

EVALUASI PENYALURAN DAYA PLTS 18 kWp DI LAB SURYA POLBAN

Alvera Apridianti Melkias¹

¹Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : alveramelkias@polban.ac.id

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya telah terpasang di laboratorium surya Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung dengan kapasitas 18 kWp sejak tahun 2009. PLTS ini menyuplai daya untuk kegiatan perkuliahan, praktikum, dan penerangan. Sistem PLTS ditopang oleh sistem baterai dengan kapasitas 1800 Ah dilengkapi pula oleh generator set (genset). Evaluasi sistem dilakukan untuk mengetahui apakah sistem telah beroperasi secara efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penyaluran daya berlebih dari sistem PLTS ke jaringan PLN. Metode penelitian yang dilakukan dengan pengukuran secara langsung pada cuaca berawan/hujan serta cuaca cerah. Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis yang dilakukan maka diperoleh hasil evaluasi sistem PLTS bahwa pada cuaca berawan/hujan di hari kerja tidak direkomendasikan penyaluran daya ke jaringan PLN. Pada musim kemarau (cuaca cerah) di hari kerja kelebihan daya mampu PV sebesar 2,42 kW (19,38 kWh) dapat disalurkan ke jaringan PLN sedangkan pada hari sabtu, minggu, atau hari libur kelebihan daya mampu PV berkisar 7,22 kW (57,78 kWh) dapat disalurkan ke jaringan PLN.

Kata kunci: PLTS, penyaluran daya, jaringan PLN

1. PENDAHULUAN

Pada tahun 2006, pemerintah Indonesia mengeluarkan kebijakan melalui Peraturan Presiden No.5 tahun 2006 untuk mengurangi kontribusi minyak mentah dalam pasokan energi di Indonesia dan meningkatkan kontribusi gas alam, batubara, dan energi baru terbarukan^[1].

Energi matahari merupakan energi alternatif yang telah dikenal luas dan menjadi populer disebagian dunia. Indonesia sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa memiliki banyak potensi untuk memanfaatkan energi matahari. Radiasi matahari rata-rata di Indonesia sebesar 4 kWh/m²^[2].

Data yang diperoleh dari 18 lokasi di Indonesia, distribusi radiasi matahari dibagi berdasarkan wilayah barat dan wilayah timur. Diperkirakan distribusi radiasi untuk wilayah barat sekitar 4,5 kWh/m² dan untuk wilayah timur sekitar 5,1 kWh/m²^[3].

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia nomor 17 tahun 2013, tanggal 12 Juni 2013, pemerintah mendorong pemanfaatan energi surya untuk pembangkit tenaga listrik sebagai salah satu cara percepatan realisasi konsumsi

energi baru terbarukan untuk mencapai target energi nasional. *Feed in Tariff* pembangkit listrik tenaga surya maksimal sebesar US\$ 25 sen/kWh dan US\$ 30 sen/kWh untuk yang memanfaatkan *local content* minimal sebesar 40%^[4].

Sistem PLTS dengan kapasitas 18 kWp telah terpasang di laboratorium Teknik Konversi Energi POLBAN sejak 2009 sebagai sumber energi listrik untuk kegiatan perkuliahan, praktikum serta penerangan pada gedung. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penyaluran daya berlebih dari sistem PLTS ke jaringan PLN. Penyaluran daya berlebih dari sistem merupakan optimalisasi sistem agar daya mampu PV dan daya pada beban gedung dapat termanfaatkan secara optimal. Penelitian ini akan melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Jenis panel surya polikristal dengan daya maksimum (peak to peak) 180 Watt sebanyak 102 buah.
2. Data spesifikasi panel surya, *PV inverter*, *bidirectional inverter*, dan baterai berdasarkan buku manual. Data pengukuran sistem baterai dan *bidirectional inverter* berdasarkan data yang terekam dalam *memory card* (SD-

card) yang terpasang pada *bidirectional inverter*. Data radiasi matahari, daya mampu PV, dan data operasi PV berdasarkan hasil pengukuran di lapangan.

3. Hasil pengukuran dianalisis untuk memperoleh kesesuaian daya mampu PV terhadap beban yang terpasang dan mengetahui kehandalan sistem penopang oleh baterai.
4. Hasil analisis dan perhitungan selanjutnya sebagai rekomendasi penerapan sistem PLTS tersambung ke dalam jaringan listrik PLN.

2. DESKRIPSI PLTS HIBRIDA 18kWp



Gambar 1: PLTS Hibrida (Tampak Luar)

Gambar 1 merupakan penampakan pembangkit yang berada di atas gedung laboratorium. Energi matahari dikonversi oleh panel surya menjadi sumber energi listrik DC. Jika sumber energi listrik DC akan digunakan langsung ke beban maka akan dirubah menjadi sumber listrik AC melalui DC/AC inverter. Jika sumber energi relatif besar namun beban yang digunakan rendah, maka energi berlebih akan disimpan ke dalam sistem baterai melalui *bidirectional inverter*. Jika sumber energi tidak mencukupi untuk mensuplai energi listrik untuk kebutuhan beban, maka akan disuplai dari sistem baterai. Jika sumber energi dari sistem panel surya maupun sistem baterai masih tetap tidak mencukupi maka akan disuplai dari *generator set (genset)* yang diaktifkan secara manual.



Gambar 2 : PLTS Hibrida (Tampak Dalam)

Sistem PLTS-Hibrida yang ada di laboratorium surya terdiri dari beberapa komponen yaitu :

1. 102 buah panel surya yang tersusun secara seri paralel yang membentuk *solar array* yang terbagi menjadi 3 string (rangkaiian utama). Pada ketiga string berjumlah 92 panel surya dengan 17 buah panel surya tersusun secara seri pada setiap string dengan enam buah panel surya tersusun secara paralel. Berikut ini spesifikasi panel surya yang digunakan pada Tabel 1.

