

Manajemen Optimal *Power Flow* Pada Jaringan Terhubung PV Dilengkapi Baterai Menggunakan *Bellman Algorithm*

Rizky Ramadyan Widiarto, Rony Seto Wibowo, Dedet Candra Riawan
 Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
 Jl. Arif Rahman Hakim, Surabaya 60111
 e-mail : rizkyramadyan14@gmail.com, ronyseto@ee.its.ac.id, dedet@ee.its.ac.id

Abstract – Optimal Power Flow (OPF) atau aliran daya optimal merupakan kombinasi antara metode *Economic Dispatch* dan *Power Flow*. Metode ini 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. Paper ini melakukan proses optimalisasi aliran daya pada sistem dengan memasukan pemodelan PV dan Baterai pada sistem. Pemodelan digunakan untuk mempertimbangkan biaya pergantian baterai karena harga baterai yang cukup 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 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 dihitung biayanya. 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 δ SOC maka usia baterai semakin lama.

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

I. PENDAHULUAN

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, murahnya 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 hibrid 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.

BAB 2 akan menjelaskan tentang dasar teori yang digunakan, BAB 3 akan menjelaskan tentang perencanaan sistem. Hasil dan kesimpulan masing masing akan dijelaskan pada BAB 4 dan BAB 5.

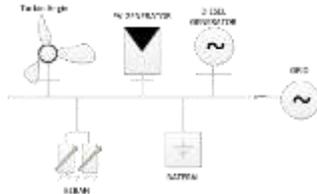
II. DASAR TEORI

A. 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[7]. Terdapat dua jenis operasi sistem tenaga listrik salah satunya adalah *Grid Connected*.

Mode operasi *Grid-connected* merupakan mode operasi dimana sistem yang lebih kecil terhubung dengan jaringan 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 Paper ini akan mampu mendapatkan suply energi listrik dari PLN maupun mampu menjual kelebihan energi yang dibangkitkan kepada PLN.



Gambar 1. Sistem Kelistrikan *Grid-Connected*[8]

B. 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.[6]

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.

C. 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 1000W/m² pada suhu 25°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 [5] :

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

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 (W/m²)
- $G_{T,STC}$: Radiasi saat kondisi standar STC (1000 W/m²)
- γ : Koefisien suhu modul sel surya (%/oC)
- T_j : Suhu sel(oC)
- T_r : Suhu referensi(oC)
- N_{PVs} : Jumlah sel surya dipasang seri
- N_{PVp} : Jumlah sel surya dipasang paralel

Dalam paper ini digunakan modul sel surya model *Sun Module SW-245 Poly Vers 2.0 dan 2.5 Frame* dengan data sheet sesuai Tabel 1 berikut :

Tabel 1
Data sheet Sun Module SW-245 Poly Vers 2.0 dan 2.5

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

D. 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.

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.

Nilai SOC pada baterai didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut [1] :

$$SOC = \frac{C(t)}{C_{ref}(t)} \quad (2)$$

Keterangan :

- SOC : *State of Charge*
- $C(t)$: Kapasitas baterai pada waktu t (Ah)
- $C_{ref}(t)$: Kapasitas referensi baterai pada waktu(Ah)

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 (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 (6) dihitung dengan menyederhanakan persamaan (3), (4) dan (5)[1].

$$SOH(t) = \frac{C_{ref}(t)}{C_{ref,nom}} \quad (3)$$

$$C_{ref}(t) = C_{ref}(t-\Delta t) - \Delta C_{ref}(t) \quad (4)$$

$$\Delta C_{ref}(t) = C_{ref,Nom}(t) - Z_x [SOC(t-\Delta t) - SOC(t)] \quad (5)$$

$$SOH(t) = \frac{C_{ref}(t-\Delta t)}{C_{ref,nom}} - Z_x [SOC(t-\Delta t) - SOC(t)] \quad (6)$$

Keterangan :

- SOH(t) : *State of Health* baterai (0-1)
- C_{ref,nom} : Kapasitas rating baterai (Ah)
- ΔC_{ref}(t) : Perubahan kapasitas rating baterai (Ah)
- Z : Koefisien penuaan linear baterai
- SOC(t) : Kondisi kapasitas baterai (0-1)

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].

