



**TUGAS AKHIR - TE141599**

**MANAJEMEN OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING  
TERHUBUNG PV (*PHOTO VOLTAIC*) DILENGKAPI BATERAI  
MENGUNAKAN BELLMAN ALGORITHM**

Rizky Ramadyan Widiarto  
NRP 2212100012

Dosen Pembimbing  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., M.T  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT - TE141599**

***OPTIMAL POWER FLOW MANAGEMENT ON GRID  
CONNECTED PV (PHOTO VOLTAIC) WITH BATTERIES  
USING BELLMAN ALGORITHM***

Rizky Ramadyan Widiarto  
NRP 2212100012

Supervisor  
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**MANAJEMEN OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING  
TERHUBUNG PV (PHOTO VOLTAIC) DILENGKAPI BATERAI  
MENGUNAKAN BELLMAN ALGORITHM**

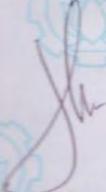
**TUGAS AKHIR**

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I,**



**Dr. Rizky Seto Wibowo, S.T., M.T.**  
NIP. 19741129 200012 1 001

**Dosen Pembimbing II,**



30  
06 16

**Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 19731119 200003 1 001



# MANAJEMEN OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING TERHUBUNG PV (PHOTO VOLTAIC) DILENGKAPI BATERAI MENGGUNAKAN BELLMAN ALGORITHM

## ABSTRAK

*Optimal Power Flow* (OPF) atau aliran daya optimal merupakan kombinasi antara metode *Economic Dispatch* dan *Power Flow* dengan menjaga batasan-batasan tertentu. Metode ini merupakan suatu metode yang digunakan untuk mendapatkan aliran daya optimal dari suatu sistem kelistrikan agar didapatkan biaya operasi sistem seminimal mungkin. Dewasa ini penggunaan sumber energi listrik terbarukan seperti PV dan Baterai dalam membantu kebutuhan energi listrik semakin marak digunakan. Hal ini terjadi karena diprediksikan energi fosil dalam waktu dekat akan habis.

Tugas Akhir ini berusaha melakukan proses optimalisasi aliran daya pada sistem dengan memasukan pemodelan PV dan Baterai pada sistem. Pemodelan tersebut digunakan untuk mempertimbangkan biaya pergantian baterai karena harga baterai yang terbilang mahal dan usia pemakaian baterai yang relatif singkat. Untuk meyelesaikan masalah ini digunakanlah metode *Bellman Algorithm*. Dengan memberikan batasan tertentu pada baterai, metode ini mampu mengatur energi baterai dari waktu ke waktu dengan menghitung setiap kemungkinan yang ada yang pada akhirnya akan dipilih jalur termurah dari semua perhitungannya.

Simulasi dibuat pada software MATLAB, dengan memasukkan data profil beban, PV (*Data Sheet*, Radiasi, Suhu) dan baterai untuk selanjutnya dihitung biayanya. Dari hasil simulasi didapatkan metode ini mampu memberikan aliran daya optimal dari sistem sehingga akhirnya didapatkan biaya pengeluaran yang minimal. Penggunaan baterai mampu memenuhi kebutuhan beban puncak yang pada titik tersebut tidak mampu dipenuhi oleh grid karena terbatas. Hasil simulasi menunjukkan baterai mampu melalui proses *charge* dan *discharge* dengan baik. Semakin kecil nilai  $\delta$ SOC maka usia baterai semakin lama.

**Kata Kunci :** *Optimal Power Flow, Battery Lifetime, Bellman Algorithm, Photo Voltaic*

# OPTIMAL POWER FLOW MANAGEMENT ON GRID CONNECTED PV (PHOTO VOLTAIC) WITH BATTERIES USING BELLMAN ALGORITHM

## ABSTRACT

Optimal Power Flow (OPF) is a combination method of Economic Dispatch and Power Flow with maintaining certain restrictions. This method used to obtain optimal power flow of an electrical system in order to get the system operating costs to a minimum. Today, the use of renewable energy sources such as PV and assisted by battery increasingly use to help supplying electric energy needed. This event happens because people has predicted that fossil fuels will be exhausted in the near future time.

This final project tried to do an optimization flow power process on the system by involving the model of the PV and battery to the system. The Model is used to consider the replacement cost of the batteries because of the battery prices is so expensive also short use of battery life. To solve the equation then Bellman Algorithm is used. Within some certain restrictions on the battery, this method is able to manage the energy of battery by counting each of the possibilities exist for the selected track that has the lowest cost of all the calculations.

Simulations created in MATLAB software, by entering the data load, PV (Data sheet, radiation, temperature) and the use the battery then calculated the cost of operations. The simulation result show us that this metode can perform optimal power flow of the sistem, so we get the lowest cost needed. The use of batteries can supply peak load system even at that time the peak load greater than the max grid. Simulation also show us that the batteies can do good charge and discharge process. The lower value of  $\delta$ SOC make the battery life more longer.

**Key-word :** Optimal Power Flow, Battery Lifetime, Bellman Algorithm, Photo Voltaic

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABLE</b> .....	xi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Permasalahan .....	2
1.3. Tujuan .....	2
1.4. Batasan Masalah .....	2
1.5. Metodologi .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING TERHUBUNG PV DILENGKAPI BATERAI</b> .....	5
2.1. Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.2. Aliran Daya Optimal Pada Sistem Tenaga .....	6
2.3. Sel Surya / PV Generator .....	7
2.4. Baterai .....	9
2.5. Grid (PLN) .....	12
2.6. Bellman Algorithm .....	13
<b>BAB 3 PENGGUNAAN BELLMAN ALGORITHM UNTUK OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING TERHUBUNG PV DILENGKAPI BATERAI</b> .....	17
3.1. Konfigurasi Sistem .....	17
3.2. Profil Beban Jamali PLN 500kV .....	19
3.3. Penentuan Kapasitas Baterai dan PV .....	20
3.4. Lintasan <i>Shortest Path</i> .....	22
3.5. Tarif Grid dan <i>Feed in Tariff</i> .....	24
3.6. Biaya Pergantian Baterai .....	24
<b>BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS</b> .....	27
4.1. Simulasi Optimasi Power Flow Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm Dengan Nilai $\delta SOC=0.001$ . .....	27

4.2. Simulasi Optimasi Power Flow Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm Dengan Nilai $\delta\text{SOC}=0.002$ . .....	31
4.3. Simulasi Optimasi Power Flow Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm Dengan Nilai $\delta\text{SOC}=0.003$ . .....	34
4.4. Perbandingan hasil simulasi pada 4.1, 4.2 dan 4.3 .....	37
4.5. Penjualan Energi Listrik ke Grid.....	39
4.6. Waktu Pergantian Baterai .....	40
4.7 Hasil Simulasi Menggunakan Ruled-Based.....	40
<b>BAB 5 PENUTUP</b> .....	43
5.1. Kesimpulan .....	43
5.2. Saran .....	43
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	45
<b>LAMPIRAN</b> .....	47
<b>RIWAYAT PENULIS</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Kelistrikan Grid-Connected[10] .....	5
Gambar 2. 2 Sistem Kelistrikan Non Grid-Connected[10] .....	6
Gambar 2. 3 Kurva Karakteristik PV sesuai data Radiasi.....	8
Gambar 2. 4 Data Radiasi dari AWS BMKG Tj. Perak.....	8
Gambar 2. 5 Data Suhu dari AWS BMKG Tj. Perak.....	8
Gambar 2. 6 Grafik tegangan baterai berdasarkan percobaan oleh INES.[1]. .....	12
Gambar 2. 7 Jalur dan biaya dari suatu sistem. ....	14
Gambar 2. 8 State baterai saat kondisi charge, discharge dan idle.....	14
Gambar 2. 9 Pemodelan SOC sistem berdasarkan nilai $\delta$ SOC .....	15
Gambar 3. 1 Arsitekur sistem dan aliran daya.[1].....	17
Gambar 3. 2 Lokasi pemasangan alat ukur energi C1, C2, C3.....	19
Gambar 3. 3 Profil beban Jamali (Real).....	19
Gambar 3. 4 Profil beban Jamali (Modifikasi).....	20
Gambar 3. 5 Alur kerja baterai.....	22
Gambar 3. 6 Diagram alir perhitungan pada sistem .....	23
Gambar 4. 1 Power flow hasil optimai untuk $\delta$ SOC=0.001 .....	28
Gambar 4. 2 Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam dengan $\delta$ SOC=0.001 .....	29
Gambar 4. 3 Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam $\delta$ SOC=0.001 .....	30
Gambar 4. 4 Biaya penggunaan baterai selama 24 Jam $\delta$ SOC=0.001 .....	30
Gambar 4. 5 Power flow hasil optimai untuk $\delta$ SOC=0.002.....	31
Gambar 4. 6 Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam dengan $\delta$ SOC=0.002 .....	32
Gambar 4. 7 Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam $\delta$ SOC=0.002 .....	33
Gambar 4. 8 Nilai SOC dari baterai selama 24 Jam $\delta$ SOC=0.002.....	33
Gambar 4. 9 Power flow hasil optimasi untuk $\delta$ SOC=0.003 .....	34
Gambar 4. 10 Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam dengan $\delta$ SOC=0.003 .....	35
Gambar 4. 11 Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam $\delta$ SOC=0.003 .....	36
Gambar 4. 12 Nilai SOC dari baterai selama 24 Jam $\delta$ SOC=0.002 .....	37
Gambar 4. 13 Flow daya pada baterai dengan $\delta$ SOC berbeda .....	38

Gambar 4.14 Power Flow sesuai *ruled-based*..... 41  
Gambar 4.15 SOC baterai sesuai *ruled-based*..... 41

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data Karakteristik PV yang digunakan[6] .....	7
Tabel 3. 1 Hasil Perhitungan Kapasitas Baterai dan PV .....	21
Tabel 3. 2 Batasan simulasi.....	21
Tabel 4. 1 Perbandingan Biaya dan energi tiap percobaan .....	37
Tabel 4. 2 Perbandingan biaya <i>Ruled-Based</i> dan Bellman <i>Algorithm</i> .....	42
Tabel 5. 1 Hasil simulasi 4.1 .....	47
Tabel 5. 1 Hasil simulasi 4.1 (lanjutan) .....	48
Tabel 5. 1 Hasil simulasi 4.1 (lanjutan) .....	49
Tabel 5. 2 Hasil simulasi 4.2 .....	50
Tabel 5. 2 Hasil simulasi 4.2 (lanjutan) .....	51
Tabel 5. 2 Hasil simulasi 4.2 (lanjutan) .....	52
Tabel 5. 3 Hasil simulasi 4.3 .....	53
Tabel 5. 3 Hasil simulasi 4.3 (lanjutan) .....	54
Tabel 5. 3 Hasil simulasi 4.3 (lanjutan) .....	55
Tabel 5. 4 Hasil <i>Ruled-Based</i> 4.7.....	56
Tabel 5. 4 Hasil <i>Ruled-Based</i> 4.7 (Lanjutan) .....	57
Tabel 5. 4 Hasil <i>Ruled-Based</i> 4.7 (Lanjutan) .....	58
Tabel 5. 5 Data Radiasi dan Suhu AWS BMKG Maritim Tj. Perak .....	59

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Hasil Simulasi Bellman Algorithm dan Ruled-Based .....	47
Lampiran 2 : Listing Perhitungan Kapasitas PV & Battery .....	60
Lampiran 3 : Listing Program utama .....	62
Lampiran 4 : Riwayat Penulis	

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Energi merupakan satu hal yang sangat diperlukan dalam kehidupan manusia. Setiap peralatan yang digunakan dalam kehidupan hampir semua membutuhkan energi untuk bekerja. Energi listrik merupakan salah satunya. Meningkatnya jumlah penduduk dan menipisnya energi fosil serta perlunya peningkatan penggunaan energi yang ramah lingkungan merupakan beberapa masalah yang perlu kita pecahkan saat ini. Disamping itu, ada beberapa hal yang perlu diketahui bersama yakni hingga kini sumber energi utama kita masih menggunakan energi fosil yang diprediksikan kedepan tidak akan mampu mensuply kebutuhan lagi karena jumlahnya yang semakin hari semakin menipis dan suatu saat akan habis. Sebagai tambahan, isu mengenai gas emisi juga menjadi salah satu topik yang cukup gencar dibahas dan bisa menjadi perhatian untuk mulai menyediakan energi yang ramah lingkungan melalui energi terbarukan[1].

Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan energi terbarukan seperti sel surya untuk penyediaan energi listrik. sumber energi ini disamping emisinya tidak ada atau nol emisi, murah biaya operasi juga membuat pembangkitan jenis ini dapat menjadi pertimbangan untuk energi masa depan. Saat ini, penggunaan PV ini sangat cocok digunakan bersama dengan elemen penyimpanan guna menyimpan energi saat tidak ada sinar matahari di malam hari. Dengan adanya PV ini, tidak serta merta kita dapat langsung menghilangkan energi konvensional seperti PLTU, PLTG ataupun pembangkit konvensional lainnya, sehingga yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan hybrid energi antara energi PV ini dan pembangkit konvensional untuk memenuhi beban kebutuhan listrik.

Akibat penggunaan PV dan baterai tersebut maka akan muncul beberapa parameter baru dalam proses perhitungan optimalisasi, terutama dalam hal pergantian baterai akibat usia baterai yang terbatas dan harganya yang terbilang sangat mahal. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan suatu manajemen optimal power flow dengan memasukkan parameter PV dan Baterai pada proses perhitungan pembangkitan listrik menggunakan *Dynamic Programming : Bellman*

*Algorithm*, guna mendapatkan aliran daya optimum dan mendapatkan biaya operasi yang minimum.