Tabel 1 : Spesifikasi Panel Surya

Jenis Sel Surya	Polikristal
Merk	Mitsubishi PV-AD180MF5
Sudut kemiringan	10°
Daya	180 Wp (±3%)
Vmp	24,2 V _{DC}
Imp	7,45 A
Voc	30,4 V _{DC}
Isc	8,03 A
Fuse rating	15 A
Dimensi panel surya	1608 x 810 mm ²
Efisiensi	13%
Tegangan sistem max	1000 V

2. Tiga buah inverter yang berfungsi untuk mengubah tegangan DC yang berasal dari panel surya menjadi tegangan AC. Berikut ini spesifikasi panel surya yang digunakan pada Tabel 2.

Tabel 2 : Spesifikasi DC/AC inverter

Tipe	Sunny Mini Central SMC 5000A
Daya masukan maksimal	5750 W
V _{DC} MPP	246-600 V
I _{DC} maksimal	26 A
V _{AC} nominal	230 V
I _{AC} nominal	21,7 A
P _{AC} nominal	5000 W
Efisiensi maksimum	96,1%

3. 72 buah baterai yang tersusun secara seri paralel yang membentuk *battery bank* yang terbagi menjadi 3 string (rangkaiian utama). Setiap satu rangkaian utama baterai terdiri dari 24 baterai yang tersusun

secara seri serta enam buah buah baterai secara paralel. Berikut ini spesifikasi panel surya yang digunakan pada Tabel 3.

Tabel 3 : Spesifikasi sistem baterai

Type	Lead Acid (Hoppecke-Jerman)
Kapasitas baterai	600 Ah
Tegangan baterai	2 V
SoC minimum	30%
Design Life	20 tahun

4. Tiga buah *bidirectional* inverter. *Bidirectional inverter* digunakan untuk merubah arus AC dari *DC/AC inverter* menjadi arus DC pada proses pengisian sistem baterai (*charging*) serta merubah arus DC menjadi arus AC saat proses pelepasan daya baterai ke beban gedung (*discharging*). Berikut ini spesifikasi panel surya yang digunakan pada Tabel 4.

Tabel 4 : Spesifikasi sistem baterai

Type	Sunny Island SI 5048
Efisiensi max	95 %
V _{DC} Nominal	48 Volt
I _{DC} Nominal	100 Ampere
V _{AC} Nominal	230 Volt
Frekuensi _{AC} Nominal	50 Hz
P _{AC} Nominal	5000 W
I _{AC} Out Nominal	21,7 A
I _{AC} In Maksimum	56 A
Capacity	100-10.000 Ah
Cos phi	1

5. Satu buah genset dengan kapasitas 13 kVA untuk mensuplai listrik pada gedung.

Semua komponen sistem akan terhubung pada panel distribusi 3 fasa yang akan mensuplai listrik pada setiap ruangan gedung laboratorium.

3. HASIL PENGUKURAN

Data hari 1 dimana kondisi cuaca cerah dan beban yang digunakan juga tinggi ditunjukkan pada gambar 3-6