3. Battery Voltage

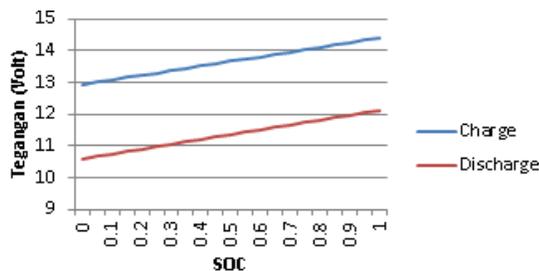
Tegangan pada baterai diketahui linear terhadap nilai SOC seperti yang telah disebutkan pada subab 2.4.1 sehingga besaran nilai tegangan dari sebuah baterai dapat dituliskan dan dimodelkan dalam sebuah fungsi persamaan dari besar kecilnya SOC. Berdasarkan percobaan interpolasi linear yang dilakukan oleh INES institut didapatkan besar tegangan baterai berbeda saat kondisi *charge* dan *discharge* seperti persamaan 7 dan 8.

$$V_{BATT}(t) = [12.94 + 1.46 \times SOC(t)] \times N_{BATT_S} \quad (7)$$

$$V_{BATT}(t) = [12.13 - 1.54 \times (1 - SOC(t))] \times N_{BATT_S} \quad (8)$$

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



Gambar 2 Grafik tegangan baterai berdasarkan percobaan oleh INES.

E. Grid (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 paper ini total biaya pembelian dan penjualan listrik dari dan ke PLN adalah sebagai berikut :

$$CP(t) = P_B(t) \times TDL \quad (9)$$

$$CR(t) = P_J(t) \times FiT \quad (10)$$

$$CF(t) = CP(t) - CR(t) \quad (11)$$

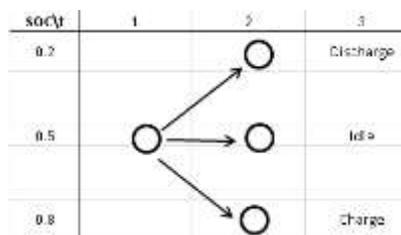
Keterangan :

- 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.

F. 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[9].

Gambar 3 berikut ini merupakan contoh penggambaran sistem algoritma pada paper ini, teori yang digunakan adalah menggunakan *shortest path* atau jalur terpendek yang teorinya dikemukakan oleh Bellman juga yang dikenal dengan *Bellman Algorithm*.



Gambar 3 State baterai saat kondisi *charge*, *discharge* dan *idle*.

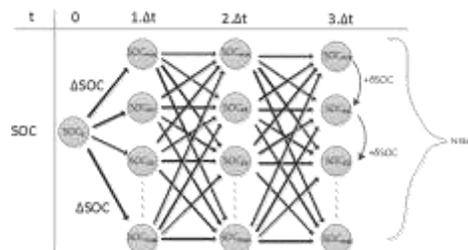
Kondisi baterai :

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

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

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

Gambar 3 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 ΔSOC > 0, *discharge* terjadi ketika ΔSOC < 0 dan *idle* terjadi saat ΔSOC = 0.



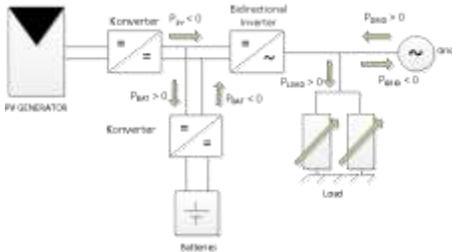
Gambar 4 Semua kemungkinan SOC sistem berdasarkan nilai ΔSOC

Gambar 4 diatas menunjukkan gambaran semua kemungkinan dari semua SOC yang mungkin dituju dan dihitung. Nilai δSOC menunjukkan skala resolusi dari SOC baterai yang mungkin. Semakin kecil δSOC maka semakin banyak pula SOC yang mungkin dituju oleh sistem.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Konfigurasi Sistem

Sistem pada paper 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 alur sistem berikut gambaran arsitektur dari sistem.



