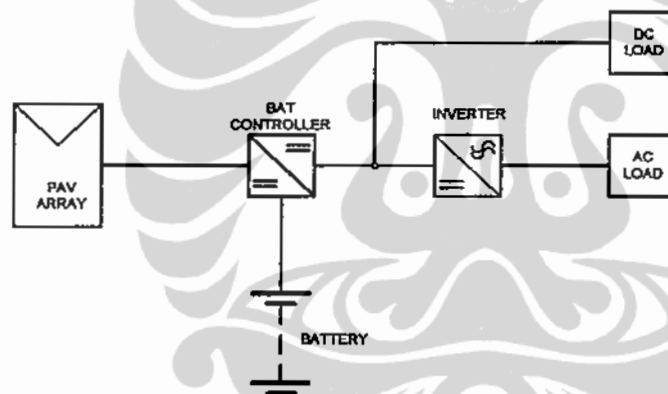
Saat ini beberapa operator jaringan seluler telah menggunakan BTS yang memanfaatkan teknologi panel sel surya sebagai sumber energi bagi BTS. Dengan memanfaatkan tenaga matahari, pasokan energi untuk pengoperasian BTS tetap terjaga. Hal ini telah dikenal kalangan umum sebagai "Green BTS". Penggunaan energi alternatif tersebut tak lain adalah untuk mendukung efisiensi penggunaan listrik, di samping untuk mendukung masyarakat di wilayah perkotaan dalam mengatasi krisis energi listrik serta mendukung program pemerintah dalam menghemat energi.

Seperti yang dilakukan oleh operator seluler tertentu pada tahun 2010 ini akan menyiapkan 39 BTS yang menggunakan sumber energi alternatif, untuk menambah 132 BTS yang telah menggunakan teknologi panel surya. Penggunaan teknologi panel sel surya sebagai sumber energi bagi BTS sudah dilakukan operator tersebut sejak 2005. Dengan memanfaatkan tenaga matahari, pasokan energi untuk pengoperasian 132 BTS tersebut tetap terjaga.

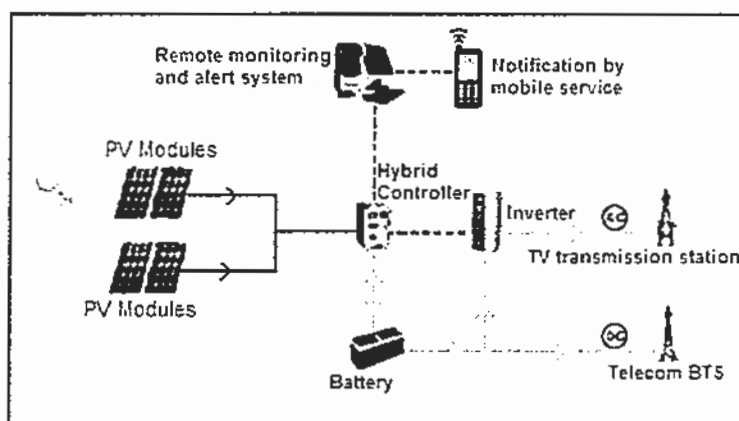
Operator seluler ini telah mengimplementasikan beberapa sumber energi alternatif, seperti tenaga angin, surya, dan *biofuel*, untuk mengoperasikan BTS yang disesuaikan dengan kondisi geografis setempat.

## 2.2 Aplikasi PLTS pada BTS

BTS merupakan salah satu peralatan telekomunikasi yang berfungsi untuk menerima sinyal dan sekaligus memancarkan sinyal ke segala penjuru agar sinyal ini dapat diterima dengan baik oleh peralatan telekomunikasi yang lain. Sesuai dengan fungsinya, maka BTS ini dibuat dalam bentuk menara yang menjulang tinggi, sehingga BTS perlu dilengkapi dengan lampu peringatan bagi penerbangan serta sistem pengamanan terhadap sambaran petir. BTS yang berada di area perkotaan seperti di wilayah DKI Jakarta, umumnya ditempatkan diatas gedung atau di area terbuka dekat rumah penduduk. Untuk melakukan semua tugasnya BTS memerlukan sumber tenaga listrik arus searah dengan daya yang cukup besar. Biasanya listrik diperoleh dari jala-jala PLN yang disearahkan menjadi tegangan arus searah.



Gambar 2.1 Sistem PLTS dengan beban ABB dan beban AS.



Gambar 2.2 Aplikasi PLTS Mandiri pada BTS.

PLTS dapat digunakan sebagai sumber tenaga listrik pada BTS mengingat lokasi penempatan BTS umumnya di area yang terbuka, serta tegangan yang dibutuhkan adalah tegangan arus searah. Ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan untuk menggunakan PLTS sebagai sumber pasokan daya BTS, antara lain:

1. Luas wilayah yang diperlukan untuk penempatan sejumlah sel surya.
2. Kondisi lingkungan sekitar harus terbuka agar cahaya matahari dapat mengenai sel surya.
3. Nilai daya, tegangan dan arus yang diperlukan serta jenis tegangan (ABB atau AS).

Hal ini menentukan perlu tidaknya menggunakan perangkat perubah tegangan, karena tegangan yang dihasilkan PLTS secara langsung adalah tegangan searah. Bila diinginkan tegangan bolak-balik, maka harus menggunakan inverter.

4. Tingkat keamanan sel surya terhadap tindak pencurian.
5. Besar daya yang diinginkan. Hal ini menentukan jumlah sel surya yang diperlukan serta kapasitas baterai.
6. Intensitas cahaya daerah penempatan PLTS
7. Lama waktu pemakaian dan perawatan PLTS.

Sel surya dapat diletakkan di atas tanah atau diletakkan di atas bangunan yang berfungsi sebagai atap dari suatu bangunan. Pemasangan di atas bangunan dapat menghemat lahan dibandingkan jika diletakkan areal terbuka. Selain itu perlu dipertimbangkan apakah lahan BTS cukup terbuka sehingga sinar matahari dapat langsung mengenai sel.

Umumnya BTS di atas tanah dinilai kurang layak bila menggunakan PLTS karena areal lahan terlalu sempit, lingkungan sekitar berupa pepohonan yang tidak boleh ditebang, selain itu lokasi terlalu dekat dengan pemukiman. Hal ini menyangkut keamanan sel surya terhadap tindak pencurian, karena sel ini mahal harganya. Yang paling layak menggunakan PLTS adalah BTS yang berada di atas gedung, karena lahannya luas, tidak adanya penghalang sinar matahari dan aman terhadap tindak pencurian.

## 2.3 Komponen Sistem

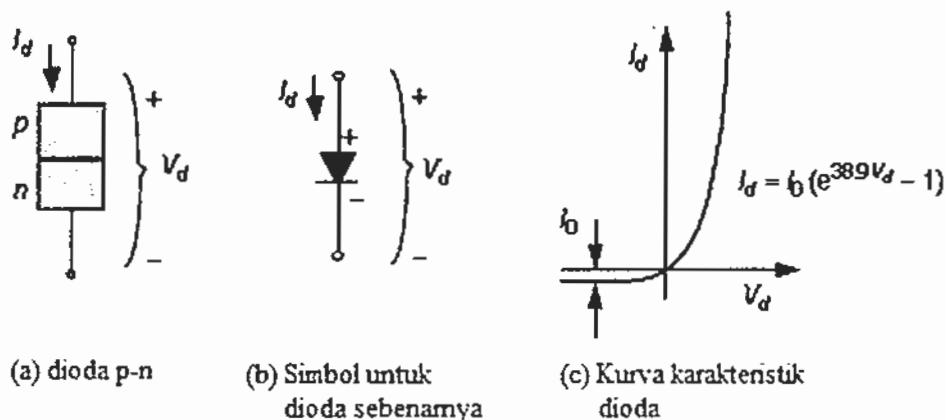
Untuk memasok kebutuhan daya listrik beban BTS, akan digunakan suatu model sistem PLTS dan selanjutnya beberapa simulasi akan dijalankan untuk mengetahui kinerja pengoperasian dan karakteristik sistem menggunakan program perangkat lunak MATLAB/SIMULINK.

### 2.3.1 Dioda Sambungan p-n

Karakteristik dioda sambungan p-n, yang disajikan pada Gambar 2.3. Jika kita menerapkan tegangan  $V_d$  melalui terminal dioda, arus maju akan mengalir dengan mudah melalui dioda dari sisi-p ke sisi-n, tapi untuk mengirim arus ke arah sebaliknya, hanya arus saturasi balik  $I_0$  yang sangat kecil ( $\approx 10^{-12}$  A/cm<sup>2</sup>) akan mengalir. Arus saturasi balik adalah hasil dari pembawa muatan yang dihasilkan secara termal dengan lubang yang menyapu ke sisi-p dan elektron ke sisi-n. Dalam arah maju, jatuh tegangan pada dioda hanya beberapa sepersepuluh volt.

Dioda ideal tidak memiliki jatuh tegangan dalam arah maju, dan tidak ada sama sekali arus mengalir dalam arah sebaliknya. Kurva karakteristik arus-tegangan untuk dioda sambungan p-n dijelaskan oleh persamaan dioda *Shockley* berikut:

$$I_d = I_0 (e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1) \quad (2.1)$$



Gambar 2.3 Dioda sambungan p-n.

dimana:

- $I_o$  = arus saturasi balik dioda (A)
- $q$  = muatan elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)
- $V_d$  = tegangan melalui dioda (V)
- $k$  = konstanta *Boltzmann* ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K)
- $T$  = suhu sambungan sel dalam derajat *Kelvin* (K)

Menggantikan konstanta di atas ke dalam eksponen dari (2.1) memberikan

$$\frac{qV_d}{kT} = \frac{1,602 \times 10^{-19}}{1,381 \times 10^{-23}} \cdot \frac{V_d}{T(K)} = 11.600 \frac{V_d}{T(K)} \quad (2.2)$$

Suhu sambungan  $25^\circ\text{C}$  sering digunakan sebagai standar, yang menghasilkan persamaan dioda berikut:

$$I_d = I_o(e^{38.9V_d} - 1) \quad (\text{pada } 25^\circ\text{C}) \quad (2.3)$$

Sedangkan persamaan dioda *Shockley* (2.1) yang sesuai untuk tujuan kita, harus dicatat bahwa dalam beberapa keadaan hal itu diubah dengan faktor idealitas "A", yang meliputi mekanisme berbeda yang bertanggung jawab untuk memindahkan pembawa muatan melalui sambungan. Persamaan yang dihasilkan adalah:

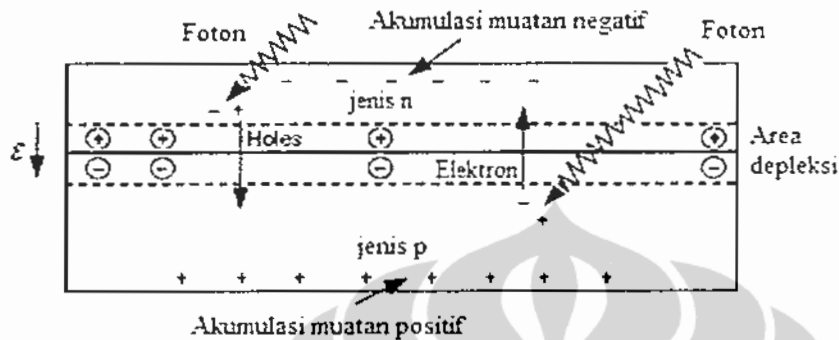
$$I_d = I_o(e^{qV_d/AT} - 1) \quad (2.4)$$

dimana faktor idealistis A adalah 1 jika proses transportasi murni difusi, dan  $A \approx 2$  jika rekombinasi terutama di daerah depleksi.

### 2.3.2 Pemodelan Sel Surya

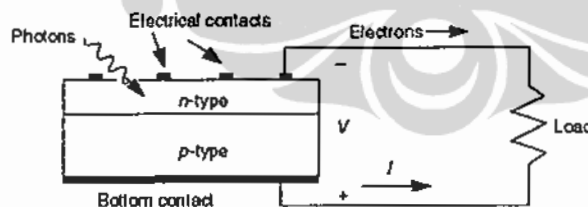
Foton cahaya dengan energi yang lebih tinggi daripada celah pita energi bahan surya dapat membuat elektron dalam materi membebaskan diri dari atom yang menahan mereka dan membuat pasangan elektron-lubang, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Elektron tersebut, namun segera akan jatuh kembali ke lubang menyebabkan pembawa muatan menghilang. Jika medan listrik terdekat tersedia, mereka yang berada di pita konduksi dapat kontinyu tersapu dari

lubang ke kontak logam dimana mereka akan muncul sebagai arus listrik. Medan listrik dalam semikonduktor itu sendiri di persimpangan antara dua wilayah jenis kristal yang berbeda, yang disebut sambungan p-n.



Gambar 2.4 Sel surya sambungan p-n.

Sel surya memiliki kontak listrik pada bagian atas dan bawah untuk menangkap elektron, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Ketika sel surya mengirimkan daya ke beban, elektron mengalir keluar dari sisi-n ke kawat penghubung, melalui beban, dan kembali ke sisi-p dimana mereka bergabung kembali dengan lubang. Perhatikan bahwa arus konvensional mengalir dalam arah yang berlawanan dari elektron.

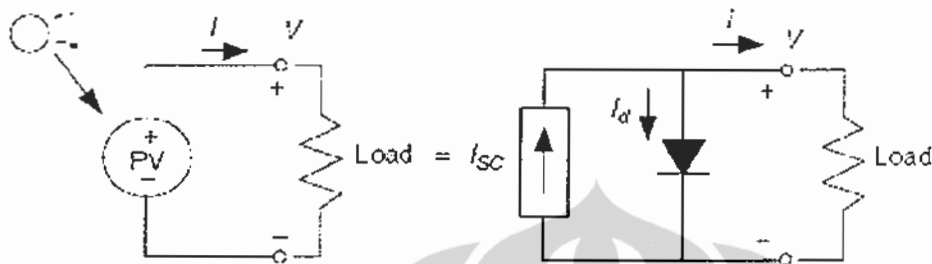


Gambar 2.5 Kontak listrik sel surya dan arus konduksi.

### 2.3.3 Modul Sel Surya

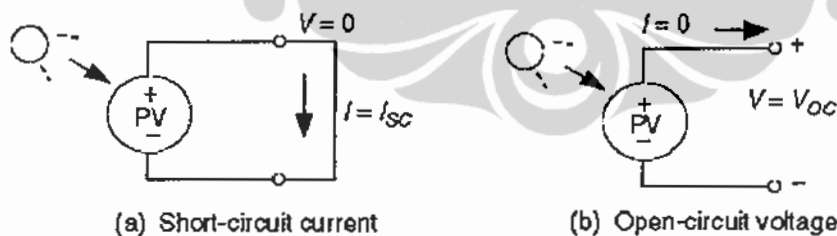
Model sel surya sederhana ditunjukkan sebagai rangkaian ekuivalen yang terdiri dari sumber arus ideal yang paralel dengan dioda ideal. Sumber arus menyatakan arus yang dihasilkan oleh foton-foton (sering ditandai dengan  $I_{ph}$  atau  $I_L$ ), dan keluarannya konstan dalam radiasi surya dan suhu yang konstan. Dua

parameter kunci umumnya digunakan untuk mengkarakterisasikan sel surya adalah arus hubung-singkat dan tegangan rangkaian terbuka. Nilai-nilai ini biasanya disediakan oleh lembar data pabrik.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen sel surya sederhana.

Dengan menghubungkan-singkat terminal sel surya, seperti pada Gambar 2.7(a), arus yang dibangkitkan foton akan keluar dari sel surya sebagai arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ). Karenanya,  $I_{ph} = I_{sc}$ . Seperti pada Gambar 2.7(b), ketika tidak ada hubungan ke sel surya (rangkaiannya terbuka), arus yang dihasilkan foton diparalel secara internal oleh dioda p-n. Hal ini memberikan tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ). Pabrik modul sel surya biasanya menyediakan nilai parameter ini dalam lembar datanya.



Gambar 2.7 Rangkaian hubung-singkat dan rangkaian terbuka sel surya.

Arus keluaran ( $I$ ) dari sel surya dapat ditentukan dengan menerapkan hukum arus *Kirchoff* pada rangkaian ekivalen dalam Gambar 2.7:

$$I = I_{sc} - I_d \quad (2.5)$$



dimana  $I_{sc}$  adalah arus hubung-singkat yang sama dengan arus yang dihasilkan foton, dan  $I_d$  adalah arus shunt melalui dioda intrinsik.

Dengan menggantikan  $I_d$  dalam persamaan (2.5) dengan persamaan (2.1) memberikan hubungan arus-tegangan dari sel surya:

$$I = I_{sc} - I_o \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

dimana  $V$  adalah tegangan melalui sel surya, dan  $I$  adalah arus keluaran dari sel.

Arus saturasi balik dioda ( $I_o$ ) konstan dalam suhu yang konstan dan dapat ditentukan dengan membuat kondisi rangkaian terbuka seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.7(b). Dengan menggunakan persamaan (2.6), dengan asumsi  $I = 0$  (bukan arus keluaran) dan menyelesaikan  $I_o$ .

$$0 = I_{sc} - I_o \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right)$$

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\left( e^{q \cdot V_d / (k \cdot T)} - 1 \right)} \quad (2.7)$$

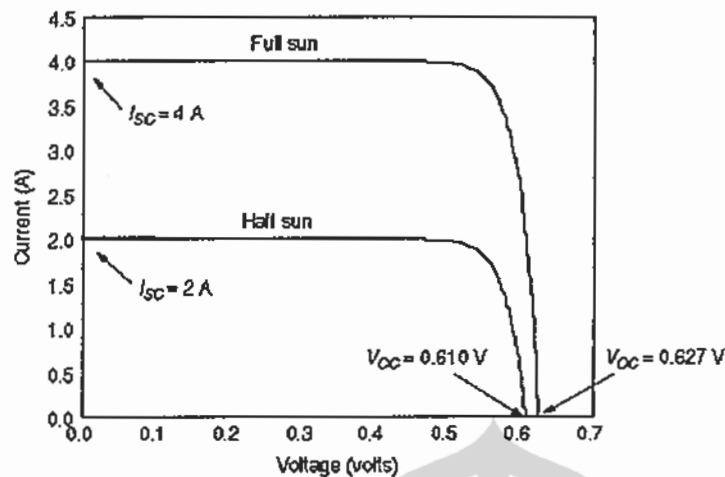
Untuk perkiraan yang baik, arus yang dibangkitkan oleh foton, yang sama dengan  $I_{sc}$  adalah berbanding langsung dengan intensitas radiasi pada sel surya. Karenanya, bila nilai  $I_{sc}$  diketahui dari lembar data, dalam kondisi uji standar,  $G_o = 1000 \text{ W/m}^2$ , maka arus yang dihasilkan foton pada beberapa nilai intensitas radiasi,  $G \text{ (W/m}^2\text{)}$ , ditentukan oleh:

$$I_{sc} I_G = \left( \frac{G}{G_o} \right) I_{sc} I_{G_o} \quad (2.8)$$

dimana:

- $G_o$  adalah nilai intensitas radiasi surya pada kondisi standar,  $1000 \text{ W/m}^2$ , pada suhu referensi  $25^\circ\text{C}$ .
- $G$  adalah nilai intensitas radiasi surya pada kondisi lainnya pada suhu tertentu.

Gambar 2.8 menunjukkan hubungan arus dan tegangan (sering disebut kurva arus-tegangan) pada sel surya ideal. Daya keluaran sel surya dibatasi oleh arus sel dan tegangan sel, dan hanya dapat menghasilkan daya yang dengan beberapa kombinasi arus dan tegangan pada kurva arus-tegangan.



Gambar 2.8 Kurva arus-tegangan sel surya ideal pada suhu 25°C.

#### 2.3.4 Model Sel Surya yang Lebih Akurat

Terdapat beberapa hal yang penting yang mempengaruhi kinerja sel surya yang sebenarnya.