Hari 1 : Cuaca cerah dan beban tinggi

Cuaca : Cerah

Durasi : 7 Jam

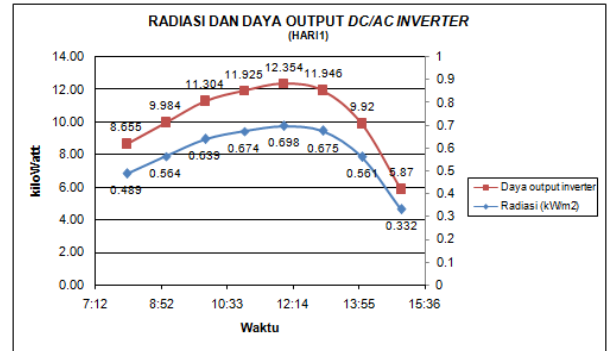
pengambilan data

Radiasi rata-rata : 0,579 kW/m²

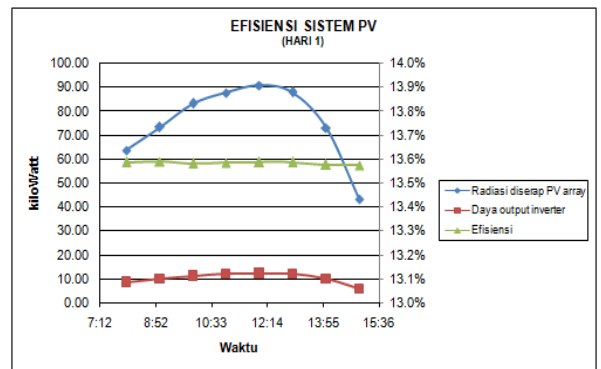
Daya output PV rata-rata : 10,25 kW

Beban rata-rata : 10,58 kW

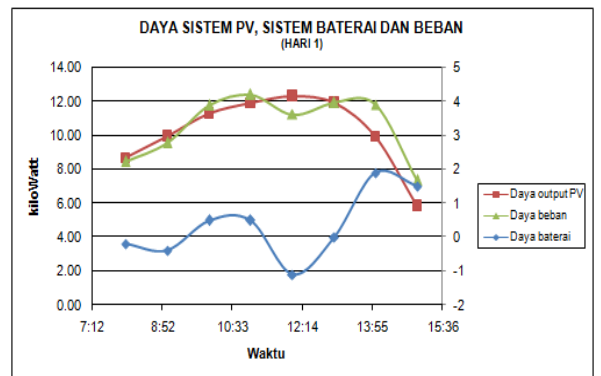
Efisiensi sistem PV rata-rata : 13,58%



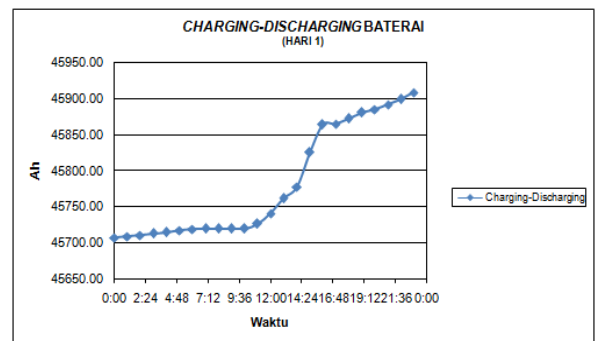
Gambar 3 Radiasi dan daya output



Gambar 4 Efisiensi Sistem PV



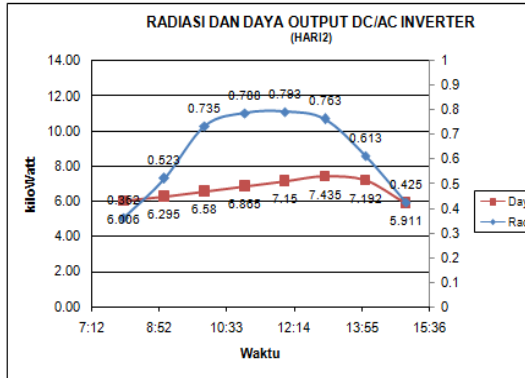
Gambar 5 Daya mampu dan beban



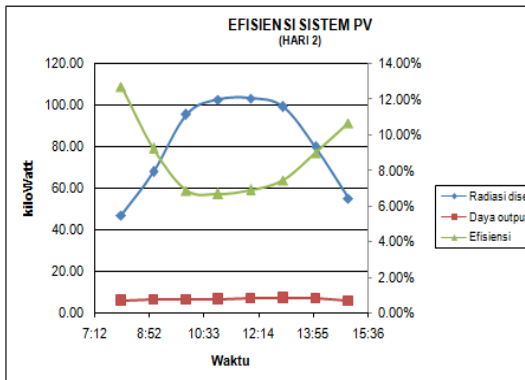
Gambar 6 Charging-discharging baterai

Data hari 2 dimana kondisi cuaca cerah namun beban relatif rendah ditunjukkan pada gambar 7-10.

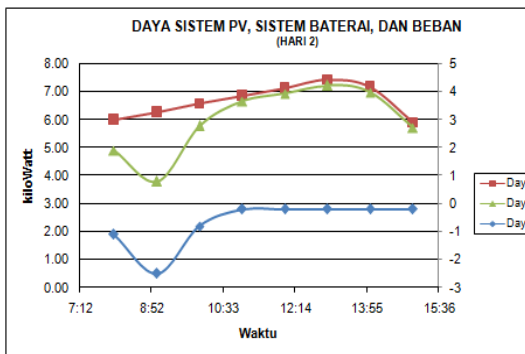
Hari 2 : Cuaca cerah dan beban rendah
 Cuaca : Cerah
 Durasi pengambilan : 7 Jam
 data
 Radiasi rata-rata : 0,625 kW/m²
 Daya output PV rata-rata : 6,68 kW
 Beban rata-rata : 6,00 kW
 Efisiensi sistem PV : 8,7 %



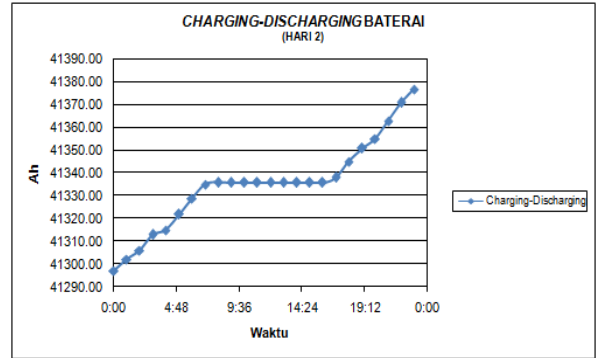
Gambar 7 Radiasi dan daya output



Gambar 8. Efisiensi sistem PV



Gambar 9. Daya mampu dan beban

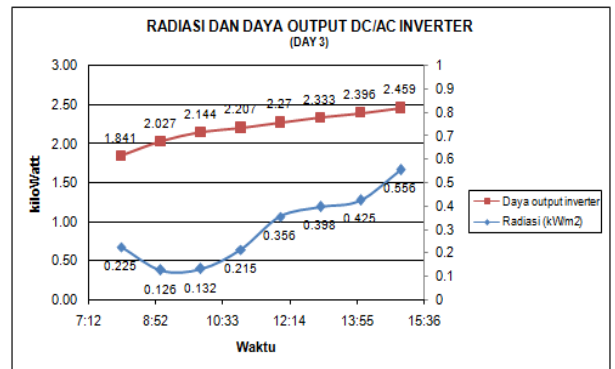


Gambar 10. Charging-discharging baterai

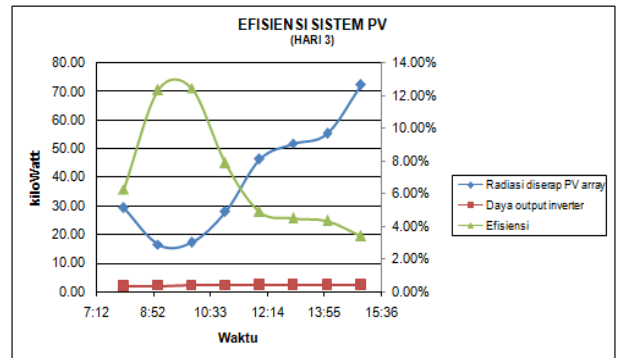
Data hari 3 dimana kondisi cuaca berawan dan hujan dan beban juga relatif rendah ditunjukkan pada gambar 11-14