Gambar 5 Arsitektur sistem dan aliran daya yang terjadi.[1]

Power Balance 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 :

$$P_{GRID}(t) = P_{PV}(t) - P_{BAT}(t) + P_{BEBAN}(t) \tag{11}$$

$$SOC^{MIN} \leq SOC(t) \leq SOC^{MAX} \tag{12}$$

$$P_{BAT}^{MIN} \leq P_{BAT}(t) \leq P_{BAT}^{MAX} \tag{13}$$

$$P_{GRID}(t) \leq P_{GRID}^{MAX} \tag{14}$$

$$SOH(t) \geq SOH^{MIN} \tag{15}$$

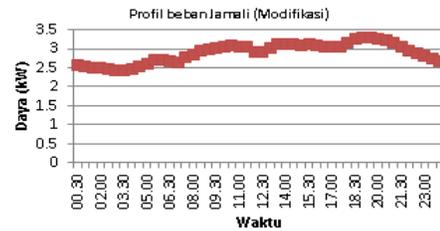
Keterangan :

- $P_{GRID}(t)$: 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)

B. Profil Beban Jamali PLN 500kV

Untuk proses simulasi sistem, dibutuhkan data profil beban. Pada paper ini simulasi dilakukan pada profil beban jawa bali (jamali) dengan dilakukan modifikasi. Modifikasi dilakukan untuk mengubah skala dari profil sistem beban

jawa bali untuk menyesuaikan dengan batasan maksimal grid.



Gambar 6 Profil beban Jamali (Modifikasi)

C. Penentuan Kapasitas Baterai dan PV

Penentuan kapasitas ini juga bertujuan agar biaya investasi dari baterai dan PV dapat diminimalkan meskipun akhirnya (pada Paper ini) biaya investasi PV diabaikan dalam perhitungan biaya..

Untuk data beban sesuai dengan profil beban pada gambar 6 dan dengan besar grid maskimal yang diperbolehkan dalam grid sebesar 3kW maka dihitung besar kapasitas PV dan Baterai. Hasil perhitungan adalah sebagai berikut :

Tabel 2
Hasil Perhitungan Kapasitas Baterai dan PV

	Perhitungan	Realisasi
PV	255.3 Wp	2x245 Wp
Baterai	345.36 Ah	24x15Ah

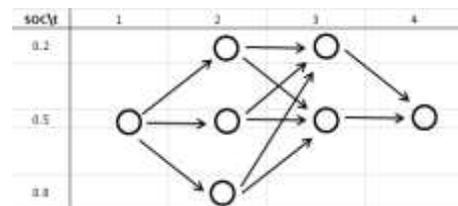
Data inilah yang selanjutnya digunakan untuk proses simulasi. PV diatas menggunakan modul 245Wp sehingga untuk mencukupi 255.3Wp setidaknya diperlukan minimal 2 modul serta baterai yang dibutuhkan sebesar 345.36Ah dimana dengan besar Ah Baterai 15Ah maka diperlukan setidaknya minimal 24 buah baterai.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

Tabel 3
Batasan simulasi

	Min	Max
SOC	0.2	1
P_{Grid}	-3 kW	3 kW
P_{BAT}	-1 kW	1 kW
SOH	0.8	-

D. 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 7 Alur kerja sistem

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 dan terakhir SOC=1. Dihitung ΔSOC dari (t=1) ke (t=2) untuk kemudian dihitung nilai daya yang diserap atau dikeluarkan oleh baterai untuk selanjutnya mencari nilai daya dari grid menggunakan persamaan *Power Balance* (3.1).