##### a. Resistansi seri

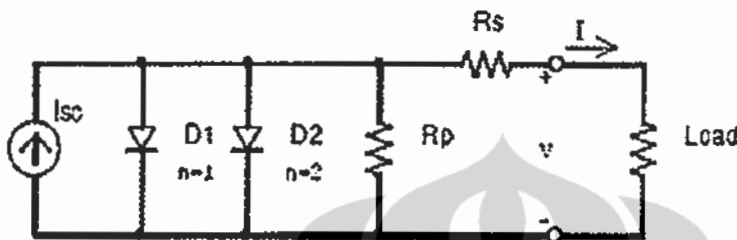
Dalam sel surya yang sebenarnya, terdapat resistansi seri dalam jalur arus pada bahan semikonduktor, logam kisi-kisi, dan arus pada bus pengumpul. Rugi-rugi resistif tersebut digabungkan bersama menjadi resistor seri ( $R_s$ ). Pengaruhnya sangat besar dalam modul sel surya yang terdiri dari banyaknya sel yang dihubungkan seri, dan nilai resistansi ini dikalikan dengan jumlah sel.

##### b. Resistansi paralel

Juga dikenal sebagai resistansi shunt. Resistansi ini dikaitkan dengan rugi-rugi arus bocor yang kecil melalui jalur resistif yang paralel dengan peralatan intrinsik. Hal ini dapat dinyatakan dengan resistor paralel ( $R_p$ ). Pengaruhnya sangat kurang dalam modul sel surya bila dibandingkan terhadap resistansi seri, dan hanya akan dipertimbangkan bila sejumlah modul sel surya dihubungkan paralel dalam sistem yang besar.

### c. Kombinasi-ulang

Kombinasi-ulang dalam daerah depleksi dari sel surya menyediakan jalur arus bukan-ohmik yang paralel dengan sel surya intrinsik. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.9, hal ini dapat dinyatakan dengan dioda kedua (D2) dalam rangkaian ekuivalen.



Gambar 2.9 Rangkaian ekuivalen yang lebih akurat dari sel surya.

Dengan memasukkan pengaruh tersebut, hubungan arus-tegangan sel surya ditulis sebagai berikut:

$$I = I_{sc} - I_{o1} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right) - I_{o2} \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{2kT}} - 1 \right) - (V + IR_s)/R_p \quad (2.9)$$

Dimungkinkan untuk menggabungkan dioda pertama (D1) dan dioda kedua (D2) dan persamaan (2.8) dapat ditulis kembali dalam bentuk persamaan:

$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - (V + IR_s)/R_p \quad (2.10)$$

dimana  $n$  adalah 'faktor idealitas' (' $n$ ' sering ditandai sebagai ' $A$ ') dan nilainya diambil diantara satu dan dua.

### 2.3.5 Model Modul Sel Surya

Sel surya tunggal menghasilkan tegangan keluaran yang kurang dari 1V, sekitar 0,6V untuk sel kristalin-silikon (Si), karenanya sejumlah sel surya dihubungkan seri untuk mencapai tegangan keluaran yang diinginkan. Sel surya yang dihubungkan seri dalam suatu susunan kerangka, disebut modul sel surya. Umumnya secara komersil tersedia modul sel surya dengan sel kristalin-Si yang memiliki 36 atau 72 sel surya yang dihubungkan seri. Modul 36 sel surya

menyediakan tegangan yang cocok untuk baterai 12V, dan modul 72 sel surya cocok untuk baterai 24V. Modul sel surya yang jumlahnya banyak dapat dihubungkan bersama dalam seri atau paralel untuk mendapatkan tegangan dan arus yang diinginkan. Kelompok modul sel surya tersebut disebut dengan array.

Cara untuk memodelkan modul sel surya tidak berbeda dari pemodelan sel surya. Pemodelan ini juga menggunakan model sel surya. Parameter-parameternya sama, tetapi hanya parameter tegangan (seperti tegangan rangkaian terbuka) yang berbeda dan harus dibagi dengan jumlah sel.

Model terdiri dari sumber arus ( $I_{sc}$ ), dioda (D), dan resistansi seri ( $R_s$ ). Pengaruh dari resistansi paralel ( $R_p$ ) adalah sangat kecil dalam satu modul. Oleh karena itu, dapat diasumsikan  $R_p = \infty$ , yang menyederhanakan persamaan arus yang dihasilkan foton menjadi:

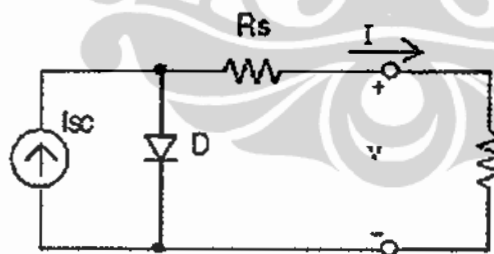
$$I = I_{sc} - I_o \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

dimana:

I adalah arus sel (nilainya sama dengan arus modul)

V adalah tegangan sel = {tegangan modul} : {jumlah sel seri}

T adalah suhu sel dalam derajat Kelvin (K).



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen dengan dioda yang digabungkan dan  $R_p = \infty$ .

Arus hubung-singkat ( $I_{sc}$ ) dapat dihitung pada suhu yang diberikan ( $T$ ) menggunakan:

$$I_{sc} \cdot I_T = I_{sc} \cdot I_{Tref} \cdot [1 + a \cdot (T - T_{ref})] \quad (2.12)$$

dimana:

$I_{sc}$  pada  $T_{ref}$  ditentukan dari lembar data (diukur dalam radiasi  $G_o = 1000W/m^2$ ).

$T_{ref}$  adalah suhu referensi pada sel surya dalam derajat *Kelvin* (K), biasanya 298K (25°C).

$a$  adalah koefisien suhu dari  $I_{sc}$  dalam persentase perubahan per derajat suhu (juga ditentukan dari lembar data).

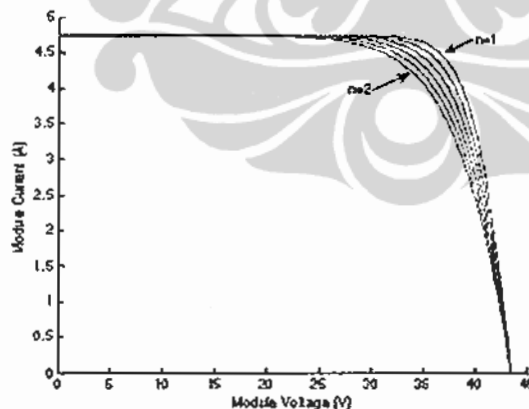
Arus saturasi balik dioda ( $I_o$ ) pada suhu referensi ( $T_{ref}$ ) diberikan oleh persamaan (2.7) dengan menambahkan faktor idealitas dioda ( $n$ ):

$$I_o = \frac{I_{sc}}{(e^{qV_{oc}/kT} - 1)} \quad (2.13)$$

Arus saturasi balik dioda ( $I_o$ ) bergantung pada suhu, dan  $I_o$  pada suhu tertentu ( $T$ ) diberikan oleh persamaan:

$$I_o(T) = I_o(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{3/n} \cdot e^{-[qV/nk] \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right]} \quad (2.14)$$

Faktor idealitas dioda ( $n$ ) tidak diketahui dan dapat diestimasi. Nilainya diantara satu dan dua; nilai  $n=1$  untuk dioda ideal, namun, akan digunakan nilai  $n$  yang diestimasi dengan mencocokkan pada kurva. Gambar 2.11 menunjukkan pengaruh dari berbagai nilai faktor idealitas dioda.



Gambar 2.11 Pengaruh faktor idealitas dioda pada 1 kW/m<sup>2</sup> dan 25°C.

Resistansi seri ( $R_s$ ) dari modul sel surya memiliki dampak yang besar pada kemiringan kurva I-V mendekati tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12, dimana nilai  $R_s$  dihitung dengan mengevaluasi

kemiringan  $\frac{dV}{dI}$  pada kurva I-V pada  $V_{oc}$ . Persamaan untuk  $R_s$  diturunkan dengan mendiferensialkan persamaan (2.11) dan selanjutnya disusun dalam bentuk  $R_s$ .

$$I = I_{sc} - I_o \left[ e^{q \left( \frac{V+I \cdot R_s}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (2.15)$$

$$dI = 0 - I_o \cdot q \left( \frac{dV + R_s \cdot dI}{nkT} \right) \cdot e^{q \left( \frac{V+I \cdot R_s}{nkT} \right)} \quad (2.16)$$

$$R_s = - \frac{dI}{dV} \frac{nkT/q}{I_o \cdot e^{q \left( \frac{V+I \cdot R_s}{nkT} \right)}} \quad (2.17)$$

Selanjutnya, mengevaluasi persamaan (2.17) pada tegangan rangkaian terbuka dimana  $V=V_{oc}$  (juga dengan asumsi  $I=0$ ).

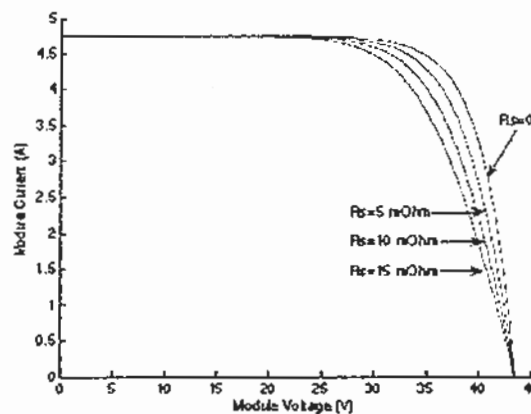
$$R_s = \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} \frac{nkT/q}{I_o \cdot e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}}} \quad (2.18)$$

dimana:

$\frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}}$  adalah kemiringan kurva I-V pada  $V_{oc}$  (mengggunakan kurva I-V

dalam lembar data dan dibagi dengan jumlah sel surya seri),

$V_{oc}$  adalah tegangan rangkaian terbuka pada sel surya (ditentukan dengan membagi  $V_{oc}$  dalam lembar data dengan jumlah sel surya).



Gambar 2.12 Pengaruh resistansi seri pada  $1 \text{ kW/m}^2$  dan  $25^\circ\text{C}$ .

Akhirnya, mungkin untuk menyelesaikan persamaan karakteristik I-V pada persamaan (2.11). Namun, menjadi rumit karena solusi dari arus adalah berulang dengan memasukan resistansi seri dalam model. Meskipun mungkin untuk menemukan penyelesaian dari iterasi sederhana, dengan menggunakan metode *Newton* karena cepat konvergen. Metode *Newton* dijelaskan sebagai berikut:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.19)$$

dimana:  $f'(x)$  adalah fungsi turunan,  $f(x) = 0$ ,  $x_n$  adalah nilai saat ini, dan  $x_{n+1}$  adalah nilai selanjutnya. Persamaan (2.11) dapat ditulis ulang sebagai:

$$f(I) = I_{sc} - I - I_o [e^{q(V+IR_s)/nkT} - 1] = 0 \quad (2.20)$$

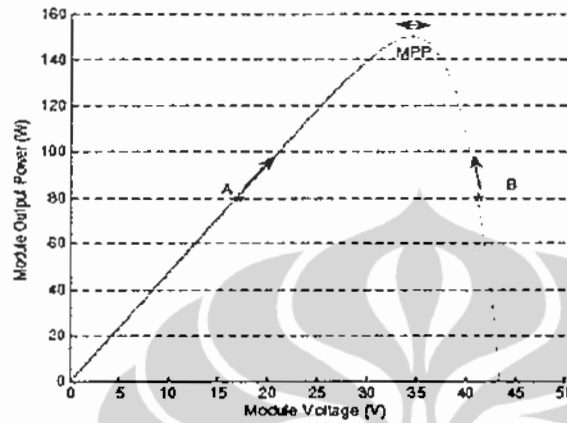
Dengan memasukan persamaan (2.20) ke dalam persamaan (2.19) memberikan persamaan berulang berikut, dan arus keluaran (I) dihitung secara iterasi.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_o [e^{q(V+I_n R_s)/nkT} - 1]}{-1 - \frac{I_o q R_s e^{q(V+I_n R_s)/nkT}}{nkT}} \quad (2.21)$$

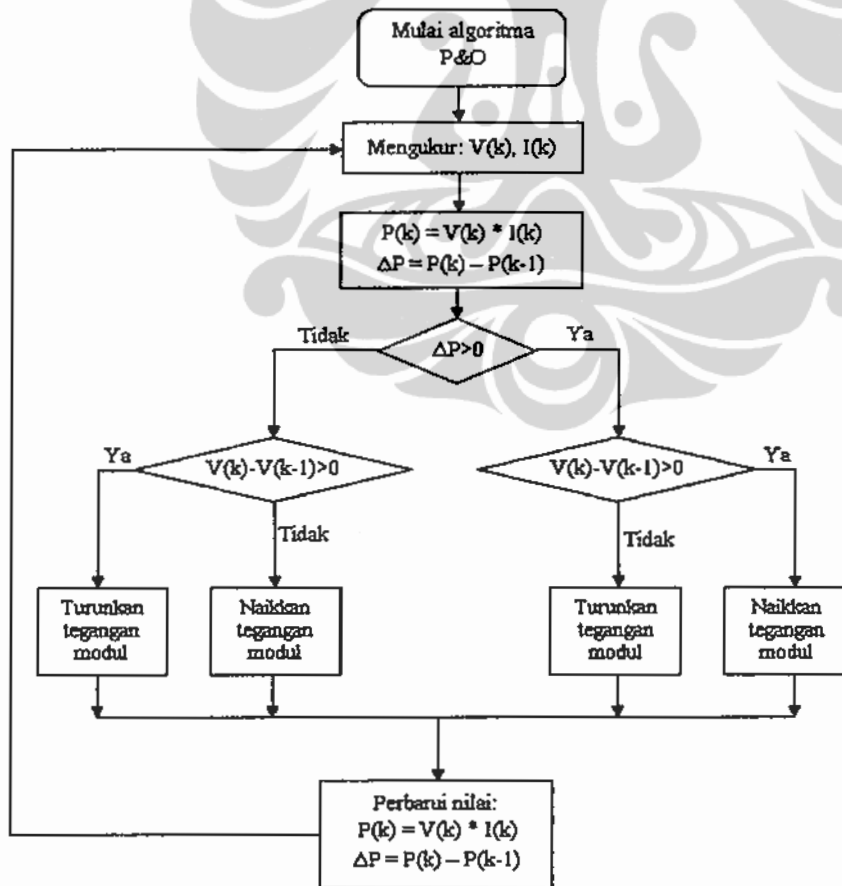
### 2.3.6 Pencari Titik Daya Maksimum

Pencari titik daya maksimum atau lebih dikenal sebagai *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) diperlukan untuk menarik sejumlah daya maksimum dari modul sel surya. Dalam model ini digunakan algoritma *Perturb and Observe* (P&O). Juga dikenal sebagai metode '*Hill Climbing*', algoritma P&O sangat populer karena sederhana dan mudah diimplementasikan. Gambar 2.13 memperlihatkan kurva daya keluaran modul sel surya sebagai fungsi dari tegangan (kurva P-V), pada radiasi dan suhu modul sel surya yang konstan, dengan asumsi modul sel surya bekerja pada titik yang jauh dari titik daya maksimum (*Maximum Power Point*, MPP). Dalam algoritma ini, tegangan kerja modul sel surya diubah dengan inkremen kecil, yang mengakibatkan perubahan daya,  $\Delta P$  yang dapat diamati. Bila  $\Delta P$  positif, maka akan bergerak menuju titik kerja mendekati MPP. Karenanya, pengubahan tegangan selanjutnya dalam arah

yang sama akan bergerak ke arah titik kerja dari MPP. Bila  $\Delta P$  negatif, titik kerja akan bergerak menjauhi MPP, dan arah perubahan harus dibalik menuju MPP. Gambar 2.14 memperlihatkan diagram alir algoritma ini.



Gambar 2.13 Kurva P-V modul sel surya pada  $1 \text{ kW/m}^2$  dan  $25^\circ\text{C}$ .



Gambar 2.14 Diagram alir algoritma P&O [1].



Pada tahun 1993 Hussein, Muta, Hoshino, dan Osaka dari Universitas Saga, Jepang, mengusulkan algoritma inkremental konduktansi dengan tujuan untuk memperbaiki algoritma P&O. Ide dasar adalah bahwa kemiringan kurva P-V menjadi nol pada MPP, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Juga dimungkinkan untuk menemukan lokasi relatif dari titik kerja MPP dengan melihat pada kurva. Kemiringan adalah turunan dari daya modul sel surya terhadap tegangan dan memiliki hubungan dengan MPP.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ pada MPP} \quad (2.22)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ pada sisi kiri dari MPP} \quad (2.23)$$

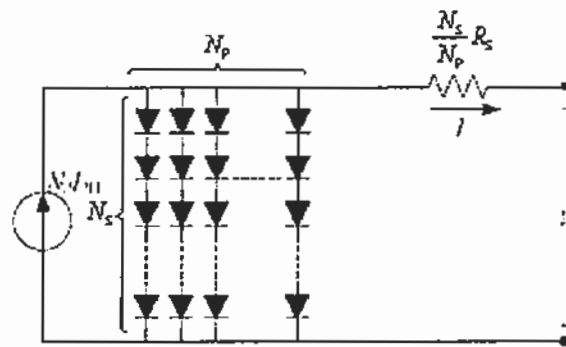
$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ pada sisi kanan dari MPP} \quad (2.24)$$

Dalam kenyataannya, kondisi  $dP/dV = 0$  jarang terjadi karena aproksimasi dibuat dalam perhitungan  $dI$  dan  $dV$ .

### 2.3.7 Array Sel Surya<sup>[4]</sup>

Karena diperkirakan sel surya hanya menghasilkan kurang dari 2W pada 0.6V, maka sel harus dihubungkan dalam konfigurasi seri-paralel pada suatu modul sel surya untuk menghasilkan daya yang cukup tinggi. Array sel surya merupakan kumpulan dari beberapa modul sel surya yang secara listrik dihubungkan dalam rangkaian seri dan paralel untuk membangkitkan arus dan tegangan yang diperlukan. Model yang disederhanakan untuk modul sel surya diperlihatkan dalam Gambar 2.15. Rangkaian ekuivalen dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V/N_s + IR_s/N_p)}{kT_c A}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$



Gambar 2.15 Modul sel surya yang dihubungkan  $N_s$  seri dan  $N_p$  paralel.

dimana  $N_s$  dan  $N_p$  jumlah modul sel surya yang dihubungkan seri dan paralel.

### 2.3.8 Baterai

Model baterai berdasarkan model baterai asam-timbal. Sel baterai asam-timbal terdiri dari dua pelat, negatif dan positif, yang direndam dalam larutan asam sulfat. Pelat positif, atau anoda, terbuat dari timbal dioksida ( $PbO_2$ ) dan pelat negatif, atau katoda, terbuat dari timbal ( $Pb$ ). Model baterai memiliki dua modus operasi: pengisian dan pengosongan. Baterai dalam modus pengisian ketika arus masuk ke dalam baterai positif, dan modus pengosongan ketika arus negatif.

Model baterai memiliki parameter masukan berikut :

- SOC awal :  $SOC_1$  (%), mengindikasikan pengisian yang tersedia.
- SOC maksimum :  $SOC_m$  (Wh), kapasitas maksimum baterai. (Catatan: kapasitas baterai bergantung pada laju pengisian atau pengosongan).
- Jumlah sel seri :  $n_s$
- Efisiensi pengisian/pengosongan baterai :  $K$  (tanpa satuan)
- Laju pengosongan-sendiri baterai :  $D_{dch}$  (per jam)

Catatan: parameter  $D_{dch}$  dan  $K$  merupakan konstanta empiris yang bergantung pada karakteristik baterai.

SOC (dalam %) memiliki hubungan yang linier terhadap tegangan terminal rangkaian-terbuka. SOC1 dapat diestimasi berdasarkan tegangan terminal rangkaian-terbuka baterai. Hubungan ini dapat diestimasi menggunakan Tabel 2.1.

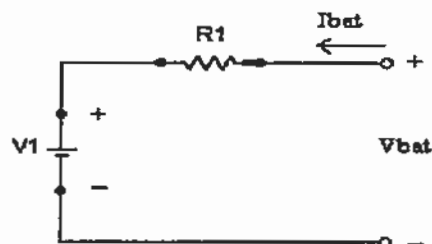
Tabel 2.1 Hubungan diantara tegangan rangkaian terbuka baterai dan SOC<sup>[2]</sup>.

Tegangan	Keadaan Pengisian (%)
12,63	100
12,54	90
12,45	80
12,39	75
12,27	60
12,18	50
11,97	25
11,76	Pengosongan sempurna

Terminal tegangan baterai diberikan oleh:

$$V_{bat} = V_1 + I_{bat} \cdot R_1 \quad (2.26)$$

dimana  $V_1$  dan  $R_1$  ditentukan oleh persamaan yang berbeda bergantung pada modus operasi baterai. Nilai untuk arus baterai ( $I_{bat}$ ) adalah positif bila baterai dalam modus pengisian dan negatif bila baterai dalam modus pengosongan.