Hari 3 : Cuaca berawan dan hujan dan beban rendah

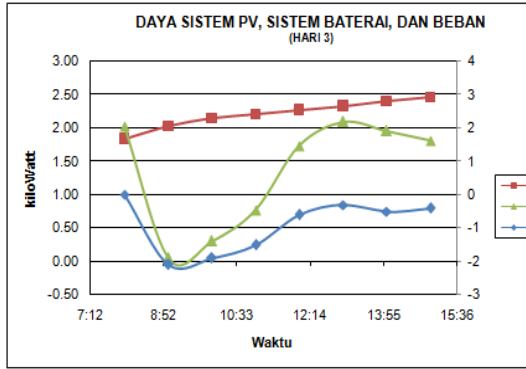
Cuaca : Berawan dan hujan
 Durasi pengambilan : 7 Jam
 data
 Radiasi rata-rata : 0,304 kW/m²
 Daya output PV rata-rata : 2,21 kW
 Beban rata-rata : 1,34 kW
 Efisiensi sistem PV : 7,01 %



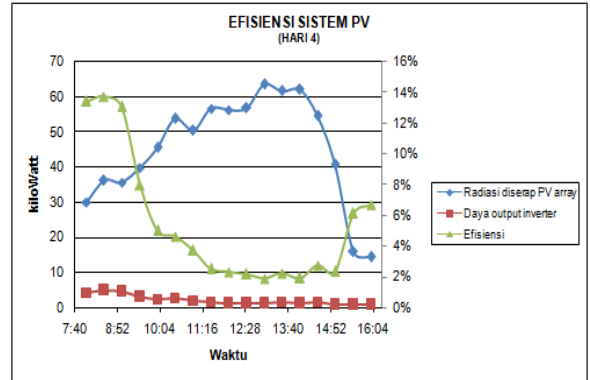
Gambar 11. Radiasi dan daya output



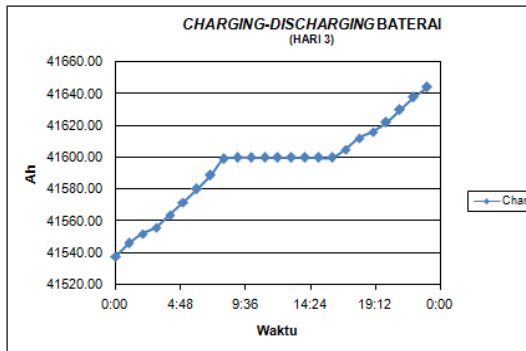
Gambar 12. Efisiensi sistem PV



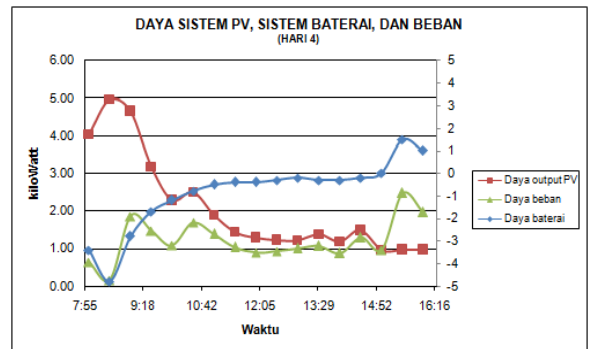
Gambar 13. Daya mampu dan beban



Gambar 15. Efisiensi sistem PV



Gambar 14. Charging-discharging baterai

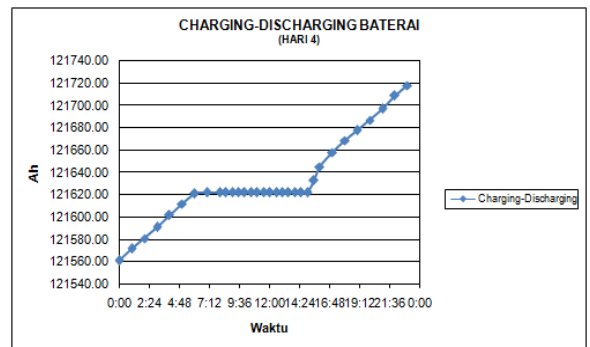


Gambar 16. Daya mampu dan beban

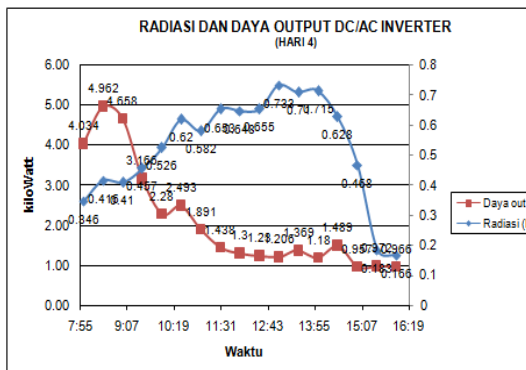
Data hari 4 dimana kondisi cuaca relatif cerah namun beban sangat rendah (pengukuran pada hari libur) ditunjukkan pada gambar 15-17