## **1.2. Permasalahan**

Adapun fokus permasalahan yang terdapat pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu terhadap besarnya parameter seperti besar baterai dan sel surya yang disesuaikan dengan profil beban dan grid.
2. Terdapat parameter  $N$  yang dimasukkan dalam sistem dimana nilai  $N$  tersebut merupakan  $\Delta SOC$  terkecil dari sistem sehingga akan menimbulkan sedikit eror dalam perhitungan.
3. Semakin banyak waktu sampling akan memakan waktu running program lebih lama.
4. Dibutuhkan data hasil forecast, yaitu forecast beban sistem dan forecast radiasi cahaya matahari, sehingga penulis cukup mengalami kesulitan untuk mencarinya dan pada akhirnya menggunakan asumsi.

## **1.3. Tujuan**

Sesuai dengan masalah diatas, tujuan yang ingin dicapai pada penelitian untuk tugas akhir ini ialah mendapatkan suatu manajemen aliran daya optimal pada sistem kelistrikan agar didapatkan suatu biaya pembangkitan atau penggunaan energi listrik minimum akibat adanya penambahan unit PV dan baterai pada sistem jaring yang disesuaikan dengan kebutuhan beban listrik. Setelah dilakukan manajemen ini, diharapkan biaya operasi sistem menjadi minimal sehingga total biaya grid dan biaya pergantian baterai akibat usia baterai yang terbatas dan harganya yang mahal dapat diminimalkan.

## **1.4. Batasan Masalah**

Batasan Masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Diasumsikan bahwa besar biaya / harga pembelian listrik dari grid (PLN) adalah tetap per kWhnya.
2. Sistem ini mengabaikan rugi rugi atau losses pada sistem seperti rugi-rugi saluran, rugi rugi pada konverter inverter.
3. Running simulasi dilakukan hanya dalam waktu 24 jam dikarenakan diasumsikan besaran profil beban dan data data

lain yang terkait memiliki nilai dan besar yang sama setiap hariya.

4. Simulasi dilakukan pada profil beban Jawa Bali yang dimodifikasi besar skalanya.

## **1.5. Metodologi**

Metode yang digunakan pada penelitian ini terbagi atas 6 tahap yang secara detail dijelaskan sebagai berikut:

### **1.5.1. Studi Literatur**

Literatur diperoleh dari buku-buku, jurnal-jurnal, tugas akhir para senior ataupun literatur lainnya yang berkaitan dengan penelitian dalam tugas akhir ini. Beberapa hal yang perlu dipelajari dan dicari adalah mengenai Dynamic Programming, Economic Dispatch, karakteristik dari PV, Baterai, dan Inverter yang akan digunakan dalam tugas akhir ini serta materi pendukung lainnya seperti materi analisa sistem tenaga listrik dan lain lain. Sebagai tambahan digunakan juga buku penunjang yakni buku pembelajaran MATLAB, Hadi Saadat dan yang lainnya.

### **1.5.2. Pengumpulan Data**

Pengumpulan data awal dapat diperoleh dari data-data yang ada di jurnal, paper, dari penelitian-penelitian sebelumnya serta data pendukung lain yang dibutuhkan seperti data profil beban listrik, data pemodelan PV, data pemodelan Baterai, data suhu, radiasi ataupun data data lain yang dibutuhkan.

### **1.5.3. Pemodelan Sistem dan Program**

Pada tahap ini dilakukan proses pemodelan sistem keseluruhan sesuai dengan data yang telah didapat untuk selanjutnya dapat dilakukan proses perencanaan terhadap program yang akan dibuat.

### **1.5.4. Pembuatan Program**

Pembuatan program dilakukan dengan menggunakan software matlab sesuai dengan rancangan desain program yang telah dirancang sebelumnya.

### **1.5.5. Simulasi Program dan Analisis**

Program yang telah dibuat diatas kemudian dilakukan proses uji coba kemudian setelah dirasa sesuai dengan target maka dilakukan simulasi program menggunakan profil beban Jawa Bali dengan beberapa perubahan Hasil running program tersebut dilakukan analisa bagaiman aliran daya pada sistem tersebut, kondisi baterai ataupun data lainnya.

### **1.5.6. Menarik Kesimpulan dan Menulis Laporan**

Proses analisis yang cukup panjang nantinya akan menghasilkan beberapa kesimpulan. Kesimpulan tersebut kemudian kita tulis dan laporkan dalam sebuah laporan berupa Buku Tugas Akhir.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Laporan penelitian ini terbagi atas lima bab. Adapun susunan laporan ini adalah sebagai berikut:

### **BAB 1. Pendahuluan**

Bab ini berisi tentang latar belakang, masalah dan tujuan, metodologi penelitian, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir

### **BAB 2. Dasar Teori**

Bab ini berisi teori-teori yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini. Teori ini digunakan sebagai dasar acuan dasar dalam penulisan tugas akhir ini.

### **BAB 3. Perencanaan Sistem *Optimal Power Flow* Pada Jaringan Terhubung PV dilengkapi Baterai Menggunakan *Bellman Algorithm*.**

Bab ini berisi tentang rancangan bagaimana sistem dibuat, metode yang digunakan beserta implementasinya.

### **BAB 4. Simulasi Program dan Analisis**

Bab ini berisi tentang proses pengujian program dan simulasi sesuai dengan data-data yang didapat kemudian dilakukan proses analisis dari hasil simulasi tersebut.

### **BAB 5. Penutup**

Bab ini berisi tentang penutup yang memuat tentang kesimpulan yang dapat diambil selama proses dan hasil eksperimen/pengujian yang telah dilakukan.

## BAB 2

# OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING TERHUBUNG PV DILENGKAPI BATERAI

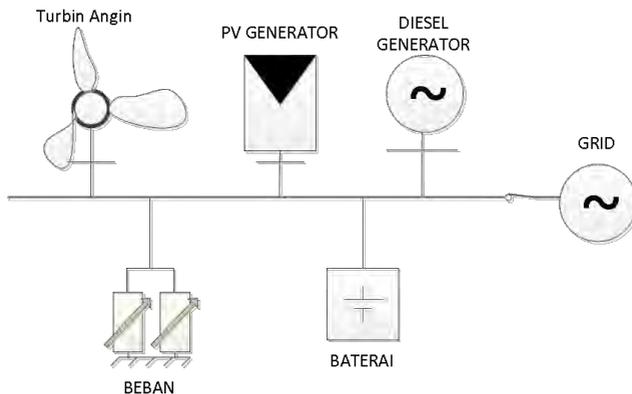
### 2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kumpulan komponen listrik yang saling terhubung satu sama lain untuk menyalurkan energi listrik. Sistem Tenaga Listrik terbagi atas 4 bagian yakni dimulai dari proses pembangkitan oleh generator kemudian listrik dialirkan melalui saluran transmisi, saluran distribusi dan selanjutnya berakhir pada beban[9].

Berdasarkan mode operasi yang ada pada sistem kelistrikan, sistem tenaga listrik terbagi menjadi dua jenis yaitu:

#### 1. *Grid-connected*

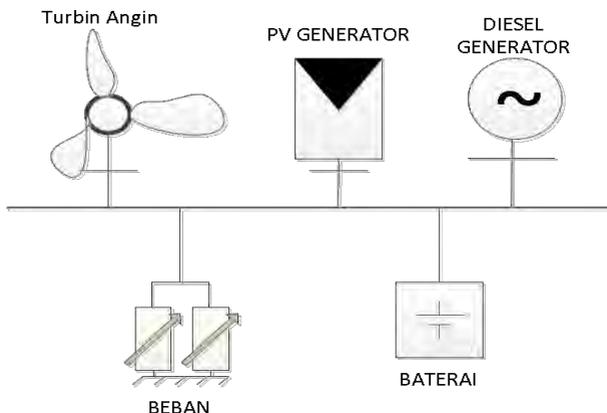
Mode operasi Grid-connected merupakan mode operasi dimana sistem yang lebih kecil terhubung dengan jaring utama (di Indonesia PLN). Pembangkit yang terpasang pada sistem kecil bekerja sama dengan pembangkit pada sistem PLN dalam pemenuhan kebutuhan energi listrik bersama. Sesuai dengan mode operasi tersebut, sistem pada Tugas Akhir ini akan mampu mendapatkan suply energi listrik dari PLN maupun mampu menjual kelebihan energi yang dibangkitkan kepada PLN.



**Gambar 2. 1** Sistem Kelistrikan Grid-Connected[10]

## 2. *Non Grid-connected*

Mode Operasi ini merupakan mode operasi dimana sistem tidak terhubung pada jaring utama (PLN) sehingga harus mampu beroperasi mandiri dalam memenuhi kebutuhannya. Mode ini bisa terdiri atas satu pembangkit saja yang kita sebut stan-alone ataupun lebih dari satu pembangkit yang bisa disebut mikrogrid ataupun minigrid.



**Gambar 2. 2** Sistem Kelistrikan Non Grid-Connected[10]

### 2.2. Aliran Daya Optimal Pada Sistem Tenaga

*Load Flow Analysis (Power Flow)* atau Studi Aliran daya merupakan suatu bagian dari proses perencanaan pada sistem tenaga listrik untuk melakukan proses optimasi dengan memperhitungkan magnitudo tegangan, sudut fasa dan magnitudo daya listrik. Pada perhitungan ini didapat besar rugi-rugi pada saluran sehingga besar nilai pembangkitan generator akan selalu lebih besar dari pada besar beban yang dibutuhkan.[8]

Optimal Power Flow (OPF) merupakan perhitungan aliran daya dengan menghitung besaran biaya pembangkitan untuk selanjutnya mencari besaran biaya pembangkitan yang murah dan efisien. OPF dibedakan menjadi dua yakni DOPF dan OPF. Pada OPF, sistem memperhitungkan besaran daya aktif dan reaktif namun berbeda pada DOPF yang hanya memperhitungkan daya aktif saja.

### 2.3. Sel Surya / PV Generator

Pembangkit sel surya atau biasa disebut PV merupakan suatu sistem yang dapat mengubah energi yang terkandung dalam cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik. Besaran daya yang diubah oleh sel surya sangat bergantung pada intensitas radiasi yang ada dan suhu sekitar yang mempengaruhi kerja sel surya itu sendiri. Berdasar kondisi standar, energi yang terkandung dalam cahaya matahari adalah sebesar  $1000\text{W/m}^2$  pada suhu  $25^\circ\text{C}$ . Oleh karena itu, besar radiasi yang ada serta suhu sekitar menjadi faktor penentu besar kecilnya daya yang dihasilkan oleh sel surya. Berikut merupakan daya keluaran yang dihasilkan oleh sel surya sesuai persamaan berikut[7] :

$$P_{PV} = \left[ P_{PV,STC} \times \frac{G_T}{G_{T,STC}} [1 - \gamma \times (T_j - T_r)] \right] \times N_{PVs} \times N_{PVp} \quad (2.1)$$

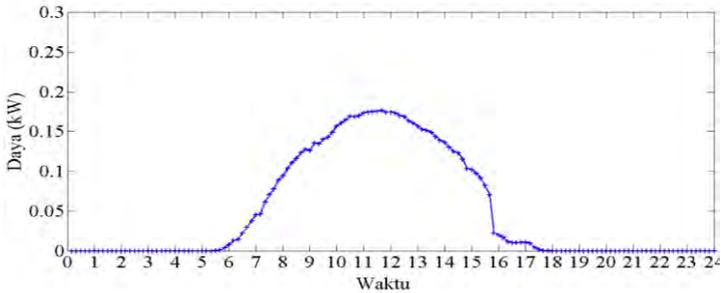
Keterangan :

- $P_{PV}$  : Daya keluaran dari modul saat radiasi  $G_T$  (Watt)
- $P_{PV,STC}$  : Daya modul maksimum pada kondisi standar/STC (Watt)
- $G_T$  : Radiasi aktual ( $\text{W/m}^2$ )
- $G_{T,STC}$  : Radiasi saat kondisi standar STC ( $1000\text{ W/m}^2$ )
- $\gamma$  : Koefisien suhu modul sel surya ( $\%/^\circ\text{C}$ )
- $T_j$  : Suhu sel ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_r$  : Suhu referensi ( $^\circ\text{C}$ )
- $N_{PVs}$  : Jumlah sel surya dipasang seri
- $N_{PVp}$  : Jumlah sel surya dipasang paralel

Dalam tugas akhir ini digunakan modul sel surya model Sun Module SW-245 Poly Vers 2.0 dan 2.5 Frame dengan data sheet sesuai Tabel 2.1 berikut :

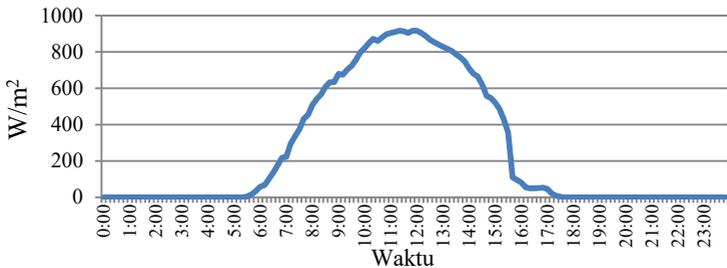
**Tabel 2. 1** Data Karakteristik PV yang digunakan[6]

$P_{\max}$	$V_{oc}$	$V_{mpp}$	$I_{sc}$	$I_{mpp}$	$\gamma$
245 Wp	37.5 V	30.8 V	8.49 A	7.96 A	0.034%/K

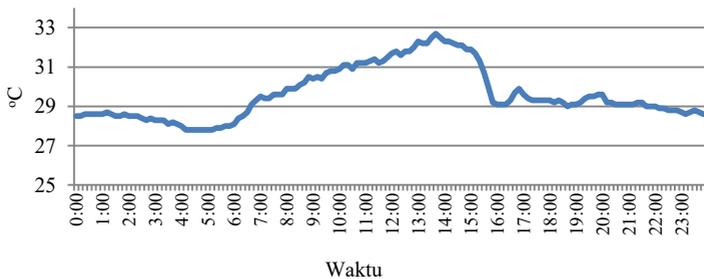


**Gambar 2.3** Kurva Karakteristik PV sesuai data Radiasi

Gambar 2.3 diatas merupakan karakteristik PV yang digunakan berdasarkan data radiasi dan data suhu yang telah didapatkan yang dicantumkan pada gambar 2.4 dan 2.5 sesuai data pada lampiran. Data suhu dan Radiasi didapatkan dari AWS BMKG Maritim Tanjung Perak .