Gambar 2.16 Model Baterai.

**Modus pengisian** <sup>[2]</sup>:

$$V_1 = V_{ch} = [2 + 0.148 \cdot \text{SOC}(t)] \cdot n_s \quad (2.27)$$

$$R_1 = R_{ch} = \frac{0.758 + 0.1309/[1.06 - \text{SOC}(t)]}{\text{SOC}_m} \cdot n_s \quad (2.28)$$

dengan SOC(t) sebagai arus SOC (%). SOC(t) akan didefinisikan dengan persamaan pada bagian selanjutnya.

**Modus pengosongan** <sup>[2]</sup> :

$$V_1 = V_{\text{arus searahh}} = [1.926 + 0.124 \cdot \text{SOC}(t)] \cdot n_s \quad (2.29)$$

$$R_1 = R_{dch} = \frac{0.19 + 0.1037/[\text{SOC}(t) - 0.14]}{\text{SOC}_m} \cdot n_s \quad (2.30)$$

Kesulitan dalam pemodelan baterai adalah estimasi akurat nilai SOC(t). Estimasi model baterai dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$\text{SOC}(t+dt) = \text{SOC}(t) [1 - D \cdot dt/3600] + k \cdot [V_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}} - R_1 \cdot I_{\text{bat}}^2] \cdot dt/3600 \quad (2.31)$$

dimana semua parameter telah terdefiniskan.

Hal ini berdasarkan persamaan keseimbangan energi yang memperhitungkan nilai inkremen SOC sebagai inkremen energi dalam diferensial waktu yang memperhitungkan pengosongan-sendiri dan efisiensi pengisian/pengosongan. Untuk persamaan ini, waktu diasumsikan memiliki satuan detik sehingga ada beberapa bagian persamaan yang harus dibagi dengan 3600 sehingga SOC dalam Wh. Nilai ini dapat diubah-ubah untuk mengkompensasikan satuan waktu dalam menit (60), atau beberapa inkremen lainnya (pembagian/jam). Untuk simulasi ini, dipilih satuan jam, dengan menyederhanakan persamaan menjadi:

$$\text{SOC}(t+dt) = \text{SOC}(t) [1 - D \cdot dt] + k [V_{\text{bat}} \cdot I_{\text{bat}} - R_1 \cdot I_{\text{bat}}^2] \cdot dt \quad (2.32)$$

Persamaan ini disederhanakan dengan mensubstitusikan  $V_{\text{bat}}$  sebagai fungsi dari  $V_1$  :

$$\text{SOC}(t+dt) = \text{SOC}(t) [1 - D \cdot dt] + [k \cdot V_1 \cdot I_{\text{bat}}] \cdot dt / \text{SOC}_m \quad (2.33)$$

Diperlukan untuk mengintegrasikan persamaan untuk menyelesaikan SOC(t):

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \int_{t-1}^t \left( \frac{(k \cdot V_1 \cdot I_{bat})}{SOC_m} - SOC(t-1) \cdot D \right) dt \quad (2.34)$$

Dengan  $t$  sebagai jumlah unit waktu. Oleh karena itu, SOC(t) dapat ditentukan bila diketahui kondisi sebelumnya. Karena  $SOC(0) = SOC(1) =$  awal SOC, SOC(1) dapat ditentukan.

### 2.3.9 Alat Pengatur

Alat pengatur merupakan perangkat elektronik yang mengatur aliran listrik dari modul surya ke baterai dan aliran listrik dari baterai ke peralatan listrik seperti lampu, TV atau radio/tape. Kendali pengisian-pengosongan melindungi baterai dari pengisian berlebihan dan melindungi dari korsleting atau pengiriman muatan arus berlebih ke masukan terminal. Alat ini juga mempunyai beberapa indikator yang akan memberikan kemudahan kepada pengguna PLTS dengan memberikan informasi mengenai kondisi baterai sehingga pengguna PLTS dapat mengendalikan konsumsi energi menurut ketersediaan listrik yang terdapat didalam baterai. Selain itu terdapat tiga indikator lainnya yang menginformasikan status pengisian, adanya muatan berlebih dan pengisian otomatis pada saat baterai kosong.

### 2.3.10 Konverter AS/AS

Konverter AS/AS digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem dengan menyesuaikan tegangan catu terhadap tegangan beban. Konverter AS/AS dapat berupa *step-up (boost)*, *step-down (buck)*, ataupun kedua-duanya untuk menaikkan dan menurunkan tegangan (*buck-boost*). Konverter AS/AS yang digunakan oleh sistem ini, dapat untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Dasar umum konverter AS/AS berdasarkan ide bahwa daya dikonservasikan sedangkan tegangan dan arus berubah.

$$P_{in} = P_{out} \quad (2.35)$$

Asumsi faktor efisiensi  $\eta$  adalah:

$$P_{in} \cdot \eta = P_{out} \quad (2.36)$$

Substitusikan V·I untuk P :

$$V_{in} \cdot I_{in} \cdot \eta = V_{out} \cdot I_{out} \quad (2.37)$$

Untuk konverter AS/AS yang digunakan dalam model ini :

$V_{in}$  = tegangan melalui array sel surya (pada titik daya maksimum)

$I_{in}$  = arus keluaran array sel surya (pada titik daya maksimum)

$\eta = 0,90$  (asumsikan efisiensi 90%)

$V_{out}$  = tegangan baterai

$I_{out}$  = arus keluaran dari konverter saat semua nilai lainnya diketahui

Untuk kebanyakan topologi konverter AS/AS, tegangan keluaran terkait tegangan masukan sebagai fungsi dari siklus tugas saklar. Untuk *Cuk* konverter, hubungan ini adalah:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad (2.38)$$

dimana D adalah siklus tugas (*duty cycle*) untuk konverter (bila sinyal tinggi selama 4ms dari periode 10ms, siklus tugas = 0,4).

Konverter AS/AS dalam model ini hanya mengubah arus keluaran dari array surya menjadi arus pada tegangan baterai; dimana dalam sistem aktual konverter AS/AS akan digunakan bersama dengan MPPT untuk mengatur tegangan array sel surya.

### 2.3.11 Kendali saklar

Kendali saklar diperlukan untuk mengendalikan kapan saklar terbuka atau tertutup berdasarkan parameter yang diukur dalam sistem. Digunakan beberapa kondisi untuk mengoperasikan saklar-saklar tersebut dalam seluruh sistem. Setiap saklar mempunyai kondisi pengoperasian masing-masing.

## 2.4 Prinsip Kerja PLTS

Pada siang hari modul surya menerima cahaya matahari yang kemudian diubah menjadi listrik melalui proses fotovoltaik. Listrik yang dihasilkan oleh modul dapat langsung disalurkan ke beban ataupun disimpan dalam baterai sebelum digunakan ke beban (lampu, radio, dan sebagainya). Pada malam hari, dimana modul sel surya tidak menghasilkan listrik, beban sepenuhnya dicatu oleh baterai. Demikian pula apabila hari mendung, dimana modul sel surya menghasilkan listrik lebih rendah dibandingkan pada saat matahari benderang. Modul sel surya dengan kapasitas tertentu dapat menghasilkan jumlah listrik yang berbeda-beda apabila ditempatkan pada daerah yang berlainan.

PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik arus searah, yang dapat diubah menjadi listrik arus bolak-balik apabila diperlukan. Oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik. PLTS pada dasarnya adalah pecatu daya (alat yang menyediakan daya), dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri, maupun dengan hibrida, baik dengan metoda desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun dengan metoda sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel).

PLTS terdiri dari sel surya sebagai perubah sinar matahari menjadi tegangan as, baterai dan rangkaian pengisian sebagai penyimpan daya listrik yang dihasilkan sel surya, serta inverter sebagai perubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik.

### 2.4.1 Keunggulan PLTS

Keunggulan yang dimiliki oleh PLTS antara lain:

1. Tidak memerlukan bahan bakar, karena menggunakan sumber energi matahari yang dapat diperoleh dimana saja secara cuma-cuma sepanjang tahun, sehingga hampir tidak memerlukan biaya operasi.
2. Tidak memerlukan konstruksi yang berat dan menetap, sehingga dapat dipasang dimana saja dan dapat dipindahkan bilamana dibutuhkan.

3. Dapat diterapkan secara sentralisasi (PLTS ditempatkan di suatu area dan listrik yang dihasilkan disalurkan melalui jaringan distribusi ke tempat-tempat yang membutuhkan) maupun desentralisasi (sistem PLTS dipasang pada setiap rumah, dengan demikian tidak diperlukan jaringan distribusi).
4. Pada pola desentralisasi, gangguan pada satu sistem tidak akan mempengaruhi sistem yang lain dan tidak banyak energi yang terbuang pada jaringan distribusi.
5. Bersifat moduler; kapasitas listrik yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan dengan cara merangkai modul secara seri dan paralel.
6. Dapat dioperasikan secara otomatis maupun menggunakan operator.
7. Ramah lingkungan. Tidak menimbulkan polusi suara maupun polusi asap.
8. Tidak ada bagian yang bergerak, sehingga hampir tidak memerlukan biaya pemeliharaan, yang diperlukan hanya membersihkan modul apabila kotor.
9. Umur pakai lebih dari 25 tahun.

#### **2.4.2 Kelemahan PLTS**

Kelemahan yang dimiliki oleh PLTS antara lain:

1. Modul sel surya memiliki efisiensi konversi yang rendah dibandingkan jenis pembangkit lainnya.
2. Untuk bekerja dengan baik, modul sel surya harus cukup mendapatkan penyinaran matahari (tergantung pada musim).
3. Memerlukan area yang luas untuk pemasangan modul sel surya untuk mendapatkan daya keluaran yang tinggi.
4. Harga modul sel surya (skala kecil) masih mahal sehingga biaya pembangkitan yang dihasilkan juga mahal.

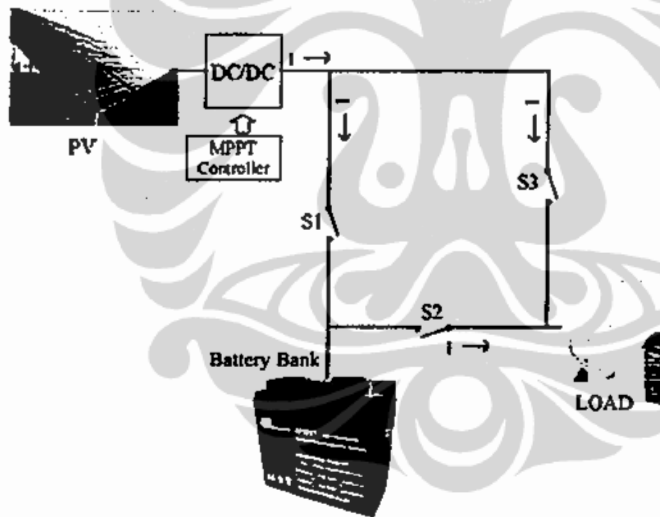


## BAB III

### STUDI IMPLEMENTASI PLTS PADA BTS

#### 3.1 Konfigurasi Sistem

Skema sistem yang ditinjau diperlihatkan dalam Gambar 3.1. Arah aliran daya dan konvensi tanda yang bersesuaian ditampilkan. Notasi tersebut digunakan sebagai referensi dalam bagian selanjutnya. Komponen utama sistem terdiri dari modul sel surya, sistem penyimpanan energi/baterai, beban konsumsi dan konverter elektronika daya.

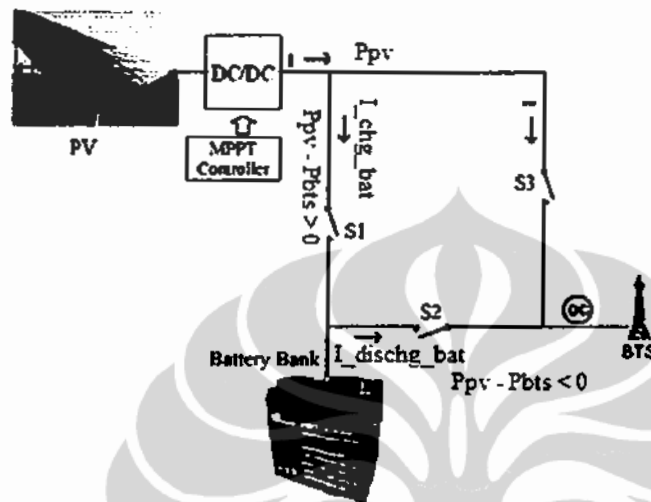


Gambar 3.1 Skema sistem dan arah aliran daya dalam sistem

#### 3.2 Pengoperasian sistem

Sistem bekerja sebagai berikut: daya dibangkitkan oleh sumber tenaga surya yang digunakan untuk memasok kebutuhan beban. Ketika energi yang dihasilkan array sel surya tidak mencukupi, maka baterai akan memasok kekurangan daya tersebut. Saat energi yang dihasilkan array sel surya melebihi

kebutuhan energi beban, maka kelebihan energi ini digunakan untuk mengisi energi baterai berupa energi yang disimpan dalam baterai.



Gambar 3.2 Skema sistem pada kondisi awal

### 3.3 Algoritma Manajemen Energi

Dalam simulasi sistem, digunakan data masukan berdasarkan prediksi waktu 24 jam dengan ukuran step yang konstan. Daya keluaran modul sel surya dimodelkan dari nilai masukan radiasi surya yang diambil dari data *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) menggunakan perangkat lunak *Hybrid Optimization Micropower Energy Renewable* (HOMER). Kebutuhan daya beban diambil dari hasil pengukuran daya konsumsi BTS di Jakarta. Gambar 3.3 berikut ini memperlihatkan algoritma manajemen energi yang digunakan dalam simulasi sistem.

Keseimbangan energi sistem tersebut akan diperiksa pada setiap kali langkah simulasi. Masukan data seperti radiasi matahari dan ambien temperatur udara dimasukkan dalam perhitungan jumlah energi yang dapat dihasilkan oleh array sel surya. Nilai energi surya dibandingkan dengan permintaan energi beban

untuk menentukan distribusi aliran energi diantara unit penyimpanan baterai dan beban.

Surplus energi surya disimpan dalam baterai dan defisit energi dapat diambil dari baterai. Energi surya yang tidak dapat digunakan (tidak dikirimkan ke beban ataupun disimpan dalam baterai) dikategorikan sebagai kelebihan energi. Dalam prakteknya, energi ini akan digunakan untuk keperluan lain, tetapi tidak dibahas disini.

Ada beberapa hal terkait antara manajemen energi dengan energi surya, baterai dan beban yaitu:

1. Saat energi yang dihasilkan array sel surya melebihi kebutuhan energi yang diperlukan beban, maka array surya akan memasok kebutuhan energi beban dan sekaligus mengisi muatan baterai (pengisian).
2. Saat daya yang dihasilkan array sel surya kurang dari daya beban maka pada saat bersamaan baterai akan mengirimkan energinya (kondisi pengosongan) ke beban sebesar kekurangan daya yang dipasok oleh array surya. Beban akan mendapat daya baik dari array surya maupun dari baterai.
3. Saat array sel surya sama sekali tidak menghasilkan energi terkait ketidaktersediaan radiasi surya, maka kebutuhan energi listrik beban sepenuhnya dipasok oleh baterai (kondisi pengosongan).

Sehingga baterai dapat bekerja diantara kondisi pengisian dan pengosongan dengan bebas, dan perbedaan antara pengisian dan pengosongan adalah arah aliran daya yang saling berlawanan. Arus pengisian bertanda positif dan daya pengosongan bertanda negatif.

Dengan memperhatikan konvensi tanda dalam Gambar 3.1, maka keseimbangan daya dalam sistem ditentukan sebagai berikut :

$$P_{pv} + P_{bat,discharging} = P_{beban} \quad (3.1)$$

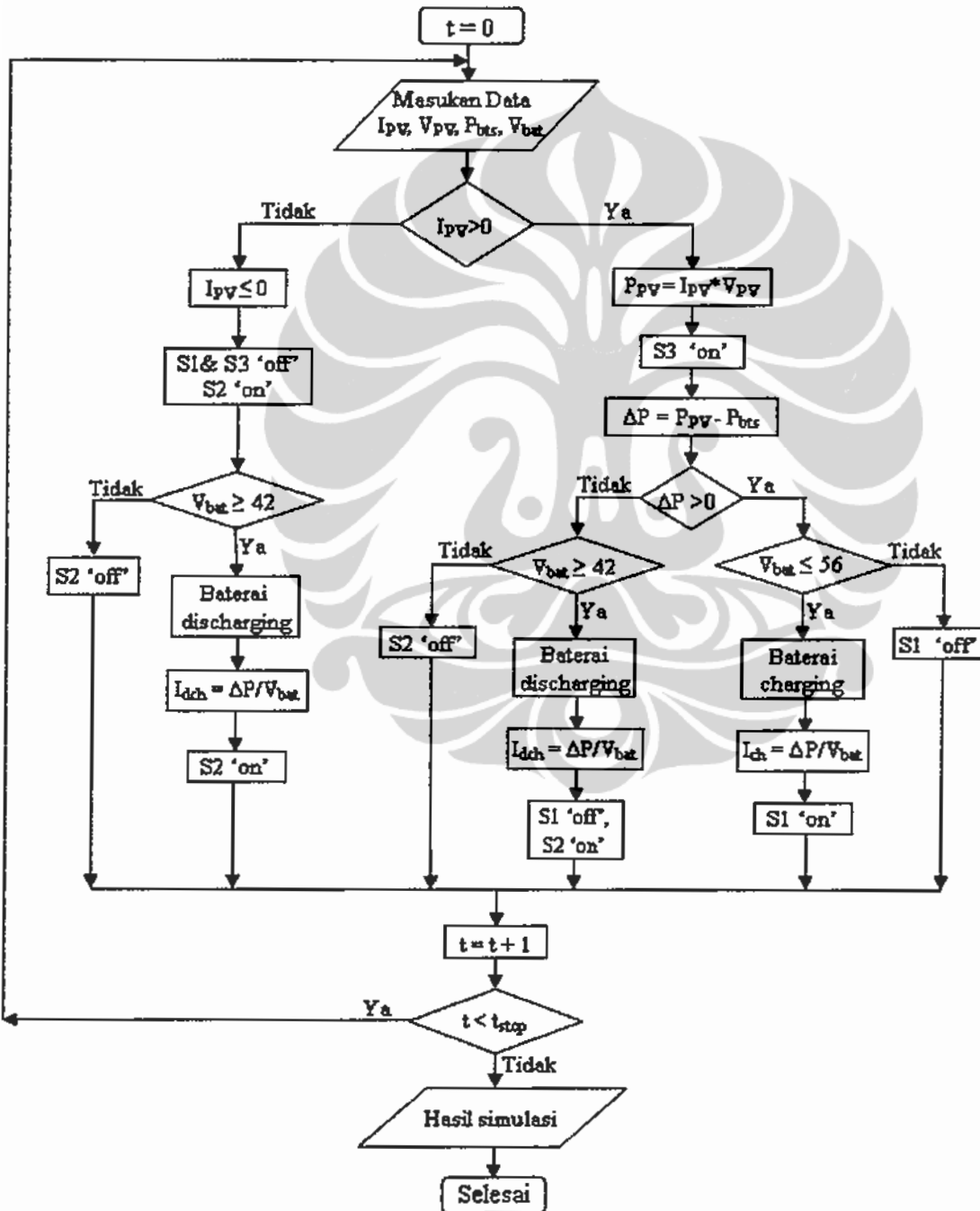
Kendala-kendala yang digunakan dalam algoritma adalah:

$$SOC_{min} < SOC < SOC_{maks} \quad (3.2)$$

$$42V \leq V_{baterai} \leq 56V \quad (3.3)$$

dimana  $SOC_{min} = 0,2$  dan  $SOC_{maks} = 0,8$ . Nilai SOC ini dimasukkan dalam blok *integrator* sebagai batas atas dan batas bawah dengan kondisi awal 0,8.

Tegangan maksimum baterai ditentukan 56 V sebagai titik pengisian-lebih dan tegangan minimum baterai ditentukan 42 V sebagai titik pengosongan-lebih<sup>[13]</sup>.