Hari 4 : Cuaca cerah dan beban rendah (hari libur)

Cuaca : Cerah
 Durasi pengambilan data : 8 Jam
 Radiasi rata-rata : 0,525 kW/m²
 Daya output PV rata-rata : 2,1 Kw
 Beban rata-rata : 1,22 kW
 Efisiensi : 5,44 %



Gambar 17. Charging-discharging baterai



Gambar 15. Radiasi dan daya output

4. DISKUSI

4.1 Penyaluran Daya Optimal ke penjangkaran PLN

4.1.1 Kondisi Cuaca Cerah (Musim Kemarau)

1. Kapasitas Sistem PV

Data awal untuk perhitungan ini sebagai berikut :

Daya modul surya : 180 kWp
 Jumlah modul surya : 102 unit
 Kapasitas total : 102 unit x 180 Wp = 18,36 kWp

Kerugian-kerugian (*losses*) pada sistem yang mengurangi daya mampu PV array akibat kotoran/debu serta kenaikan temperatur di atas *standard test condition (STC)* 25°C.

Penurunan daya akibat kotoran/debu diasumsikan sebesar 5%. Sehingga kapasitas *PV array* menjadi :

$$P_{PV} = 0.95 \times 18,36 \text{ kWp} = 17,44 \text{ kWp}$$

Penurunan daya akibat kenaikan temperatur dari *PV array* total adalah 15,94 kWp.

3 buah *DC/AC inverter* yang dipakai memiliki kapasitas input power maksimum masing-masing sebesar 5,75 kW (data spesifikasi). Efisiensi *DC/AC inverter* sebesar 96,1%.

Daya AC yang dapat digunakan untuk beban dari *DC/AC inverter* adalah $P_{PV} = 15,31 \text{ kWp}$

Intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar $4.4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ sehingga waktu nominal (T_{nom}) adalah $\approx 4,4 \text{ jam}$

Energi maksimum yang dapat dibangkitkan oleh *PV array* per hari adalah $E_{PV}(\text{maks}) = 67,38 \text{ kWh}$

Energi dari PV hanya dapat dimanfaatkan pada siang hari (pemakaian laboratorium 8 jam dari pukul 08.00 sampai 16.00).

Beban yang dapat ditopang oleh PV di siang hari adalah 8,42 kW

Berdasarkan hasil pengukuran daya beban yang digunakan pada siang hari $\approx 6 \text{ kW}$, sehingga dapat dijadikan referensi sebagai daya beban yang digunakan pada siang hari pada 5 hari kerja.

2. Kapasitas Sistem Baterai

Data awal untuk perhitungan ini sebagai berikut :

Kapasitas <i>battery bank</i>	: 1800 Ah
<i>State of Charge</i> (SoC) minimal	: 20%
	: 360 Ah
Efisiensi <i>bidirectional inverter</i>	: 95%
Tegangan sistem baterai	: 48 V

Pada kondisi cerah sistem baterai dapat digunakan untuk memberi tambahan daya ke beban dengan catatan *Depth of Discharge* (DoD) dibatasi untuk mendapatkan *cycle life time* dari baterai. *Cycle lifetime* optimal diperoleh dari pengoperasian *Depth of Discharge* (DoD) baterai sebesar 20%. *Cycle lifetime* baterai dipengaruhi oleh temperatur ruangan, hasil pengukuran menunjukkan bahawa temperatur sistem baterai rata-rata ruangan $\approx 25^\circ\text{C}$.

$$\text{Cycle lifetime} = 0,75 \times 8500 \text{ cycle} = 6375 \text{ cycle}$$

Siklus pengisian baterai (*cycle*) dioperasikan satu hari sekali pada siang hari untuk proses pengisian dan malam hari untuk melepaskan energi sehingga 1 cycle adalah 1 hari. Maka umur baterai diprediksi sebesar 17,4 tahun
Kapasitas baterai untuk penerangan malam hari sebesar 6% berdasarkan data pengukuran

penggunaan kapasitas baterai malam hari adalah 5,18 kWh

Pengoperasian malam hari dilakukan selama 12 jam (pukul 18.00 – pukul 06.00).

Daya baterai yang salurkan untuk penerangan malam hari adalah 0,43 kW

Nilai perhitungan untuk malam hari sebesar 0,43 kW mendekati nilai hasil pengukuran beban malam hari rata-rata 0,38 kW dari hasil pengukuran. Proses pengisian baterai kembali (*recharge*) dapat dilakukan pada waktu-waktu ketika daya PV tidak dimanfaatkan untuk beban, yaitu pagi hari pukul 06.00 – 08.00, waktu istirahat pukul 12.00 – 13.00, dan sore hari pukul 16.00 – 18.00.

Pukul 06.00 – 08.00 dan pukul 16.00 – 18.00 diasumsikan radiasi 0,2 kW/m² selama 1 jam, sehingga energi yang dapat digunakan untuk *charging* (luas area *pv array* 130,25 m² dan efisiensi panel surya $\approx 13\%$) adalah :

$$E_{\text{charging}} = 0,2 \text{ kW/m}^2 \times 130,25 \text{ m}^2 \times 0,13 \times 1 \text{ jam} = 3,4 \text{ kWh}$$

Nilai tersebut mendekati nilai beberapa pengukuran energi PV sampai pukul 08.00. Beban waktu istirahat (pukul 12.00 – 13.00) sebagian besar dimatikan, daya untuk pemakaian sendiri rata-rata sebesar 6 kW diturunkan menjadi 1 kW untuk memperoleh energi berlebih sebesar 5 kW selama 1 jam (5 kWh). Sehingga energi siang hari yang dapat disalurkan untuk pengisian baterai ketika beban tidak digunakan adalah sebesar 11,8 kWh. Energi ini cukup untuk proses *recharging* baterai yang digunakan pada malam hari sebesar 5,18 kWh.