**Gambar 2.4** Data Radiasi dari AWS BMKG Tj. Perak



**Gambar 2.5** Data Suhu dari AWS BMKG Tj. Perak

## 2.4. Baterai

Baterai merupakan benda dengan suatu sistem yang dapat mengubah suatu energi listrik menjadi energi kimia. Energi kimia ini kemudian disimpan dalam larutan yang terdapat pada baterai untuk jangka waktu yang relatif lama. Suatu saat ketikan dibutuhkan energi tersebut mampu kembali diubah menjadi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan listrik peralatan tertentu.

Kapasitas baterai bergantung pada banyak sel yang terpasang dan ukurannya, semakin besar ukurannya maka semakin besar kapasitasnya. Jumlah kapasitas energi yang mampu disimpan oleh sebuah baterai diitung dengan satuan Ampere-Jam (Ah). Satuan ini menjelaskan berapa besar arus listrik yang mampu dialirkan oleh baterai selama 1 jam dalam kondisi penuh dan besar jumlah arus yang diperlukan untuk mengisi penuh baterai dari keadaan kosong hingga penuh.

### 2.4.1. State of Charge

*State of Charge* (SOC) merupakan kondisi kapasitas baterai yang secara sederhana dijelaskan sebagai suatu metode perhitungan mengetahui seberapa besar kapasitas pengisian baterai pada waktu tertentu. Kapasitas baterai disimbolkan dengan simbol *Ampere-hour* (Ah) dimana kapasitas baterai akan penuh atau habis dalam satu jam jika digunakan atau *discharge* selama 1 jam. Sebagai contoh misal sebuah baterai dengan kapasitas 10Ah dan *discharge* sebesar 1A. Secara teori baterai tersebut akan habis dalam waktu 10 jam. Akan berbeda jika besar arus *discharge* baterai sebesar 10A maka baterai tersebut akan habis dalam 1 jam saja. Namun dalam sebenarnya sangat sulit untuk menghitung dan menentukan besarnya kapasitas baterai pada waktu tertentu yang sebenarnya karena banyaknya efek non linear yang bekerja pada baterai. Perlu diketahui bahwa besar tegangan pada baterai ternyata memiliki fungsi linear terhadap nilai SOC-nya.[5] Nilai SOC pada baterai didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut[1] :

$$SOC = \frac{C(t)}{C_{ref}(t)} \quad (2.2)$$

Keterangan :

*SOC* : *State of Charge*  
*C(t)* : Kapasitas baterai pada waktu t (Ah)  
*C<sub>reff</sub>(t)* : Kapasitas referensi baterai pada waktu(Ah)

Salah satu nilai baterai yang dapat didapatkan dan diukur adalah besarnya tegangan pada terminal baterai sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai SOC. Semakin besar nilai SOC maka tegangan pada baterai semakin besar. Sesuai persamaan (2.2) diatas, didapat bahwa besar nilai SOC ini berada diantara 0 dan 1 dimana nilai 0 menandakan bahwa baterai dalam kondisi kosong dan nilai 1 menandakan bahwa baterai dalam kondisi terisi penuh.

#### 2.4.2. State of Health

*State of Health* (SOH) dari baterai dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara kapasitas refensi baterai pada waktu tertentu dengan besar kapasitas rating baterai sesuai persamaan (2.3). Pada setiap baterai, penggunaan yang dilakukan akan membuat baterai mengalami proses penuaan yang tentunya akan mengurangi usia pakai baterai itu sendiri. Degradasi atau penurunan dari performa baterai selama masa penuaan telah dimodelkan dalam paper [4]. Berdasarkan paper tersebut INES Institut melakukan percobaan pada proses penuaan baterai. Sehingga didapatkan suatu koefisien penuaan baterai yang bersifat linear dinamakan koefisien Z dengan nilai  $3.10^{-4}$  untuk baterai teknologi lead acid. Dari setiap step perubahan waktu, jika baterai mengalami proses *discharge* maka kapasitas referensi baterai yang baru (2.6) dihitung dengan menyederhanakan persamaan (2.3), (2.4) dan (2.5)[1].

$$SOH(t) = \frac{C_{ref}(t)}{C_{ref,nom}} \quad (2.3)$$

$$C_{ref}(t) = C_{ref}(t-\Delta t) - \Delta C_{ref}(t) \quad (2.4)$$

$$\Delta C_{ref}(t) = C_{ref,nom}(t) - Zx [SOC(t-\Delta t) - SOC(t)] \quad (2.5)$$

$$SOH(t) = \frac{C_{ref}(t-\Delta t)}{C_{ref,nom}} - Zx [SOC(t-\Delta t) - SOC(t)] \quad (2.6)$$

Keterangan :

$SOH(t)$  : State of Healt baterai (0-1)

$C_{ref,nom}$  : Kapasitas rating baterai (Ah)

$\Delta C_{ref}(t)$  : Perubahan kapasitas rating baterai (Ah)

$Z$  : Koefisien penuaan linear baterai  
 $SOC(t)$  : Kondisi kapasitas baterai (0-1)

Sesuai persamaan (2.3) maka besaran nilai SOH dari baterai adalah antara nilai 0 dan 1. Nilai 1 menunjukkan kapasitas baterai yang dimungkinkan untuk digunakan adalah sebesar 100% kapasitas rating. Pada nilai SOH tertentu maka penggunaan baterai pada sistem harus digantikan dengan baterai baru. Diketahui bahwa usia baterai dikatakan habis usia dan seharusnya diganti dengan baterai baru ketika kapasitas baterai menurun sebesar 20% atau turun menjadi 80% dari kapasitas nominal atau ratingnya[3][4].

### 2.4.3. Battery Voltage

Tegangan pada baterai diketahui linear terhadap nilai SOC seperti yang telah disebutkan pada subbab 2.4.1 sehingga besaran nilai tegangan dari sebuah baterai dapat dituliskan dan dimodelkan dalam sebuah fungsi persamaan dari besar kecilnya SOC. Berdasarkan percobaan interpolasi linear yang dilakukan oleh INES Institut didapatkan besar tegangan baterai berbeda saat kondisi *charge* dan *discharge*. Pada baterai dengan tegangan rating 12V maka didapatkan besar tegangan berdasarkan nilai SOC sesuai persamaan (2.7) dan (2.8) berikut :

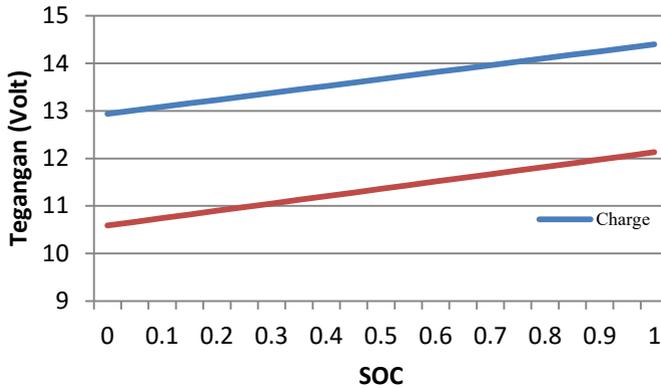
$$V_{BATT}(t)=[12.94+1.46 \times SOC(t)] \times N_{BATT\_S} \quad (2.7)$$

$$V_{BATT}(t)=\left[12.13-1.54 \times (1-SOC(t))\right] \times N_{BATT\_S} \quad (2.8)$$

Keterangan :

$V_{BATT}(t)$  : Tegangan baterai pada waktu t (Volt)  
 $N_{BATT\_S}$  : Jumlah baterai dipasang seri  
 $SOC(t)$  : *State of Charge* pada waktu t

Persamaan (2.7) merupakan persamaan untuk kondisi baterai saat *discharge* dan persamaan (2.8) untuk kondisi baterai yang sedang *discharge*.. Daya output baterai secara mudah akan didapatkan dengan mengalikan tegangan pada baterai dengan besar perubahan nilai SOC baterai. Berikut merupakan grafik tegangan baterai vs SOC untuk dua kondisi baterai sesuai persamaan diatas :



**Gambar 2. 6** Grafik tegangan vs SOC baterai berdasarkan percobaan oleh INES.[1]

Dari gambar diatas terlihat bahwa besar tegangan baterai bergantung pada besar kecilnya nilai SOC baterai pada waktu  $t$ . Pada Tugas Akhir ini kami memakai asumsi bahwa baterai yang digunakan hanya memiliki satu karakteristik kurva Tegangan vs SOC untuk semua level arus *charge* maupun *discharge*.

## 2.5. Grid (PLN)

Dalam tugas akhir ini digunakan sistem yang terkoneksi dengan jaring (*grid-connected*) dimana sistem terkoneksi dengan jaring PLN. Grid digunakan sebagai sumber pemenuhan kebutuhan beban dalam sistem yang paling utama. Grid atau PLN pada sistem memiliki nilai daya yang terbatas sesuai dengan total sumber pembangkit energi yang menyuplai grid. Ketika menyuplai beban, PLN atau grid ini akan menyeimbangkan antara kebutuhan beban dari sistem. Sistem akan mengambil daya dari PLN jika daya beban membutuhkan daya serta memungkinkan sistem memberi daya (menjual) kepada PLN pada saat pembangkitan daya pada sistem berlebih. Dalam hal ini akan ada mekanisme jual dan beli listrik oleh sistem ke PLN.

Dalam tugas akhir ini total biaya pembelian dan penjualan listrik dari dan ke PLN adalah sebagai berikut :

$$CP(t)=P_B(t) \times TDL \quad (2.9)$$

$$CR(t)=P_J(t) \times FiT \quad (2.10)$$

$$CF(t)=CP(t)-CR(t) \quad (2.11)$$

Keterangan :

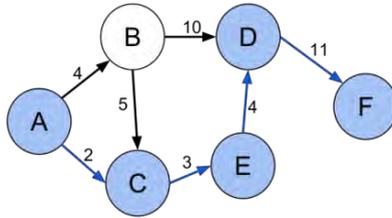
- $CP(t)$  : Total harga yang pembelian listrik ke PLN (R)
- $CR(t)$  : Total harga yang penjualan listrik ke kepada PLN (R)
- $P_B$  : Daya yang dibutuhkan sistem pada waktu t selama waktu tertentu (kW)
- $TDL$  : Harga jual listrik dari PLN (R/kWh)
- $P_J$  : Daya yang dijual kepada PLN pada waktu t selama waktu tertentu (kW)
- $FiT$  : Harga jual listrik ke PLN (R/kWh)
- $CF(t)$  : Total harga biaya (R), jika hasil (+) maka kita membayar ke PLN sebesar itu dan jika hasil (-) maka kita mendapat hasil dari PLN sebesar nilai tersebut.

## 2.6. Bellman Algorithm

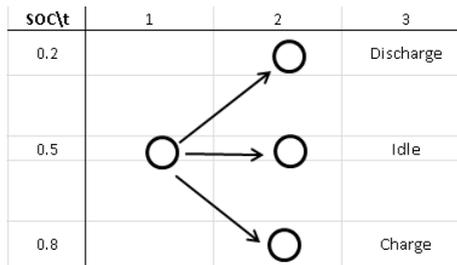
Teori *Dynaming Programming* dikenalkan pada publik pertama kali oleh Richard Bellman yang mengenalkan sebuah teori pada publikasi dengan judul “*Theori of Dynamic Programming*” pada tahun 1952. Teori ini memiliki prinsip dasar fundamental yang pada suatu saat tertentu kita akan mendapatkan situasi dimana kita mencari dan menginginkan nilai maksimum atau nilai minimum dari suatu masalah pada waktu tertentu[11].

Masalah pada Tugas Akhir ini diformulasikan sebagai sistem pengambilan keputusan yang bertingkat. Sistem bertingkat ini dibutuhkan karena adanya parameter waktu yang perlu diselesaikan pada tiap sampling waktunya. Pada dasarnya teori ini lebih mirip seperti mencari jalur terdekat (*shortest path*) untuk mencapai tujuan tertentu.

Gambar 2.7 berikut ini merupakan contoh penggambaran sistem algoritma pada tugas akhir ini, teori yang digunakan adalah menggunakan *shortest path* atau jalur terpendek yang teorinya dikemukakan oleh Bellman juga yang dikenal dengan *Bellman Algorithm*.