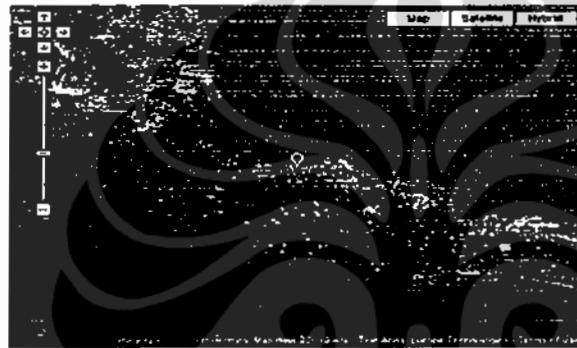
Gambar 3.3 Algoritma manajemen energi.

### 3.4 Data Sistem

Data sistem PLTS mandiri yang diinvestigasi dirancang untuk menghasilkan, menyimpan dan memasok kebutuhan energi listrik BTS diberikan berikut ini.

#### 3.4.1 Letak Geografis BTS

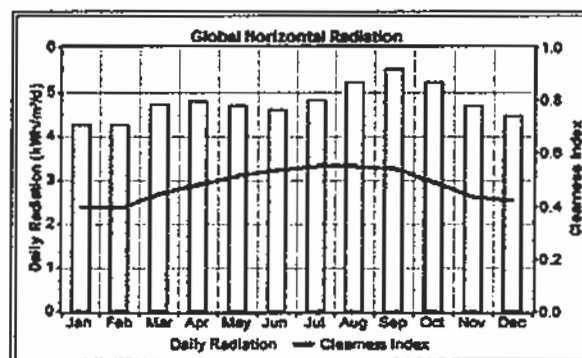
BTS yang ditinjau terletak di wilayah Jakarta Selatan, dimana letak geografis Jakarta Selatan tepatnya pada posisi  $6^{\circ}15'$  LS dan  $106^{\circ}45'$  BT.



Gambar 3.4 Letak geografis Jakarta Selatan<sup>[9]</sup>.

#### 3.4.2 Data Cuaca/Radiasi Surya

Data cuaca yang dibutuhkan untuk analisis sistem adalah intensitas radiasi surya,  $[W/m^2]$  dan temperatur udara,  $[^{\circ}C]$ . Data tersebut digunakan untuk model simulasi berbasis tiap jam. Data intensitas radiasi surya diperoleh melalui satelit NASA dengan memasukan posisi  $6^{\circ}15'$  LS dan  $106^{\circ}45'$  BT berdasarkan koordinat geografis Jakarta Selatan (diambil pada tanggal 6 April 2010).



Gambar 3.5 Radiasi horizontal global untuk Jakarta Selatan<sup>[11]</sup>.

Tabel 3.1 Data Radiasi surya harian dan *clearness index*<sup>[11]</sup>.

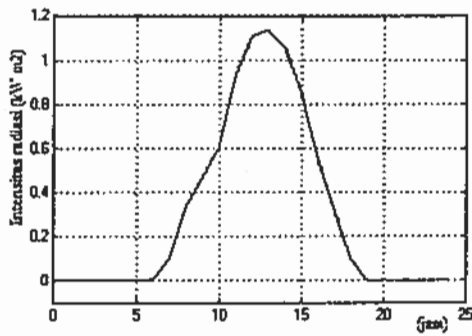
Bulan	<i>Clearness Index</i>	<i>Daily Radiation</i> (kWh/m <sup>2</sup> /hari)
Januari	0,398	4,250
Februari	0,394	4,240
Maret	0,449	4,720
April	0,483	4,760
Mei	0,516	4,670
Juni	0,534	4,580
Juli	0,550	4,820
Agustus	0,551	5,210
September	0,539	5,500
Oktober	0,490	5,200
Nopember	0,439	4,670
Desember	0,420	4,450
Rata-rata:	0,477	4,759

*Clearness index* rata-rata per bulan = 0,477 dan radiasi harian rata-rata tahunan = 4,759 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Sedangkan data suhu udara diperoleh dari situs internet [www.wunderground.com/weatherstation](http://www.wunderground.com/weatherstation).

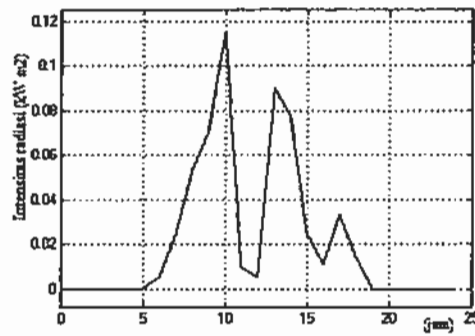
Disini digunakan data saat cuaca cerah dan cuaca berawan/hujan yaitu cuaca cerah pada tanggal 3 Januari 2010 dan cuaca berawan/hujan pada tanggal 1 Januari 2010.

Tabel 3.2 Data Radiasi Surya<sup>[11]</sup> dan Temperatur Udara pada 3 Januari 2010<sup>[12]</sup>.

Waktu	Radiasi surya kW/m <sup>2</sup>	Suhu udara (°C)	Waktu	Radiasi surya kW/m <sup>2</sup>	Suhu udara (°C)
00.00 - 01.00	0	26.9	12.00 - 13.00	1,111	37
01.00 - 02.00	0	26.9	13.00 - 14.00	1,137	37.5
02.00 - 03.00	0	26.8	14.00 - 15.00	1,055	35
03.00 - 04.00	0	26.8	15.00 - 16.00	0,851	34.9
04.00 - 05.00	0	26.9	16.00 - 17.00	0,549	34.7
05.00 - 06.00	0	26.5	17.00 - 18.00	0,321	32
06.00 - 07.00	0,003	29	18.00 - 19.00	0,099	30
07.00 - 08.00	0,101	29.2	19.00 - 20.00	0	28.8
08.00 - 09.00	0,340	32	20.00 - 21.00	0	28
09.00 - 10.00	0,471	32.2	21.00 - 22.00	0	27.5
10.00 - 11.00	0,605	35	22.00 - 23.00	0	27.5
11.00 - 12.00	0,937	36	23.00 - 24.00	0	27.2



a. Grafik intensitas radiasi surya saat cuaca cerah



b. Grafik intensitas radiasi surya saat cuaca berawan/hujan

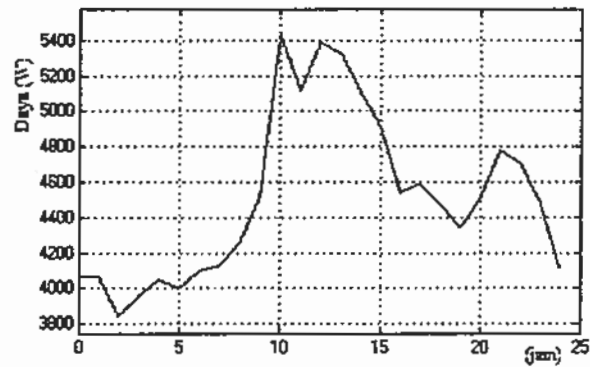
Gambar 3.6 Grafik intensitas radiasi surya

Tabel 3.3 Data Radiasi Surya<sup>[11]</sup> dan Temperatur Udara pada 1 Januari 2010<sup>[12]</sup>.

Waktu	Radiasi surya kW/m <sup>2</sup>	Suhu udara (°C)	Waktu	Radiasi surya kW/m <sup>2</sup>	Suhu udara (°C)
00.00 - 01.00	0	26.8	12.00 - 13.00	0,005	36.5
01.00 - 02.00	0	27	13.00 - 14.00	0,090	32
02.00 - 03.00	0	26.8	14.00 - 15.00	0,077	32.8
03.00 - 04.00	0	26.9	15.00 - 16.00	0,025	31.8
04.00 - 05.00	0	27	16.00 - 17.00	0,011	31
05.00 - 06.00	0	26.9	17.00 - 18.00	0,033	30
06.00 - 07.00	0,005	26.9	18.00 - 19.00	0,014	28
07.00 - 08.00	0,024	27	19.00 - 20.00	0	26
08.00 - 09.00	0,053	29	20.00 - 21.00	0	25.2
09.00 - 10.00	0,071	33,5	21.00 - 22.00	0	25
10.00 - 11.00	0,115	33	22.00 - 23.00	0	24.8
11.00 - 12.00	0,010	34	23.00 - 24.00	0	25

### 3.4.3 Data Beban BTS<sup>[13]</sup>

Kebutuhan daya harian BTS sebesar 108,8 kWh per hari dengan profil beban harian diperlihatkan pada Gambar 3.7 dan besaran daya tiap jam dapat dilihat dalam Tabel 3.4. BTS beroperasi pada tegangan searah 48 volt.



Gambar 3.7 Profil beban harian BTS

Tabel 3.4 Data daya BTS dalam 24 jam

Waktu	Daya Beban (W)	Waktu	Daya Beban (W)
00.00 - 01.00	4070,19	12.00 - 13.00	5334,28
01.00 - 02.00	3844,47	13.00 - 14.00	5109,83
02.00 - 03.00	3963,14	14.00 - 15.00	4912,08
03.00 - 04.00	4047,00	15.00 - 16.00	4535,81
04.00 - 05.00	4006,95	16.00 - 17.00	4592,32
05.00 - 06.00	4104,71	17.00 - 18.00	4478,99
06.00 - 07.00	4127,39	18.00 - 19.00	4335,53
07.00 - 08.00	4262,26	19.00 - 20.00	4510,79
08.00 - 09.00	4521,97	20.00 - 21.00	4777,86
09.00 - 10.00	5433,48	21.00 - 22.00	4713,10
10.00 - 11.00	5123,84	22.00 - 23.00	4491,69
11.00 - 12.00	5384,70	23.00 - 24.00	4113,98

#### 3.4.4 Parameter dari Komponen Sistem PLTS

Masing-masing model komponen memerlukan sejumlah parameter yang diperlukan untuk pelaksanaan program yang meliputi:

##### a. Modul Sel Surya

Karena sel surya tunggal menghasilkan tegangan keluaran kurang dari 1 volt, maka diperlukan *string* bersama sejumlah sel surya seri untuk mencapai tegangan keluaran yang diinginkan. Biasanya, 36 sel surya seri akan



memberikan tegangan yang cukup besar untuk mengisi baterai 12 volt, dan 72 sel surya cocok untuk baterai 24 volt. Namun, tegangan dapat diatur dengan konverter AS/AS sehingga baterai dapat diisi.

Modul sel surya komersial, yang terdiri atas 72 sel surya, dipilih untuk tujuan ini. Lembar data untuk modul sel surya komersial diberikan dalam Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Nilai dari lembar data modul sel surya <sup>[1]</sup>.

Karakteristik elektrik	BP SX 150S
Daya maksimum ( $P_{max}$ )	150W
Tegangan pada $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	34,5V
Arus pada $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	4,35A
$P_{max}$ minimum yang dijamin	140W
Arus hubung-singkat ( $I_{sc}$ )	4,75A
Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ )	43,5V
Koefisien temperatur pada $I_{sc}$	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}C$
Koefisien temperatur pada $V_{oc}$	$-(160 \pm 20)mV/^{\circ}C$
Koefisien temperatur daya	$-(0,5 \pm 0,05)\%/^{\circ}C$
NOCT	$47 \pm 2^{\circ}C$
Tegangan maksimum sistem	600V (rating NEC AS)

Catatan : NOCT singkatan dari *Normal Operating Cell Temperature*, dimana nilai NOCT ditentukan oleh pabrik pembuat modul sel surya, biasanya diantara 45 dan 49°C.

#### b. Baterai

Digunakan baterai Hoppecke 24 OpzS 3000 (data HOMER<sup>[11]</sup>) dengan deskripsi sebagai berikut :

- ✓ Tegangan sel baterai : 2 volt;
- ✓ Kapasitas nominal = 3000 Ah;
- ✓ Arus pada 3050 Ah = 305 Ampere;
- ✓ Arus maksimum pengisian = 610 A.

### 3.5 Menentukan Ukuran Baterai dan Modul Sel Surya<sup>[3]</sup>

#### 3.5.1 Ukuran Baterai

Berikut ini adalah cara menentukan ukuran kapasitas baterai yang akan digunakan dalam sistem dengan langkah-langkah sebagai berikut<sup>[3]</sup>.

1. Mengkonversi beban total arus searah ke dalam Ampere-hour (Ah) @ tegangan sistem.

Total beban arus searah = 108,8 kWh/hari.

Total beban (Ah/hari @ 48 volt) :

= (total beban arus searah (Wh/hari)) / tegangan sistem (V)

= (108,8 x 1000 Wh/hari) / 48 volt = 2266,7 Ah/hari.

2. Menentukan jumlah hari penyimpanan yang dibutuhkan.

Penyimpanan energi baterai selama 2 hari (2 kali kapasitas beban) agar SOC baterai tidak turun dibawah 50%.

3. Tentukan penyimpanan yang digunakan (*usage* Ah) dari total beban (Ah/hari)

Penyimpanan yang digunakan (Ah) :

= Total beban (Ah/hari) × lamanya penyimpanan (hari)

= 2266,7 (Ah/hari) x 2 hari = 4533,4 Ah

Misalkan ditentukan, faktor maksimum pengosongan 0,8<sup>[3]</sup> dan faktor 0,97<sup>[3]</sup> untuk laju pengosongan dan suhu, maka :

Kapasitas nominal baterai (pada C/20, 25°C)

= 4533,4 Ah / (0,8 x 0,97) = 5842 Ah (pada 48 volt)

4. Pilih baterai (tegangan dan Ah) dan menentukan jumlah baterai seri pada setiap string dan jumlah *string* paralel :

Jumlah string dalam baterai paralel

= total kapasitas penyimpanan (Ah)/kapasitas baterai tunggal (Ah)

= 5842 Ah / 3000 Ah = 2 @ 2 volt/sel baterai

Jumlah baterai seri :

$$= \text{tegangan sistem} / \text{tegangan nominal baterai}$$

$$= 48 \text{ volt} / 2 \text{ volt} = 24 \text{ seri baterai}$$

Aktual kapasitas daya baterai (Ah)

$$= \text{Ah/baterai} \times \text{Jumlah string paralel}$$

$$= 3000 \text{ Ah} \times 2 = 6000 \text{ Ah (288 kWh @48 volt)}$$

Untuk mendapatkan tegangan sistem 48 volt, setiap *string* paralel memiliki 2 baterai, sehingga total baterai bank akan memiliki 2 string paralel pada setiap 24 string baterai seri (dalam susunan 24 seri x 2 paralel).

### 3.5.2 Ukuran Modul Sel Surya<sup>[3]</sup>

1. Total daya arus searah BTS = 108,8 kWh/hari, dinyatakan dalam Ah @48 volt :
 
$$= (108,8 \times 1000 \text{ Wh/hari}) / 48 \text{ volt} = 2266,7 \text{ Ah/hari}$$

Nilai radiasi surya bulan Januari rata-rata = 4,25 kWh/m<sup>2</sup>/hari.

Diasumsikan, efisiensi Coulomb = 0,8 dan faktor *de-rating* = 0,9, dan berdasarkan data modul Tabel 3.5,  $I_{mpp} = 4,35\text{A}$ ;  $V_{mpp} = 34,5 \text{ volt}$ , maka:

Ah/hari – *string*

$$= \text{nilai radiasi surya} \times I_{mpp} \text{ (A)} \times \text{Coulomb} \times \text{de-rating}^{[3]}$$

$$= 4,25 \times 4,35 \times 0,8 \times 0,9 = 13,311 \text{ Ah/hari per string}$$

2. Jumlah *string* modul sel surya paralel :

$$= (\text{Ah/hari}) / (\text{Ah/hari per modul dalam bulan-disain})$$

$$= (2266,7 \text{ Ah/hari}) / 13,311 \text{ Ah/hari per string}$$

$$= 170,29 \text{ string atau dibulatkan } 171 \text{ string.}$$

$$\text{Keluaran modul sel surya} = 171 \text{ string} \times 4,35\text{A/string} \times 4,25 \times 0,90$$

$$= 2845,23 \text{ Ah/hari @48 volt}$$

3. Jumlah modul sel surya seri:

= tegangan sistem (V) / tegangan nominal modul sel surya (V)

=  $48 / 24 = 2$  modul seri

Sehingga diperlukan modul sel surya dalam 171 *string* paralel x 2 *string* seri.

### 3.6 Tahapan Simulasi

Skema simulasi sistem PLTS mandiri dan sistem baterai bank dalam memasok kebutuhan daya beban BTS dilakukan berdasarkan kondisi skenario yang berbeda yaitu:

1. Simulasi karakteristik pada modul sel surya.
2. Simulasi sistem pada kondisi awal tanpa menggunakan algoritma manajemen energi pada saat kondisi cuaca cerah dan kondisi cuaca berawan/hujan.
3. Simulasi sistem dengan menggunakan algoritma manajemen energi pada saat kondisi cuaca cerah dan kondisi cuaca berawan/hujan.

Asumsi yang digunakan dalam simulasi adalah:

1. Pada awal simulasi, diasumsikan muatan baterai penuh, dimana nilai SOC baterai maksimum sebesar 0,8.
2. Pada awal simulasi, semua kondisi saklar dianggap '1' atau terhubung ke jaringan.
3. Arus baterai saat pengosongan bertanda - (negatif), berarti baterai mengeluarkan arus untuk memasok kebutuhan energi beban.
4. Arus baterai saat pengisian bertanda + (positif), berarti baterai menerima arus dari array sel surya.

## **BAB IV**

### **HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

#### **4.1 Skema Simulasi**

Skema simulasi sistem dilakukan berdasarkan kondisi skenario yang berbeda yaitu:

1. Simulasi karakteristik pada modul sel surya.
2. Simulasi sistem pada kondisi awal tanpa menggunakan algoritma manajemen energi pada saat kondisi cuaca cerah dan kondisi cuaca berawan/hujan.
3. Simulasi sistem dengan menggunakan algoritma manajemen energi pada saat kondisi cuaca cerah dan kondisi cuaca berawan/hujan.

Simulasi sistem dilakukan berdasarkan pada kondisi awal dan kondisi dengan menggunakan algoritma manajemen energi dengan susunan konfigurasi sistem terdiri dari:

1. Array sel surya yang tersusun atas 171 modul sel surya paralel dan 2 modul sel surya seri. Setiap modul sel surya terdiri dari 72 sel surya seri.
2. Baterai bank dengan susunan 24 *string* sel baterai paralel dan 2 *string* sel baterai seri.
3. Kebutuhan energi BTS sebesar 108,8 kWh.

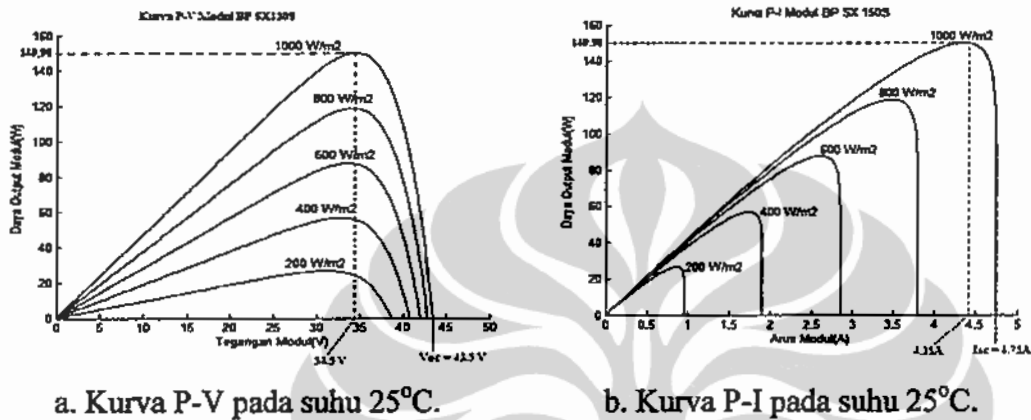
#### **4.2 Hasil Simulasi dan Analisis**

Berikut ini diberikan hasil simulasi dan analisisnya yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/SIMULINK.