3. Pola Operasi Sistem PLTS

Pola operasi yang disarankan untuk pemakaian sistem PLTS ini pada cuaca cerah (musim kemarau).

A. Lima hari Kerja (Senin – Jumat)

Penggunaan beban rata-rata di siang hari untuk pemakaian sendiri pada hari kerja berdasarkan hasil pengukuran $\approx 6 \text{ kW}$, daya ini dijadikan referensi beban pemakaian gedung.

Tabel 5. Pola operasi penyaluran daya pada hari kerja

Daya optimal yang digunakan untuk beban siang hari (pukul 08.00 – 16.00)	8,42 kW (67,38 kWh)
Daya rata-rata keperluan gedung (perkuliahan, praktikum, dll)	6 kW (48 kWh)
Daya berlebih yang dapat disalurkan	2,42 kW (19,38 kWh)
Daya untuk beban penerangan malam hari (pukul 18.00 – 06.00)	0,43 kW (5,18 kWh)

Daya pengisian baterai (<i>recharge</i>) :	11,68 kWh
Pagi (pukul 06.00 – 08.00)	3,34 kWh
Jam istirahat (pukul 12.00 – 13.00)	5 kWh
Sore (pukul 16.00 – 18.00)	3,34 kWh

Daya berlebih sistem PLTS yang dapat disalurkan pada hari lima kerja adalah 2,42 kW selama 8 jam yang setara dengan 19,38 kWh. Sehingga dengan *feed in tariff* PLTS minimal sebesar US\$ 25 sen/kWh, maka diperoleh harga jual listrik sebesar Rp. 58.150,- per hari untuk lima hari kerja. Berdasarkan data hasil pengukuran, kapasitas baterai selalu diatas 90% maka dari kapasistas tersebut dapat salurkan pula ke jaringan PLN dengan ambang batas (*state of charge*) pada baterai di atas 80% guna menjaga *cycle lifetime* baterai.

B. Hari Libur (Sabtu, Minggu, atau Hari Besar)

Penggunaan beban gedung pada hari libur berdasarkan hasil pengukuran diperoleh rata-rata $\approx 1,2$ kW, daya tersebut digunakan sebagai referensi beban pemakaian gedung pada hari libur.

Tabel 6. Pola operasi penyaluran daya pada hari libur

Daya optimal yang digunakan untuk beban siang hari (pukul 08.00 – 16.00)	8,42 kW (67,38 kWh)
Daya rata-rata keperluan gedung	1,2 kW (9,6 kWh)
Daya berlebih yang dapat disalurkan ke PLN	7,22 kW (57,8 kWh)
Daya untuk beban penerangan malam hari (pukul 18.00 – 06.00)	0,43 kW (5,18 kWh)
Daya pengisian baterai (<i>recharge</i>) :	11,68 kWh
Pagi (pukul 06.00 – 08.00)	3,34 kWh
Jam istirahat (pukul 12.00 – 13.00)	5 kWh
Sore (pukul 16.00 – 18.00)	3,34 kWh

Daya berlebih sistem PLTS yang dapat disalurkan pada hari libur adalah 7,22 kW selama 8 jam yang setara dengan 57,8 kWh. maka diperoleh harga jual listrik sebesar Rp 173.354,- per hari untuk pada hari libur.

Apabila diasumsikan dalam 1 minggu terdapat 5 hari kerja dan 2 hari libur serta 1 bulan terdiri dari 4 minggu, maka energi berlebih yang dapat disalurkan ke PLN sebesar 212,5 kWh/bulan setara dengan Rp. 637.477,-.

Pola operasi yang direkomendasikan di musim kemarau (cuaca cerah) adalah :

1. Pada lima hari kerja, beban rata-rata yang digunakan adalah 6 kW sehingga kelebihan daya mampu PV sebesar 2,42 kW (19,38 kWh) dapat disalurkan ke jaringan PLN.

2. Pada hari sabtu, minggu, atau hari libur, beban rata-rata yang digunakan adalah 1,2 kW sehingga kelebihan daya mampu PV berkisar 7,22 kW(57,78 kWh) dapat disalurkan ke jaringan PLN.
3. Penyaluran ke PLN pada malam hari tidak optimal karena ada rugi-rugi *charging-discharging* dari *bidirectional inverter* dan waktu pengisian relatif lama (10A/100Ah). Kapasitas baterai (*depth of discharge*) yang direkomendasikan sebesar 20% guna memperoleh umur optimal.

4.1.2 Kondisi Cuaca Berawan/Hujan (Musim Hujan)

1. Kapasitas Sistem PV

Intensitas radiasi matahari rata-rata pada cuaca cerah berawan/hujan adalah $2,01 \frac{kWh}{m^2}$, maka waktu nominal (T_{nom}) diambil sebesar 2,01 jam.

Penurunan daya akibat kenaikan temperatur adalah daya output dari *PV array* total 16,65 kWp.

Efisiensi *DC/AC inverter* sebesar 96,1%.