**Gambar 2. 7** Jalur dan biaya dari suatu sistem.



**Gambar 2. 8** State baterai saat kondisi *charge*, *discharge* dan *idle*.

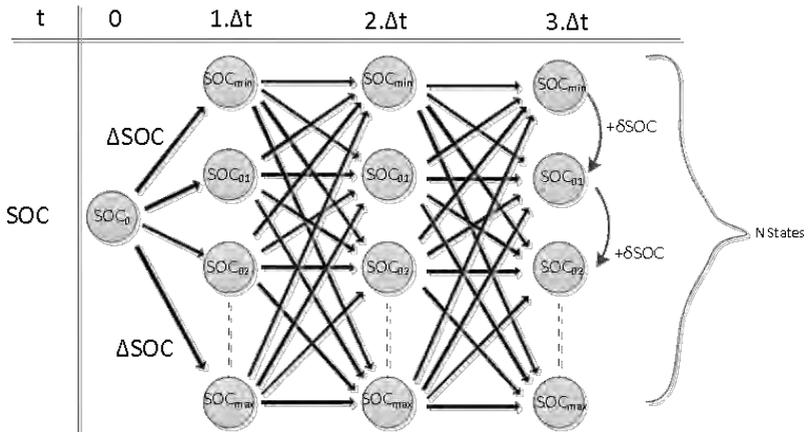
Kondisi baterai :

$$SOC(t) > SOC(t+\Delta t) \quad : \text{Discharge} \quad (2.12)$$

$$SOC(t) < SOC(t+\Delta t) \quad : \text{Charge} \quad (2.13)$$

$$SOC(t) = SOC(t+\Delta t) \quad : \text{Idle} \quad (2.14)$$

Gambar 2.8 diatas merupakan contoh gambaran kemungkinan SOC yang terjadi pada baterai. Sesuai gambar tersebut baterai memiliki tiga kemungkinan kondisi state yakni *discharge*, *charge* ataupun *idle*. *Charge* terjadi ketika  $\Delta SOC > 0$ , *discharge* terjadi ketika  $\Delta SOC < 0$  dan *idle* terjadi saat  $\Delta SOC = 0$ .



**Gambar 2. 9** Pemodelan SOC sistem berdasarkan nilai  $\delta$ SOC

Gambar 2.9 diatas menunjukkan gambaran semua kemungkinan dari semua SOC yang mungkin dituju dan dihitung. Nilai  $\delta$ SOC menunjukkan skala resolusi / ketelitian dari SOC baterai yang mungkin diperhitungkan. Semakin kecil  $\delta$ SOC maka semakin banyak kemungkinan SOC yang dapat dituju oleh sistem. Banyaknya kemungkinan tersebut pada gambar diatas adalah variabel N.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

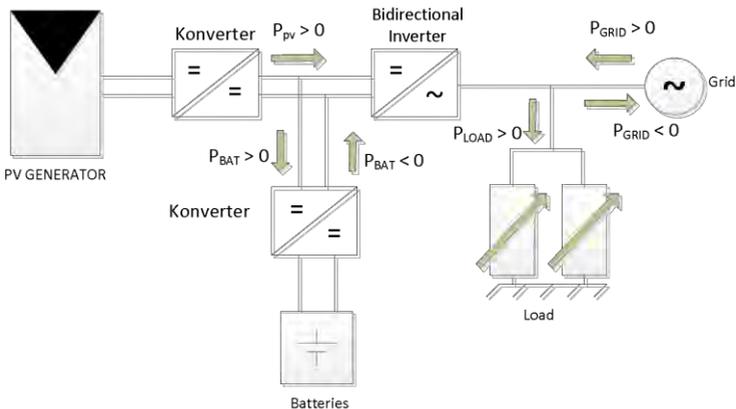
# BAB 3

## PENGGUNAAN BELLMAN ALGORITHM UNTUK OPTIMAL POWER FLOW PADA JARING TERHUBUNG PV DILENGKAPI BATERAI

Proses perancangan sistem dimulai pertama kali dengan melakukan pengumpulan data yang diperlukan. Perlu diketahui bahwa tujuan utama dari Tugas Akhir ini adalah untuk menemukan penjadwalan aliran daya optimal dari sistem untuk mengurangi pengeluaran untuk memenuhi beban sistem. Pada tugas akhir ini kita asumsikan pengaturan aliran dayanya adalah sama untuk setiap hari, sehingga profil beban dan forecast dari PV juga dianggap sama.

### 3.1. Konfigurasi Sistem

Sistem pada Tugas Akhir ini menggunakan Bellman Algorithm untuk mengatur SOC dari baterai. Baterai memiliki beberapa proses perubahan SOC selama perhitungan mulai dari *charge*, *discharge* maupun dalam kondisi idle. Agar terlihat lebih jelas, konfigurasi sistem diperlihatkan pada gambar 3.1.



**Gambar 3. 1** Arsitekur sistem dan aliran daya.[1]

*Power Balance* sesuai persamaan (3.1) pada gambar diatas diperlukan untuk menentukan besaran daya yang dibutuhkan dari grid

(PLN). Persamaan ini dibutuhkan sebagai batasan dalam sistem. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut :

$$P_{GRID}(t) = -P_{PV}(t) - P_{BAT}(t) + P_{BEBAN}(t) \quad (3.1)$$

$$SOC^{MIN} \leq SOC(t) \leq SOC^{MAX} \quad (3.2)$$

$$P_{BAT}^{MIN} \leq P_{BAT}(t) \leq P_{BAT}^{MAX} \quad (3.3)$$

$$P_{GRID}(t) \leq P_{GRID}^{MAX} \quad (3.4)$$

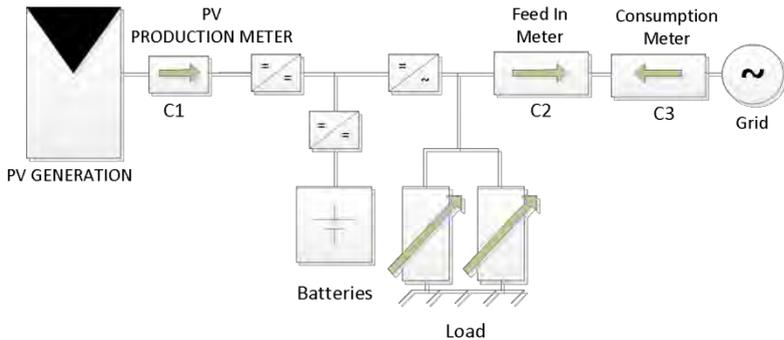
$$SOH(t) \geq SOH^{MIN} \quad (3.5)$$

Keterangan :

- $P_{GRID}(t)$  : Daya yang diambil dari grid (kW)
- $P_{PV}(t)$  : Daya output sel surya (kW)
- $P_{BAT}(t)$  : (+)Daya output baterai, (-) Daya input baterai (kW)
- $P_{BEBAN}(t)$  : Daya beban (kW)
- $SOC^{MIN}$  : Nilai SOC minimum yang diperbolehkan untuk Baterai
- $SOC(t)$  : Nilai SOC pada waktu t
- $SOC^{MAX}$  : Nilai SOC maksimum yang diperbolehkan untuk Baterai
- $P_{BAT}^{MIN}$  : Daya minimum baterai yang diperbolehkan untuk *charge* maupun *discharge* (kW)
- $P_{BAT}^{MAX}$  : Daya maksimum baterai yang diperbolehkan untuk *charge* maupun *discharge* (kW)
- $P_{GRID}^{MAX}$  : Daya maksimum yang mampu diberikan oleh grid (kW)

Pada sistem ini terdapat kemungkinan untuk menjual listrik ke PLN dan membeli listrik dari PLN maka diperlukan energi meter tiga buah, dimana satu digunakan untuk mengukur berapa energi yang dibeli dari PLN dan yang lainnya digunakan untuk mengukur berapa besar energi yang dijual ke Grid PLN dan penggunaan pribadi untuk mengukur daya yang dihasilkan oleh Sel Surya. Konverter yang digunakan dalam simulasi kali ini diasumsikan ideal dengan losses 0% dan mampu diatur pengoperasiannya. Berikut merupakan lokasi titik

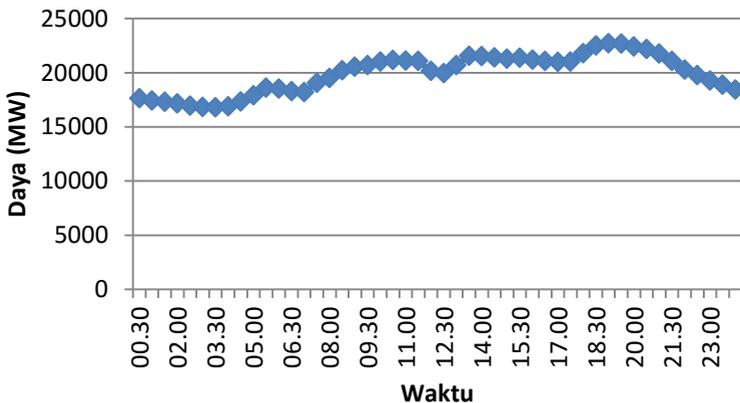
pemasangan peralatan pengukuran energi listrik sesuai gambar 3.2 jika sistem diterapkan.



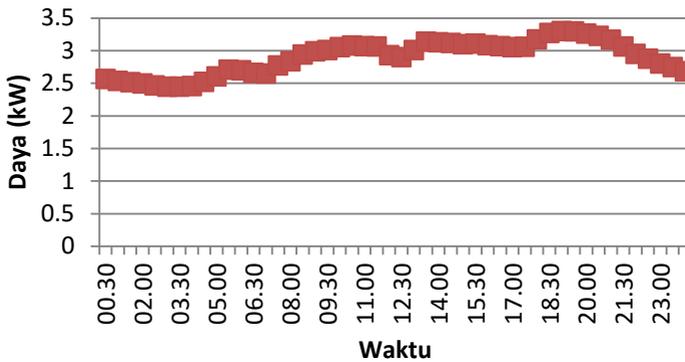
**Gambar 3. 2** Lokasi pemasangan alat ukur energi C1, C2, C3

### 3.2. Profil Beban Jamali PLN 500kV

Untuk proses simulasi sistem, sudah jelas dibutuhkan data profil beban. Pada tugas akhir ini simulasi dilakukan pada profil beban Jawa-Bali (Jamali) yang dilakukan modifikasi dengan mengubah faktor skala.



**Gambar 3. 3** Profil beban Jamali (Real)



**Gambar 3. 4** Profil beban Jamali (Modifikasi)

Pada profil beban sesuai gambar 3.3 tersebut nilai yang akan digunakan untuk simulasi menjadi cukup besar untuk simulasi sedangkan untuk parameter lain seperti baterai dan sel surya yang digunakan nilainya relatif sangat kecil. Untuk itu, data dimodifikasi dengan anggapan profil beban semirip mungkin namun dengan skala atau faktor kali yang berbeda. Gambar 3.4 adalah hasil modifikasi beban ke skala yang dimungkinkan sesuai parameter pada program simulasi.

### 3.3. Penentuan Kapasitas Baterai dan PV

Sebelum melakukan simulasi, hal yang pertama kali dilakukan adalah menentukan kapasitas baterai dan PV yang akan digunakan. Nilai baterai dan PV tersebut besarnya diatur sesuai dengan profil beban yang ada, serta grid yang tersedia. Penentuan kapasitas ini juga bertujuan agar biaya investasi dari baterai dan PV dapat diminimalkan meskipun akhirnya (pada Tugas Akhir ini) biaya investasi PV diabaikan dalam perhitungan biaya..

Untuk data beban sesuai dengan profil beban pada gambar 3.4 dan dengan besar grid maskimal yang diperbolehkan dalam grid sebesar 3kW maka dihitung besar kapasitas PV dan Baterai sesuai profil beban dan kapasitas Grid. Hasil perhitungan adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 1** Hasil Perhitungan Kapasitas Baterai dan PV

	<b>Perhitungan</b>	<b>Realisasi</b>
PV	255.3 Wp	2x245 Wp
Baterai	345.36 Ah	24x15Ah

Data inilah yang selanjutnya digunakan untuk proses simulasi. PV diatas menggunakan modul 245Wp sehingga untuk mencukupi 255.3Wp setidaknya diperlukan minimal 2 modul serta baterai yang dibutuhkan sebesar 345.36Ah dimana dengan besar Ah Baterai 15Ah maka diperlukan setidaknya minimal 24 buah baterai. Pada simulasi ini, baterai kita pasang paralel 24 buah kemudian seri 1.

Selanjutnya persamaan (3.1)-(3.5) diatas merupakan batasan operasi dari perhitungan sistem yang akan dilakukan. Persamaan (3.1) merupakan persamaan keseimbangan daya yang terjadi pada sistem, besar daya yang dibutuhkan dari grid atau daya yang dijual ke grid bergantung pada besar beban, daya output baterai dan PV pada waktu  $t$ . Perhitungan daya baterai diambil dari besar perpindahan  $\Delta SOC$  antar step waktu yang akan dijelaskan pada subab 3.4. Pada persamaan (3.2) sistem dibatasi dengan mengatur limit dari penggunaan baterai dimana besar SOC dari baterai tidak boleh lebih dari nilai maksimal ataupun kurang dari nilai minimalnya SOCnya. Membatasi daya output maupun input baterai seperti pada persamaan (3.3) dilakukan dengan cara membatasi besar perubahan  $\Delta SOC$  antar waktu. Penjelasan lebih lanjut akan kembali jelaskan pada subab 3.3. Pada sistem, baterai juga dibatasi kemampuannya yang disebut dengan SOH. Sesuai dengan persamaan (3.4) dibatasi nilai SOH dari baterai jika SOH baterai kurang dari yang ditentukan maka baterai harus diganti. Selain itu batasan grid / saluran juga menjadi pertimbangan (3.5) dimana pada sistem ini grid merupakan sistem yang memiliki batas maksimal operasi.