## 4.2.1 Simulasi karakteristik pada modul sel surya

### A. Simulasi karakteristik modul sel surya

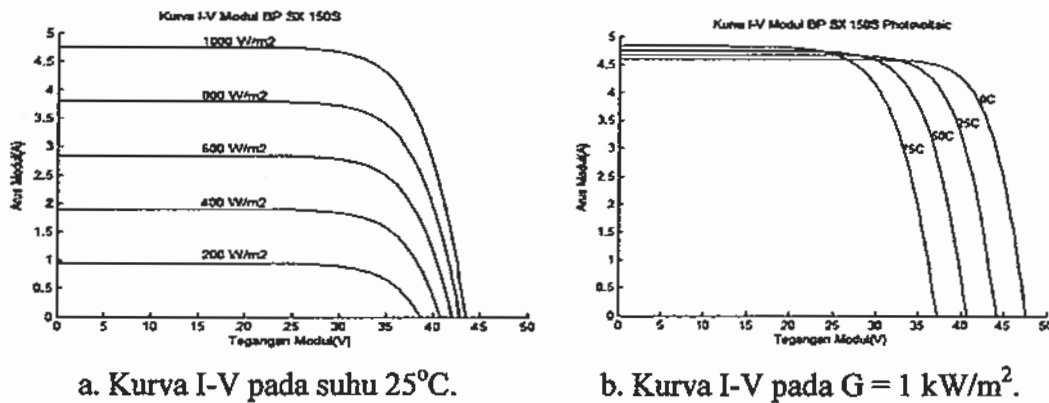
Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik modul sel surya berdasarkan lembar data pabrik modul sel surya tersebut.



Gambar 4.1 Kurva P-V dan kurva P-I modul sel surya hasil simulasi.

Dari Gambar 4.1(a) diperoleh hasil bahwa pada kondisi standar  $G = 1$  kW/m<sup>2</sup> dan suhu 25°C diperoleh daya maksimum hasil simulasi sebesar 149,98 W pada tegangan modul 34,5 V, sedangkan karakteristik daya maksimum data pabrik modul BPSX150S sebesar 150 W pada tegangan rangkaian terbuka 34,5 V. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai intensitas radiasi surya, semakin tinggi daya dan tegangan yang dihasilkan oleh modul sel surya tersebut.

Pada Gambar 4.1(b), daya maksimum hasil simulasi 149,98 W pada arus modul 4,35 A sama dengan data pabrik modul. Demikian juga diperoleh arus hubung singkat 4,75A. Dari grafik terlihat bahwa semakin tinggi nilai intensitas radiasi surya semakin besar arus dan daya yang dihasilkan oleh modul sel surya tersebut.



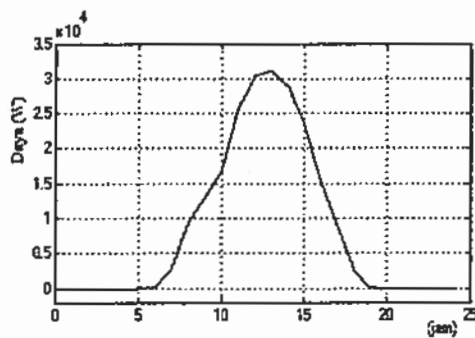
Gambar 4.2 Kurva I-V modul sel surya hasil simulasi.

Gambar 4.2(a) memperlihatkan karakteristik kurva I-V pada berbagai nilai  $G$  yang berbeda dan pada 25°C, yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB/SIMULINK. Dari grafik terlihat, bahwa pada nilai  $G = 1 \text{ kW/m}^2$ , diperoleh tegangan modul 43,5V dan arus 4,75A. Dari grafik diperoleh, bahwa semakin tinggi nilai intensitas radiasi surya, semakin besar arus yang dihasilkan modul sel surya, dan juga nilai tegangan modul semakin bertambah.

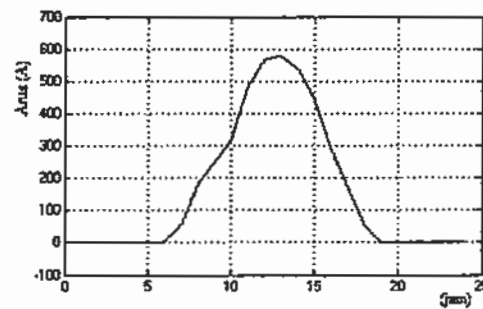
Gambar 4.2(b) memperlihatkan karakteristik I-V pada berbagai nilai suhu yang berbeda dan  $G = 1 \text{ kW/m}^2$ . Pada suhu 25°C, arus yang dihasilkan modul 4,75A dan pada tegangan 43,5V. Dari grafik terlihat bahwa semakin tinggi suhu modul, semakin tinggi arus modul tetapi sebaliknya tegangan modul semakin menurun.

## B. Simulasi array sel surya pada kondisi cuaca cerah

Total daya listrik yang dihasilkan oleh modul sel surya pada tanggal 3 Januari saat cuaca cerah adalah 208,34 kWh/hari, dengan menggunakan susunan array sel surya 2 *string* seri dan 171 *string* paralel.



a. Profil daya array sel surya



b. Profil arus array sel surya

Gambar 4.3 Profil daya dan arus array sel surya saat cuaca cerah.

Profil daya yang dihasilkan modul sel surya diperlihatkan pada Gambar 4.3(a), dimana grafik mulai naik dari pukul 06:00 pagi hingga puncaknya pada siang hari pukul 13.00 dan selanjutnya turun hingga pukul 18:00 sore. Nilai puncak daya yang dihasilkan modul sel surya 30,75 kWh terjadi pada pukul 13.00.

Gambar 4.3(b) memperlihatkan profil arus yang dihasilkan oleh array sel surya pada saat cuaca cerah. Diperkirakan arus maksimum yang dihasilkan oleh array sel surya sebesar 572,453A terjadi pada siang hari pada pukul 13:00. Hal ini sebanding dengan besarnya intensitas cahaya matahari saat tersebut mencapai puncaknya sebesar 1,137 kWh/m<sup>2</sup>.

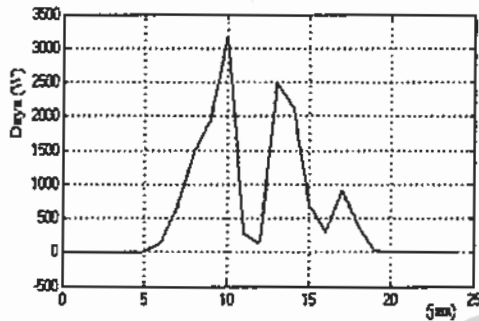
### C. Simulasi array sel surya pada kondisi cuaca berawan/hujan

Profil daya yang dihasilkan modul sel surya diperlihatkan pada Gambar 4.4(a), dimana grafik mulai naik dari pukul 06:00 pagi hingga pukul 10:00 sebesar 2565,67 W, tetapi cepat menurun menjadi 207,49W pada pukul 12:00 karena diperkirakan terjadi hujan. Energi yang dihasilkan modul sel surya dalam kondisi hujan adalah sebesar 14,73 kWh.

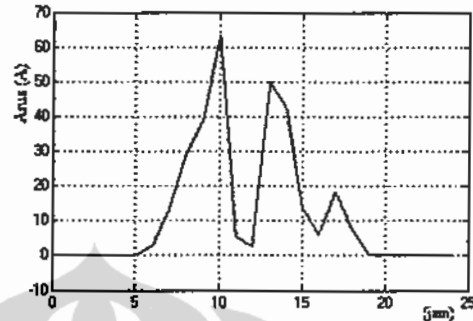
Gambar 4.4(b) memperlihatkan profil arus yang dihasilkan oleh array sel surya pada saat cuaca hujan. Diperkirakan arus maksimum yang dihasilkan oleh array sel surya sebesar 51,17A terjadi pada pukul 10:00 dan cepat menurun



menjadi 4,2A pada pukul 12:00 saat hujan. Pada pukul 12:00 besarnya intensitas cahaya matahari hanya  $5 \text{ kWh/m}^2$ .



a. Profil daya array sel surya



b. Profil arus array sel surya

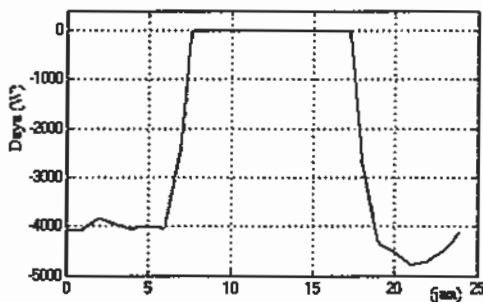
Gambar 4.4 Profil daya dan arus array sel surya saat cuaca berawan/hujan.

#### 4.2.2 Simulasi sistem pada kondisi awal tanpa menggunakan algoritma manajemen energi.

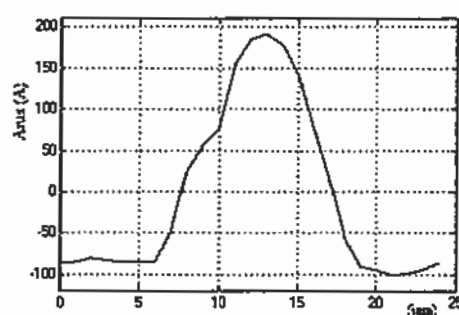
##### A. Saat kondisi cuaca cerah

Gambar 4.5(a) memperlihatkan profil daya pengosongan baterai. Dari hasil simulasi, diperoleh daya pengosongan baterai sebesar 55,106 kWh.

Gambar 4.5(b) memperlihatkan profil arus pengisian (bernilai positif) dan arus pengosongan (bernilai negatif). Antara pukul 07.00 hingga pukul 08.00 terjadi peralihan arus pengosongan menuju arus pengisian dan sebaliknya, antara pukul 17.00 dan 18.00, arus pengisian dan pengosongan terjadi bersamaan.

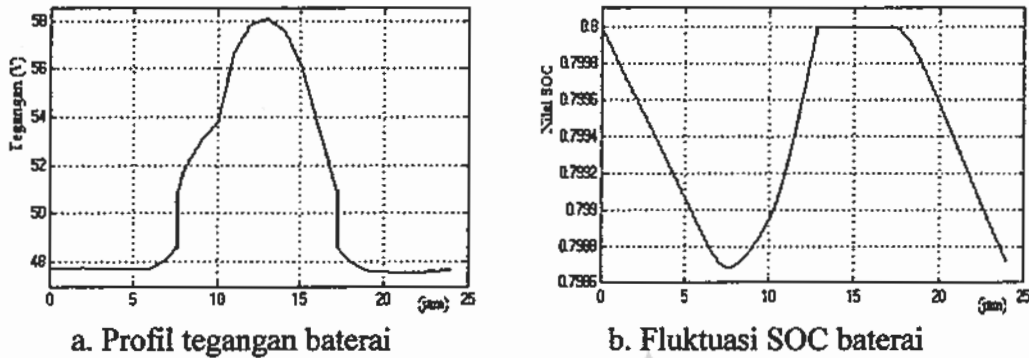


a. Daya pengosongan baterai



b. Profil arus baterai

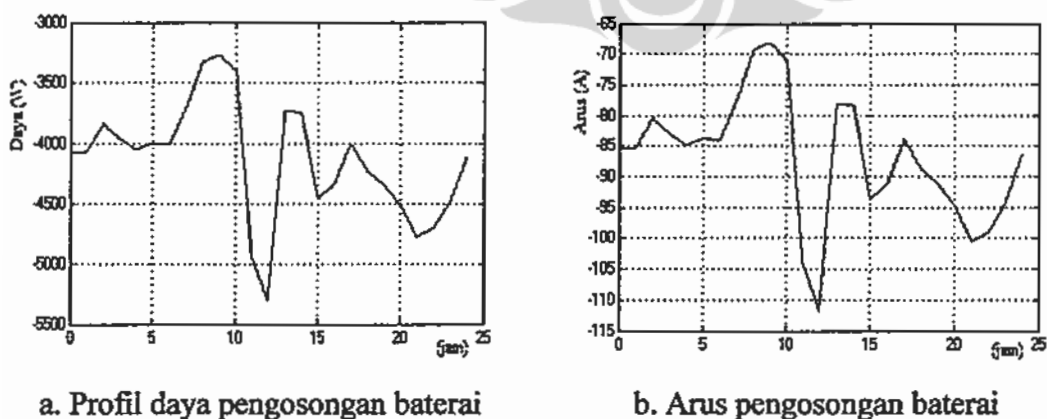
Gambar 4.5 Profil daya pengosongan dan arus pada baterai.



Gambar 4.6 Profil tegangan dan nilai SOC baterai.

Gambar 4.6(a) memperlihatkan profil tegangan baterai, dimana tegangan maksimum baterai mencapai 58 volt pada pukul 13.00 saat arus pengisian maksimum 188,39 A. Gambar 4.6(b) memperlihatkan fluktuasi SOC baterai, dimana SOC turun menjadi 0,7987 yang terjadi antara pukul 00.00 hingga pukul 08.00. SOC mencapai 0,8 kembali antara pukul 13.00 dan 17.00 (garis mendatar) karena baterai dalam kondisi pengisian dan kembali turun dari pukul 17.00 hingga pukul 24.00 karena baterai dalam kondisi pengosongan.

## B. Saat kondisi cuaca berawan/hujan

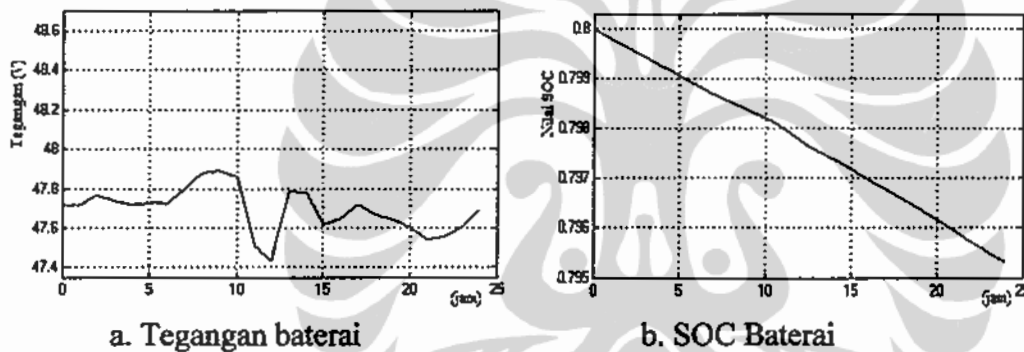


Gambar 4.7 Profil pengosongan daya dan arus pada baterai.

Gambar 4.7(a) memperlihatkan profil pengosongan daya baterai selama 24 jam. Dari hasil simulasi, diperoleh daya pengosongan baterai sebesar 99,285 kWh.

Gambar 4.7(b) memperlihatkan profil arus pengosongan baterai selama 24 jam, karena array surya hanya menghasilkan energi listrik sebesar 14,73 kWh.

Gambar 4.8(a) memperlihatkan profil tegangan baterai selama kondisi baterai mengalami kondisi pengosongan dalam waktu 24 jam. Gambar 4.10(b) memperlihatkan fluktuasi SOC baterai, dimana selama 24 jam, nilai SOC mengalami penurunan menjadi 0,7954, diperlihatkan dalam grafik berupa garis hampir lurus menurun.



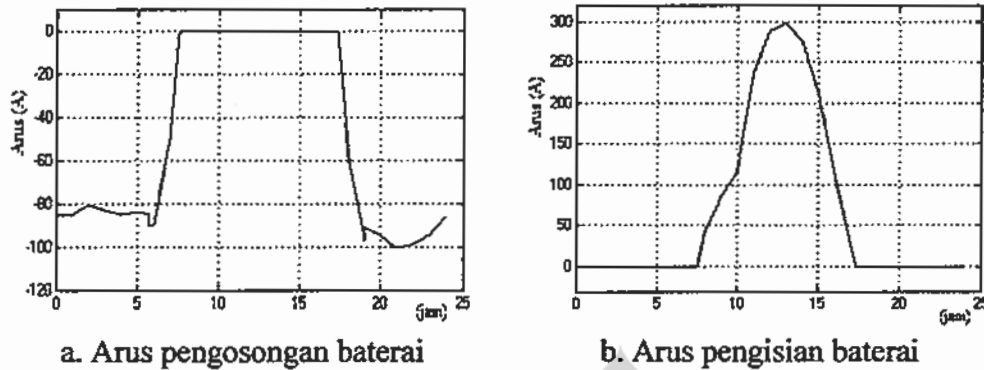
Gambar 4.8 Profil tegangan dan nilai SOC baterai hasil simulasi saat cuaca hujan.

#### 4.2.3 Simulasi sistem dengan menggunakan algoritma manajemen energi

##### A. Saat kondisi cuaca cerah

Gambar 4.9(a) berikut memperlihatkan profil arus pengosongan baterai dengan total daya pengosongan sebesar 54,74 kWh. Dari grafik terlihat bahwa BTS disuplai oleh daya pengosongan baterai antara pukul 17.00 hingga pukul 08.00.

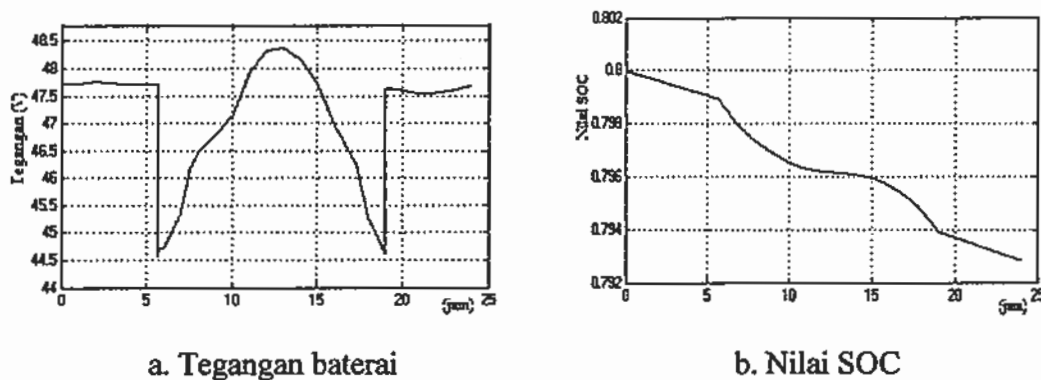
Gambar 4.9(b) memperlihatkan arus pengisian baterai yang terjadi dari pukul 07.00 hingga pukul 18.00, dimana arus maksimum 292,897A terjadi pada pukul 13.00.



Gambar 4.9 Profil arus baterai hasil simulasi saat cuaca cerah.

Pada Gambar 4.10 (a) memperlihatkan profil perubahan tegangan baterai saat pengosongan maupun pengisian. Tegangan maksimum baterai mencapai 48,36 volt pukul 13.00. Antara pukul 06.00-07.00 tegangan turun menjadi 45,07 volt karena saat tersebut terjadi peralihan kondisi pengosongan menjadi pengisian. Demikian juga, antara pukul 18.00-19.00 tegangan turun menjadi 44,945 volt karena baterai dalam kondisi peralihan pengisian menjadi pengosongan.

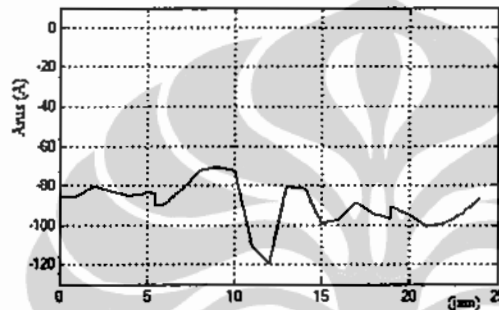
Gambar 4.10(b) memperlihatkan fluktuasi nilai SOC baterai, dimana antara pukul 07.00 hingga pukul 18.00 baterai menerima arus dari array surya (kondisi pengisian). Sedangkan antara pukul 18.00 hingga pukul 07.00 baterai mengirimkan arus ke BTS (kondisi pengosongan). Nilai SOC terendah terjadi pada pukul 24.00 sebesar 0,793.



Gambar 4.10 Fluktuasi tegangan dan nilai SOC baterai saat cuaca cerah.

### B. Sistem PV saat kondisi cuaca berawan/hujan

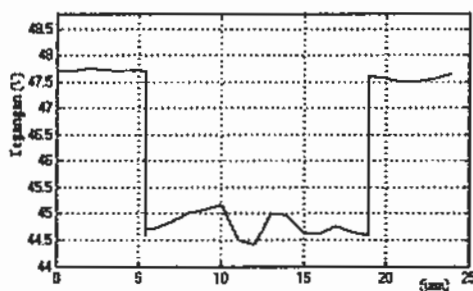
Dari Gambar 4.11 terlihat perubahan arus pengosongan baterai selama 24 jam. Baterai memasok selisih daya antara daya yang dihasilkan array sel surya dan daya beban dimana  $P_{PV} < P_{bts}$  dimana arus pengosongan baterai tertinggi terjadi pada pukul 12.00 sebesar 114,936A, dan arus pengosongan baterai terendah pada pukul 10.00 sebesar 71,48A, karena saat tersebut arus array sel surya mencapai nilai tertinggi sebesar 51,17A. Energi listrik yang dihasilkan baterai selama 24 jam dalam kondisi pengosongan sebesar 98,645 kWh.