E. 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)[10]. 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]

F. Biaya Pergantian Baterai

Pada paper 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 paper 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]:

$$BrC(t) = BiC \times \left(\frac{\Delta SOH}{1 - SOH_{MIN}} \right) \tag{16}$$

$$\Delta SOH = SOH(t) - SOH(t + \Delta t) \tag{17}$$

$$\sum_{SOH_{MIN}}^1 BrC(t) = BiC \tag{18}$$

Keterangan :

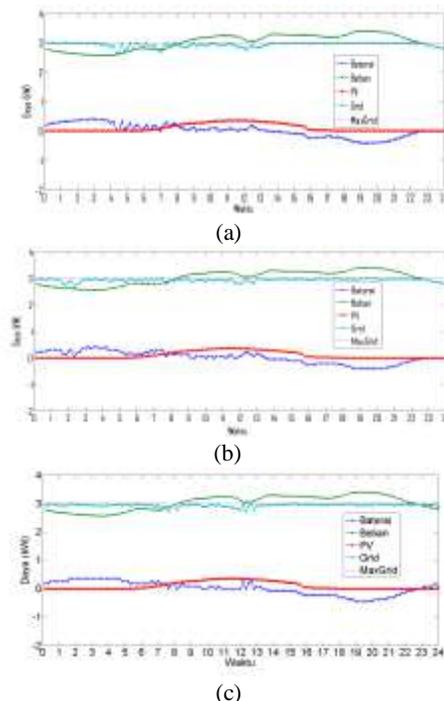
- BrC(t) : Biaya pergantian baterai untuk waktu t (R).
- BiC : Harga total investasi baterai (R).
- ΔSOH : Besar perubahan SOH.
- SOH(t) : Besar *State of Charge* pada waktu t.

Perhitungan biaya dimulai pada persamaan (16) dimana biaya dihitung dari waktu awal hingga waktu akhir yang kemudian dijumlah sesuai persamaan (18) 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 paper ini digunakan modul baterai 15Ah sebanyak 24 buah (sesuai perhitungan) dengan harga per satuan baterai 655.000 rupiah.

IV. HASIL SIMULASI

Simulasi dilakukan dengan memasukkan parameter SOC awal 0.5 dan dengan parameter yang telah ditentukan pada bab sebelumnya dengan mensimulasikan δSOC yang berbeda yakni 0,001, 0,002 dan 0,003.

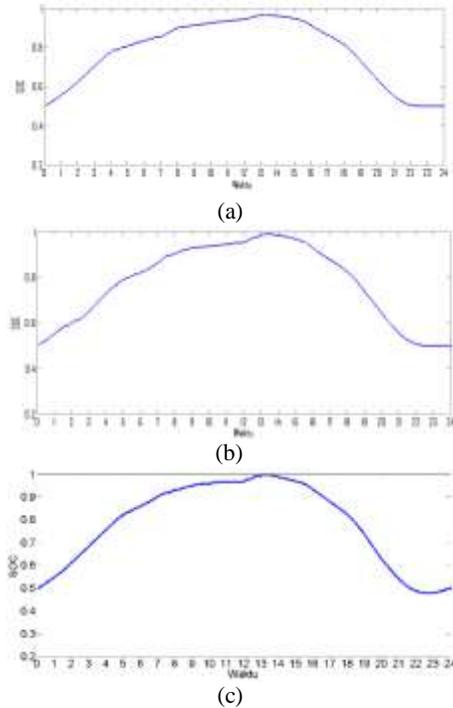
A. Power Flow



Gambar 8 *Power flow* hasil optimai untuk (a) δSOC=0.001, (b) δSOC=0.002 dan (c) δSOC=0.003

Berdasarkan gambar diatas ketiga percobaan berhasil dilakukan dimana sistem mampu memenuhi kebuthan peak pada malam hari namun dengan *power flow* yang berbeda. Sistem mampu mengisi baterai pada saat sistem kelebihan energi listrik dan mampu mengeluarkan pada saat yang diperlukan seperti pada beban puncak malam harinya.