Berikut merupakan batasan sistem pada Tugas Akhir ini :

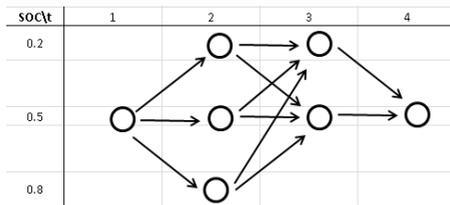
**Tabel 3. 2** Batasan simulasi

	<b>Min</b>	<b>Max</b>
SOC	0.2	1
$P_{Grid}$	-3 kW	3 kW
$P_{BAT}$	-1 kW	1 kW
SOH	0.8	-

Pada tabel diatas terlihat bahwa baterai ditentukan besar SOC minimum dan SOC maksimumnya, kemudian ditentukan juga besar  $\delta$ SOC yang menunjukkan perubahan state yang dimungkinkan oleh baterai. Semakin besar nilai  $\delta$ SOC maka kemungkinan state yang dituju oleh sistem akan semakin besar. Sehingga jumlah jalur yang akan dilewati sistem juga semakin besar. Besar grid pada sistem terbatas sebesar 3kW, output baterai juga dibatasi dan yang terakhir nilai SOH juga dibatasi sebesar 80% dimana jika nilai SOH baterai kurang dari 0.8 maka baterai harus diganti.

### 3.4. Lintasan *Shortest Path*

*Dynamic Programming* digunakan dengan menerapkan *Bellman Algorithm*. Dengan menggunakan metode ini sistem akan mencari jalur terpendek dari semua kemungkinan yang tersedia untuk selanjutnya hasil minimal akan didapatkan. Proses kerja dari sistem akan dijelaskan dengan gambar berikut :

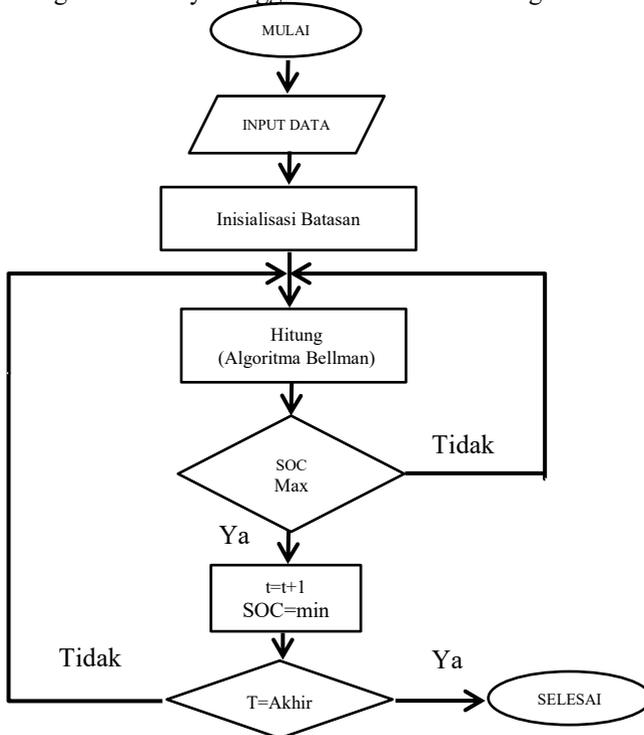


**Gambar 3. 5** Alur kerja baterai

Pada gambar diatas proses dimulai ketika ( $t=1$ ) atau posisi start dimana SOC baterai adalah 0.5 atau separuh dari kondisi penuhnya. Range kerja SOC baterai juga kita batasi sehingga sesuai gambar kapasitas minimum baterai yang diperbolehkan adalah sebesar 20% dari kapasitas total serta kapasitas maksimal yang diperbolehkan adalah 100% (sesuai batasan) dari kapasitas penuh. Sehingga besar aliran daya yang keluar masuk dari baterai maksimal sebesar 80% dari kapasitas nominal baterai. Dari ( $t=1$ ) kemudian kita beranjak ke ( $t=2$ ) disana terdapat beberapa pilihan jalur mulai dari SOC 0.2, 0.5 atau 0.8. semua kemungkinan akan dihitung. Selanjutnya  $\Delta$ SOC atau selisih SOC dari ( $t=1$ ) ke ( $t=2$ ) kemudian dihitung nilai daya yang masuk atau dikeluarkan oleh baterai agar proses selanjutnya dapat mencari besar

daya dari grid yang dibutuhkan menggunakan persamaan *Power Balance* (3.1).

Sesuai gambar 2.9 kita mengharuskan menentukan besaran nilai  $\delta SOC$  yang digunakan. Tugas akhir ini akan mensimulasikan sistem dengan nilai  $\delta SOC = 0.001$ ,  $\delta SOC = 0.002$  dan  $\delta SOC = 0.003$ . Sesuai gambar 2.9 diatas didapatkan  $\delta SOC$  yang digunakan mengacu pada banyak kemungkinan SOC baterai yang diperbolehkan. Pada akhirnya nilai  $\delta SOC$  akan mengacu pada nilai resolusi arus *charging* dan *discharging* pada baterai. Semakin kecil nilai  $\delta SOC$  maka semakin besar resolusi dari level arus baterai (step semakin kecil). Sistem akan mencari jalur minimum dari (t=1) ke (t=2) untuk semua SOC pada (t=2), kemudian akan dilanjutkan hasilnya untuk mempertimbangkan jalur minimum dari masing-masing SOC pada (t=2) ke semua nilai SOC pada (t=3) dan begitu seterusnya hingga semua selesai dihitung.



**Gambar 3. 6** Diagram alir perhitungan sistem.

### **3.5. Tarif Grid dan *Feed in Tariff***

*Feed-in-tariff* adalah harga jual yang ditetapkan pemerintah dengan telah mempertimbangkan keekonomian yang layak bagi para investor energi terbarukan tersebut. *Feed-in-tariff* yang tertuang dalam Peraturan Menteri ESDM No.4 Tahun 2012 merupakan formula yang telah dibicarakan bersama antara Pemerintah dan pengusaha energi terbarukan sehingga mengakomodir kepentingan semua pihak.

Adapun *feed-in-tariff* untuk energi terbarukan seperti *solar cell* disebutkan dalam Peraturan Menteri ESDM No.17 Tahun 2013. Dalam Permen Tersebut disebutkan bahwa pembelian tenaga listrik dari PLTS Fotovoltaik atau sel surya oleh PLN maka ditetapkan harga dengan patokan tertinggi sebesar US\$ 25 sen/kWh (dua puluh lima sen dolar amerika serikat per kWh)[12]. Dengan terbitnya *feed-in-tariff*, diharapkan gairah para investor untuk bisnis energi terbarukan akan tumbuh dan mampu mewujudkan visi 25/25 yaitu pemanfaatan energi terbarukan sebesar 25% dari energi nasional pada tahun 2025.[2]

Sehingga dengan asumsi nilai tukar rupiah terhadap dolar amerika adalah sebesar 13.000 rupiah per dolar maka besaran harga jual listrik dari Sel Surya sebesar 3250 rupiah/kWh. Selain itu harga listrik (TDL) atau tarif listrik grid normal per kWh yang dibeli dari PLN (Grid) adalah konstan sebesar 1500 (R/kWh)..

### **3.6. Biaya Pergantian Baterai**

Seperti yang diketahui bahwa dewasa ini harga elemen penyimpan energi atau baterai dijual dengan harga yang terbilang mahal. Penggunaan yang kurang tepat akan membuat biaya pengeluaran yang semakin besar. Pada tugas akhir ini digunakan beberapa buah baterai yang digunakan untuk menyimpan energi yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak ketika daya dari grid sudah tidak mencukupi. Usia penggunaan baterai yang relatif singkat membuat harga baterai yang mahal menyebabkan pengeluaran yang sangat besar. Baterai dengan kapasitas daya yang menurun sebesar 20% atau turun menjadi 80% dari kapasitas nominalnya harus segera diganti.

Dalam Tugas Akhir ini akan dihitung biaya operasi baterai dengan asumsi bahwa biaya operasi baterai tersebut digunakan untuk biaya pergantian baterai. Operasi dihitung dalam program sebagai besar perubahan dari SOH. Sesuai [1] dijabarkan bahwa nilai SOH baterai berkurang secara linear dengan faktor koefisien Z ketika baterai dalam

keadaan *discharge* namun SOH tidak berubah selama *charge* ataupun *idle*.

Perhitungan menentukan biaya operasi baterai ini sangat berguna dilakukan karena pihak terkait dan siap siaga dengan perlunya biaya pergantian baterai. Biaya pergantian baterai  $BrC$  (*Battery Replacement Cost*) dihitung dengan persamaan berikut[1]:

$$BrC(t) = BiCx \left( \frac{\Delta SOH}{1 - SOH_{MIN}} \right) \quad (3.6)$$

$$\Delta SOH = SOH(t) - SOH(t + \Delta t) \quad (3.7)$$

$$\sum_{SOH_{MIN}}^I BrC(t) = BiC \quad (3.8)$$

Keterangan :

- $BrC(t)$  : Biaya pergantian baterai untuk waktu  $t$  (R).
- $BiC$  : Harga total investasi baterai (R).
- $\Delta SOH$  : Besar perubahan SOH.
- $SOH(t)$  : Besar *State of Charge* pada waktu  $t$ .

Perhitungan biaya dimulai pada persamaan (3.6) dimana biaya dihitung dari waktu awal hingga waktu akhir yang kemudian dijumlah sesuai persamaan (3.8) maka jumlah total biaya pergantian baterai ketika baterai pada kondisi harus diganti adalah sebesar  $BiC$  atau biaya investaasi baterai itu sendiri sehingga tidak perlu mengeluarkan biaya tambahan seketika yang besar karena sudah dicicil jauh jauh hari dari biaya operasi baterai. Pada tugas akhir ini digunakan modul baterai 15Ah sebanyak 24 buah (sesuai perhitungan) dengan harga per satuan baterai 655.000 rupiah.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

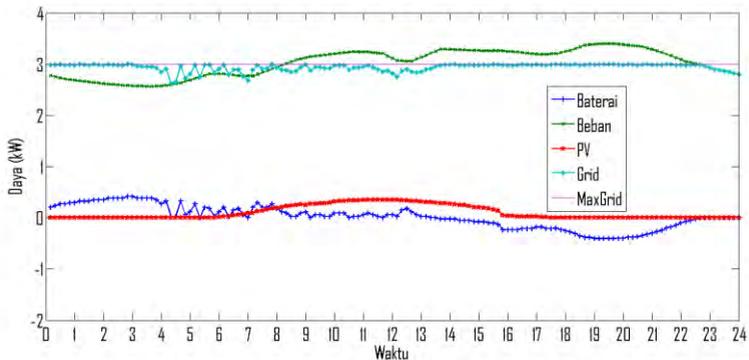
## **BAB 4**

### **SIMULASI DAN ANALISIS**

Pada bagian ini akan dibahas mengenai hasil simulasi yang dilakukan berupa aliran daya optimal sistem sesuai program yang telah dibuat. Sistem optimasi dirancang sedemikian rupa sehingga hasil akhir output dari program merupakan grafik dari aliran daya sistem baik dari grid, PV, maupun pada baterai. Grafik tersebut merupakan gambaran dari proses optimasi yang berisi data data besar daya mengalir dalam sistem. Simulasi dalam tugas akhir ini nantinya dilakukan tiga kali dengan menggunakan besaran nilai  $\delta$ SOC yang berbeda. Variabel  $\delta$ SOC ini menunjukkan selisih SOC dari sistem baterai sesuai algoritma yang dipakai. Sesuai gambar 2.7 diatas didapatkan semakin besar  $\delta$ SOC maka jumlah kemungkinan yang akan dihitung oleh program akan semakin sedikit begitu pula sebaliknya. Nilai  $\delta$ SOC ini akhirnya juga mengacu pada resolusi dari level arus *charging* dan *discharging* untuk mengontrol konverter pada baterai. Sehingga pada akhirnya akan didapatkan nilai arus yang harus masuk dan atau keluar pada baterai. Hasil simulasi ini nantinya akan dimasukkan pada sebuah mikrokontroler untuk mengatur konverter agar arus yang masuk dan keluar baterai sesuai dengan yang dibutuhkan sesuai simulasi.