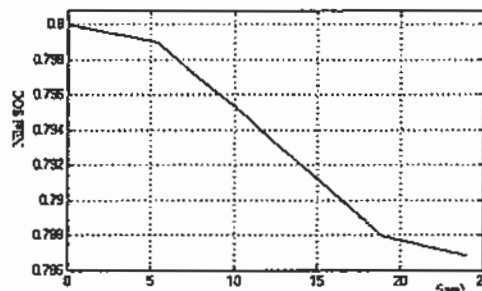
Gambar 4.11 Profil arus pengosongan baterai hasil simulasi saat cuaca hujan.

Pada Gambar 4.12 memperlihatkan profil perubahan tegangan baterai saat baterai dalam kondisi pengosongan selama 24 jam. Tegangan terendah 44,464 terjadi pada pukul 12.00 saat kondisi arus pengosongan baterai maksimum sebesar 114,936A dan daya BTS mencapai puncaknya ketika kemungkinan terjadi hujan.

Berdasarkan Gambar 4.12 (b), dalam rentang waktu 24 jam, nilai SOC mengalami penurunan karena pada saat tersebut baterai sedang memasok energi listrik BTS (kondisi pengosongan). Nilai terendah SOC 0,7869 terjadi pada pukul 24.00 setelah baterai memasok energi listrik BTS dalam waktu 24 jam.



a. Profil tegangan baterai



b. Perubahan nilai SOC

Gambar 4.12 Perubahan tegangan dan nilai SOC baterai saat cuaca hujan.

### 4.3 Perbandingan Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan dua kondisi cuaca berbeda yaitu cuaca cerah dengan tingkat radiasi surya tinggi dan cuaca berawan/hujan dengan tingkat radiasi surya rendah. Simulasi ini berdasarkan algoritma manajemen energi diantara energi PLTS dan energi baterai untuk memasok kebutuhan energi BTS sebesar 108,8 kWh/hari pada tegangan sistem 48V.

Hasil simulasi diberikan dalam Tabel 4.1 dalam kondisi cuaca cerah dan cuaca berawan berikut ini.

Tabel 4.1 Hasil simulasi dalam kondisi cuaca cerah dan cuaca berawan/hujan.

No.	Energi pada sistem	Cuaca cerah			Cuaca berawan/hujan		
		kWh	Maks.	Min.	kWh	Maks.	Min.
1	Energi <sub>PLTS</sub>	208,34	—	—	14,73	—	—
2	Kebutuhan E <sub>BTS</sub>	108,8	—	—	108,8	—	—
3	E <sub>PLTS</sub> untuk BTS	54,06	—	—	14,73	—	—
4	Kelebihan E <sub>PLTS</sub>	73,976	—	—	—	—	—
5	Energi <sub>pengosongan_baterai</sub>	54,74	—	—	98,645	—	—
6	Energi <sub>pengisian_baterai</sub>	80,304	—	—	—	—	—
7	V <sub>baterai</sub>	—	48,346V	44,954V	—	47,753V	44,464V
8	SOC <sub>baterai</sub>	—	0,7999	0,7929	—	0,7999V	0,7869

#### 4.3.1. Saat cuaca cerah

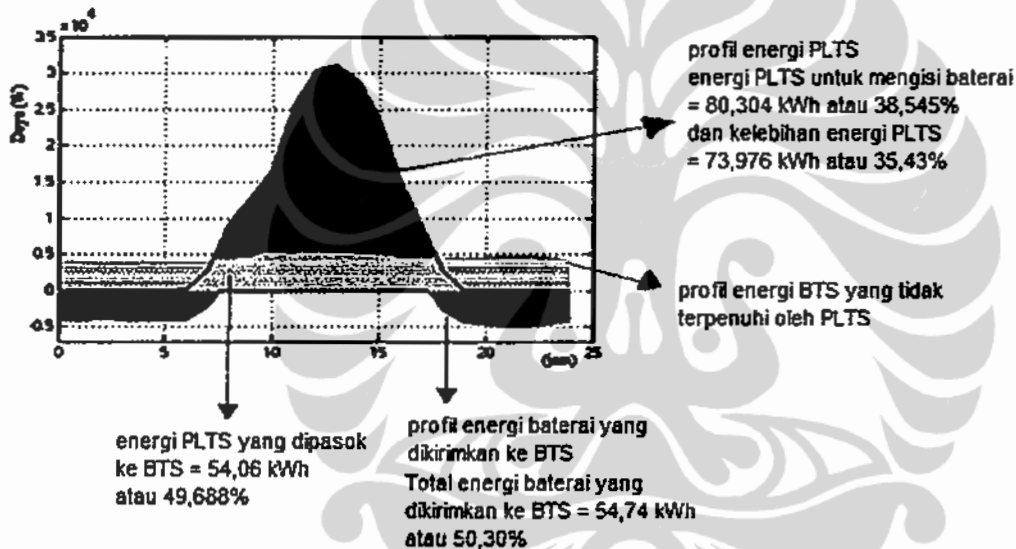
Dari hasil simulasi Tabel 4.1 dalam kondisi cuaca cerah dengan tingkat intensitas radiasi surya tinggi, diperlihatkan dalam bentuk gambaran profil energi PLTS dan baterai pada Gambar 4.13.

##### A. Kontribusi energi

Pada Gambar 4.13, diperlihatkan profil energi PLTS (area berwarna biru) yang digunakan untuk mengisi baterai yaitu 80,304 kWh atau 38,545% dari total energi PLTS dan kelebihan energi PLTS sebesar 73,976 kWh atau 35,43% dari total energi PLTS dimana kelebihan energi ini dapat digunakan untuk keperluan lainnya.

Sedangkan kontribusi energi yang dihasilkan PLTS dalam memenuhi kebutuhan energi listrik BTS yaitu 54,06 kWh atau 49,688% (area berwarna kuning). PLTS menghasilkan energi dimulai dari pukul 06.00 hingga pukul 18.00 dan energi PLTS mencapai nilai puncaknya terjadi pada pukul 13.00.

Kontribusi energi pengosongan baterai dalam memasok kebutuhan energi listrik BTS adalah 54,74 kWh atau 50,30%, dalam Gambar 4.13 ditunjukkan dalam area berwarna merah. Hal ini terjadi antara pukul 17.00 hingga pukul 08.00 saat intensitas radiasi surya rendah atau tidak adanya intensitas radiasi surya (saat malam hari).



Gambar 4.13 Profil energi sistem hasil simulasi saat cuaca cerah.

## B. Tegangan baterai

Tegangan maksimum baterai mencapai 48,346 volt dan tegangan minimum 44,954 volt. Tegangan tersebut masih dalam batasan tegangan yang ditentukan dalam algoritma yaitu  $42V \leq V_{\text{baterai}} \leq 56V$  dimana 56 volt adalah batasan tegangan pengisian-lebih dan 42 volt adalah batasan tegangan pengosongan-lebih pada baterai.

Bila tegangan maksimum baterai melebihi tegangan maksimum pengisian-lebih baterai 56 volt akan mengakibatkan baterai mengalami pengisian-lebih (timbulnya proses sulfasi/gas pada baterai) yang menyebabkan kerusakan pada

baterai dan peralatan proteksi elektronik lainnya yang sensitif terhadap lonjakan perubahan tegangan yang cukup tinggi.

### **C. Nilai SOC baterai**

Nilai SOC baterai selama kondisi pengosongan baterai yang terjadi antara pukul 17.00 hingga pukul 08.00 tidak turun dibawah 0,790. Ini berarti ketersediaan energi baterai masih melebihi 98,75% dari nilai SOC maksimumnya.

### **4.3.2. Saat cuaca berawan/hujan**

Dari hasil simulasi Tabel 4.1 dalam kondisi cuaca berawan/hujan, diperlihatkan dalam bentuk gambaran profil energi PLTS dan baterai dalam kondisi tersebut pada Gambar 4.14.

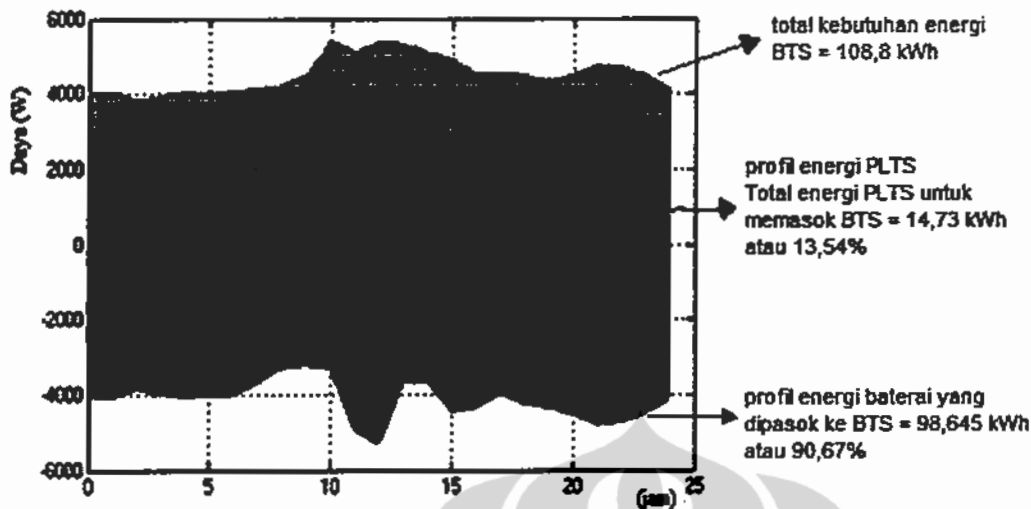
#### **A. Kontribusi energi**

Pada Gambar 4.14, diperlihatkan profil energi PLTS dalam kondisi cuaca berawan/hujan (area berwarna biru) dimana energi PLTS yang dihasilkan 14,73 kWh hanya mampu memenuhi kebutuhan energi BTS sebesar 13,54%. Kekurangan pasokan energi PLTS dalam memenuhi kebutuhan energi BTS dapat dalam Gambar 4.14 dengan luas area berwarna hijau menunjukkan profil energi BTS.

Oleh karena itu, kekurangan energi BTS tersebut sepenuhnya dipasok oleh energi baterai. Kontribusi energi pengosongan baterai dalam memasok kebutuhan energi listrik BTS sebesar 98,645 kWh atau 90,67%. Hal ini terjadi selama periode 24 jam pada hari tersebut yang ditunjukkan dalam Gambar 4.14 pada area berwarna merah.

Total energi yang dihasilkan oleh PLTS dan energi pengosongan baterai pada saat cuaca berawan/hujan adalah 113,375 kWh atau 104,20% melebihi kebutuhan energi listrik BTS.





Gambar 4.14 Profil energi sistem hasil simulasi saat cuaca hujan.

### B. Tegangan baterai

Tegangan maksimum baterai mencapai 47,753 volt dan tegangan minimum 44,464 volt. Tegangan tersebut masih dalam batasan tegangan yang ditentukan dalam algoritma yaitu  $42V \leq V_{\text{baterai}} \leq 56V$  dimana 56 volt adalah batasan tegangan pengisian-lebih dan 42 volt adalah batasan tegangan pengosongan-lebih pada baterai. Tegangan baterai masih dalam batasan yang ditentukan meskipun baterai memasok kebutuhan energi BTS dalam 24 jam.

### C. Nilai SOC baterai

Meskipun nilai SOC minimum baterai hasil simulasi mencapai 0,7869 atau turun sebesar 1,64% dari batasan SOC maksimum 0,8 tetapi turunnya tidak melebihi 25% dari nilai SOC maksimum padahal baterai telah mengirimkan energi ke BTS dalam waktu 24 jam. Hal ini menunjukkan bahwa baterai dapat memasok kebutuhan energi listrik BTS selama dua hari berturut-turut dalam kondisi cuaca berawan/hujan.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

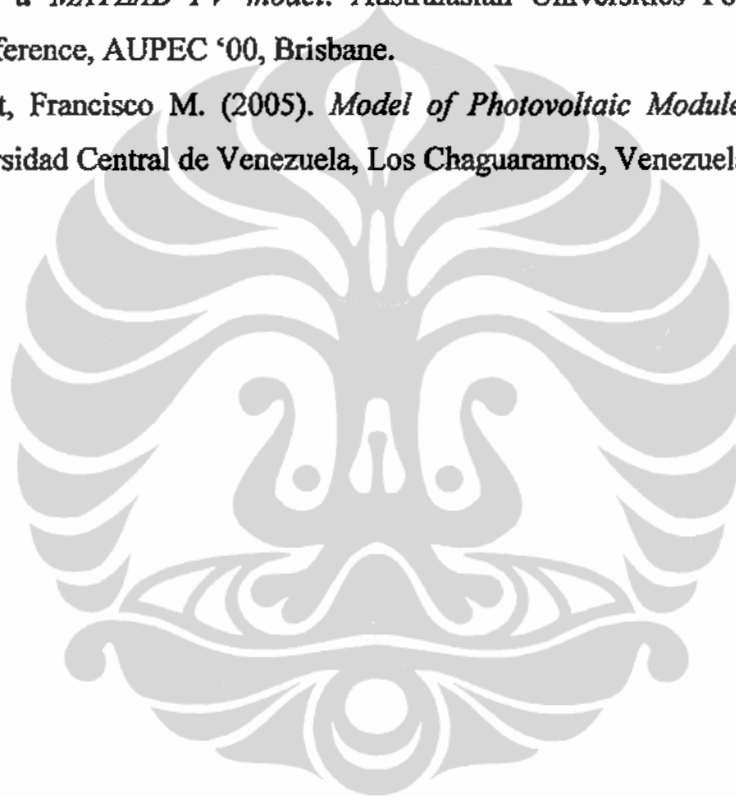
Energi listrik yang dihasilkan PLTS cenderung berubah-ubah atau tidak teratur yang bergantung pada kondisi cuaca sekitarnya. Ketidakteraturan energi listrik PLTS ini dapat diatasi melalui algoritma manajemen energi diantara PLTS dan baterai sebagai media penyimpanan energi dalam memenuhi kebutuhan energi BTS dalam siklus 24 jam. Algoritma ini dibuat berdasarkan batasan tegangan pengisian-lebih baterai 56V dan tegangan pengosongan-lebih baterai 42V serta nilai SOC baterai maksimum 0,8 dan SOC baterai minimum 0,2. Berdasarkan algoritma manajemen energi tersebut, diperoleh hasil sebagai berikut:

- 1) Dalam kondisi cuaca, diperoleh kontribusi energi PLTS 54,06 kWh atau 49,688% dan kontribusi energi pengosongan baterai 54,74 kWh atau 50,30%, dari total kebutuhan energi listrik BTS. Dalam kondisi cuaca hujan, diperoleh kontribusi energi PLTS 14,73 kWh atau 13,54% dan kontribusi energi pengosongan baterai 98,645 kWh atau 90,67% dari total kebutuhan energi listrik BTS.
- 2) Tegangan baterai hasil simulasi baik dalam kondisi cuaca cerah maupun kondisi cuaca berawan/hujan masih dalam batasan tegangan baterai yang ditentukan dalam algoritma manajemen energi.
- 3) Perubahan nilai SOC baterai, baik dalam kondisi cuaca cerah maupun cuaca hujan tidak pernah turun sampai 25% dari nilai SOC maksimum 0,8. Sehingga dapat diprediksi bahwa ketersediaan energi baterai dapat memenuhi kebutuhan energi listrik BTS selama dua hari secara mandiri.

## DAFTAR REFERENSI

1. Oi, Akihiro. (2005). *Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System*. Thesis. California Polytechnic State University.
2. DenHerder, Tyson. (2006). *Design and Simulation of Photovoltaic Super System Using Simulink*. Paper. California Polytechnic State University.
3. Masters, Gilbert M. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
4. Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, Yi-Jie Su. (2008). *Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK*. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, San Francisco.
5. S.X. Chen, H. B. Gooi. (2009). *Scheduling of Energy Storage in a Grid-Connected PV/Battery System via SIMPLORER*, IEEE.
6. T.T. Ha Pham, F. Wurtz, S. Bacha. (2009). *Optimal operation of a PV based multi-source system and energy management for household application*, IEEE.
7. Thomas E. Hoff, Richard Perez, Robert M. Margolis. (2005). *Maximizing The Value of Customer-Sited PV Systems Using Storage and Controls*, IEEE.
8. Y.Riffonneau, S.Bacha, F.Barruel, A.Delaille. (2009). *Energy flow management in grid connected PV systems with storage - A deterministic approach*, IEEE.
9. Google earth. (2010). *Jakarta Selatan*. Tele Atlas Europe Technologies.
10. NASA Surface meteorology and Solar Energy. (2010). <http://eosweb.larc.nasa.gov>.
11. Gilman, P., Lambert, T. (2010). *Homer (Version 2.68)*. [Computer Software]. United State of America. National Renewable Energy Laboratory of United States Government.
12. <http://www.wunderground.com/weatherstation>. (2010).
13. Data pengukuran tanggal 23 Maret 2010 oleh PT. Excelcomindo Pratama Tbk.

14. Xianglin Zhu, Zhiling Liao. (2009). *Energy Management for Stand-alone PV System*. ISECS, IEEE. International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management.
15. Salaheddin A. Zabalawi, Goran Mandic, Adel Nasiri. (2008). *Utilizing Energy Storage with PV for Residential and Commercial Use*. University of Wisconsin – Milwaukee, IEEE.
16. Walker, Geoff. (2000). Walker, Geoff R. *Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model*. Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane.
17. Gonzalez-Longatt, Francisco M. (2005). *Model of Photovoltaic Module in Matlab<sup>TM</sup>*. Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos, Venezuela.



```

function Ia = bp_sxl50sl(Va, G, TaC)
% function bp_sxl50s.m models the BP SX 150S PV module
% calculates module current under given voltage, irradiance and
temperature
%
% Ia = bp_sxl50s(Va, G, TaC)
% Out: Ia = module operating current (A), vector or scalar
% In: Va = module operating voltage (V), vector or scalar
% G = irradiance (1 G = 1000 W/m^2), scalar
% TaC = module temperature in deg C, scalar
%
% Written by Akihiro Oi 01/7/2005
% Direvisi 7/18/2005
%
% Direvisi Eva MS pada 15/05/2010 untuk 171 modul BPSX150S
% Define constants
%
k = 1.381e-23; % konstanta Boltzmann
q = 1.602e-19; % muatan elektron
Va = 24.0; % PV voltage
% Following constants are taken from the datasheet of PV module
and
% curve fitting of I-V characteristic (use data for 1000 W/m^2)
n = 1.62; % faktor idealitas dioda
% 1 (dioda ideal) < n < 2
Eg = 1.12; % band gap energy; 1.12eV (Si), 1.42 (GaAs), 1.5 (CdTe)
Ns = 72; % jumlah sel surya seri (BP SX150s, 72 sel)
TrK = 298; % suhu referensi (25 C) dalam Kelvin
Voc_TrK = 43.5 / Ns; % Voc (open circuit voltage per cell) @ temp
TrK
Isc_TrK = 4.75; % Isc (short circuit current per cell) @ temp TrK
a = 0.65e-3; % temperature coefficient of Isc (0.065%/C)
% Define variables
%
TaK = 273.0 + TaC; % module temperature in Kelvin
Vc = Va / Ns; % cell voltage
% calculate short-circuit current for TaK
Isc = Isc_TrK * (1 + (a * (TaK - TrK)));
% calculate photon generated current @ given irradiance
Iph = G * Isc;
% Define thermal potential (Vt) at temp TrK
Vt_TrK = n * k * TrK / q;
% Define b = Eg * q / (n*k)
b = Eg * q / (n*k);
%
% Calculate reverse saturation current for given temperature
Ir_TrK = Isc_TrK / (exp(Voc_TrK / Vt_TrK) - 1);
Ir = Ir_TrK * ((TaK / TrK)^(3/n)) * exp(-b * ((1 / TaK) -
(1/TrK)));
% calculate series resistance per cell (Rs = 5.1mOhm)
dVdI_Voc = -1.0/Ns; % take dV/dI @ Voc from I-V curve of datasheet
Xv = Ir_TrK / Vt_TrK * exp(Voc_TrK / Vt_TrK);
Rs = - dVdI_Voc - (1/Xv);
%
% define thermal potential (Vt) at temp Ta
%
Vt_Ta = n * k * TaK / q;
% Ia = Iph - Ir * (exp((Vc + Ia * Rs) / Vt_Ta) - 1)