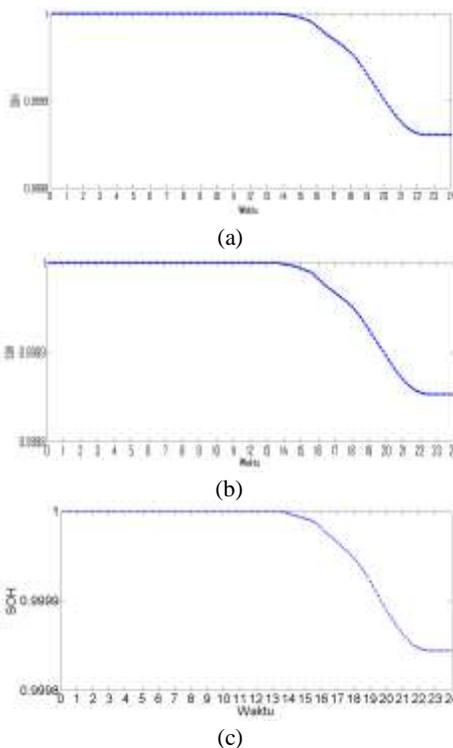
B. SOC



Gambar 9 Nilai SOC pada baterai selama 24 Jam untuk (a) $\delta SOC=0.001$, (b) $\delta SOC=0.002$ dan (c) $\delta SOC=0.003$

Sesuai gambar di atas didapatkan bahwa semakin besar δSOC maka penggunaan energi baterai semakin besar sehingga baterai harus diisi lebih banyak. Ini yang membuat SOC puncak baterai berbeda untuk masing-masing δSOC . Hal ini terjadi karena δSOC menentukan besar step level arus yang keluar dan masuk baterai.

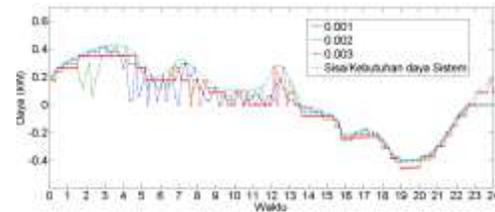
C. SOH



Gambar 9 Nilai perubahan SOH dari baterai selama 24 Jam untuk (a) $\delta SOC=0.001$, (b) $\delta SOC=0.002$ dan (c) $\delta SOC=0.003$

Sesuai gambar di atas terlihat cukup jelas, berdasarkan gambar 8 karena semakin besar energi yang keluar masuk baterai maka semakin cepat proses penuaan (*aging*) yang terjadi pada baterai.

D. Aliran Energi Baterai dan BrC



Gambar 10 Flow daya pada baterai dengan δSOC berbeda

Sesuai gambar di atas didapatkan bahwa semakin kecil δSOC maka proses perhitungan sistem menjadi lebih akurat dan mendekati nilai yang seharusnya. δSOC sendiri merupakan step pada proses perhitungan *Bellman Algorithm* dimana pada akhirnya δSOC akan mengacu pada step level arus pengisian dan penggunaan baterai. Semakin kecil δSOC maka resolusi semakin besar sehingga mampu mengikuti kebutuhan dengan lebih teliti. Berikut merupakan tabel selisih energi keluar dan masuk pada baterai dengan δSOC yang berbeda.

Tabel 4
Selisih energi keluar masuk baterai

δSOC	BrC	Grid Cost	Total Cost	Total energi BAT (kWh)
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

Sesuai gambar di atas terlihat energi baterai untuk δSOC kecil maka nilainya semakin kecil. Hal ini berakibat pada biaya penggunaan baterai yang semakin sedikit sehingga biaya total yang dikeluarkan menjadi lebih sedikit.