#### **4.1. Simulasi Optimasi Power Flow Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm Dengan Nilai $\delta$ SOC=0.001.**

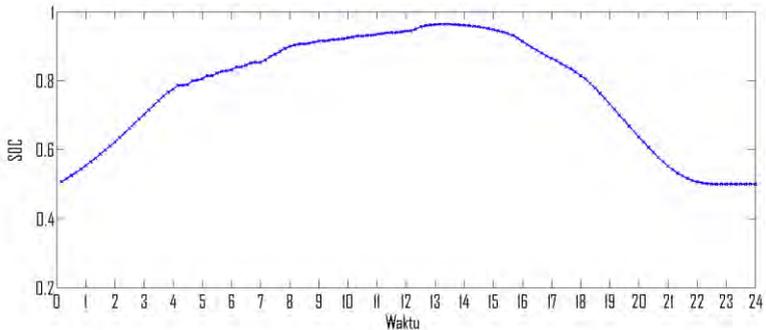
Sistem dilakukan pada profil beban jawa bali yang telah dimodifikasi sebelumnya. Selain itu diperlukan juga data data pendukung lain seperti besaran suhu dan radiasi sekitar untuk mendapatkan hasil output sel surya. Data tersebut diambil dari AWS BMKG Tanjung Perak untuk tanggal 29 April 2016:



**Gambar 4. 1** Power flow hasil optimai untuk  $\delta\text{SOC}=0.001$

Dari gambar 4.1 diatas terlihat bahwa beban puncak terjadi ketika besar daya beban melebihi daya grid maksimal dan hal tersebut terjadi mulai pukul 08.00 hingga pukul 22.00. Dengan bantuan Sel Surya dan Baterai yang digunakan, sistem mampu memenuhi beban tersebut. Pada pukul 00.00 hingga pukul 08.00 nilai beban berada pada *range* grid sehingga beban disuplai oleh grid. Pada waktu itu juga sistem ternyata melakukan proses charging baterai untuk digunakan pada beban peak yang akan terjadi. Pukul 08.00 hingga pukul 16.00 sel surya menghasilkan energi listrik yang membantu memenuhi kebutuhan beban. Dengan adanya sel surya ini beban pada pukul 08.00 hingga pukul 16.00 grid memenuhi kebutuhan beban dengan dibantu oleh sel surya. Hasil simulasi juga menunjukkan pada waktu ini sistem juga melakukan proses charging pada waktu tertentu. Mulai pukul 16.00 hingga 22.00 Sel Surya mulai tidak menghasilkan listrik sedangkan beban berada pada puncak. Hal ini kemudian yang mengharuskan baterai melakukan *discharging* untuk memenuhi kebutuhan beban.

Berikut ini merupakan grafik kemungkinan baterai melakukan proses charging dan discharging sesuai data grid, beban, dan sel surya yang digunakan.

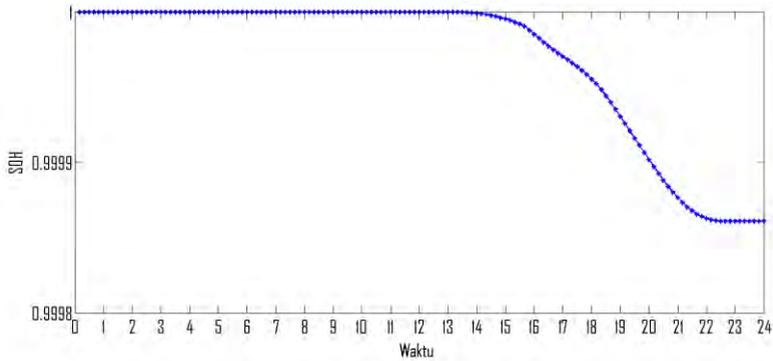


**Gambar 4. 2** Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam dengan  $\delta SOC=0.001$

Pada gambar 4.2 diatas didapatkan bahwa bahwa baterai melakukan proses charging pada pukul 00.00 hingga pukul 14.00 yang membuat nilai SOC naik, sedangkan pada pukul 14.00 hingga 22.00 baterai *discharging* sehingga SOC baterai akan menurun. Sedangkan pada pukul 23.00 hingga 24.00 baterai pada posisi *Idle* karena baterai tidak digunakan.

Sesuai hasil optimasi diatas, didapatkan bahwa pada pukul 00:00 sampai dengan pukul 14.00 baterai mengalami proses charging. Hal ini dapat terjadi memang karena selama rentang waktu tersebut daya beban kurang dari grid maksimal dan atau PV dalam keadaan menghasilkan daya (sistem kelebihan daya). Pukul 13.20 hingga 22.20 baterai melakukan *discharge* karena memang waktu itulah beban puncak terjadi yang mana grid maupun daya yang dihasilkan PV tidak mampu memenuhi kebutuhan beban (sistem kekurangan daya). Mulai pukul 22.30 hingga 23.50 besar daya grid sama dengan beban karena baterai pada posisi idle dan PV tidak menghasilkan listrik dan beban tidak melebihi nilai maksimum grid.

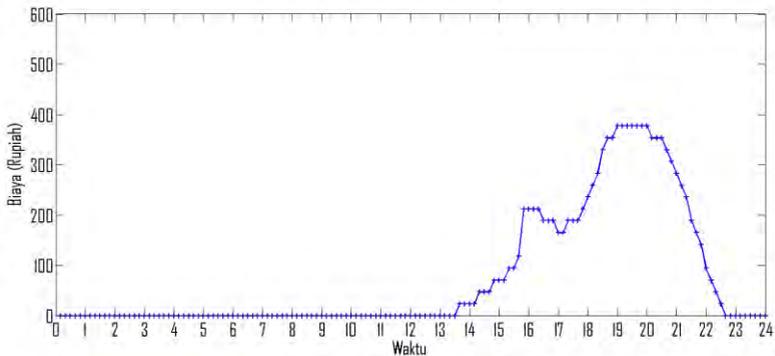
Selanjutnya didapatkan kondisi SOH baterai sesuai grafik berikut



**Gambar 4.3** Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam  $\delta SOC=0.001$

Sesuai teori yang digunakan, nilai SOH akan berkurang ketika baterai melakukan *discharging* sesuai dengan besar arusnya. Hal ini sesuai karena pada gambar 4.2 diatas nilai SOC berkurang mulai pukul 14.00 dan pada akhir pukul 24.00 SOH baterai telah berkurang menjadi 0,999861. SOH ini mengacu pada kapasitas baterai pada saat itu dikalikan dengan besar Ah baterai nominal sistem.

Setelah diketahui nilai SOH maka kita dapat menghitung besaran biaya yang dikeluarkan untuk grid dan penggunaan baterai untuk biaya pergantian baterai. BrC atau Biaya pergantian baterai didapat ketika terjadi penurunan nilai SOH. Berikut grafik biaya penggunaan baterai :



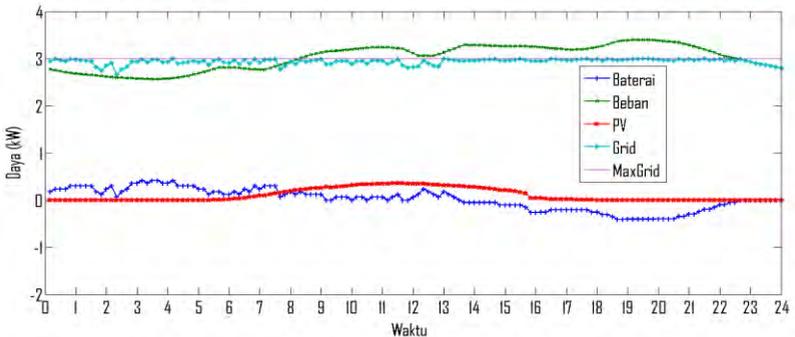
**Gambar 4.4** Biaya penggunaan baterai selama 24 Jam  $\delta SOC=0.001$

Sesuai grafik diatas, biaya baterai mulai dikeluarkan sekitar pukul 14.00 karena saat itu baterai melakukan *discharge* untuk memenuhi beban. Total biaya penggunaan baterai selama 24 Jam adalah 10.941 rupiah dan total biaya listrik grid sebesar 105.781 rupiah yang lebih detail datanya berada pada lampiran.

#### 4.2. Simulasi Optimasi Power Flow Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm Dengan Nilai $\delta SOC=0.002$ .

Berikut merupakan simulasi dengan mengubah parameter  $\delta SOC$  menjadi 0.002 untuk mengetahui perbedaan pada sistem untuk  $\delta SOC$  berbeda. Semakin kecil nilai  $\delta SOC$  maka semakin banyak kemungkinan node yang dituju oleh sistem.  $\delta SOC$  ini akan berpengaruh terhadap resolusi level arus pengisian atau pengeluaran energi pada baterai atau dengan kata lain menentukan ketelitian dari pengaturan aliran daya pada sistem. Semakin kecil  $\delta SOC$  maka akan semakin teliti.

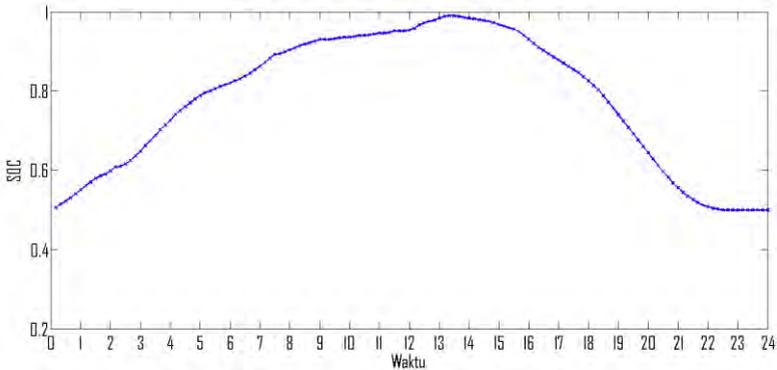
Berikut merupakan hasil simulasinya untuk  $\delta SOC=0.002$ :



**Gambar 4. 5** Power flow hasil optimai untuk  $\delta SOC=0.002$

Sesuai hasil optimasi pada gambar 4.5 diatas didapatkan bahwa pada pukul 00:00 sampai dengan pukul 13.10 baterai mengalami proses charging. Hal ini dapat terjadi memang karena selama rentang waktu tersebut daya beban kurang dari grid maksimal dan atau PV dalam keadaan menghasilkan daya. Pukul 13.20 hingga 22.20 baterai melakukan *discharge* karena memang waktu itulah beban puncak terjadi yang mana grid maupun daya yang dihasilkan PV tidak mampu

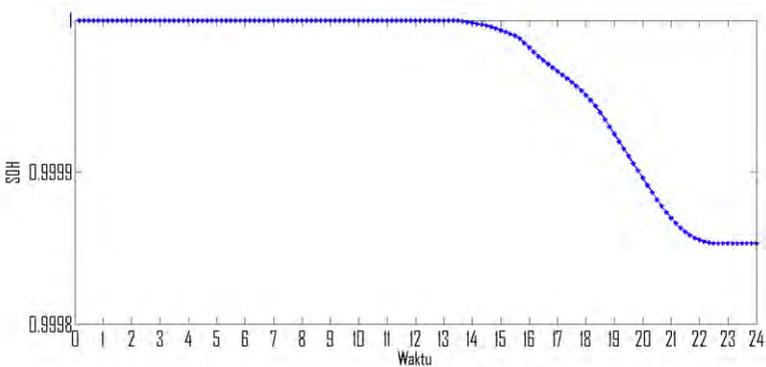
memenuhi kebutuhan beban. Mulai pukul 22.30 hingga 23.50 besar daya grid sama dengan beban karena baterai pada posisi idle dan PV tidak menghasilkan listrik. Data ini serupa dengan simulasi pada subab 4.1 namun dengan nilai yang berbeda karena besar arus *charging* dan *discharging* baterai berbeda akibat penentuan ketelitian yang berbeda yakni parameter  $\delta\text{SOC}$ . Dengan resolusi arus (ketelitian) yang berbeda maka aliran dan besar arus *charging* dan *discharging* menjadi berbeda.



**Gambar 4. 6** Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam dengan  $\delta\text{SOC}=0.002$

Pada gambar 4.6 didapat bahwa baterai melakukan proses *charging* pada pukul 00.00 hingga pukul 14.00 dan membuat nilai SOC naik, sedangkan pada pukul 14.00 hingga 22.00 baterai *discharging* sehingga SOC baterai akan menurun. Sedangkan pada pukul 23.00 hingga 24.00 baterai pada posisi *charging* kembali untuk mengisi baterai agar baterai pada pukul 00.00 adalah sama untuk setiap harinya. Karena ketelitian yang semakin menurun dibandingkan  $\delta\text{SOC}=0,001$  maka sistem ini mengeluarkan energi sedikit lebih besar untuk memenuhi beban. Analogi  $\delta\text{SOC}$  tersebut seperti saat kita membutuhkan kayu sebesar 0.7m namun karena dijual per meter maka kita harus membeli sepanjang 1m, akan berbeda jika dijual dengan satuan per 10cm atau bahkan per cm maka kita dapat membeli sesuai kebutuhan.

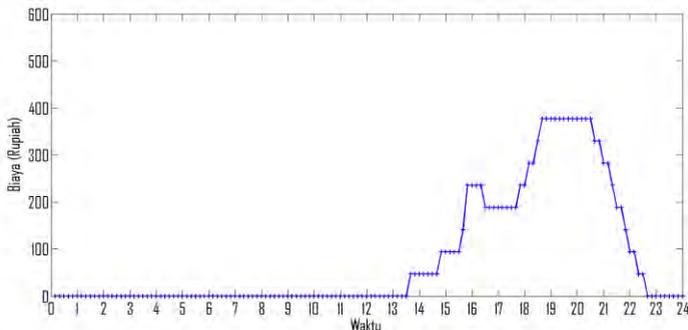
Sesuai dengan operasi penggunaan baterai tersebut maka kemudian didapatkan hasil SOH baterai yang digambarkan pada gambar 4.7 berikut:



**Gambar 4. 7** Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam  $\delta$ SOC=0.002

Sesuai gambar 4.7 diatas, nilai SOH berkurang ketika baterai melakukan *discharging* sesuai dengan besar arusnya. Nilai SOC berkurang mulai pukul 14.00 dan pada akhir Jam 24.00 SOH baterai telah berkurang menjadi 0,999853. Nilai ini sedikit lebih kecil dibanding simulasi 4.1 karena semakin besar energi yang dikeluarkan baterai maka semakin besar pengurangan SOH.