Daya keluaran dari *DC/AC inverter* adalah :

$$P_{PV} = 0.961 \times 16,65 \text{ kWp} = 16 \text{ kWp}$$

Energi maksimum yang dibangkitkan oleh *PV array* per hari adalah 32,17 kWh

Energi dari PV hanya dapat dimanfaatkan pada siang hari dengan asumsi pemakaian di siang hari selama 8 adalah 4,02 kW

2. Kapasitas Sistem Baterai

Apabila daya pada sistem PV lebih rendah dari daya beban yang dibutuhkan untuk beban maka daya yang tersuplai untuk beban akan diberikan oleh baterai. Jika daya pada beban rata-rata 6 kW sedangkan daya mampu PV pada musim hujan 4,02 kW maka terdapat kekurangan daya sebesar 1.98 kW yang perlu ditopang oleh baterai..

Kapasitas baterai yang digunakan untuk menopang kekurangan daya sebesar 1,97 kW selama 8 jam adalah 15,84 kWh dengan persentase baterai sebesar 18,3%.

Kapasitas baterai yang digunakan untuk penerangan malam hari kurang dari 6% dari kapasitas total sesuai perhitungan sebelumnya. Sehingga total kapasitas yang digunakan untuk menyuplai daya selama satu hari adalah sebesar 24,3% dari kapasitas total, sehingga dapat diambil *DoD* sebesar 25%.

Pada musim hujan dengan rata-rata intensitas matahari sebesar $2,01 \text{ kW/m}^2$ maka sistem PLTS tidak direkomendasikan untuk disalurkan ke jaringan PLN, karena hanya

mencukupi untuk pemakaian kebutuhan beban gedung. Pada hari libur beban relatif gedung sangat rendah sehingga daya PV digunakan untuk proses pengisian baterai dan daya yang berlebih dapat disalurkan ke jaringan PLN.

3. Pola Operasi Sistem PLTS

Pola operasi yang disarankan untuk pemakaian sistem PLTS pada musim hujan sebagai berikut :

A. Lima hari Kerja (Senin – Jumat)

Jika daya pada beban rata-rata 6 kW sedangkan daya mampu PV pada musim hujan 4,02 kW maka terdapat kekurangan daya sebesar 1,98 kW yang perlu ditopang oleh baterai.

Tabel 7. Pola operasi pada hari kerja di musim hujan

Daya optimal yang digunakan untuk beban siang hari (pukul 08.00 – 16.00)	4,02 kW (32,17 kWh)
Daya rata-rata keperluan gedung	6 kW (48 kWh)
Daya baterai menopang kekurangan daya beban	1,98 kW (15,84 kWh)
Daya berlebih yang dapat disalurkan	0 kW (0 kWh)
Daya yang digunakan untuk beban penerangan malam hari (pukul 18.00 – 06.00)	0,43 kW (5,18 kWh)
Kemampuan daya baterai apabila radiasi selalu rendah :	
Kapasitas baterai yang dibatasi (<i>depth of discharge</i>)	50% (43,2 kWh)
Kapasitas baterai terpakai dalam 1 hari	24,32% (21,02 kWh)

B. Hari Libur (Sabtu, Minggu, atau Hari Besar)

Penggunaan beban gedung pada hari libur berdasarkan hasil pengukuran diperoleh rata-rata $\approx 1,2$ kW dengan daya optimal sistem sebesar 4,02 kW.

Tabel 8. Pola operasi pada hari libur di musim hujan

Daya optimal yang digunakan untuk beban siang hari (pukul 08.00 – 16.00)	4,02 kW (32,2 kWh)
Daya rata-rata keperluan gedung	1,2 kW (9,6 kWh)
Daya berlebih	2,83 kW (22,6 kWh)

Pola operasi di musim hujan yang direkomendasikan adalah

1. Pada musim hujan, di hari kerja sistem PLTS tidak direkomendasikan untuk disalurkan ke PLN apabila pemakaian daya pada beban yang digunakan diatas 4,03 kW (32,2 kWh) dengan radiasi matahari yang

rendah ($2,01 \text{ kWh/m}^2$), kekurangan daya untuk beban disuplai oleh sistem baterai.

2. Pada hari kerja dapat menyalurkan daya ke PLN apabila pemakaian daya beban rendah dengan radiasi matahari tinggi. Kapasitas baterai yang tinggi sehingga dapat disalurkan sesuai DoD yang direncanakan untuk menjaga umur baterai dapat bertahan lama.
4. Beban rata-rata yang digunakan pada hari libur berkisar 1,2 kW (9,6 kWh) sehingga kelebihan daya mampu PV berkisar 2,83 kW (22,6 kWh) digunakan untuk pengisian baterai sampai penuh untuk menopang kekurangan daya beban di hari kerja berikutnya.
5. Penyaluran daya ke PLN dapat dilakukan pada kondisi-kondisi tersebut dimana daya mampu sistem relatif tinggi dari daya beban dan kapasitas baterai relatif tinggi sesuai dengan DoD yang direncanakan.

4.2 Analisis Kapasitas Baterai

DoD ditentukan maksimal 50% pada musim hujan yang akan digunakan untuk menopang pemenuhan daya.

Kapasitas baterai untuk menopang kekurangan daya beban pada hari kerja di siang hari dan pemenuhan daya beban malam hari sesuai perhitungan di atas sebesar 21,02 kWh (24,32% kapasitas baterai) dan diasumsikan fluktuasi (penurunan) intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar 50% dari hasil pengukuran 32,17 kWh yaitu sebesar 16,14 kWh (18,68% kapasitas baterai). Sehingga energi atau kapasitas baterai yang digunakan untuk menopang beban sebesar 37,15 kWh atau sebesar 43% dengan kapasitas baterai (DoD) yaitu 75 kWh.

Kapasitas baterai yang terpasang sebesar 1800 Ah (86 kWh) sudah mencukupi kebutuhan daya beban dan dan fluktuasi intensitas radiasi matahari pada musim hujan.