E. Penjualan Energi Listrik ke Grid

Diketahui bahwa pada simulasi dengan $\delta SOC=0.001$, $\delta SOC=0.002$ dan $\delta SOC=0.003$ sistem menggunakan kapasitas PV dan baterai yang sama. maka sesuai gambar 8 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 telah dihitung hanya mampu mensupply energi 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 Surya yang cukup mahal.

F. Waktu Pergantian Baterai

Setelah didapatkan SOH baterai sesuai gambar di atas maka dapat diperkirakan baterai harus diganti dengan menggunakan rumus berikut:

$$Age = \frac{1-0.8}{1-SOHI(t)} \text{ hari} \quad (19)$$

a. Untuk $\delta SOC=0.001$

$$Age = \frac{0.2}{1-0.999861} \text{ hari} \quad (20)$$

Age=1.438,5 hari

Age=3,94 tahun

b. Untuk $\delta SOC=0.002$

$$Age = \frac{0.2}{1-0.999853} \text{ hari} \quad (21)$$

Age=1.360,5 hari

Age=3,72 tahun

c. Untuk $\delta SOC=0.003$

$$Age = \frac{0.2}{1-0.999844} \text{ hari} \quad (22)$$

Age=1282,3 hari

Age=3,5 tahun

V. KESIMPULAN

Dari simulasi dan analisis yang dilakukan pada paper 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 δSOC 0.002 dan 118.073 rupiah untuk δSOC 0.003.
2. Penggunaan baterai menambah biaya pengeluaran untuk pergantian baterai yang dalam paper ini dicicil dan dihitung dari seberapa besar biaya pemakaian baterai
3. Biaya yang dikeluarkan untuk $\delta SOC=0.001$, $\delta SOC=0.002$ dan $\delta SOC=0.003$ walaupun dengan sistem, kapasitas baterai dan PV yang sama akan menghasilkan biaya yang berbeda. Semakin besar nilai δSOC 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 $\delta SOC=0.001$ harus diganti setelah digunakan 3.94 tahun, untuk $\delta SOC=0.002$ harus diganti setelah digunakan selama 3.7 tahun dan untuk $\delta SOC=0.003$ harus sudah diganti setelah 3.51 tahun. Semakin kecil δSOC maka usia baterai semakin lama.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Yann Riffonneau, Seddik bacha, Franck barruel, Stephane Ploix, "Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV System With Batteries" IEEE Tans. Suinustainable Energy, July 2011

[2] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia no 4 tahun 2012 "Harga Pembelian Tenaga Listrik oleh PT PLN (persero) dari Pembangkit Tenaga Listrik Yang Menggunakan Energi Terbarukan Skala Kecil dan Menengah atau Kelebihan Tenaga Listrik"

[3] Yu-Hua Sun, Hung-Liang, 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, Amaud D, Philipine M, "Assessment of Storage Ageing in Different Types of PV Systems: Technical and Economical Aspects

[5] E.Skoplaki, JA Palyvos, "On The temperature dependence of module electrical performance: Areview of efficiency / power corelation", Science Direct, Solar Energy, 2009

[6] Hadi S., "Power System Analysis 2nd edition", McGrawHill, Ch.I, 1999

[7] Khasrismawan, Rony Seto, Syamsul A, "Online Simulator untuk operasi optimum Sistem tenaga listrik Dengan Mempertimbangkan Kontingensi", Paper, Elektro ITS 2015

[8] Sulistijono, Primaditya "Emission and Econmic Dispatch Pada Sistem Kelistrikan Micro Grid Menggunakan Multiobjective Genetic Algorithm Optimization", Paper, Elektro ITS 2014

[9] Bellman, Richard, "On The Theory Of Dynamic Programming", RAND Corp, June 1952

[10] Peraturan Menteri ESDM No. 17 tahun 2013 Tentang Pembelian Tenaga Listrik Oleh PT Perusahaan Listrik Negara (persero) dari Pembangkit Listrik Lenaga Surya Fotovoltaik.