```

```

% f(Ia) = Iph - Ia - Ir * (exp((Vc + Ia * Rs) / Vt_Ta) - 1)
% solve for Ia by Newton's method: Ia2 = Ia1 - f(Ia1)/f'(Ia1)
Ia = zeros(size(Vc)); % initialize Ia with zeros
%
% untuk 1 modul gunakan Ia=Ia-(Iph-Ia-Ir.*(exp(Vc) +
(Ia.*Rs)/(Vt_Ta)-1))./(-1 - Ir * (Rs./(Vt_Ta)).* exp((Vc) +
(Ia.*Rs)/(Vt_Ta)))
%
% untuk 171 modul paralel dan 2 modul seri gunakan berikut ini
for j=1:5;

    Ia=Ia-(171*Iph-Ia-171*Ir.*(exp((Vc/2) +
(Ia.*Rs/171))/(Vt_Ta/2)-1))./(-1 - 171*Ir *
(Rs./(Vt_Ta/2)).* exp((Vc/2) + (Ia.*Rs/171))/(Vt_Ta/2)));
end

%

```



```

function [Vmp,Ial]= mppt(Ia)
%
% Ditulis oleh Tyson DenHerder 11/2/06
%
%
% Define variables and initialize
C = 0.1; % step size for ref voltage change (V)
% Define variables with initial conditions
fread = Ia; % PV current
Pa = 24.0 * Ia; % PV keluaran power
Vref_new = 24.0 + C; % new reference voltage
% performs 100 iterations
for n = 1:100;
    Va_new = Vref_new;
    Ia_new = Ia;
    % calculate new Pa
    Pa_new = Va_new * Ia_new;
    deltaPa = Pa_new - Pa;
    % P&O algorithm starts here
    if deltaPa > 0
        if Va_new > 24.0
            Vref_new = Va_new + C; % increase Vref
        else
            Vref_new = Va_new - C; % decrease Vref
        end
    elseif deltaPa < 0
        if Va_new > 24.0
            Vref_new = Va_new - C; % decrease Vref
        else
            Vref_new = Va_new + C; % increase Vref
        end
    else
        Vref_new = Va_new; % no change
    end
    % Update history
    Ia = Ia_new;
    Pa = Pa_new;
end
Vmp = Vref_new;
Ial = Ia;
%endfunction

```

Lampiran 3. Listing Program Kurva 59  
Modul Sel Surya

Listing program Matlab membuat kurva P-I modul BPSX150S :

```
figure
hold on
for G=0:.2:1;
    Va = linspace(0, 45, 200);
    Ial = Ia;
    Pa = Ial.*Va;
    Ial_max=max(Ial)
    plot(Ial, Pa)
    Pa_max = max(Pa)
end
title('Kurva P-I Modul BP SX 150S')
xlabel('Arus Modul (A)')
ylabel('Daya Keluaran Modul (W)')
axis([0 5 0 160])
gtext('200 W/m2')
gtext('400 W/m2')
gtext('600 W/m2')
gtext('800 W/m2')
gtext('1000 W/m2')
hold off
```

Listing program Matlab membuat kurva I-V modul BPSX150S :

```
figure
hold on
for TaC=0:25:75;
    Va = linspace(0, 48-TaC/8, 200);
    Ial = Ia;
    plot(Va, Ial)
end
title('Kurva I-V Modul BP SX 150S Photovoltaic')
xlabel('Tegangan Modul (V)')
ylabel('Arus Modul (A)')
axis([0 50 0 5])
gtext('0C')
gtext('25C')
gtext('50C')
gtext('75C')
hold off
```



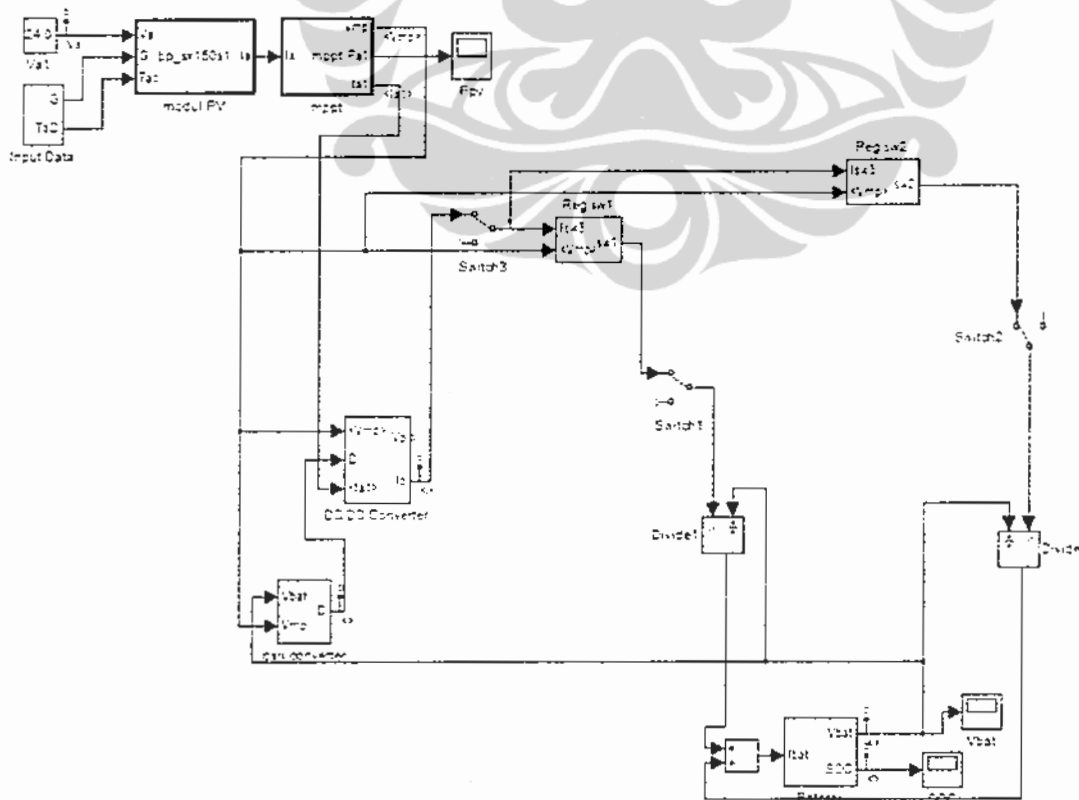
**PROGRAM SIMULASI SISTEM**

Dalam bagian ini, akan digunakan program simulasi yang disebut MATLAB/SIMULINK yang akan mensimulasikan setiap periode waktu yang ditinjau yaitu dalam rentang periode 24 jam.

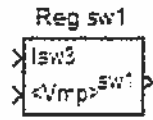
Model sistem dalam MATLAB/SIMULINK dapat dilihat dalam bagian lampiran, dimana array sel surya dinyatakan dengan sumber arus dan baterai dengan sumber tegangan.

Sumber arus yang mewakili keluaran modul sel surya dimana arus keluaran diatur oleh blok keluaran konverter AS/AS 'I<sub>o</sub>'. Sumber tegangan yang mewakili baterai bergantung pada keluaran V<sub>bat</sub> dari blok baterai. Blok 'powergui' diperlukan karena dalam model sistem menggunakan komponen SIMPOWER. Komponen SIMPOWER yang digunakan meliputi: sumber arus, sumber tegangan, meter arus, saklar dan resistor.

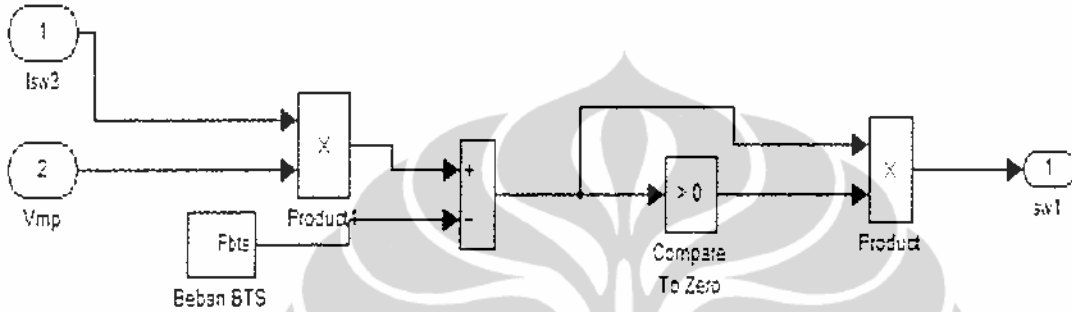
**A. Diagram Blok Simulink pada Kondisi Awal**



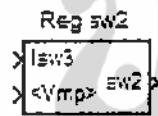
### Regulator switch1



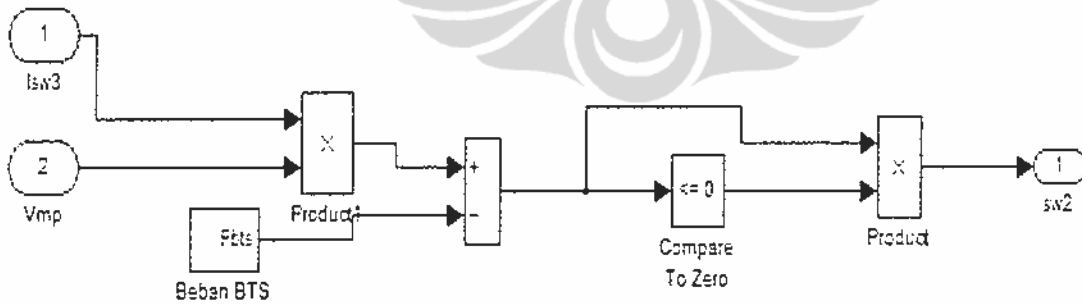
### Isi blok regulator switch1



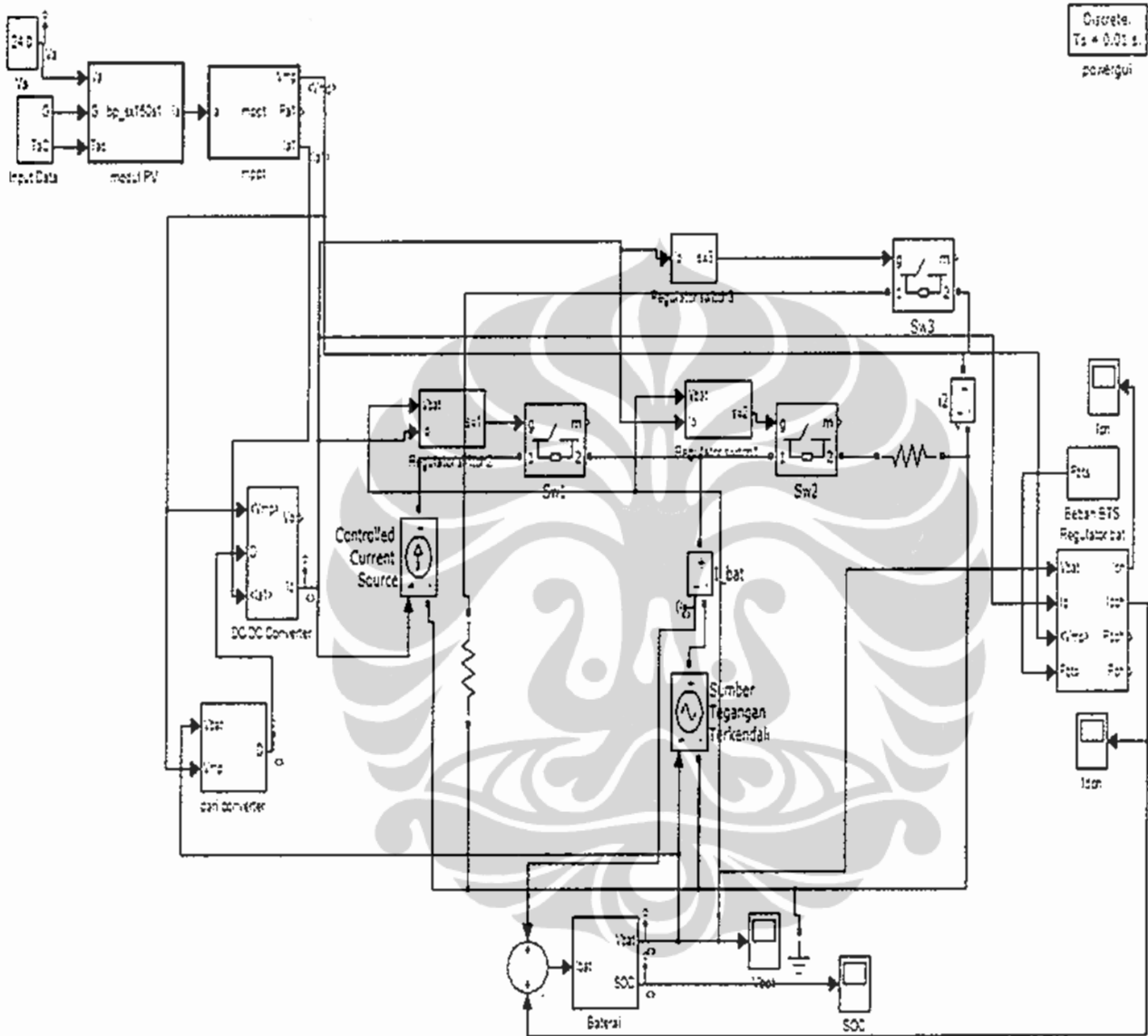
### Regulator switch2



### Isi blok regulator switch2



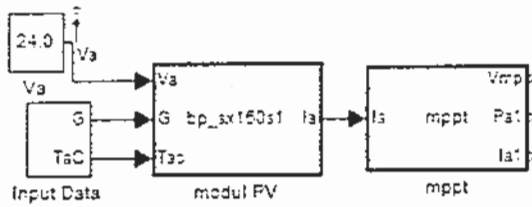
### B. Diagram Blok Simulink Menggunakan Algoritma



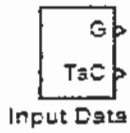
#### Modul sel surya dan MPPT

Modul sel surya dan blok MPPT digabungkan menggunakan blok *Embedded Matlab Function* untuk memasukan rumus perhitungan ke dalam simulasi. Sedangkan persamaan-persamaan untuk menghitung arus modul sel surya dan MPPT dalam bab 2 diselesaikan dalam blok 'modul sel surya' dan blok 'mppt'.

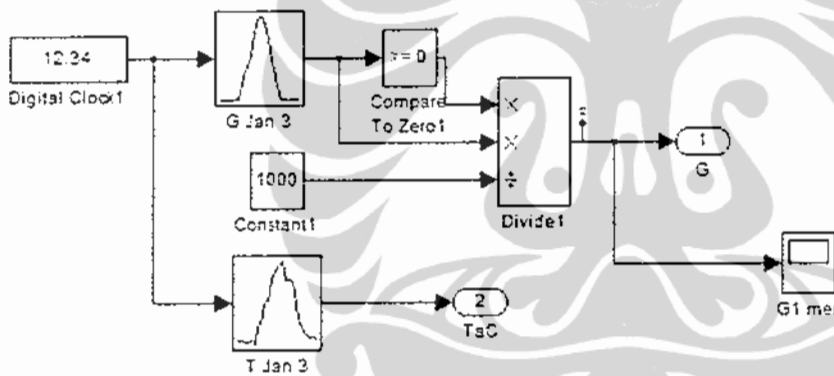
Blok modul surya dan mppt



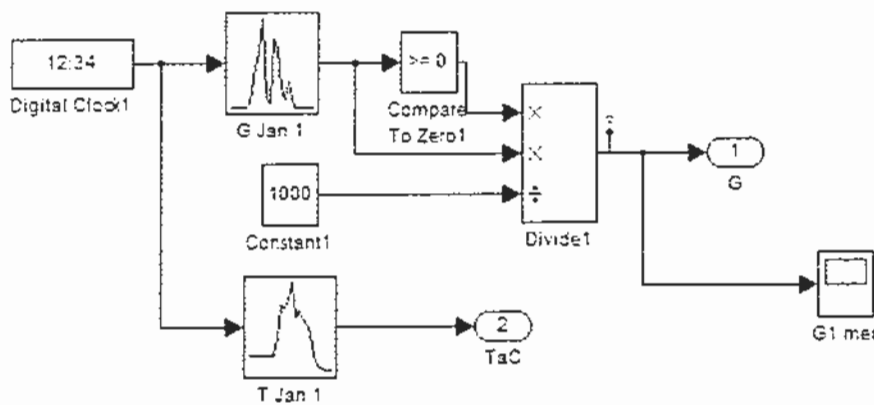
Blok masukan data 3 Januari



Isi dari blok masukan data :



Blok masukan data 1 Januari



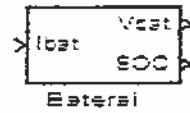
## Baterai

Baterai merupakan bagian yang kompleks dalam memodelkan sistem. Walaupun hanya ada masukan  $I_{bat}$  dan  $V_{bat}$ , tetapi terdapat beberapa nilai yang diperlukan dalam membuat model baterai. Parameter yang diperlukan tersebut adalah :

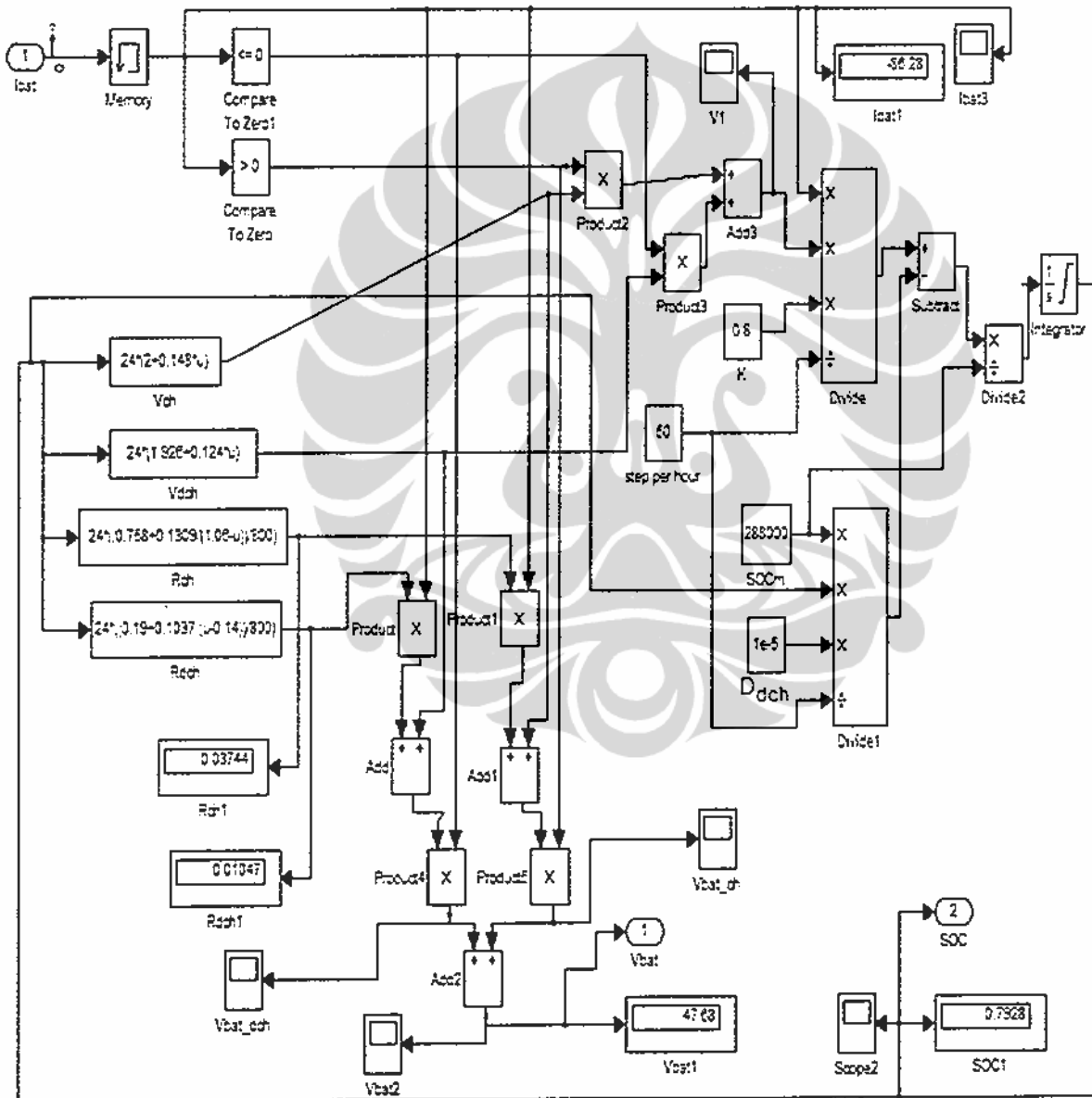
- $N_s$  = jumlah sel baterai 2 volt (24 sel untuk 48 volt) dapat ditemukan dalam blok fungsi untuk  $V_{ch}$ ,  $V_{dch}$ ,  $R_{ch}$ , dan  $R_{dch}$ , dimana pada setiap blok dikalikan dengan 24 untuk mendapatkan tegangan baterai 48 volt.
- $SOC_m$  = energi maksimum baterai (Wh) yang dapat ditemukan sebagai blok konstanta yang diberi label 'SOCm' dan nilainya dapat diubah dengan klik ulang blok.
- $D_{dch}$  = laju pengosongan-sendiri baterai (per jam) ditemukan dalam blok konstanta ' $D_{dch}$ '.
- $K$  = efisiensi pengisian/pengosongan baterai dapat ditemukan dalam blok konstanta ' $K$ '.
- Step/hour* = banyaknya periode sampel dalam satu jam (dalam 60 menit atau 3600 detik) ditemukan dalam blok konstanta berlabel '*step per hour*'.
- $SOC_1$  = nilai SOC awal baterai (0.8 atau 80%) dapat ditemukan dalam blok '*integrator*' sebagai kondisi awal.