Setelah diketahui nilai SOH maka kita dapat menghitung besaran biaya yang dikeluarkan untuk grid serta biaya penggunaan baterai untuk biaya pergantian baterai. BrC atau biaya pergantian baterai didapatkan ketika terjadi penurunan nilai SOH. Berikut grafik biaya penggunaan baterai 0.002 :

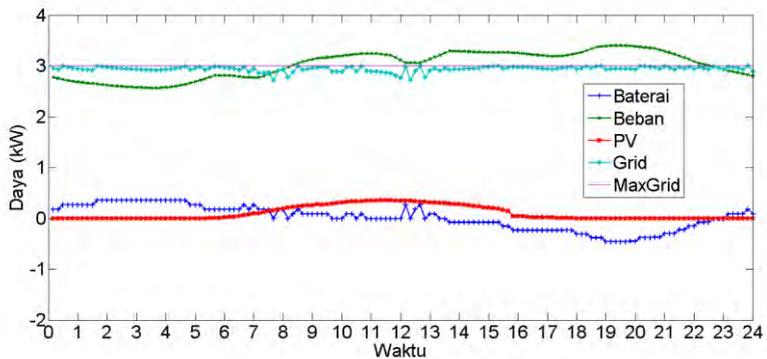


**Gambar 4. 8** Nilai SOC dari baterai selama 24 Jam  $\delta$ SOC=0.002

Sesuai grafik 4.8 diatas, biaya baterai dikeluarkan sekitar pukul 13.30 dimana saat itu baterai melakukan *discharge* untuk memenuhi beban. Total biaya penggunaan baterai selama 24 Jam adalah 11.554 rupiah dan total biaya listrik grid sebesar 105.803 rupiah yang lebih detail datanya berada pada lampiran. Nilai ini lebih mahal dibanding simulasi 4.1

### 4.3. Simulasi Optimasi Power Flow Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan Bellman Algorithm Dengan Nilai $\delta\text{SOC}=0.003$ .

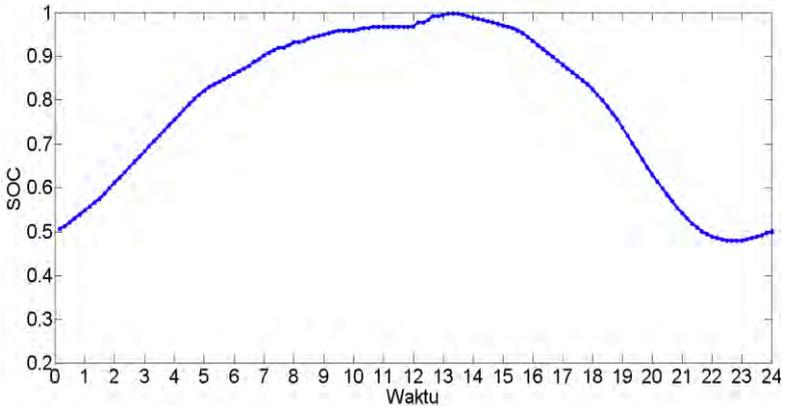
Berikut merupakan simulasi dengan mengubah parameter  $\delta\text{SOC}$  menjadi 0.003 . Berikut merupakan hasil simulasinya:



**Gambar 4. 9** Power flow hasil optimasi untuk  $\delta\text{SOC}=0.003$

Sekali lagi sesuai hasil optimasi pada gambar 4.9 diatas didapatkan bahwa pada pukul 00:00 sampai dengan pukul 13.10 baterai mengalami proses charging. Hal ini dapat terjadi memang karena selama rentang waktu tersebut daya beban kurang dari grid maksimal dan atau PV dalam keadaan menghasilkan daya. Pukul 13.20 hingga 22.20 baterai melakukan *discharge* karena memang waktu itulah beban puncak terjadi yang mana grid maupun daya yang dihasilkan PV tidak mampu memnuhi kebutuhan beban. Mulai pukul 22.30 hingga 23.50 besar daya grid sama dengan beban karena baterai pada posisi idle dan PV tidak menghasilkan listrik. Data ini serupa dengan simulasi pada subab 4.1 dan 4.2 namun dengan nilai yang berbeda karena besar arus *charging* dan *discharging* baterai berbeda akibat penentuan ketelitian yang berbeda yakni parameter  $\delta\text{SOC}$ . Dengan resolusi arus (ketelitian) yang berbeda maka aliran dan besar arus *charging* dan *discharging* menjadi berbeda.

Perubahan level arus charging menyebabkan besar SOC baterai menjadi berubah dan berbeda dengan simulasi 4.1 dan 4.2 seperti pada gambar dibawah ini :

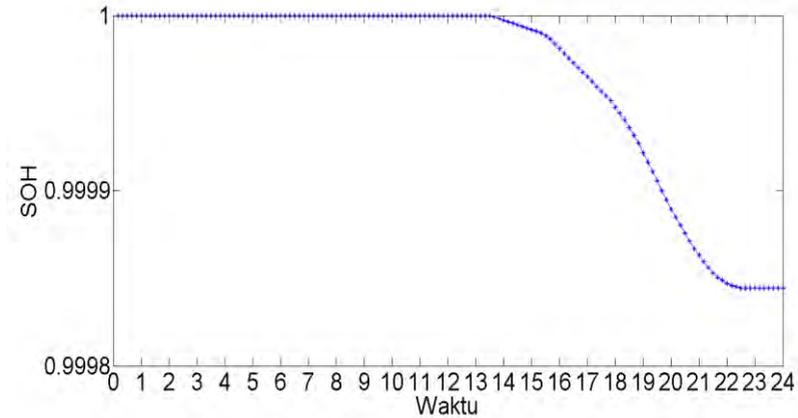


**Gambar 4. 10** Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam dengan  $\delta\text{SOC}=0.003$

Sesuai gambar 4.10 diatas maka didapatkan bahwa baterai melakukan proses charging pada pukul 00.00 hingga pukul 14.00 yang membuat nilai SOC naik, sedangkan pada pukul 14.00 hingga 22.00

baterai *discharging* sehingga SOC baterai akan menurun. Sedangkan pada pukul 23.00 hingga 24.00 baterai pada posisi *charging* kembali untuk mengisi baterai agar baterai pada pukul 00.00 SOC baterai adalah sama untuk setiap harinya. Ketelitian yang sedikit lebih kecil membuat sistem *discharge* energi baterai yang lebih besar untuk memenuhi beban seperti yang dijelaskan sebelumnya.

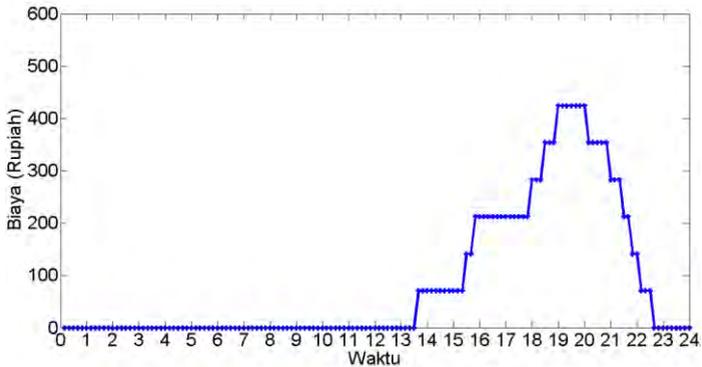
Dengan penggunaan baterai tersebut maka kemudian didapatkan hasil SOH baterai yang digambarkan pada gambar 4.11 berikut:



**Gambar 4. 11** Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam  
 $\delta SOC=0.003$

Sesuai gambar diatas, nilai SOH berkurang ketika baterai melakukan *discharging* sesuai dengan besar arusnya. Nilai SOC berkurang mulai pukul 14.00 dan pada akhir Jam 24.00 SOH baterai telah berkurang menjadi 0,999844. Nilai ini sedikit lebih kecil dibanding simulasi 4.1 dan 4.2 karena semakin besar energi yang dikeluarkan baterai maka semakin besar pengurangan SOH.

Setelah diketahui nilai SOH maka kita dapat menghitung besaran biaya yang dikeluarkan untuk grid serta biaya penggunaan baterai untuk biaya pergantian baterai. BrC atau biaya pergantian baterai didapatkan ketika terjadi penurunan nilai SOH. Berikut grafik biaya penggunaan baterai 0.003 :



**Gambar 4. 12** Nilai SOC dari baterai selama 24 Jam  $\delta\text{SOC}=0.002$

Sesuai grafik diatas, biaya baterai dikeluarkan sekitar pukul 13.30 dimana saat itu baterai melakukan *discharge* untuk memenuhi beban. Total biaya penggunaan baterai selama 24 Jam adalah 12.238 rupiah dan total biaya listrik grid sebesar 105.835 rupiah yang lebih detail datanya berada pada lampiran. Nilai ini lebih mahal dibanding simulasi 4.1 dan 4.2.

#### 4.4. Perbandingan hasil simulasi pada 4.1, 4.2 dan 4.3

##### a. Biaya

Dapat dilihat dari hasil total biaya sesuai gambar 4.4, 4.8 dan 4.12 bahwa besar biaya total yang harus dikeluarkan selama 24 jam untuk simulasi dengan  $\delta\text{SOC}=0.003$  (simulasi 4.3) lebih besar jika dibandingkan dengan  $\delta\text{SOC}=0.002$  dan simulasi dengan  $\delta\text{SOC}=0.002$  (simulasi 4.2) lebih besar jika dibandingkan dengan  $\delta\text{SOC}=0.001$

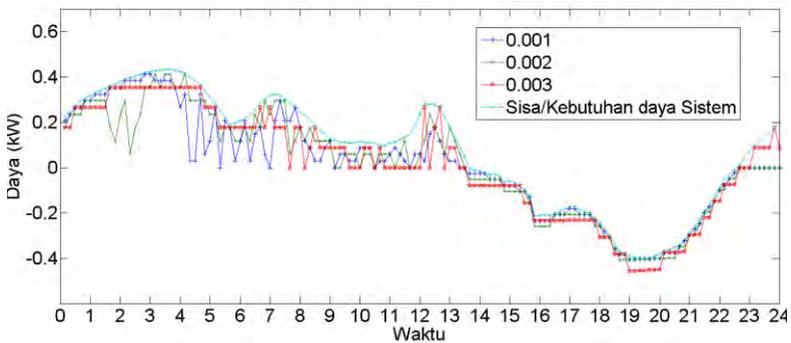
**Tabel 4. 1** Perbandingan Biaya dan energi tiap percobaan

$\delta\text{SOC}$	BrC	Grid Cost	Total Cost	Total energi BAT
0.001	10.941	105.781	116.722	0.324824
0.002	11.554	105.803	117.357	0.339469
0.003	12.238	105.835	118.073	0.361362

Perbedaan yang mencolok dari perhitungan tersebut dikarenakan dengan resolusi level arus *charging* dan *discharging* yang berbeda maka besar energi yang keluar masuk baterai juga berbeda. Dari tabel diatas Total energi baterai menunjukkan total energi yang keluar masuk baterai dan didapatkan data bahwa semakin besar  $\delta$ SOC maka energi yang dibutuhkan baterai semakin besar untuk mengikuti aturan baterai harus dalam kondisi sama saat terpasang. Penggunaan energi baterai yang lebih besar berakibat pada biaya baterai yang semakin besar dan secara otomatis akan berpengaruh terhadap cycle baterai.

### b. SOC

Kapasitas baterai dan PV yang digunakan dihitung untuk memenuhi kebutuhan beban. Untuk mendukung manajemen aliran daya yang diinginkan sama setiap hari diharapkan SOC baterai saat posisi awal (pukul 0:00) sama dengan SOC akhir (pukul 23.50). Sesuai gambar 4.2, 4.6 dan 4.10 maka didapatkan nilai SOC yang berbeda dari masing masing simulasi akibat dari perbedaan total energi yang keluar dan energi yang masuk pada baterai. Berikut merupakan perbandingan energi yang keluar masuk pada baterai untuk ketiga simulasi :



**Gambar 4. 13** Flow daya pada baterai dengan  $\delta$ SOC berbeda

Sesuai gambar diatas didapatkan bahwa semakin kecil nilai  $\delta$ SOC maka flow daya pada baterai akan cukup mengikuti sesuai besar sisa atau kebutuhan daya pada sistem dengan lebih teliti (pukul 14.00-22.00). Dengan  $\delta$ SOC kecil maka step atau resolusi arus baterai semakin kecil sehingga mampu mendekati nilai seharusnya. Pada gambar diatas

juga diketahui sistem mampu menentukan kapan dan berapa besar arus yang keluar atau masuk pada baterai.

### c. SOH

Berdasarkan gambar 4.3, 4.7 dan 4.11 untuk nilai  $\delta$ SOC yang berbeda, maka besar SOH pada akhir program pukul 24.00 sedikit berbeda. Mengacu pada besar energi yang digunakan berbeda untuk setiap simulasi maka secara otomatis akan mengubah besar nilai SOH. Dari tabel 4.1 didapatkan bahwa semakin besar  $\delta$ SOC maka energi yang keluar atau masuk baterai lebih besar untuk memenuhi beban meskipun dengan beban yang sama sehingga besar SOH juga akan berpengaruh. Semakin besar  $\delta$ SOC maka SOH akhir pada sistem menjadi lebih cepat berkurang.