Pada cuaca cerah (musim kemarau), baterai tidak digunakan untuk menyalurkan beban di siang hari, hanya untuk menjaga kestabilan daya beban dan menopang daya beban untuk penerangan di malam hari yang relatif sangat rendah (6% kapasitas baterai), sehingga dapat dijadikan referensi *depth of discharge* (DoD) pada cuaca cerah (musim kemarau), diambil pembatasan DoD di musim kemarau atau cuaca cerah sebesar 10%.

Apabila diasumsikan intensitas musim kemarau dan musim hujan adalah sama (6 bulan musim hujan dan 6 bulan musim kemarau). Maka umur baterai dapat diperkirakan 26,5%.

Pada DoD baterai sebesar 26,5 % diperoleh *cycle lifetime* sebesar ≈ 6500 cycle, dari hasil pengukuran temperatur baterai yang rata-rata sebesar 25°C, *design life* $\approx 75\%$.

Cycle lifetime (*n*) baterai dari perhitungan 4875 cycle. Siklus pengisian baterai (*cycle*) dioperasikan satu hari sekali, yaitu pada siang hari untuk proses pengisian dan malam hari melepaskan energi sehingga 1 *cycle* adalah 1 hari. Umur baterai diprediksi sebesar 13,3 tahun.

Sehingga dari uraian di atas, 3 string sistem baterai yang terpasang (kapasitas 1800 Ah) dapat digunakan selama $\approx 13,3$ tahun. Maka penggunaan dua kali sistem baterai (satu kali penggantian) untuk tipe yang terpasang di Politeknik Negeri Bandung dapat untuk menopang sistem PLTS selama ≈ 25 tahun (seumur pembangkit tenaga surya).

5. PERSAMAAN

$$\text{DoD}(\%) = \frac{\text{energi yang digunakan}}{\text{kapasitas baterai}} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Kapasitas baterai} = \frac{\text{energi yang digunakan}}{\text{DoD}(\%)} \times 100\% \dots\dots(2)$$

$$\text{Umur baterai} = \frac{n \text{ cycle}}{365,5 \text{ hari/tahun}} \dots\dots\dots(3)$$

6. KESIMPULAN

Pada cuaca berawan/hujan daya mampu sistem pada siang hari rata-rata sebesar 4,02 kW selama 8 jam (32,17 kWh) dengan intensitas radiasi matahari rata-rata relatif rendah 2,01 kWh/m². Apabila pemakaian beban gedung rata-rata 6 kW (48 kWh) maka terdapat daya yang perlu ditopang oleh sistem baterai sebesar rata-rata 1,98 kW (15,84 kWh) sehingga pada hari kerja tidak direkomendasikan penyaluran daya ke jaringan PLN.

Pada musim kemarau (cuaca cerah), beban rata-rata lima hari kerja yang digunakan adalah 6 kW sehingga kelebihan daya mampu PV sebesar 2,42 kW (19,38 kWh) dapat disalurkan ke jaringan PLN sedangkan pada hari sabtu, minggu, atau hari libur, beban rata-rata yang digunakan adalah 1,2 kW sehingga kelebihan daya mampu PV berkisar 7,22 kW (57,78 kWh) dapat disalurkan ke jaringan PLN.

Pada hari libur pemakaian beban gedung rata-rata 1,2 kW (9,6 kWh) sehingga terdapat daya berlebih rata-rata sebesar 2,83 kW (22,6 kWh) setara dengan 48% kapasitas mampu sistem PV. Pada hari libur daya berlebih dapat

digunakan untuk pengisian baterai mencapai kapasitas penuhnya atau disalurkan ke jaringan PLN.

Saran yang penulis rekomendasikan kepada pihak pengelola Laboratorium Surya Teknik Konversi Energi POLBAN, yakni tenaga pengawas gedung mengawasi dan mengoperasikan sistem PLTS 18 kWp sehingga pemanfaatan energi mampu sistem dapat optimal, alat ukur yang terintegrasi antara sistem PV, sistem baterai, dan sistem beban, dan pengukuran intensitas radiasi matahari rata-rata kota Bandung dan karakteristik cuaca dalam 1 tahun yang mencakup musim hujan dan musim kemarau.

7. KUTIPAN

- 1) Peraturan Presiden Republik Indonesia Tentang Kebijakan Energi Nasional No. 5/2006, 2006.
- 2) Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi. *Indonesia Energy Outlook 2012*, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, BPPT Press : Jakarta, 2012.
- 3) M.H. Hasan, T.M.I. Mahlia, Hadi Nur, A *Review on Energy Scenario and Sustainable Energy in Indonesia*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012); 2316 – 2328
- 4) Peraturan Menteri Energi dan Sumberdaya Mineral Republik Indonesia No.17/2013. *Pembelian Tenaga Listrik Oleh PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik* : Indonesia, 2013.

8. DAFTAR PUSTAKA

- 1) Gary Cook, Lynn Billman, and Rick Adcock. *Photovoltaic Fundamental*. U,S Department of Energy. February 1995
- 2) G.N. Tiwari, and Swapnil Dubey. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. : RSC Publishing, New Delhi, India, 2010.
- 3) Mitsubishi Electric. *Manual mitsubishi electric photovoltaic module*, 2014
- 4) Hoppecke Batterien GmbH & Co. KG. *Installation, commissioning and operating instruction for valve-regulated stationary lead-acid batteries* : Brilon, 2013
- 5) Evaluasi Kinerja “Solar Cell-Hybrid Off Grid” 18 kWp Gedung Lab. Surya-Teknik Konversi Energi POLBAN. Alvera Apridialianti Melkias ., Dr. Abdurrachim, 2015.