Model baterai merupakan diagram blok berdasarkan persamaan yang telah didefinisikan dalam bab 2. Blok '*compare to zero*' digunakan hanya untuk nilai  $R_1$  ( $R_{ch}$  atau  $R_{dch}$ ) dan  $V_1$  ( $V_{ch}$  atau  $V_{dch}$ ) melalui persamaan yang pada keadaan pengisian atau pengosongan baterai. Blok memori menerima masukan dan memberikan keluaran pada step waktu berikutnya.

Blok baterai [2] :

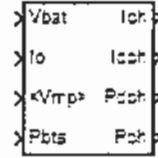


Isi dari blok baterai [2] adalah :

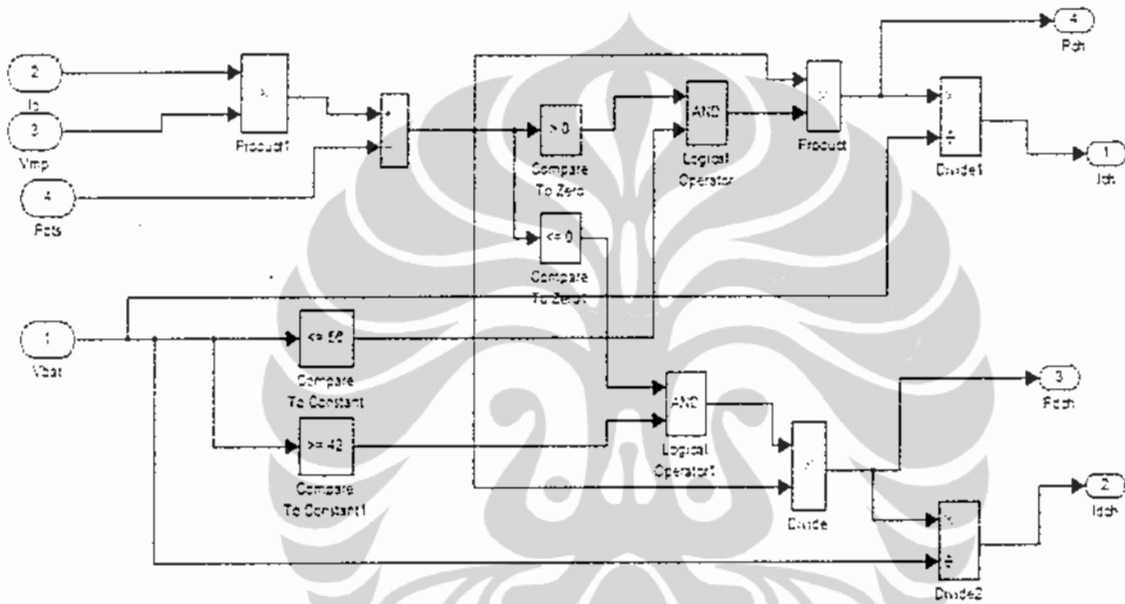


### Regulator baterai dan beban

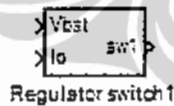
Regulator bat & beban



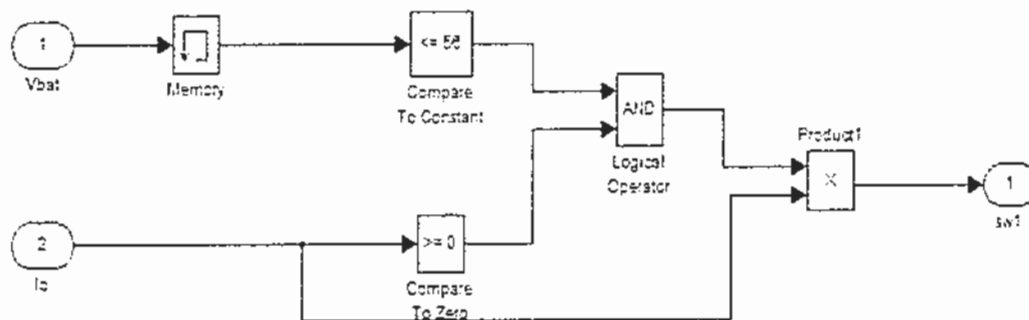
Isi dari regulator baterai dan beban adalah:



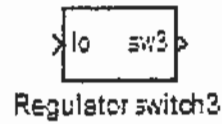
### Regulator switch 1



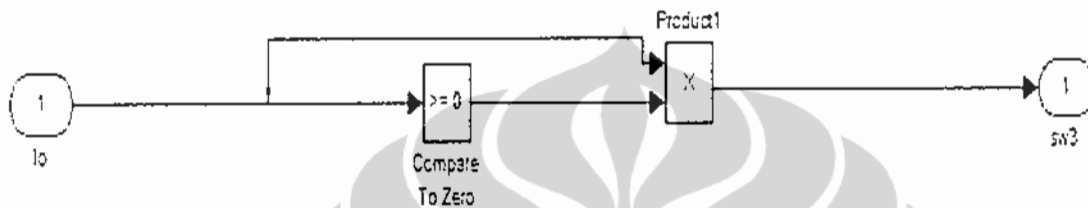
Isi regulator switch1 adalah



### Regulator switch 3



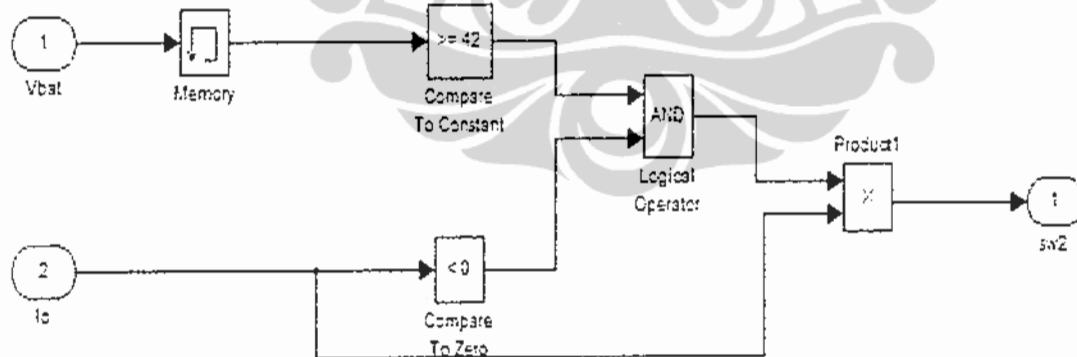
Isi dari regulator switch3 adalah:



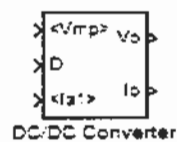
### Regulator switch 2



Isi dari regulator switch2 adalah:

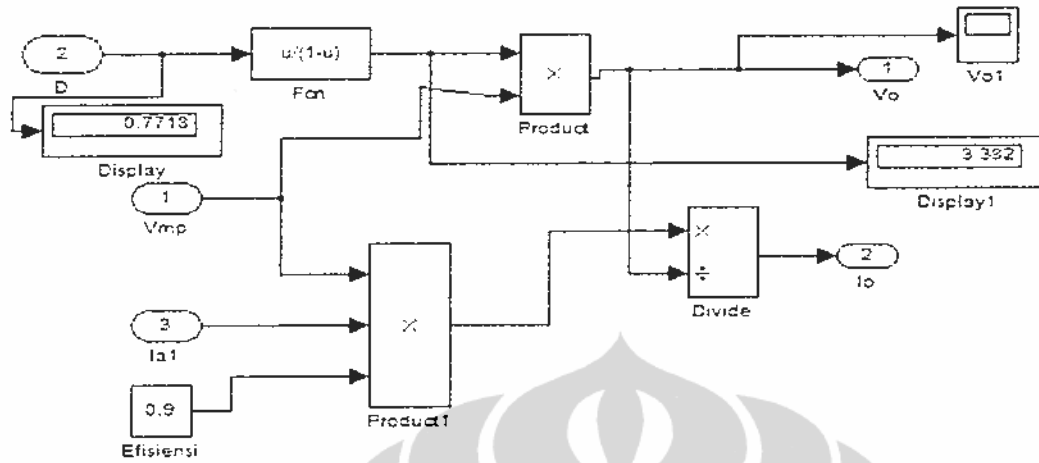


### Konvertor arus searah/ arus searah

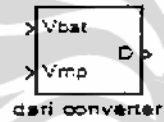




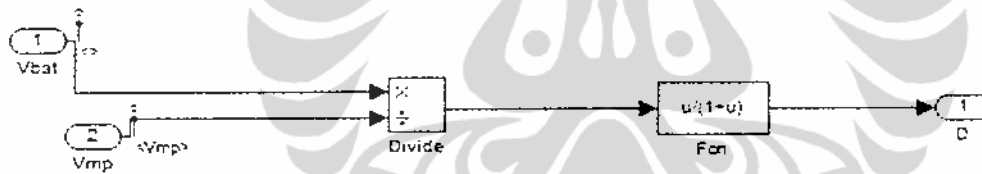
Isi blok konverter arus searah/ arus searah adalah:



Dari konverter



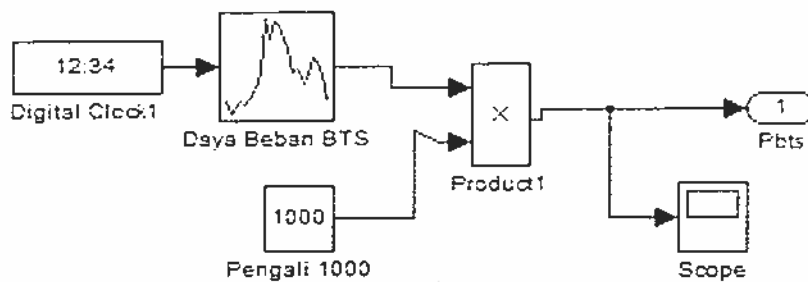
Isi blok 'dari converter' adalah:



Masukan data beban bts



Isi blok Pbts adalah:



Lampiran 5. Hasil Simulasi Saat Cuaca Cerah 69  
Menggunakan Algoritma

**Hasil Simulasi Sistem Saat Cuaca Cerah Menggunakan Algoritma**

Waktu	I_charge (A)	I_discharge (A)	I <sub>pv</sub> (A)	SOC	Vbat (V)
00.00 - 01.00	0	-84,4132	-0,00544	0,7999	47,674
01.00 - 02.00	0	-82,8703	-0,00543	0,7997	47,740
02.00 - 03.00	0	-81,6595	-0,00543	0,7995	47,753
03.00 - 04.00	0	-83,9037	-0,00543	0,7993	47,729
04.00 - 05.00	0	-84,3473	-0,00543	0,7991	47,723
05.00 - 06.00	0	-86,1665	-0,7903	0,7989	46,731
06.00 - 07.00	0	-69,9166	28,3953	0,7983	45,037
07.00 - 08.00	9,607	-13,2634	118,3176	0,7976	46,018
08.00 - 09.00	63,722	0	215,8611	0,7971	46,624
09.00 - 10.00	100,573	0	284,2649	0,7967	46,952
10.00 - 11.00	176,589	0	401,0143	0,7964	47,511
11.00 - 12.00	262,697	0	524,7583	0,7962	48,112
12.00 - 13.00	292,897	0	572,4529	0,7962	48,346
13.00 - 14.00	287,000	0	559,5103	0,7961	48,285
14.00 - 15.00	244,931	0	491,4989	0,7960	47,959
15.00 - 16.00	164,432	0	367,1639	0,7958	47,359
16.00 - 17.00	71,576	0	232,0163	0,7955	46,704
17.00 - 18.00	4,666	-18,9079	114,0620	0,7950	45,951
18.00 - 19.00	0	-77,2216	27,608	0,7943	44,954
19.00 - 20.00	0	-92,979	-0,00545	0,7938	47,584
20.00 - 21.00	0	-97,6294	-0,00545	0,7936	47,565
21.00 - 22.00	0	-99,8183	-0,00546	0,7934	47,541
22.00 - 23.00	0	-96,7209	-0,00545	0,7932	47,572
23.00 - 24.00	0	-90,3069	-0,00544	0,7929	47,638

Lampiran 6. Hasil Simulasi Saat Cuaca Hujan 70  
Menggunakan Algoritma

**Hasil Simulasi Sistem Saat Cuaca Hujan Menggunakan Algoritma**

Waktu	I <sub>charge</sub> (A)	I <sub>discharge</sub> (A)	I <sub>pv</sub> (A)	SOC	Vbat (V)
00.00 - 01.00	0	-84,4132	-0,00544	0,7999	47,674
01.00 - 02.00	0	-82,8703	-0,00544	0,7997	47,740
02.00 - 03.00	0	-81,6590	-0,00543	0,7995	47,753
03.00 - 04.00	0	-83,9037	-0,00543	0,7993	47,729
04.00 - 05.00	0	-84,3473	-0,00543	0,7991	47,723
05.00 - 06.00	0	-87,2059	1,3499	0,7988	45,955
06.00 - 07.00	0	-85,7927	7,9919	0,7981	44,787
07.00 - 08.00	0	-77,2392	21,2352	0,7973	44,930
08.00 - 09.00	0	-71,5368	34,2023	0,7965	45,045
09.00 - 10.00	0	-71,4832	51,1683	0,7957	45,124
10.00 - 11.00	0	-91,1532	34,8953	0,7949	44,856
11.00 - 12.00	0	-114,9359	4,1992	0,7941	44,464
12.00 - 13.00	0	-99,9993	26,1494	0,7932	44,706
13.00 - 14.00	0	-81,0121	46,2253	0,7924	44,991
14.00 - 15.00	0	-90,1836	28,4473	0,7917	44,813
15.00 - 16.00	0	-98,2036	10,0648	0,7908	44,638
16.00 - 17.00	0	-92,8424	12,1771	0,7899	44,695
17.00 - 18.00	0	-91,4330	13,1229	0,7892	44,712
18.00 - 19.00	0	-95,2350	3,9280	0,7883	44,921
19.00 - 20.00	0	-92,9600	-0,00545	0,7879	47,593
20.00 - 21.00	0	-97,6758	-0,00546	0,7876	47,543
21.00 - 22.00	0	-99,8660	-0,00546	0,7874	47,518
22.00 - 23.00	0	-96,7668	-0,00545	0,7872	47,549
23.00 - 24.00	0	-90,3492	-0,00545	0,7869	47,616

Lampiran 7. Hasil Simulasi Saat Cuaca 71  
Cerah Pada Kondisi Awal

**Hasil Simulasi Sistem Saat Cuaca Cerah Pada Kondisi Awal**

Waktu	I_charge (A)	I_discharge (A)	I <sub>PV</sub> (A)	SOC	Vbat (V)
00.00 - 01.00	0	-85,282	-0,00544	0,7999	47,725
01.00 - 02.00	0	-82,870	-0,00543	0,7997	47,740
02.00 - 03.00	0	-81,659	-0,00543	0,7995	47,753
03.00 - 04.00	0	-83,904	-0,00543	0,7993	47,729
04.00 - 05.00	0	-84,347	-0,00543	0,7992	47,723
05.00 - 06.00	0	-84,309	-0,7903	0,7989	47,723
06.00 - 07.00	0	-66,902	28,3953	0,7988	47,900
07.00 - 08.00	4,636	-14,465	118,3176	0,7987	49,460
08.00 - 09.00	41,188	0	215,8611	0,7987	52,381
09.00 - 10.00	66,697	0	284,2649	0,7989	53,349
10.00 - 11.00	116,884	0	401,0143	0,7991	55,226
11.00 - 12.00	170,605	0	524,7583	0,7994	57,279
12.00 - 13.00	188,389	0	572,4529	0,7998	57,966
13.00 - 14.00	185,024	0	559,5103	0,8	57,848
14.00 - 15.00	159,989	0	491,4989	0,8	56,910
15.00 - 16.00	109,599	0	367,1639	0,8	55,013
16.00 - 17.00	46,306	0	232,0163	0,8	52,618
17.00 - 18.00	1,5904	-20,385	114,0620	0,7999	49,023
18.00 - 19.00	0	-73,705	27,608	0,7999	47,840
19.00 - 20.00	0	-92,874	-0,00545	0,7997	47,637
20.00 - 21.00	0	-97,584	-0,00545	0,7995	47,587
21.00 - 22.00	0	-99,772	-0,00546	0,7993	47,563
22.00 - 23.00	0	-96,676	-0,00545	0,7990	47,594
23.00 - 24.00	0	-90,266	-0,00544	0,7988	47,659

Lampiran 8. Hasil Simulasi Saat Cuaca 72  
Hujan Pada Kondisi Awal

**Hasil Simulasi Sistem Saat Cuaca Hujan Pada Kondisi Awal**

Waktu	I <sub>charge</sub> (A)	I <sub>discharge</sub> (A)	I <sub>PV</sub> (A)	SOC	V <sub>bat</sub> (V)
00.00 - 01.00	0	-85,282	-0,00544	0,7999	47,725
01.00 - 02.00	0	-82,870	-0,00544	0,7997	47,740
02.00 - 03.00	0	-81,659	-0,00543	0,7995	47,753
03.00 - 04.00	0	-83,904	-0,00543	0,7993	47,729
04.00 - 05.00	0	-84,347	-0,00543	0,7992	47,723
05.00 - 06.00	0	-83,934	1,3499	0,7989	47,727
06.00 - 07.00	0	-80,809	7,9919	0,7988	47,758
07.00 - 08.00	0	-73,466	21,2352	0,7986	47,834
08.00 - 09.00	0	-68,739	34,2023	0,7984	47,883
09.00 - 10.00	0	-69,466	51,1683	0,7983	47,876
10.00 - 11.00	0	-87,165	34,8953	0,7981	47,694
11.00 - 12.00	0	-107,838	4,1992	0,7979	47,475
12.00 - 13.00	0	-95,017	26,1494	0,7977	47,603
13.00 - 14.00	0	-78,207	46,2253	0,7975	47,781
14.00 - 15.00	0	-85,943	28,4473	0,7973	47,702
15.00 - 16.00	0	-92,486	10,0648	0,7971	47,631
16.00 - 17.00	0	-87,572	12,1771	0,7969	47,681
17.00 - 18.00	0	-86,299	13,1229	0,7967	47,695
18.00 - 19.00	0	-89,919	3,9280	0,7965	47,656
19.00 - 20.00	0	-92,899	-0,00545	0,7963	47,624
20.00 - 21.00	0	-97,610	-0,00546	0,7961	47,574
21.00 - 22.00	0	-99,799	-0,00546	0,7958	47,550
22.00 - 23.00	0	-96,702	-0,00545	0,7956	47,581
23.00 - 24.00	0	-90,289	-0,00545	0,7954	47,647