Dari ketiga simulasi diatas didapatkan bahwa untuk pengaturan diusahakan menggunakan nilai  $\delta$ SOC yang sekecil mungkin. Namun pada kenyataan semakin kecil nilai  $\delta$ SOC semakin banyak node yang harus dituju sehingga waktu simulasi akan jauh lebih lama. Selain itu, efeknya jika hasil simulasi benar-benar diterapkan maka jika menggunakan simulasi  $\delta$ SOC terlalu kecil maka hasilnya bagus namun akan kesulitan untuk memrogram untuk mengatur baterai itu sendiri dan juga kesulitan untuk mencari peralatan yang sesuai karena tidak ada yang ideal.

## 4.5. Penjualan Energi Listrik ke Grid

Diketahui bahwa pada simulasi 4.1, 4.2 dan 4.3, sistem menggunakan kapasitas PV dan Baterai yang sama. maka sesuai gambar 4.1 dan gambar 4.6 terlihat bahwa besar daya yang dihasilkan oleh PV sistem tidak pernah lebih besar dari profil beban untuk semua waktu. Dengan kata lain dengan profil beban seperti pada percobaan ini sistem tidak akan pernah menjual listrik kepada PLN. Salah satu penyebab alasan lainnya adalah kapasitas PV yang digunakan hanya dihitung untuk mampu mensuply energy listrik beban saja sehingga kecil kemungkinan untuk mampu menjual listrik. Kemungkinan yang baik adalah dengan memperbesar nilai kapasitas PV namun hal itu sistem tidak akan menjadi kurang optimal karena harga Modul PV yang cukup mahal.

#### 4.6. Waktu Pergantian Baterai

Setelah didapatkan SOH baterai maka dapat memperkirakan baterai harus diganti dengan menggunakan rumus berikut:

$$Age = \frac{1-0.8}{1-SOH(I)} \text{ hari} \quad (4.1)$$

**a. Untuk  $\delta SOC=0.001$**

$$Age = \frac{0.2}{1-0,999861} \text{ hari} \quad (4.2)$$

$$Age = 1.438,5 \text{ hari}$$

$$Age = 3,94 \text{ tahun}$$

**b. Untuk  $\delta SOC=0.002$**

$$Age = \frac{0.2}{1-0,999853} \text{ hari} \quad (4.3)$$

$$Age = 1.360,5 \text{ hari}$$

$$Age = 3,72 \text{ tahun}$$

**c. Untuk  $\delta SOC=0.003$**

$$Age = \frac{0.2}{1-0,999844} \text{ hari} \quad (4.4)$$

$$Age = 1282,3 \text{ hari}$$

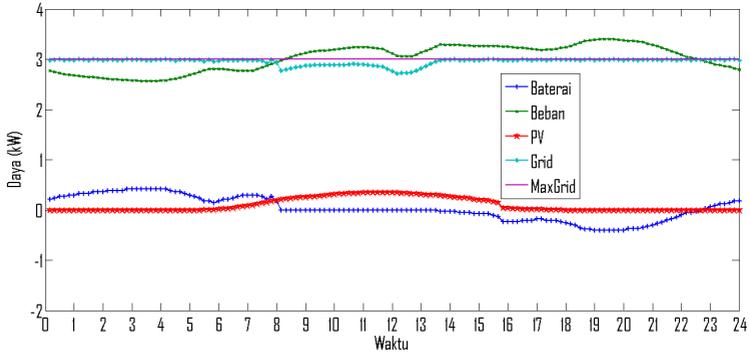
$$Age = 3,5 \text{ tahun}$$

Dari hasil diatas yang paling baik adalah dengan menggunakan  $\delta SOC$  yang terkecil, namun jika dibandingkan nantinya akan sedikit kesulitan untuk mengatur laju arus pada baterai yang sebenarnya karena telalu banyak level laju arus baterai terlebih peralatan yang digunakan seperti konverter yang ada juga terbatas pengaturan arusnya.

#### 4.7. Hasil Simulasi Menggunakan *Ruled-Based*.

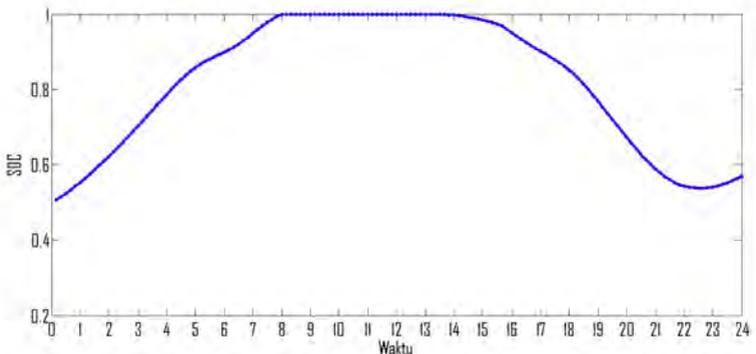
Ruled based merupakan suatu operasi pada pengaturan operasi baterai pada simulasi. Operasi ini menekankan pada operasi baterai untuk selalu mengisi baterai hingga penuh saat energi pada sistem mencukupi dan *discharge* saat diperlukan. Selama ini banyak sistem

masih menggunakan ruled-based ini dimana baterai selalu diisi jika energi pada sistem berlebih hingga baterai penuh. Kali ini kita akan membandingkan hasil optimasi Bellman Algorithm dengan sistem *ruled-based* dengan ketelitian yang sama yakni  $\delta SOC=0.001$ . Berikut merupakan hasil dari ruled based dengan data lengkap terdapat pada lampiran 5.4.



**Gambar 4. 14** Power Flow sesuai *ruled-based*

Sesuai gambar diatas maka baterai akan melakukan *charge* terus menerus hingga penuh sesuai dengan daya yang tersedia pada sistem seperti pada gambar dibawah. Berbeda dengan hasil optimasi pada 4.1 yang hanya mengisi baterai sesuai keperluan saja.



**Gambar 4. 15** SOC baterai sesuai ruled-based

Karena tujuan akhir dari Tugas Akhir ini adalah untuk melakukan manajemen aliran daya sistem dengan pengaturan yang sama untuk setiap harinya maka dibuat sistem dimana SOC awal harus sama dengan SOC akhir agar manajemen aliran daya menjadi lebih mudah. Jika menggunakan *ruled-based*, penerapan manajemen aliran daya dari sistem akan berbeda untuk tiap harinya karena SOC baterai yang berbeda. Inilah satu alasan kenapa menggunakan metode bellman ini agar manajemen pengaturan aliran daya menjadi optimal dalam arti lebih mudah dilakukan.

Selain itu berikut merupakan perbedaan biaya total yang diperlukan untuk operasi sistem selama satu hari untuk Bellman Algorithm dan Ruled-Based. Perbandingan ini digunakan untuk mengetahui besar biaya yang diperlukan untuk masing masing metode.

**Tabel 4. 2** Perbandingan biaya *Ruled-Based* dan Bellman Algorithm

	<b>Ruled-Based</b>	<b>Bellman-Algorithm</b>
<b>Biaya TOTAL (Rupiah)</b>	117.168	116.722

Biaya pengeluaran operasi dalam satu hari untuk Ruled-Based dan Bellman Algorithm berbeda dimana untuk Bellman Algorithm biayanya menjadi lebih murah. Selain itu penggunaan Bellman Algorithm memungkinkan dilakukan manajemen pengaturan operasi yang sama pada sistem membuatnya lebih mudah sehingga dapat dikatakan penggunaan Bellman Algorithm mampu membuat operasi menjadi optimal.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari simulasi dan analisis yang dilakukan pada tugas akhir ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Program simulasi yang telah dibuat mampu melakukan perhitungan untuk mencari aliran daya optimum dari sistem dengan profil beban dibuat murip Jawa bali dengan faktor skala tertentu dengan biaya total 117.357 rupiah untuk  $\delta\text{SOC}$  0.002 dan 118.073 rupiah untuk  $\delta\text{SOC}$  0.003.
2. Penggunaan baterai menambah biaya pengeluaran untuk pergantian baterai yang dalam tugas akhir ini dicicil dan dihitung dari seberapa besar biaya pemakaian baterai
3. Biaya yang dikeluarkan untuk  $\delta\text{SOC}=0.001$ ,  $\delta\text{SOC}=0.002$  dan  $\delta\text{SOC}=0.003$  walaupun dengan sistem, kapasitas baterai dan PV yang sama akan menghasilkan biaya yang berbeda. Semakin besar nilai  $\delta\text{SOC}$  biaya total menjadi lebih mahal akibat biaya baterai yang meningkat.
4. Baterai mampu melakukan tugas sebagai *peak load shaving* ketika beban puncak melebihi nilai maksimum grid dengan cara baterai akan *charge* ketika beban rendah dan *discharge* ketika beban puncak.
5. Hasil simulasi dapat digunakan sebagai *Power Schedule* yang digunakan untuk mengatur operasi baterai yang terpasang pada suatu sistem.
6. Usia baterai untuk simulasi menggunakan  $\delta\text{SOC}=0.001$  harus diganti setelah digunakan 3.94 tahun, untuk  $\delta\text{SOC}=0.002$  harus diganti setelah digunakan selama 3.7 tahun dan untuk  $\delta\text{SOC}=0.003$  harus sudah diganti setelah 3.51 tahun. Semakin kecil  $\delta\text{SOC}$  maka usia baterai semakin lama.
7. Hasil simulasi Bellman Algorithm dengan *ruled-based* menunjukkan hasil optimasi Bellman Algorithm lebih murah.

#### **5.2. Saran**

Saran untuk penelitian selanjutnya pada bidang operasi optimum atau optimal power flow sistem tenaga adalah sebagai berikut:

1. Tugas akhir ini menggunakan asumsi harga listrik per kWh adalah sama sehingga dapat dikatakan biaya pembangkitan

untuk setiap level adalah sama. Untuk selanjutnya sistem diperluas dengan membuat grid memiliki variabel yang membuat pembangkitan energi dari grid tidak sama.

2. Ada kemungkinan suatu saat setiap rumah pada suatu hari nanti akan memiliki PV dan baterai dan masing2 akan terhubung menjadi grid. Sehingga kedepan bisa diperluas simulasi dengan banyak sistem kecil yang terkoneksi ke grid yang pastinya masalahnya akan mejadi lebih kompleks

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yann Riffonneau, Seddik bacha, Franck barruel, Stephane Ploix, "Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV System With Batteries" IEEE Trans. Suinustainable Energy, July 2011
- [2] Peraturan Menteri ESDM RI no 4, "Harga Pembelian Tenaga Listrik oleh PT PLN (persero) dari Pembangkit Tenaga Listrik Yang Menggunakan Energi Terbarukan Skala Kecil dan Menengah atau Kelebihan Tenaga Listrik", 2012
- [3] Yu-Hua Sun, Hurng-Liangh, Jinn-Chang W., "Aging Estimation Method for Lead-Acid Battery", IEEE Trans On Energy Conversion, Vol 26 No 1 March 2011
- [4] Elisabeth L, Florence M, Arnaud D, Philipine M, "Assessment of Storage Ageing in Different Types of PV Systems: Technical and Economical Aspects, Spanyol, September 2008
- [5] NM. Hamad, "Automotive Battery Modelling and Management", Journal of Engineering Science and Technology Review, 2011
- [6] Data Sheet, "PV Sunmodule SW 245 Poly Ver 2.0 and 2.5 Frame"
- [7] E.Skoplaki, JA Palyvos, "On The temperature dependence of module electrical performance: Areview of efficiency / power corelation", Science Direct, Solar Energy, 2009
- [8] Hadi S., "Power System Analysis 2nd edition", McGrowHill, Ch.I, 1999
- [9] Khasrismawan, Rony Seto, Syamsul A, "Online Simulator untuk operasi optimum Sistem tenaga listrik Dengan Mempertimbangkan Kontingensi", Tugas Akhir, Elektro ITS 2015
- [10] Sulistijono, Primaditya "Emision and Econmic Dispatch Pada Sistem Kelistrikan Micro Grid Menggunakan Multiobjective Genetic Algorithm Optimization", Tugas Akhir, Elektro ITS 2014
- [11] Bellman, Richard, "On The Theory Of Dynamic Programming", RAND Corp, June 1952
- [12] Peraturan Menteri ESDM RI No. 17, "Pembelian Tenaga Listrik Oleh PT Perusahaan Listrik Negara (persero) dari Pembangkit Listrik Lenaga Surya Fotovoltaik", 2013

## RIWAYAT PENULIS



Rizky Ramadyan Widiarto itulah nama lengkap yang diberikan orang tua kepada saya. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara, lahir pada hari Minggu di Probolinggo pada tanggal 14 Maret 1993 Masehi atau pada tanggal 20 Ramadhan 1413H. Lahir dari keluarga yang sederhana penulis menjalani masa sekolah yang cukup menyenangkan. Dimulai dari TK Kartini pada tahun 1998-2000. Selanjutnya di SDN Kalisalam II tahun 2000-2006. Kemudian beralih ke SMPN 5 Probolinggo tahun 2006-2009. Tak hanya disitu penulis melanjutkan ke jenjang selanjutnya yakni di SMAN 1 Probolinggo pada jurusan IPA pada tahun 2009-2012. Ketertarikan penulis pada ilmu listrik dan elektro membuat ia melanjutkan studi S1 Teknik Elektro di ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) Surabaya mulai tahun 2012 hingga saat Tugas Akhir ini dibuat.